



Caracterización y análisis comparativo de los Métodos Geo-eléctrico (Dipolo-Dipolo en Tomografía) y Geo-mecánico (Penetración Mecánica del Subsuelo “Penetrologger”) y su incidencia para el estudio en la aplicación de búsqueda de fosas comunes en Colombia

**Jonathan David Gaona Galindo
Pablo Alexander Torres Ardila**

Universidad Antonio Nariño
Facultad de Ingeniería Mecánica, Electrónica y Biomédica
Bogotá, Colombia
2020

Caracterización y análisis comparativo de los Métodos Geo-eléctrico (Dipolo-Dipolo en Tomografía) y Geo-mecánico (Penetración Mecánica del Subsuelo “Penetrologger”) y su incidencia para el estudio en la aplicación de búsqueda de fosas comunes en Colombia

**Jonathan David Gaona Galindo
Pablo Alexander Torres Ardila**

Proyecto de grado presentado como requisito parcial para optar al título de:
Ingeniero Electromecánico e Ingeniero Mecánico

Director:

(Ing. Electrónico) Carlos Arturo García Gómez

Codirectora:

(Esp, MsC Y PhD en Física y Ciencias Forenses) Alejandra Juliette Baena Vásquez

Línea de Investigación:

Diseño, construcción y simulación de sistemas electromecánicos

Grupo de Investigación:

GRESIA y GIFAN

Universidad Antonio Nariño

Facultad de Ingeniería Mecánica, Electrónica y Biomédica

Bogotá, Colombia

2020

(Los pensamientos te llevan a tus propósitos, tus propósitos a tus acciones, tus acciones a tus hábitos, tus hábitos a tu carácter y tu carácter determina tu destino.

Tyron Edwards)

El presente trabajo está dedicado principalmente a Dios, por habernos dado la vida y por permitirnos haber llegado hasta este momento tan importante de nuestra formación profesional. Asimismo, a todas a aquellas personas que no pierden la esperanza de encontrar a sus seres queridos.

A nuestras familias por haber sido nuestro apoyo a lo largo de toda la carrera universitaria como también a lo largo de nuestras vidas y a todas las personas especiales que de una u otra forma nos acompañaron en esta etapa, aportando a nuestra formación tanto profesional como de seres humanos.

Agradecimientos

Agradecemos primero que todo a Dios por ser nuestro guía y acompañante en el transcurso de nuestras vidas, brindándonos paciencia y sabiduría para culminar con éxito nuestras metas.

A la Universidad Antonio Nariño, por el aprendizaje y formación recibida, al departamento de ciencias por el préstamo de los equipos, asimismo a los diferentes docentes de la universidad que nos han visto crecer como personas y profesionales y que gracias a sus conocimientos otorgados hoy podemos sentirnos satisfechos con lo logrado.

A la profesora Alejandra Baena, por sus ideas y acompañamiento incondicional en campo, igualmente por la gestión hecha para las diferentes salidas en las cuales contamos con su guía y tiempo dedicado a lo largo de todas las fases de este trabajo.

Al profesor Carlos García, por su guía, consejo y tiempo dedicado en el desarrollo y estructuración de este trabajo integral de grado, también por enseñarnos sus técnicas y métodos de trabajo eficientes.

Al profesor Carlos Martin Molina, quien nos acompañó y siempre estuvo pendiente de nuestro proyecto, además sus trabajos e investigaciones fueron de vital importancia para el desarrollo de este proyecto.

A Carlo Rojas y Andrés Suarez, por sus consejos a la hora de ejecutar el procesamiento y limpieza de datos para la prospección hecha por el tomógrafo.

Merecen reconocimiento especial nuestros padres y madres; “Pablo Torres y Claudia Ardila” y “Santos Gaona y Janeth Galindo”; que con su esfuerzo y dedicación nos ayudaron a culminar la carrera universitaria y nos dieron el apoyo suficiente para no decaer cuando todo parecía complicado e imposible.

Resumen

Debido al atraso tecnológico que existe en Colombia para encontrar de manera efectiva las fosas de cuerpos desaparecidos producto del conflicto es necesario buscar nuevos métodos para tratar de solventar de mejor manera este problema.

Este proyecto consiste en encontrar una posible alternativa a la búsqueda de fosas a través del estudio de dos métodos principalmente, el análisis de perfiles de resistencia mecánica del suelo con respecto a la profundidad usando un Penetrologger y el análisis de perfiles de resistividad eléctrica del suelo usando un tomógrafo eléctrico en modo Dipolo-Dipolo y en modo Wenner; para esto se realizaron tres salidas de campo para la toma de datos en cuatro fosas simuladas y posteriormente se realizaron análisis relacionales de los datos obtenidos en cada fosa para cada salida de campo, diferenciando además los datos ubicados dentro y fuera de las fosas para delimitarlas.

Los resultados obtenidos representan un avance para la búsqueda de fosas en Colombia, ya que se logró comprobar que, en el tipo de terreno en estudio, resulta más efectivo el método Wenner que el Dipolo-Dipolo, y que el Penetrologger, aunque no determina por si solo la existencia de una fosa, sirve como ayuda para delimitarlas, siendo este último el equipo más versátil y de sencillo manejo.

Palabras clave: Resistividad eléctrica, resistencia mecánica, fosas simuladas, tomografía eléctrica, Penetrologger.

Abstract

Due to the technological backwardness that exists in Colombia to effectively find the graves of bodies disappeared as a result of the conflict, it is necessary to seek new methods to try to better solve this problem.

This project consists of finding a possible alternative to the search for common grave through the study of two mainly methods, the analysis of profiles of mechanical resistance of the soil with respect to depth using a Penetrologger and the analysis of profiles of electrical resistivity of the soil using an electrical tomograph in Dipole-Dipole mode and in Wenner mode; For this, three field trips were made to collect data in four simulated graves, and then relational analyzes of the data obtained in each grave for each field trip were carried out, besides that differentiating the data located inside and outside the graves to delimit them.

The results obtained represent an advance for the search for graves in Colombia, since it was found that, in the type of terrain under study, the Wenner method is more effective than the Dipole-Dipole, and that the Penetrologger, although it does not determine by itself only the existence of a grave, it serves as an aid to delimit them, the latter being the most versatile and user-friendly equipment.

Keywords: Electrical resistivity, mechanical resistance, simulated pits, electrical tomography, Penetrologger.

Contenido

| | Pág. |
|---|-------------|
| Resumen | VI |
| Lista de figuras | X |
| Lista de tablas..... | XIII |
| Lista de ecuaciones..... | XIV |
| Introducción..... | 1 |
| Planteamiento del problema | 1 |
| Justificación | 2 |
| Objetivos..... | 3 |
| Objetivo General | 3 |
| Objetivos Específicos | 3 |
| Alcance..... | 4 |
| Ubicación dentro de las líneas de trabajo del programa..... | 4 |
| Usuarios directos y formas de utilización de los resultados del proyecto | 5 |
| 1 Marco Teórico..... | 6 |
| 1.1 Fosa Clandestina | 6 |
| 1.2 Resistividad..... | 7 |
| 1.2.1 Resistividad Eléctrica..... | 7 |
| 1.2.2 Resistividad aparente | 8 |
| 1.2.3 Resistencia a la penetración mecánica..... | 8 |
| 1.3 Variables que afectan la resistividad eléctrica y la resistencia mecánica de un terreno | 9 |
| 1.3.1 Humedad..... | 9 |
| 1.3.2 Temperatura | 10 |
| 1.3.3 Compactación..... | 10 |
| 1.3.4 Composición del terreno | 11 |
| 1.3.5 Granulometría..... | 13 |
| 1.4 Tomógrafo eléctrico..... | 13 |
| 1.4.1 Campos de uso..... | 13 |
| 1.4.2 Ámbito forense | 14 |
| 1.4.3 Método Dipolo-Dipolo | 14 |
| 1.5 Penetrómetro | 16 |
| 1.5.1 Campos de uso..... | 17 |

| | | |
|-----------|---|-----------|
| 1.5.2 | Ámbito forense | 17 |
| 1.5.3 | Principio de funcionamiento de Penetrómetro electrónico..... | 18 |
| 1.6 | Métodos comúnmente usados para la detección de fosas | 19 |
| 1.6.1 | Fotogrametría y sensores remotos | 19 |
| 1.6.2 | Exploración directa por excavación..... | 20 |
| 1.6.3 | Sondeo con barreno manual o pala vizcachera | 21 |
| 1.6.4 | Método Wenner de tomografía eléctrica | 22 |
| 1.6.5 | Otros métodos de tomografía 2D | 22 |
| 1.6.6 | Georradar GPR..... | 24 |
| 1.7 | Normatividad vigente..... | 25 |
| 1.7.1 | Normatividad forense..... | 25 |
| 2 | Metodología | 27 |
| 2.1 | Análisis de instrumentos Tomógrafo y Penetrologger para medir las propiedades físicas del subsuelo..... | 27 |
| 2.1.1 | Tomógrafo eléctrico | 27 |
| 2.1.2 | Penetrologger | 28 |
| 2.2 | Visitas de campo y adquisición de datos | 29 |
| 2.2.1 | Reconocimiento del área de estudio | 29 |
| 2.2.2 | Herramientas y equipos requeridos | 30 |
| 2.2.3 | Procedimiento en campo | 30 |
| 2.3 | Aplicación de métodos geofísicos en la toma de medición | 34 |
| 2.3.1 | Tomógrafo eléctrico | 34 |
| 2.3.2 | Penetrologger | 37 |
| 2.4 | Análisis y evaluación de los perfiles y datos obtenidos..... | 39 |
| 2.4.1 | Análisis de los datos obtenidos con tomógrafo Eléctrico..... | 39 |
| 2.4.2 | Análisis de los datos obtenidos con Penetrologger | 45 |
| 2.5 | Interpretación de resultados | 61 |
| 2.5.1 | Tomógrafo eléctrico | 61 |
| 2.5.2 | Penetrologger | 63 |
| 3 | Análisis de resultados..... | 66 |
| 4 | Conclusiones y recomendaciones | 68 |
| 4.1 | Conclusiones..... | 68 |
| 4.2 | Recomendaciones..... | 69 |
| A. | Anexo: Protocolo de prospección para la detección de fosas con Penetrologger | 70 |
| B. | Anexo: Protocolo de prospección para fosas con Tomógrafo Eléctrico | 73 |
| C. | Anexo: Tratamiento de datos del Penetrologger | 75 |
| D. | Anexo: Protocolo de procesamiento para tomógrafo eléctrico | 76 |
| E. | Anexo: Tratamiento de datos del Tomógrafo Eléctrico | 77 |
| | Bibliografía..... | 78 |

Lista de figuras

| | Pág. |
|---|-------------|
| Figura 1-1: Modelo geológico conceptual de una fosa con víctima de homicidio. | 6 |
| Figura 1-2: Líneas de corriente y equipotenciales para arreglo Wenner en Tomografía Eléctrica. | 7 |
| Figura 1-3: Perfil de Resistencia Mecánica en diferentes horizontes de suelo. | 9 |
| Figura 1-4: Configuración de electrodos para arreglo Dipolo-Dipolo, A y B: electrodos de corriente (inyección), M y N: electrodos de voltaje (medición) y a=b: distancia entre electrodos. | 14 |
| Figura 1-5: Esquema de adquisición de datos para Dipolo-Dipolo. | 15 |
| Figura 1-6: a) Forma de uso b) Vista general del equipo c) Tablero analógico d) Conos de penetración. | 16 |
| Figura 1-7: Fotogrametría. | 20 |
| Figura 1-8: Excavación de una fosa. | 21 |
| Figura 1-9: A) Obtención de los materiales extraídos por la cuchara del barreno manual. B) Perfil litológico del subsuelo reconstruido en superficie con muestras obtenidas a distintas profundidades. C) Ejemplo de corte en un piso de cerámicos, dentro de una habitación para acceder al subsuelo. | 21 |
| Figura 1-10: Montaje método Wenner. | 22 |
| Figura 1-11: a) Toma de Datos b) Perfil obtenido con Georradar. | 25 |
| Figura 2-1: Tomógrafo Eléctrico UAN: A. Consola Geoamp303, B. Consola switch AMS001 C. equipos en campo ya conectados y en correcto funcionamiento. | 27 |
| Figura 2-2: Electrodo en pleno funcionamiento debidamente conectado y en total comunicación con el tomógrafo eléctrico. | 28 |
| Figura 2-3: Penetrologger, Eijkelkamp Soil & Water UAN. | 28 |

| | |
|---|----|
| Figura 2-4: Centro Agropecuario Marengo, de la Universidad Nacional de Colombia. Municipio de Mosquera, Sabana de Bogotá (Ubicación GPS Google Earth). | 29 |
| Figura 2-5: Fosas simuladas. | 31 |
| Figura 2-6: Instalación del Tomógrafo Eléctrico. 1) Instalación 2) Toma de datos | 32 |
| Figura 2-7: Consolas del Tomógrafo Eléctrico UAN. 1) En funcionamiento 2) Consolas | 32 |
| Figura 2-8: Delimitación de malla de prospección para Penetrologger. 1) toma de medida 2) Estacas de cada punto de penetración | 33 |
| Figura 2-9: Toma de datos con Penetrologger UAN. | 33 |
| Figura 2-10: Esquema y nomenclatura de fosas y su contenido. | 34 |
| Figura 2-11: Disposición de electrodos para una línea intermedia de prospección. | 36 |
| Figura 2-12: Fosas del Penetrologger. | 37 |
| Figura 2-13: Malla de prospección con Penetrologger. | 38 |
| Figura 2-14: Modelamiento para la línea 4 aplicando método Wenner. Dentro de la fosa | 42 |
| Figura 2-15: Modelamiento para la línea 4 aplicando el método Dipolo-Dipolo. Dentro de la fosa | 43 |
| Figura 2-16: Modelamiento para la línea 5 (control) aplicando método Wenner. Fuera de la fosa | 43 |
| Figura 2-17: Modelamiento para la línea 5 (control) aplicando método Dipolo-Dipolo. Fuera de la fosa. | 43 |
| Figura 2-18: Modelamiento 3D para línea 4 y línea 5 aplicando método Wenner. | 44 |
| Figura 2-19: Modelamiento 3D para línea 4 y línea 5 aplicando método Dipolo-Dipolo. .. | 44 |
| Figura 2-20: Perfiles de cada penetración Línea 1 (Fosa D1). | 47 |
| Figura 2-21: Perfiles promedio de cada punto de la malla, línea 1 (Fosa D1). | 49 |
| Figura 2-22: Superposición de perfiles de cada punto de la malla, Línea 1 (Fosa D1). ... | 50 |
| Figura 2-23: Perfil promedio, Línea 1 (Fosa D1). Interior de la fosa | 52 |
| Figura 2-24: Perfil promedio, Línea 1 (Fosa D1). Exterior de la fosa | 52 |
| Figura 2-25: Superposición de promedios de cada Línea (Fosa D1). Interior de la fosa.. | 53 |
| Figura 2-26: Superposición de promedios de cada Línea (Fosa D1). Exterior de la fosa | 53 |
| Figura 2-27: Grafica promedio total (Fosa D1). Interior de la fosa. | 55 |
| Figura 2-28: Grafica promedio total (Fosa D1). Exterior de la fosa. | 56 |
| Figura 2-29: Perfil global al interior de las fosas. | 60 |
| Figura 2-30: Perfil global al exterior de las fosas. | 60 |
| Figura 2-31: Mapa que describen la alteración (Dentro de la fosa) o no alteración (fuera de la fosa) del terreno, aplicando método Wenner en la fosa B1. | 62 |

| | |
|--|----|
| Figura 2-32: Mapa que describe la alteración (Dentro de la fosa) o no alteración (fuera de la fosa) del terreno aplicando método Dipolo-Dipolo en la fosa B1..... | 62 |
| Figura 2-33: Modelamiento 3D de cinco líneas para método Wenner..... | 63 |
| Figura 2-34: Modelamiento 3D de cinco líneas para método Dipolo-Dipolo..... | 63 |
| Figura 2-35: Curvas definitivas que describen la posible alteración del terreno..... | 64 |
| Figura 2-36: Ejemplo de aproximación de línea de tendencia de cada penetración a las líneas de tendencia encontradas..... | 65 |

Lista de tablas

| | Pág. |
|--|------|
| Tabla 1-1: Resistividad de varios tipos de terreno..... | 12 |
| Tabla 1-2: Ventajas y desventajas de dispositivos electródicos, esquema de ubicación y espaciamiento de electrodos y relación de entre señal y ruido..... | 23 |
| Tabla 2-1: Características relevantes para cada salida a campo..... | 31 |
| Tabla 2-2: Nombre de proyectos y métodos aplicados para cada salida..... | 37 |
| Tabla 2-3: Datos de programación del Penetrologger..... | 38 |
| Tabla 2-4: Datos de tomógrafo eléctrico para línea 4 de la salida a campo del día 20/11/2019 aplicando método Wenner y Dipolo-Dipolo. Para observar la tabla completa consultar el Anexo E..... | 40 |
| Tabla 2-5: Datos del Penetrologger Línea 1 (Fosa D1)..... | 46 |
| Tabla 2-6: Promedio de cada punto de la malla, Línea 1 (Fosa D1)..... | 48 |
| Tabla 2-7: Promedio de perfiles de cada punto de la malla, Línea 1 (Fosa D1). 1) Interior de la fosa 2) Exterior de la fosa..... | 51 |
| Tabla 2-8: Promedio total (Fosa D1) 1) Interior de la fosa 2) Exterior de la fosa..... | 54 |
| Tabla 2-9: Análisis de varianza de un factor (Fosa D1 Interior y Exterior)..... | 57 |
| Tabla 2-10: Análisis de varianza de un factor (Fosa D2 Interior y Exterior)..... | 57 |
| Tabla 2-11: Análisis de varianza de un factor (Fosa D1 y D2 al Interior)..... | 57 |
| Tabla 2-12: Análisis de varianza de un factor (Fosa D1 y D2 al Exterior)..... | 57 |
| Tabla 2-13: Promedio global del terreno en estudio. 1) Interior de las fosas 2) Exterior de las fosas..... | 59 |

Lista de ecuaciones

| | Pág. |
|--|-------------|
| Ecuación 1-1: Ecuación de Albrecht..... | 9 |
| Ecuación 1-2: Densidad Aparente..... | 11 |
| Ecuación 1-3: Formula General del arreglo Dipolo-Dipolo..... | 16 |
| Ecuación 1-4: Principio físico del Penetrómetro electrónico..... | 18 |
| Ecuación 1-5: Ecuación del Penetrómetro electrónico con fuerza aplicada constante..... | 18 |
| Ecuación 1-6: Masa que varía de acuerdo a la fuerza aplicada sobre el Penetrómetro electrónico..... | 19 |
| Ecuación 1-7: Principio de funcionamiento del Penetrologger..... | 19 |

Introducción

La desaparición de personas tanto de Colombia como de los demás países latinoamericanos ha ido aumentando con el paso del tiempo a un ritmo cada vez mayor, por ejemplo, en Colombia se tiene un registro aproximado de 89.736 personas desaparecidas en 2013, 110.833 casos en 2015 y 142.618 casos en 2018, en los cuales se aprecia un aumento progresivo de la cantidad de personas que no han podido ser halladas. (Instituto Nacional de Medicina Legal y Ciencias Forenses, 2020)

Esto ha generado que se empiecen a buscar métodos diferentes a los convencionales para hallar de forma más efectiva y rápida fosas o enterramientos clandestinos, esta búsqueda comienza en los años sesenta y avanza muy lentamente hasta finales de los ochenta, en donde se fortalece un poco el uso de algunos métodos, como el GPR y la tomografía eléctrica en países europeos, y a partir del principio de los noventa comienzan a profundizar en los estudios acerca de este tema (Molina Gallego, 2016).

El desarrollo de métodos geofísicos para la búsqueda de fosas en Colombia no ha tenido un progreso consistente con la cantidad de personas que desaparecen a diario en el país, por lo que con los resultados que se obtengan de este proyecto se espera poder contribuir de alguna manera con la búsqueda de estos desaparecidos, desarrollando un enfoque que permita encontrar más rápidamente fosas, a través de dos equipos de alta resolución para diferenciar algunas propiedades eléctricas y mecánicas presentes en el subsuelo.

Planteamiento del problema

A lo largo del tiempo en Colombia la búsqueda de fosas se ha desarrollado a través de declaraciones de testigos y la excavación del suelo en lugares sospechosos, usando por lo general una sonda de acero inoxidable para encontrar restos de los cuerpos, de una manera que no ha presentado una evolución significativa en cuanto a su metodología, ya que estos métodos un tanto convencionales no reflejan resultados confiables, y no son capaces de

abarcando una gran extensión de terreno. Esto hace necesario buscar métodos que faciliten y agilicen estos procedimientos.

En Colombia ya se han hecho algunas investigaciones acerca del tema, utilizando métodos para identificar fosas a través de equipos como el tomógrafo eléctrico (usando el método Polo-Polo) y el georadar, (Molina, 2020). En este caso se pretende emplear el tomógrafo eléctrico, pero en un modo de trabajo diferente, usando el método Dipolo-Dipolo, que no se ha probado en el país, con el fin de identificar las posibles ventajas y desventajas que este tiene para la correcta identificación de fosas.

Justificación

El proyecto surge de la necesidad de mejorar la forma en la que se encuentran fosas enterradas en el suelo abordando el tema desde un enfoque forense, partiendo de la importancia de encontrar métodos más eficientes, lo cual se hace cada vez más necesario por el incremento en la desaparición masiva de personas y el incremento de la delincuencia en general; la determinación de un mejor método para hallar estos cuerpos se hace mayormente importante para la gran cantidad de personas que siguen en la constante búsqueda de sus familiares y amigos o conocidos desaparecidos, y consecuentemente para esclarecer las posibles causas de sus muertes.

El estudio y la experimentación de estos métodos consiste principalmente en desarrollar dos análisis relacionales, que puedan ofrecer resultados cuyo fin sea aportar una técnica funcional en la búsqueda de fosas comunes en Colombia:

- **Geoelectrico (Tomografía):** en esta investigación se pone a prueba el método Dipolo-Dipolo, que ha sido poco utilizado en la búsqueda de fosas, comparándolo con el método Wenner, ya que se pretende encontrar más claridad en los resultados y al ser una técnica no invasiva mejora el tiempo de búsqueda de los enterramientos clandestinos.
- **Geomecánico (Penetración mecánica):** Adicionalmente para el proyecto se aplica un procedimiento semi-invasivo que a diferencia del barrenado (usado en Colombia para sondear las superficies donde se cree está el enterramiento), otorga datos

numéricos y representaciones gráficas de la resistencia mecánica con respecto a la profundidad del subsuelo en estudio, esto con el fin de mejorar la precisión ya que sus resultados son adquiridos y entregados de forma inmediata.

Asimismo, se puede anotar que el proyecto está acompañado por el grupo de investigación GRESIA, GIFAN de la Universidad Antonio Nariño.

El análisis de estos procedimientos será realizado en 4 fosas simuladas a 80 cm de profundidad, en el Centro Agropecuario “Marengo” de la Universidad Nacional de Colombia, una de las fosas contiene restos en descomposición de un Cerdo, la siguiente, restos de huesos humanos, en otra se hallan restos quemados de huesos humanos y por último una que no contiene nada para comparar y diferenciar las propiedades físicas en estudio en cada una de las fosas.

Objetivos

Objetivo General

Realizar la caracterización del método Dipolo-Dipolo comparándolo con el método Wenner, y la caracterización de la penetración mecánica del subsuelo, a partir de los datos arrojados por los dos instrumentos (Tomógrafo y Penetrologger), y del análisis de las propiedades físicas del suelo (eléctricas y mecánicas), para determinar la incidencia de estos métodos en la búsqueda de fosas comunes en Colombia.

Objetivos Específicos

- Analizar las herramientas multimediales para el análisis de los resultados arrojados por los instrumentos.
- Estudio y análisis de perfiles geo-eléctricos y geo-mecánicos del subsuelo, en la incidencia de detección de fosas comunes, basado en patrones físicos y temporales (condición climática) del terreno.
- Realizar 3 salidas de campo al centro agropecuario “Marengo” de la Universidad Nacional de Colombia ubicado en el municipio de Mosquera para la toma de datos

geo-mecánicos y geo-eléctricos del subsuelo en 4 fosas simuladas para el tomógrafo y en dos fosas para el Penetrologger.

- Crear un protocolo de prospección para la búsqueda de fosas clandestinas con “Penetrologger” en pruebas de resistencia geomecánica en Colombia.
- Hacer un análisis relacional de los diferentes perfiles obtenidos, de acuerdo al tipo de fosa en investigación (4 fosas simuladas) para identificar parámetros del subsuelo que permitan identificar el cuerpo.
- Interpretar y determinar el alcance de los métodos de estudio con el Penetrologger y el método Dipolo-Dipolo con respecto al método Wenner de tomografía eléctrica, para la determinación de fosas comunes en Colombia.

Alcance

Se contempla que dentro de la ejecución del proyecto se puedan presentar estas limitaciones:

- La variación de las condiciones climáticas y ambientales al momento de hacer las diferentes tomas de datos en las fosas simuladas pueden afectar parcialmente el resultado de los mismos.
- La cantidad de visitas hechas a las fosas simuladas es relativamente escasa debido al tiempo de ejecución dispuesto para el proyecto.
- El resultado que arroje el proyecto solo es válido para ser usado en condiciones similares a las presentes en las fosas simuladas al momento de realizar las pruebas.

Ubicación dentro de las líneas de trabajo del programa

Este proyecto requiere resistencia mecánica, análisis de resistencia eléctrica, análisis estadístico, interpretación y comparación de series de datos, estudio de perfiles bidimensionales y tridimensionales de las propiedades físicas del subsuelo.

Usuarios directos y formas de utilización de los resultados del proyecto

Los usuarios directos o beneficiados con los resultados que se obtengan en este proyecto son todas las entidades gubernamentales, ONGs, universidades y familiares de aquellas personas que tienen algún conocido desaparecido y genera un avance para la ciencia forense en la determinación pronta de fosas clandestinas.

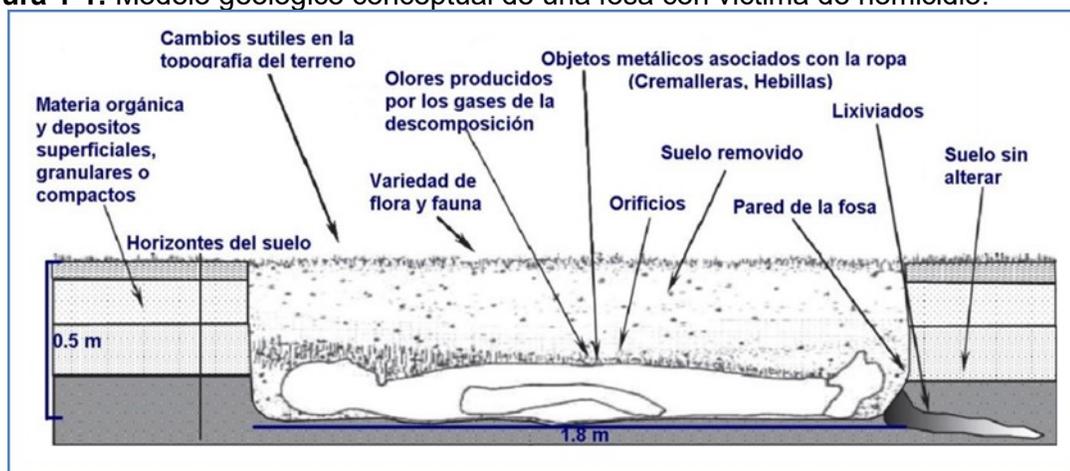
1 Marco Teórico

1.1 Fosa Clandestina

Se suele pensar que se trata de excavaciones, hoyos en el terreno o enterramientos profundos, pero realmente debe de ampliarse su alcance a cualquier lugar en el cual se enterraron, arrojaron o colocaron uno o más cadáveres, huesos y/o restos humanos, de manera ilegal, con el propósito de ocultar el paradero de una o más personas, dificultar o imposibilitar su localización y/o identificación, destruir evidencia, o bien, entre otras cosas, evitar que las autoridades puedan investigar o sancionar las razones y/o las modalidades de tales actos, pueden ser comunes o individuales del tipo penal, criminal o forense. (Lorusso, 2020)

Las características más comunes de una fosa con una víctima de homicidio se describen en la **Figura 1-1**.

Figura 1-1: Modelo geológico conceptual de una fosa con víctima de homicidio.



(Molina Gallego, 2016)

1.2 Resistividad

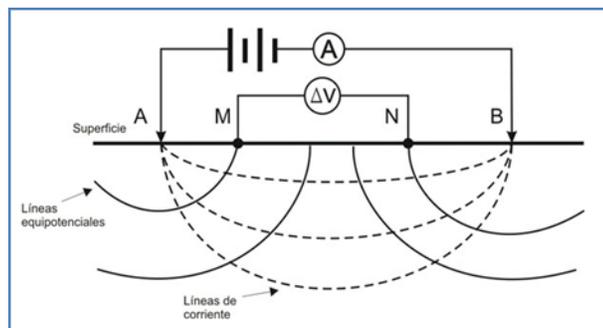
1.2.1 Resistividad Eléctrica

La resistividad eléctrica es una propiedad fundamental capaz de distinguir tipos de materiales según lo conductivos que sean en función del paso de corriente eléctrica, sus enfoques son muchos ya que en su naturaleza posee una variedad de aplicaciones y usos como lo son: sedimentos, presencia de agua, minerales entre otros. la resistividad eléctrica orientada al campo forense consigue establecer la existencia o inexistencia de entierros y vertederos de basura. (Molina Gallego, 2016)

La resistividad eléctrica aplicada al campo y estudio forense suele presentar dos tipos de resultados:

- Sondeo eléctrico vertical: Es un grupo de resoluciones de resistividad aparente, a diferentes profundidades, que pueden ser generadas al interpolar un arco de inyección de corriente como se muestra en la **Figura 1-2** y tomando datos de las intersecciones formadas por estos arcos. (Molina Gallego, 2016)
- Sondeo eléctrico horizontal: Hace referencia a la adquisición de datos de resistividad aparente modificando la vista de plano vertical a horizontal, también con separación entre electrodos, las cuales presentan menores profundidades y menor diámetro del arco de inyección y toma de datos. (Molina Gallego, 2016)

Figura 1-2: Líneas de corriente y equipotenciales para arreglo Wenner en Tomografía Eléctrica.



(Geophysical Studies, s.f.)

1.2.2 Resistividad aparente

La resistividad aparente es una propiedad física que se puede medir con la aplicación de diferentes métodos de tomografía eléctrica, en la cual se presentan variaciones dependiendo de la posición de cuatro electrodos, dado a las irregularidades del medio en el que sea aplicado el estudio. Los datos de resistividad aparente obtenidos son atribuidos a un valor calculado, el cual es supeditado por las características entregadas por el medio y su geometría. (Toledo Baca, 2016)

Esta resistividad se obtiene al momento de inyectar corriente eléctrica en el subsuelo desarrollando un comportamiento extensivo, por lo que estas conducciones se pueden clasificar de tres distintas maneras:

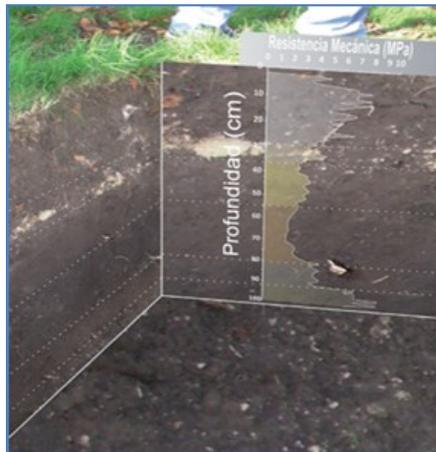
- Conducción dieléctrica: dada en materiales muy poco conductores o aislantes
- Conducción electrónica: dada en materiales con electrones libre como los metales
- Conducción electrolítica: dada al movimiento de los iones presentes en el fluido intersticial del terreno. (Toledo Baca, 2016)

1.2.3 Resistencia a la penetración mecánica

La resistencia a la penetración es una medida de la fuerza requerida para que un cono circular logre atravesar el suelo de forma vertical, esta fuerza es determinada por el área lateral del cono, es decir, la superficie que entra en contacto con el suelo, el esfuerzo uniforme que actúa sobre este y la velocidad de penetración. (Tenza Pongutá, 2016)

Esta medida varía dependiendo de los diferentes horizontes del subsuelo, por lo que su valor cambia de acuerdo a la profundidad como se aprecia en la **Figura 1-3**.

Figura 1-3: Perfil de Resistencia Mecánica en diferentes horizontes de suelo.



(Sagripanti G. L., Villalba, Aguilera, & Giaccardi, 2017)

1.3 Variables que afectan la resistividad eléctrica y la resistencia mecánica de un terreno

1.3.1 Humedad

Es la cantidad de agua por unidad de volumen presente en el suelo, su valor se mide generalmente por porcentaje de peso y su capacidad para mantenerse en el suelo depende estrictamente del tipo de suelo y las condiciones climáticas y ambientales del lugar. (Shaxson, 2008)

La humedad es un factor que puede aumentar o disminuir la resistividad eléctrica y la resistencia a la penetración mecánica, cuando el porcentaje de humedad del suelo es bajo tanto la resistividad eléctrica como la resistencia mecánica aumentan, y en caso contrario cuando el porcentaje de humedad es alto debe disminuir la resistividad eléctrica y la resistencia mecánica, este comportamiento para la resistividad eléctrica se puede apreciar en la **Ecuación 1-1**. (Cárdenas Valencia & Galvis Garcia, 2011) (Acuña, Iglesias, Jara, & Morales, 2011)

Ecuación 1-1: Ecuación de Albrecht.

$$\rho = \frac{1.3 * 10^4}{(1 + 0.73H^2)(1 + 0.03T)} \quad T > 0^\circ C$$

- $\rho = \text{Resistividad Electrica } (\Omega m)$
- $H = \text{Humedad } (\% \text{ Peso})$
- $T = \text{Temperatura } (^{\circ}C)$

(Cárdenas Valencia & Galvis Garcia, 2011) (Acuña, Iglesias, Jara, & Morales, 2011)

Normalmente es mejor realizar la toma de estas medidas en un ambiente que brinde mayores valores de resistividad y resistencia, por lo que en general el verano o épocas de calor son los mejores momentos para realizar este tipo de procedimientos. La resistividad eléctrica es inversamente proporcional al cuadrado del porcentaje de humedad en peso. (Cárdenas Valencia & Galvis Garcia, 2011) (Acuña, Iglesias, Jara, & Morales, 2011)

1.3.2 Temperatura

Este factor es un gran determinante en el valor de resistividad eléctrica y en el de resistencia mecánica, para el caso de la resistividad cuando la temperatura es alta menor es el de resistividad, esto se debe a que aumenta la movilidad de los iones de carga, mientras que la resistencia mecánica aumenta con el aumento de la temperatura, debido principalmente a la evaporación del agua que contiene el terreno. Este comportamiento esta descrito en la **Ecuación 1-1** anterior. (Cárdenas Valencia & Galvis Garcia, 2011)

En este caso se recomienda tomar estos datos en una época de verano o clima de alto calor. La temperatura en inversamente proporcional a la resistividad eléctrica. (Cárdenas Valencia & Galvis Garcia, 2011) (Acuña, Iglesias, Jara, & Morales, 2011)

1.3.3 Compactación

Ocurre cuando al suelo se le aplica una determinada carga, fuerza o presión, y como resultado su densidad aumenta, esto se debe a que las pequeñas burbujas de oxígeno presentes dentro de las capas del terreno salen a la superficie, y los diferentes componentes del suelo quedan más cerca unos de otros. También puede ocurrir por deformación plástica de algunos componentes presentes en el subsuelo; o simplemente una combinación de ambos factores. (INTA PRECOP, 2014) (Sepúlveda, 2007)

Su magnitud se expresa a través del incremento de la densidad aparente en la **Ecuación 1-2**, o bien a través de la resistencia de un suelo, es decir la habilidad que presenta éste para resistir la penetración o desplazamiento de un cuerpo. (INTA PRECOP, 2014) (Sepúlveda, 2007)

Ecuación 1-2: Densidad Aparente.

$$d_a = \frac{m}{V}$$

- *d = Densidad Aparente*
- *m = Masa del suelo*
- *V = Volumen ocupado*

La compactación es un factor que tiende a aumentar la conducción de la corriente y por lo tanto disminuye la resistividad eléctrica aparente, esto ocurre principalmente por que la distancia entre las partículas disminuye con el aumento del nivel de compactación por lo tanto la conducción a través de la humedad contenida es mejor. Para la resistencia a la penetración también se observa que su valor es mayor con el aumento de la compactación, debido a que la fricción que debe vencer el equipo de medida en su paso por el suelo se incrementa. (Cárdenas Valencia & Galvis Garcia, 2011) (Acuña, Iglesias, Jara, & Morales, 2011)

1.3.4 Composición del terreno

El suelo se ha formado a lo largo de los siglos, gracias a las diferentes condiciones climatológicas y todos los animales y plantas que han crecido y muerto modificando lentamente sus propiedades, proviene de la desintegración o alteración física y química de las rocas y de los residuos de las actividades de seres vivos, por lo que está compuesto de una combinación de materiales como minerales, aire, agua, materia orgánica, organismos animales y vegetales. (Chiappini, 1996)

Este factor es muy dependiente de la naturaleza del mismo, es decir que la resistividad eléctrica cambia de acuerdo al tipo de materiales que componen el suelo, el valor conductivo de cada material es muy diferente uno respecto de otro, esto se puede apreciar

en la **Tabla 1-1**. (Cárdenas Valencia & Galvis Garcia, 2011) (Acuña, Iglesias, Jara, & Morales, 2011)

Otro factor determinante es la cantidad de minerales y electrolitos presentes en el suelo, principalmente sales, que aumentan considerablemente la conducción de corriente por el medio, por lo tanto, entre mayor sea el contenido de sal en suelo menor es el valor de resistividad eléctrica del medio. Un contenido de humedad alto tiende a disolver las sales presentes en el terreno, esto causa que la conducción de corriente disminuya y aumente el de resistividad. (Cárdenas Valencia & Galvis Garcia, 2011) (Acuña, Iglesias, Jara, & Morales, 2011)

Tabla 1-1: Resistividad de varios tipos de terreno.

| Naturaleza del terreno | Resistividad (Ωm) |
|---|---|
| Terrenos pantanosos | < 30 |
| Limo | 20 a 100 |
| Humos | 10 a 150 |
| Turba húmeda | 5 a 100 |
| Arcilla plástica | 50 |
| Margas y arcillas compactas | 100 a 200 |
| Margas del jurásico | 30 a 40 |
| Arena arcillosa | 50 a 500 |
| Arena silíceas | 200 a 3000 |
| Suelo pedregoso cubierto de césped | 300 a 500 |
| Suelo pedregoso desnudo | 1500 a 3000 |
| Calizas blandas | 100 a 300 |
| Calizas compactas | 1000 a 5000 |
| Calizas agrietadas | 500 a 1000 |
| Pizarras | 50 a 300 |
| Rocas de mica y cuarzo | 800 |
| Granitos y gres procedentes de alteración | 1500 a 10000 |
| Granitos y gres muy alterados | 100 a 600 |

(LH)

1.3.5 Granulometría

Se trata de la clasificación que se les da a los diferentes tipos de suelo de acuerdo al tamaño de los granos de su formación sedimentaria, con este dato es posible determinar muchas propiedades mecánicas. (Acuña, Iglesias, Jara, & Morales, 2011)

Influye en gran medida sobre la porosidad y el poder retenedor de humedad del suelo, por lo tanto, afecta la calidad del contacto de los electrodos con el terreno, entre mayor sea el tamaño de los granos de la tierra mayor es su resistividad eléctrica, por otro lado, entre menor sea el tamaño de grano mayor su resistencia mecánica, esto se debe a que existe mayor área de contacto entre los granos y la superficie que intenta penetrar el suelo. (Acuña, Iglesias, Jara, & Morales, 2011) (Rondón Quintana & Guzmán Millán, 2010)

1.4 Tomógrafo eléctrico

El tomógrafo eléctrico es un instrumento diseñado para adquirir datos de resistividad eléctrica con el objetivo de elaborar una construcción de imágenes en dos dimensiones, abordando las irregularidades del subsuelo. El procesamiento de datos se realiza empleando usualmente más de 24 electrodos, los cuales son puestos a lo largo de la superficie del terreno y conectados mediante cables desde la consola hasta el electrodo. el equipo tiene como función esencial elegir de manera automática cuatro del total de electrodos y posteriormente designar dos electrodos para inyectar corriente y los otros dos para para medir potencial eléctrico, para la siguiente medida el tomógrafo elige otro grupo de cuatro electrodos según sea el arreglo y aplica el mismo funcionamiento. (Weinzettel, Varni, Dietrich, & Usunoff, 2009)

1.4.1 Campos de uso

- Estudio para la identificación de horizontes petrocálcicos. (Weinzettel, Varni, Dietrich, & Usunoff, 2009)
- Estudio para la detección de enterramientos clandestinos. (Molina Gallego, 2016)
- Estudio para estimar contenido de agua en el suelo. (Auge, 2008)
- Estudio para la caracterización de sitios contaminados. (Losinno, Sainato, Malleville, & Galindo, 2008)

- Tomografía aplicada al estudio arqueológico. (Perdomo & Ainchil, 2009)
- Tomografía aplicada al estudio de los depósitos estériles mineros.
- Tomografía aplicada al estudio de deslizamientos. (Quintana Berlanga & Teixidó I Ullod, 2013)

1.4.2 Ámbito forense

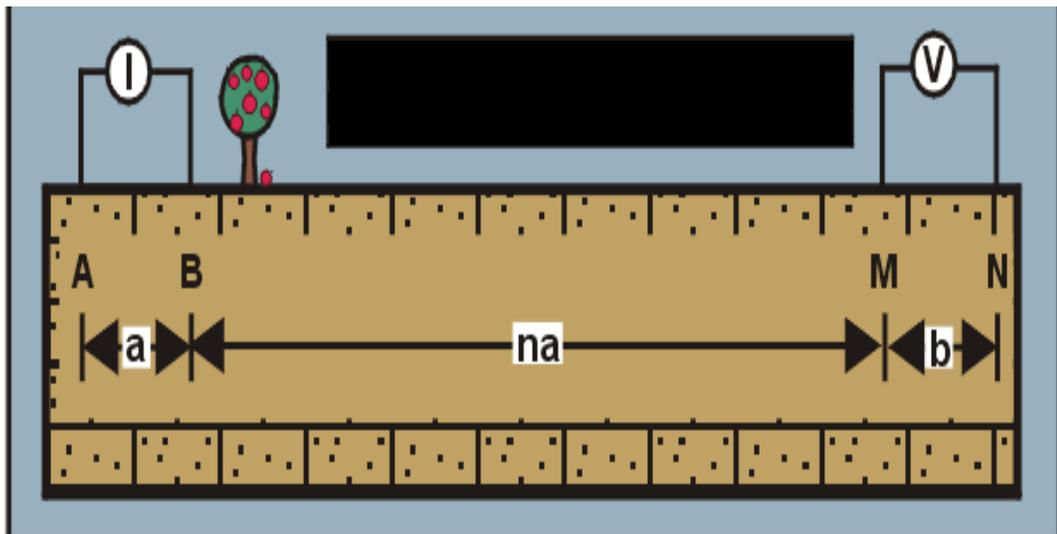
A pesar de que la tomografía eléctrica en el ámbito forense no ha sido implementada, al día de hoy se han realizado varios estudios en los cuales los métodos eléctricos han permitido determinar texturas en los subsuelos, además de obtener perfiles continuos de resistividad eléctrica en dos dimensiones capaces de vislumbrar zonas de no compactación de suelos con lo cual los estudios toman más precisión en la entrega de resultados relacionados a remoción de tierra por enterramientos clandestinos. (Sagripanti G. , Villalba, Aguilera, & Giaccardi, 2013)

El tomógrafo eléctrico ha ofrecido una serie de propiedades de procesamiento, combinando adecuadamente las imágenes de los perfiles de resistividad aparente de alta resolución con la profundidad debajo del suelo que puede alcanzar, este es sin duda uno de los instrumentos de carácter no invasivo más eficaz para el estudio y caracterización de probables discontinuidades del subsuelo con detalle en los primeros metros de profundidad. (Sagripanti G. , Villalba, Aguilera, & Giaccardi, 2013)

1.4.3 Método Dipolo-Dipolo

La configuración Dipolo-Dipolo, tiene como característica primordial la ubicación de los electrodos, para esta técnica el par de electrodos de corriente, se encuentran en un intervalo de distancia extenso con respecto al par de electrodos que miden el potencial eléctrico. véase **Figura 1-4**.

Figura 1-4: Configuración de electrodos para arreglo Dipolo-Dipolo, A y B: electrodos de corriente (inyección), M y N: electrodos de voltaje (medición) y $a=b$: distancia entre electrodos.

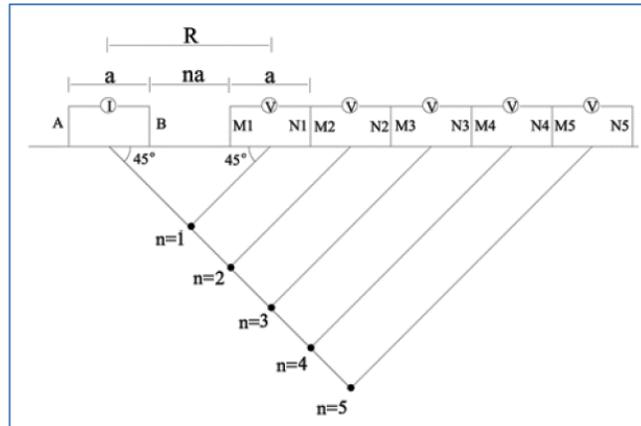


(Griem-Klee, 2016)

Aplicando el método Dipolo-Dipolo se garantiza en primera medida una gran sensibilidad a los cambios horizontales en la resistividad del subsuelo, no tan así para los cambios verticales, de forma tal que resulta siendo muy útil para estructuras verticales identificando fallas y fracturas principalmente, además de tener ventajas en la búsqueda de muros enterrados y cavidades o plumas contaminantes. Como desventaja se puede mencionar su poca resolución para estructuras horizontales, ejemplo: capas sedimentarias. (Toledo Baca, 2016)

Este método resulta ser más sensible a cambios horizontales que otras disposiciones de electrodos debido a que la distancia entre cada par de electrodos se mantiene constante, esto permite que con el aumento progresivo de la distancia n entre cada par de electrodos, se logre que el arco de corriente alcance una profundidad directamente proporcional a la cantidad n de avances. n siempre se incrementa de acuerdo a una cantidad a y siguiendo un orden de números natural ($1a, 2a, 3a, \dots$). Este incremento natural de números obliga al arco de corriente a formar una malla con una inclinación de 45° como se aprecia en la **Figura 1-5**. (Toledo Baca, 2016)

Figura 1-5: Esquema de adquisición de datos para Dipolo-Dipolo.



El funcionamiento del equipo está basado en la aplicación matemática de la **Ecuación 1-3** para la toma de datos en cada punto del subsuelo. (Griem-Klee, 2016)

Ecuación 1-3: Formula General del arreglo Dipolo-Dipolo.

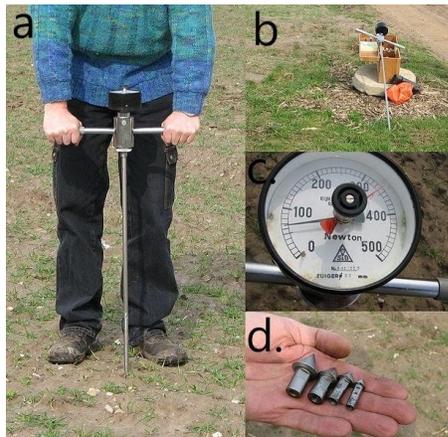
$$\rho a = \pi * n * (n + 1) * (n + 2) * a * \frac{\Delta V}{I}$$

- $\rho a =$ Resistividad Aparente
- $n =$ Cantidad de intervalos que separan cada par de electrodos
- $\Delta V =$ Diferencia de potencial tomado en ese punto
- $I =$ Corriente suministrada en ese punto
- $a =$ Separación entre electrodos
- $\pi =$ Constante

1.5 Penetrómetro

El penetrómetro puede ser electrónico o análogo, es un equipo que mide y recolecta datos numéricos de la resistencia que ofrece el suelo a la penetración mecánica, al hacer pasar a través de él un barreno de acero inoxidable con un cono en la punta, obteniendo de este procedimiento información de la fuerza necesaria para que el equipo logre atravesar el suelo con respecto a la profundidad (EcuRed contributors, 2019). En la **Figura 1-6** se presenta una imagen de un penetrómetro análogo.

Figura 1-6: a) Forma de uso b) Vista general del equipo c) Tablero analógico d) Conos de penetración.



(Henríquez, y otros, 2011)

1.5.1 Campos de uso

- Estudio geotécnico de suelos (Sanhueza, C & Villavicencio, G., 2010)
- Estudio de la capacidad de soporte de carga (Demuner Molina, Cadena Zapata, & Campos Magaña, 2013)
- Estudio de transitabilidad (Villavicencio, G. , Breul, P., Espinace, R., & Valenzuela, P. , 2012)
- Proyectos de Ingeniería Civil (Domínguez Palacio, Pozo Gálvez, & León Sánchez, 2018)
- Ciencias del Suelo (Campos Magaña, y otros, 2015)
- Agricultura (Santelli, Ribeiro Calbo, & Gimenez Calbo, 2009)
- Gestión y mantenimiento de campos, parques y jardines (Gómez Giraldo & Osorio Canal, 2013)

1.5.2 Ámbito forense

En el ámbito forense los penetrómetros han tenido muy poco uso, se trata de una herramienta que, aunque ha tenido gran utilidad e investigación en otras áreas del conocimiento, se encuentra en un estado de prueba para la investigación de fosas clandestinas en Colombia.

En Argentina ya han hecho un par de investigaciones con el uso de un penetrómetro electrónico para la determinación de la posible existencia de fosas, como apoyo a los métodos tradicionales, de acuerdo a ciertos parámetros con resultados satisfactorios para fosas que tengan como máximo un año de haber sido excavadas. (Sagripanti G. L., Villalba, Aguilera, & Giaccardi, 2017)

1.5.3 Principio de funcionamiento de Penetrómetro electrónico

Los penetrómetros se basan en el principio físico de la conservación de la cantidad de movimiento, y el teorema de la energía cinética.

La resistencia que ofrece el suelo al paso de la punta cónica es entonces, el resultado de la energía cinética presente en cada punto del recorrido dividida en el área lateral del cono y a su desplazamiento como se observa en la **Ecuación 1-4**.

Ecuación 1-4: Principio físico del Penetrómetro electrónico.

$$R = \frac{k}{A * d}$$

- $R = Resistencia\ Mecanica\ (MPa)$
- $k = Energia\ cinetica\ (J)$
- $A = Area\ lateral\ del\ cono\ (cm^2)$
- $d = Desplazamiento\ (cm)$

La energía cinética depende de la masa y la velocidad, por lo que podemos reescribir esta expresión como se muestra en la **Ecuación 1-5**.

Ecuación 1-5: Ecuación del Penetrómetro electrónico con fuerza aplicada constante.

$$R = \frac{\frac{mv^2}{2}}{A * d}$$

- $m = Masa\ (kg)$
- $v = Velocidad\ \left(\frac{m}{s}\right)$

En este caso la masa es variable, ya que depende de la fuerza que se aplica por parte del operador al Penetrologger, por lo que la ecuación se debe reescribir con respecto a la fuerza aplicada, con la **Ecuación 1-6**:

Ecuación 1-6: Masa que varía de acuerdo a la fuerza aplicada sobre el Penetrómetro electrónico.

$$m = \frac{F + W}{g}$$

- $F = \text{Fuerza Aplicada por el operador (N)}$
- $W = \text{Peso total del Penetrologger (N)}$
- $g = \text{Gravedad } \left(\frac{m}{s^2}\right)$

Reemplazando esta expresión en la **Ecuación 1-5** obtenemos la **Ecuación 1-7** que describe el funcionamiento del Penetrologger.

Ecuación 1-7: Principio de funcionamiento del Penetrologger.

$$R = \frac{\left(\frac{F + W}{g}\right) v^2}{A * d} = \frac{(F + W)v^2}{2gAd}$$

(Minaya Lizárraga & Acahuana Mollo, 2019)

El Penetrómetro Electrónico recolecta datos de velocidad, distancia recorrida y fuerza aplicada gracias a dos sensores, uno que mide la presión o fuerza que se le imprime al aparato para desplazarse a través del suelo y otro que mide la distancia que recorre este en forma vertical con respecto a una placa metálica que se coloca en el suelo. En el **Anexo C** se describen a detalle las características del equipo. (Toledo Bruzual & Millán Boadas, 2016)

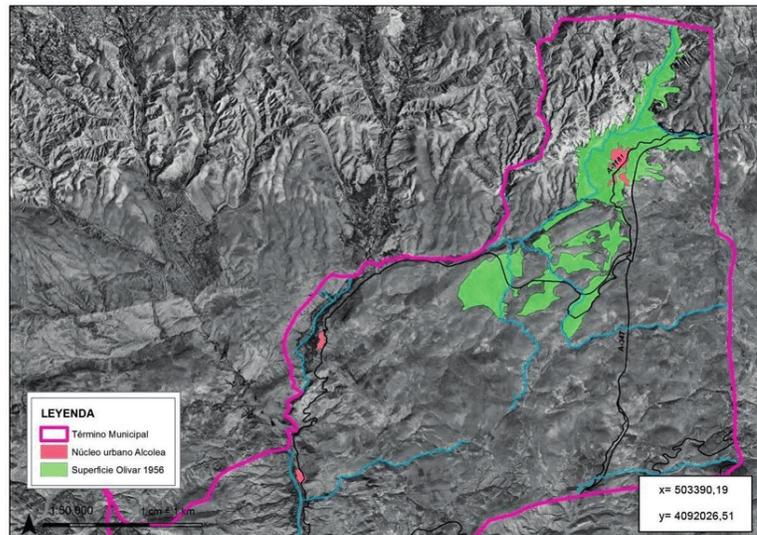
1.6 Métodos comúnmente usados para la detección de fosas

1.6.1 Fotogrametría y sensores remotos

Consiste en analizar imágenes o fotografías aéreas y satelitales de diferente altitud (**Figura 1-7**) para la determinación de zonas con cambios recientes en su geografía, es decir, que

se trata estrictamente de encontrar sitios con características que indiquen una posible remoción de terreno o alteración del mismo, lo que a su vez indica la posible existencia de fosas clandestinas. Generalmente, este método necesita de un tiempo de análisis bastante grande, ya que para encontrar exitosamente cambios en la morfología de cada lugar se deben hacer comparaciones con mapas y fotografías anteriormente tomadas o documentadas. Por lo general, este procedimiento se acompaña con otro método de detección cuando se tiene sospecha de un sitio en particular. (Sagripanti G. L., Villalba, Aguilera, & Giaccardi, 2017)

Figura 1-7: Fotogrametría.



(Sánchez Escolano & Ruíz Moya, 2019)

1.6.2 Exploración directa por excavación

En este método se realizan excavaciones en los lugares con la posible existencia de una fosa (**Figura 1-8**), basándose generalmente en declaraciones de personas, generando alteraciones del terreno y por lo tanto dañando pruebas de gran valor que puedan existir en el suelo. Se trata de un método costoso tanto económicamente como en su tiempo de ejecución, adicional a esto los resultados son insatisfactorios en la mayoría de ocasiones. (Sagripanti G. L., Villalba, Aguilera, & Giaccardi, 2017)

Figura 1-8: Excavación de una fosa.



(Morales Martínez, 2018)

1.6.3 Sondeo con barreno manual o pala vizcachera

Consiste en una especie de pala que realiza un corte vertical profundo de las primeras capas del suelo y extrae del mismo muestras para su posterior análisis de las propiedades mecánicas presentes e identificación del tipo de suelo (**Figura 1-9**), con este procedimiento se busca encontrar alteraciones de la resistencia del suelo y sus componentes edáficos normales. Es un procedimiento que solo se utiliza en terrenos relativamente blandos o de baja dureza, se utiliza normalmente como primer indicador de la posible existencia de una fosa y posteriormente se apoya el resultado con otro método de exploración geofísico. (Sagripanti G. L., Villalba, Aguilera, & Giaccardi, 2017)

Figura 1-9: **A)** Obtención de los materiales extraídos por la cuchara del barreno manual. **B)** Perfil litológico del subsuelo reconstruido en superficie con muestras obtenidas a distintas profundidades. **C)** Ejemplo de corte en un piso de cerámicos, dentro de una habitación para acceder al subsuelo.

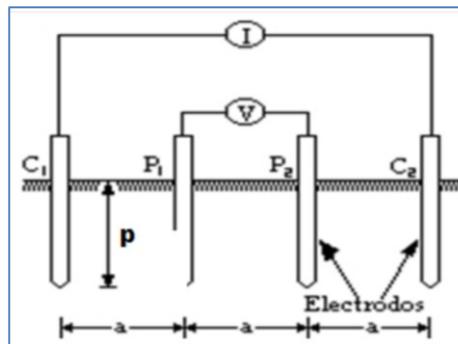


(Sagripanti G. L., Villalba, Aguilera, & Giaccardi, 2017)

1.6.4 Método Wenner de tomografía eléctrica

Es bastante similar al método Dipolo-Dipolo, cambia en la disposición y distancia entre electrodos. Se trata de un arreglo que mide la resistividad aparente del subsuelo en línea recta, cuenta con un par de electrodos que emiten corriente eléctrica y un par de electrodos que miden la diferencia de potencial resultante, como característica principal mantiene la distancia entre los electrodos constante (**Figura 1-10**), este método es el más utilizado para detectar los diferentes horizontes de suelo y brinda una mejor información en medidas verticales, su capacidad de penetración depende de la distancia entre los electrodos, entre mayor sea su separación más profundo viaja el arco de corriente. (Cárdenas Valencia & Galvis Garcia, 2011)

Figura 1-10: Montaje método Wenner.



(Cárdenas Valencia & Galvis Garcia, 2011)

1.6.5 Otros métodos de tomografía 2D

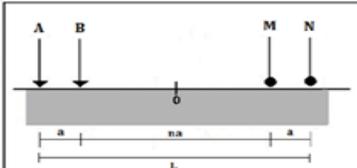
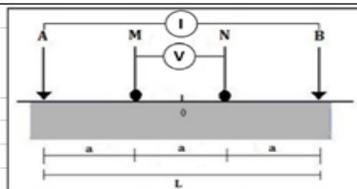
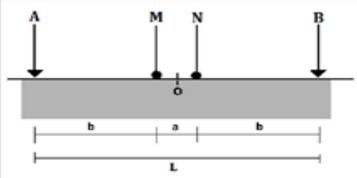
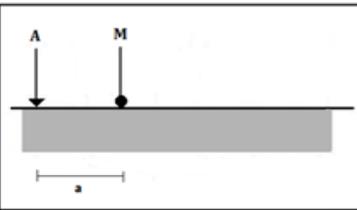
La tomografía eléctrica sin duda alguna ha generado una serie de campos aplicativos para muchas áreas de la investigación, esto se debe a que la medición de potencial eléctrico presenta facilidades debido a que solo dependen de arreglos de tipo geométricos para así ejecutar cualquier tipo de método el cual bajo cierta característica experimental dará diferentes resultados. El principio de funcionamiento se mantiene, cualquier método de tomografía tiene como base trabajar con cuatro electrodos, dos de ellos A y B cuya función es inyectar corriente y M y N cuya función será medir la diferencia de potencial del campo eléctrico creado por A y B.

A priori los cuatro electrodos se pueden acoger a cualquier disposición geométrica sobre la zona o superficie del terreno de prospección, la mejor opción de configuración para efectuar

un estudio de campo dependerá del tipo de zona a ser mapeada, las variables a tener cuenta al momento de seleccionar alguna configuración de electrodos son las siguientes: profundidad, sensibilidad del equipo, forma y dimensiones del terreno, nivel de ruido de fondo en la zona del estudio.

En la **Tabla 1-2** se reseñan las características de cuatro tipos de configuraciones empleadas para la adquisición de datos mediante la técnica de tomografía eléctrica. (E. van den Bogaard, 2014)

Tabla 1-2: Ventajas y desventajas de dispositivos electródicos, esquema de ubicación y espaciamiento de electrodos y relación de entre señal y ruido.

| Configuración electródica | Ventajas | Desventajas | Esquema de configuración | Relación señal/ruido |
|---------------------------|---|--|---|---|
| Dipolo-Dipolo | Arreglo simétrico | Resolución vertical pobre |  <p>A y B= corriente, M y N=Voltage</p> | Pobre (intensidad de la señal debil) |
| | Minimiza el acople inductivo entre electrodos de corriente y potencial | Sensibilidad al ruido geologico | | |
| | Sensitiva a cambios horizontales (estructuras verticales) | La resistencia de contacto de los electrodos moviles es mas critica que el polo-polo | | |
| Wenner | Sensible a las mediciones con respecto a los espaciamientos entre electrodos. | Cobertura horizontal es pobre a medida que incrementa "a". |  <p>A y B= corriente, M y N=Voltage</p> | Buena (intensidad de la señal fuerte) |
| | Sensitiva a cambios verticales (estructuras horizontales). | Profundidad media de investigación (moderada) de aprox. 0.5 veces el espacio "a" | | |
| Schlumberger | Arreglo simétrico | Menor cobertura horizontal que en Dipolo-Dipolo, pero mayor que el Wenner. |  <p>A y B= corriente, M y N=Voltage</p> | Regular (intensidad de la señal media) |
| | Excelente para medios estratificados. | Espaciamiento de electrodos de potencial es pequeño comparado con el de corriente, significa que es muy sensible a las mediciones. | | |
| Polo-Polo | Mejor inyección de corriente, al ser menor número de electrodos activos, a un bajo costo. | Mayor nivel de ruido telúrico, por esta razón no son recomendados espaciamientos demasiado grandes |  <p>A=corriente, M=Voltage</p> | Muy buena (sensitiva al ruido telúrico) |
| | La resistencia de contacto de electrodos al infinito será despreciable. Mayor profundidad de investigación. | | | |

(E. van den Bogaard, 2014)

1.6.6 Georradar GPR

El georradar es dispositivo que emite ondas electromagnéticas con el fin de crear perfiles basándose en el tiempo y calidad de la onda que reflejan los diferentes materiales que componen el suelo (**Figura 1-11**). Estos perfiles deben ser tratados con varios filtros y algoritmos matemáticos para poder determinar si en efecto existe una anomalía en lugar de estudio.

Con este equipo se puede sacar información de forma bastante rápida, ya que este consiste en un carro pequeño que se desplaza por el terreno generando y recibiendo ondas electromagnéticas en varios pulsos por segundo, debido a esta ventaja se considera uno de los mejores instrumentos para la búsqueda de fosas, sin mencionar que tiene una buena relación costo-beneficio. (Sagripanti G. L., Villalba, Aguilera, & Giaccardi, 2017) (Asociación Notio)

Principales ventajas:

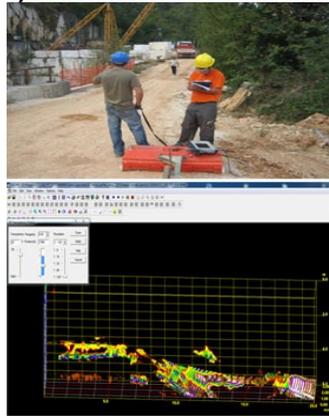
- No altera el suelo de ninguna manera.
- Toma de medidas continua.
- Toma de medidas e interpretación de datos bastante rápida.
- Muy útil para distintas aplicaciones.
- No genera impactos ambientales.

(Asociación Notio)

Principales desventajas:

- Dificultad para aplicar la técnica en terrenos boscosos, montañosos y accidentados, muy comunes en Colombia.

Figura 1-11: a) Toma de Datos b) Perfil obtenido con Georradar.



(Asociación Notio)

1.7 Normatividad vigente

1.7.1 Normatividad forense

Instituto Nacional de Medicina legal y Ciencias Forenses

- RESOLUCIÓN No. 000281 DE 2008
Por medio de la cual se reglamenta el acceso al Sistema de Información Red de Desaparecidos y Cadáveres – SIRDEC. (Franco Maz, 2008)
- RESOLUCIÓN No. 000733 DE 2009
Por la cual se adopta el manual de Identificación de Cadáveres en la Práctica Forense. (Franco Maz, 2009)
- Resolución 00580 del 29 de julio de 2015
Por la cual se adopta el Reglamento de Prácticas Académicas para estudiantes de Instituciones en convenio de cooperación en el Instituto Nacional de Medicina Legal y Ciencias Forenses (Valdes Moreno, 2015)
- RESOLUCIÓN No. 000485 DE 2002
Por medio de la cual se reglamenta el procedimiento para la entrega de cadáveres y componentes anatómicos que se obtengan de los mismos, para fines de docencia e investigación. (Cuevas Zambrano, 2002)
- RESOLUCIÓN No. 001019 DE 2004
Por la cual se adoptan unas guías de procedimientos y reglamento técnico forense. (Duque Piedrahita, 2004)

2 Metodología

2.1 Análisis de instrumentos Tomógrafo y Penetrologger para medir las propiedades físicas del subsuelo.

Para el desarrollo de este proyecto se utilizaron dos equipos principalmente, uno de ellos es un Penetrologger de la marca Eijkelkamp Soil & Water, y el otro es un Tomógrafo Eléctrico de la marca SUBSUELO 3D.

2.1.1 Tomógrafo eléctrico

El Tomógrafo Eléctrico empleado para este proyecto es un dispositivo de alta resolución, versátil con grandes facilidades de manejo y transporte, desarrollado por SUBSUELO 3D, y propiedad de la universidad Antonio Nariño, ver **Figura 2-1**.

Figura 2-1: Tomógrafo Eléctrico UAN: **A.** Consola Geoamp303, **B.** Consola switch AMS001 **C.** equipos en campo ya conectados y en correcto funcionamiento.



Adicionalmente el equipo utilizado en campo tiene como accesorios fundamentales los siguientes componentes: cables conectores, electrodos, fuentes de voltaje y una Computadora. En la Figura **2-2** se aprecia la imagen del montaje de un electrodo en campo.

Figura 2-2: Electrodo en pleno funcionamiento debidamente conectado y en total comunicación con el tomógrafo eléctrico.



El manual de uso y protocolo para la prospección se describe en el **Anexo B**

2.1.2 Penetrologger

El Penetrómetro usado para la adquisición de datos en este proyecto es un penetrómetro electrónico de alta resolución llamado "Penetrologger" que pertenece a la Universidad Antonio Nariño, ver (Figura 2-3)

Figura 2-3: Penetrologger, Eijkelkamp Soil & Water UAN.



El manual de uso y características del equipo se describen con detalle en el **Anexo C** al final del documento.

Como este equipo no ha sido utilizado con el fin de encontrar fosas clandestinas, no se logró encontrar un protocolo de prospección o norma vigente que permita establecer una forma correcta o estandarizada para realizar este procedimiento, por lo que, en base a investigaciones hechas con este equipo en otras áreas del conocimiento, se desarrolló y siguió el protocolo de prospección para fosas descrito en el **Anexo A** al final del documento.

2.2 Visitas de campo y adquisición de datos

2.2.1 Reconocimiento del área de estudio

Se ubica en las coordenadas geográficas N04 40.928 W074 12.798, a 2.579 metros sobre el nivel del mar, en el Centro Agropecuario Marengo, de la Universidad Nacional de Colombia, ubicado a 14 kilómetros aproximadamente de la carretera de occidente que comunica a Bogotá con el municipio de Mosquera, departamento de Cundinamarca (**Figura 2-4**).

Según el IGAC los datos geodésicos del lugar de estudio consisten en una zona rural con ecosistema neotropical perteneciente a la sabana de Bogotá, tiene una temperatura promedio anual de 16 °C y una precipitación de 1.125 m aproximadamente con dos periodos secos y dos lluviosos.

Figura 2-4: Centro Agropecuario Marengo, de la Universidad Nacional de Colombia. Municipio de Mosquera, Sabana de Bogotá (Ubicación GPS Google Earth).



El tipo de terreno que se estudia en este proyecto, es un suelo andisol con sedimentos lacustres y ceniza volcánica que tiene un horizonte superior de materia orgánica seguido de una textura franco arcillosa roja, la geología local corresponde a una terraza fluvio lacustre de la formación Sabana con edad Pleistoceno medio a tardío.

2.2.2 Herramientas y equipos requeridos

- Penetrologger UAN
- Tomógrafo Eléctrico UAN
- Ristras de medición
- Estacas
- Electroodos
- Cinta Métrica
- Multímetro
- Baterías
- Cuaderno de anotación
- Cámara
- Brújula
- Termómetro
- Camioneta para transporte de equipos

2.2.3 Procedimiento en campo

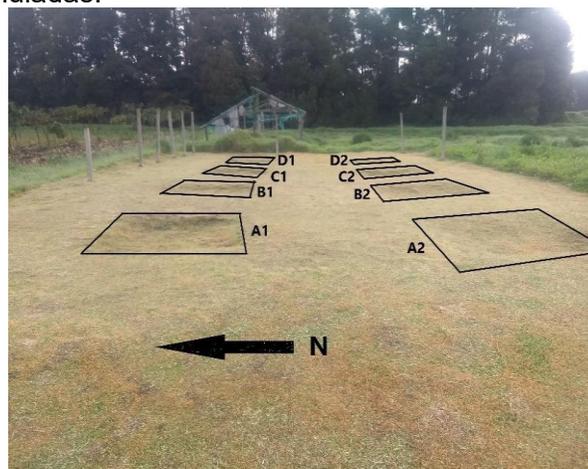
El primer paso para realizar cada salida de campo fue solicitar el préstamo de los equipos a la Universidad Antonio Nariño, la gestión se realizó por parte de la codirectora del proyecto (que hace parte del área de ciencias forenses de la Universidad), ella se encargó de toda la parte logística en estas dos salidas de campo, A continuación, se presenta la **Tabla 2-1**, allí se puede observar todas las características presentadas para cada salida, desde los métodos que fueron aplicados pasando por las fosas estudiadas por cada uno como también las características que presento el entorno en las tres distintas fechas.

Tabla 2-1: Características relevantes para cada salida a campo.

| Salidas a campo | Fecha | Lugar | Métodos aplicados | Fosas estudiadas | Hora de inicio y hora final | Condiciones climáticas |
|-----------------|------------------------------------|--|------------------------------------|------------------|-----------------------------|---|
| Primera | Miércoles, 20 de noviembre de 2019 | Centro agropecuario Marengo, Mosquera Cundinamarca | Tomografía: Wenner y Dipolo-Dipolo | A1, B1, C1, D1 | 6:00 am a 5:50 pm | Clima seco con nubosidad, Temperatura promedio 18 °C |
| | | | Penetración mecánica | D1,D2 | | |
| Segunda | Miércoles, 05 de febrero de 2020 | Centro agropecuario Marengo, Mosquera Cundinamarca | Tomografía: Wenner | A1, B1, C1, D1 | 6:00 am a 4:45 pm | Clima seco con cielo despejado, Temperatura promedio 22°C |
| | | | Penetración mecánica | D1,D2 | | |
| Tercera | Domingo, 16 de febrero de 2020 | Centro agropecuario Marengo, Mosquera Cundinamarca | Tomografía: Dipolo-Dipolo | A1, B1, C1, D1 | 6:00 am a 1:00 pm | Clima seco con cielo cubierto, Temperatura promedio 14 °C |
| | | | Penetración mecánica | D1,D2 | | |

Es importante mencionar que para alcanzar a realizar la toma de datos en cada salida es necesario llegar al Centro Agropecuario Marengo a las 6:00 am y luego de la aplicación de los métodos geofísicos y trabajo en campo, la salida de Marengo fue en promedio a las 5:00 pm, es decir, que para cumplir adecuadamente con la salida de campo se requiere una disponibilidad de 10 horas aproximadamente, la foto de las fosas simuladas se puede ver en la **Figura 2-5**.

Figura 2-5: Fosas simuladas.



Todas las fotos y videos que se registraron en las salidas de campo se pueden consultar en el **Anexo C** y el **Anexo D** al final del documento.

Una vez en campo, con la cinta métrica se empieza a delimitar la malla de prospección (descrita en el **Anexo B**), se toma la medida de temperatura tanto al inicio como al final de la prospección y se comienzan a insertar los electrodos del tomógrafo en el suelo en cada punto de la malla (esta abarca las fosas A1, B1, C1 y D1), a continuación se realiza la instalación de las ristras para cada electrodo y por último se programa el tomógrafo para que inicie con la respectiva toma de datos de resistividad eléctrica, primero se hace para el método Wenner y en seguida el método Dipolo-Dipolo, ver **Figura 2-6**.

Figura 2-6: Instalación del Tomógrafo Eléctrico. 1) Instalación 2) Toma de datos



Este proceso tiene un tiempo de duración aproximando de 1 hora para cada línea de la malla de prospección (5 líneas para cada método). Es necesario llevar un control del nivel carga de las baterías que alimentan al equipo en todo momento, ya que estas se agotan con bastante rapidez en este proceso, es por esto que se recomienda llevar baterías adicionales o un sistema de suministro de energía en próximos proyectos, ver **Figura 2-7**.

Figura 2-7: Consolas del Tomógrafo Eléctrico UAN. 1) En funcionamiento 2) Consolas

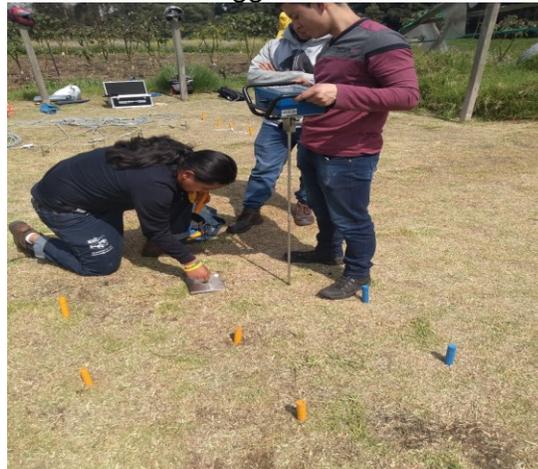


Una vez terminada la toma de datos con el tomógrafo, se inicia la delimitación de la malla de prospección del Penetrologger descrita en el **Anexo A** (esta abarca las fosas D1 y D2), ver **Figura 2-8**, cada punto de la malla es marcado con una estaca clavada en el suelo, se procede con la programación del equipo y posteriormente se comienzan a realizar las penetraciones siguiendo el orden estipulado por el equipo, ver **Figura 2-9**.

Figura 2-8: Delimitación de malla de prospección para Penetrologger. **1)** toma de medida **2)** Estacas de cada punto de penetración



Figura 2-9: Toma de datos con Penetrologger UAN.



2.3 Aplicación de métodos geofísicos en la toma de medición

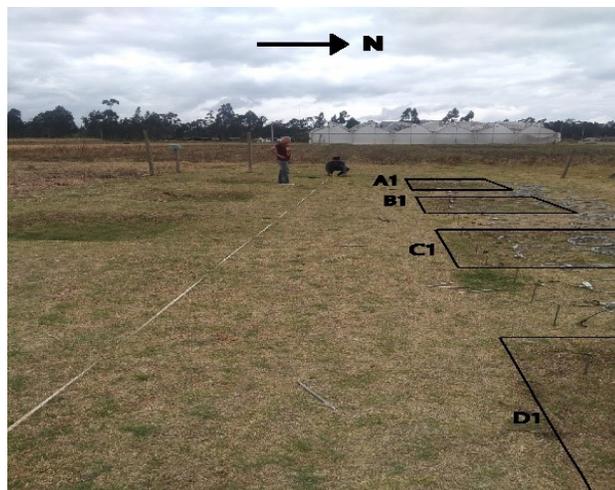
Para la aplicación de métodos geofísicos se realizaron tres salidas de campo para recolectar los datos de las propiedades eléctricas y mecánicas de una serie de fosas simuladas que fueron creadas el 19 de junio de 2013, estas tres expediciones a campo se realizaron en las siguientes fechas:

- Miércoles 20 noviembre 2019
- Miércoles 5 febrero 2020
- Domingo 16 febrero 2020

2.3.1 Tomógrafo eléctrico

La toma de datos para el caso del tomógrafo se desarrolló a lo largo de cuatro fosas simuladas, cada una con unas dimensiones de 2 m x 2 m aproximadamente y con una profundidad de 0.8 m, las fosas poseen las siguientes nomenclaturas y contenidos, A1: cerdo, B1: fosa de control, C1: Esqueleto humano, D1: restos óseos incinerados, ver **Figura 2-10**.

Figura 2-10: Esquema y nomenclatura de fosas y su contenido.



Para establecer la aplicación de métodos geofísicos se crearon cinco líneas de prospección, las cuales tan solo cuatro estuvieron dispuestas sobre las cuatro fosas y una línea que se

simuló sobre un terreno sin enterramientos, esta se le denomina línea de control. Como características principales tenemos que la separación de electrodos es de 0.5 m, asimismo el espaciamiento entre líneas también es de 0.5 m, los puntos en los que se ubicaran los electrodos comparten posición con los puntos para la adquisición de datos mediante el método de penetración mecánica (Penetrologger) esto para la fosa D1.

Estas líneas de prospección cuentan con 32 electrodos a lo largo de las mismas para así abarcar un espacio total de 16 m, con lo cual se asegura que la prospección comprenda las cuatro fosas propuestas, por lo tanto, es fundamental anotar que la puesta del electrodo número 1 se hizo sobre la fosa A1 para así tener el electrodo número 32 en la fosa D1.

Es importante mencionar la fase previa en el alistamiento y colocación de elementos para cada prospección, ver **Figura 2-11**. Como procedimientos más complicados esta la fase de organización de ristras o cables. fue de gran ayuda que en salidas a campo pasadas desarrolladas por la universidad, se lograra establecer un método más organizado para guardar y almacenar el cable, con este nuevo mecanismo la puesta en campo de las ristras tan solo demoro 25 minutos.

En consecuencia, en un promedio de 25 minutos a 30 minutos el equipo se encontraba totalmente conectado y listo para empezar la jornada de trabajo, una parte importante de la aplicación de los métodos geofísicos es la verificación de que efectivamente se esté recolectando datos, para ello se volvió necesario aplicar una supervisión absoluta al programa ya que en ocasiones el proceso se cortó ocasionando una pérdida de tiempo y de energía eléctrica, y por lo cual se tuvo que reiniciar el proceso para esa línea desde cero.

Una vez el equipo es puesto en marcha, es importante tener en cuenta los niveles de energía que tenemos a lo largo de la aplicación de los métodos, ya que la consola de potencia presenta un consumo mayor de energía en comparación con la consola de inyección de corriente y adquisición de datos.

Figura 2-11: Disposición de electrodos para una línea intermedia de prospección.



Es sustancial mencionar el procedimiento desarrollado para guardar la información ya que con este se establece un patrón de operación, esto es posible mediante la creación de plantillas de almacenamiento de datos, la cual se realizó con un mismo patrón de escritura para todos los archivos obtenidos durante todas las salidas a campo, tan solo cambiando los datos necesarios tales como nombre de la línea, método aplicado, fecha y lugar.

La creación del archivo no presentó mayor dificultad pues el programa antes de iniciar cada prospección exige que el usuario otorgue un nombre y una ubicación para el almacenamiento de datos. El programa crea dos archivos por línea en formato DAT, uno de la tabla general de recolección con todas sus variables y otro con el procesamiento, este último es el que nos sirve para el análisis de los resultados. Para ver el protocolo de procesamiento ver **Anexo D**.

A continuación, en la **Tabla 2-2** se describen todos los datos con los que se programó el equipo para la toma de datos.

Tabla 2-2: Nombre de proyectos y métodos aplicados para cada salida.

| Tomógrafo eléctrico | | | | | | | | | | |
|--|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-------------------|-----------------|------------------|--|--|
| Nombre de proyectos para procesamiento | | | | | | | | | | |
| Líneas | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 (CONTROL) | Tamaño de archivo | Tipo de archivo | Fosas estudiadas | | |
| # Electrodos usados | 32 | 32 | 32 | 32 | 32 | | | | | |
| Salida 1: 20 de noviembre de 2019 | | | | | | | | | | |
| Método Dipolo-Dipolo | L1 MARENGO DD 20.11.2019 | L2 MARENGO DD 20.11.2019 | L3 MARENGO DD 20.11.2019 | L4 MARENGO DD 20.11.2019 | L5 MARENGO DD 20.11.2019 | 12 kilobytes | DAT | D1,C1,B1,A1 | | |
| Método Wenner | L1 MARENGO WN 20.11.2019 | L2 MARENGO WN 20.11.2019 | L3 MARENGO WN 20.11.2019 | L4 MARENGO WN 20.11.2019 | L5 MARENGO WN 20.11.2019 | 5 kilobytes | | | | |
| Salida 2: 05 de febrero de 2020 | | | | | | | | | | |
| Método Wenner | L1 MARENGO WN 05.02.2020 | L2 MARENGO WN 05.02.2020 | L3 MARENGO WN 05.02.2020 | L4 MARENGO WN 05.02.2020 | L5 MARENGO WN 05.02.2020 | 5 kilobytes | | | | |
| Salida 3: 16 de febrero de 2020 | | | | | | | | | | |
| Método Dipolo-Dipolo | L1 MARENGO DD 16.02.2020 | L2 MARENGO DD 16.02.2020 | L3 MARENGO DD 16.02.2020 | L4 MARENGO DD 16.02.2020 | L5 MARENGO DD 16.02.2020 | 12 kilobytes | | | | |

2.3.2 Penetrologger

La toma de datos con este equipo se realizó en dos fosas simuladas con forma cuadrada y una medida de 2 m x 2 m aproximadamente, la primera se designó con el nombre “D1” y tiene 80 cm de profundidad, la segunda se le dio el nombre “D2” y cuenta con una profundidad de 120 cm, cada fosa contiene restos óseos incinerados y la simulación de un decapitado, ver **Figura 2-12**.

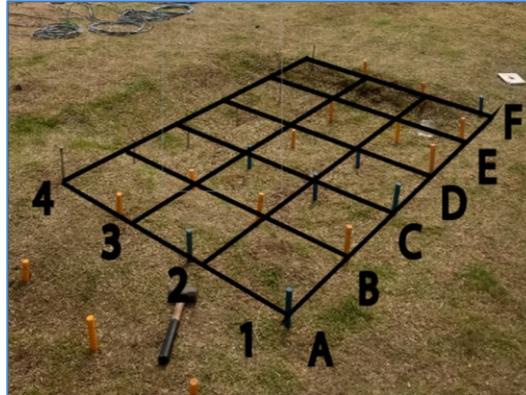
Figura 2-12: Fosas del Penetrologger.



Para poder determinar la frontera que limita cada fosa es necesario tomar datos tanto por dentro como por fuera de la fosa, para esto se diseñó una malla de penetraciones que abarca la totalidad de cada fosa y sobresale de la misma para encontrar diferencias en cada

penetración que puedan indicar la delimitación de las fosas. Esta malla corresponde con la malla usada en tomografía eléctrica para comparar de forma más acertada los resultados que se obtengan de cada equipo, como se muestra en la **Figura 2-13**.

Figura 2-13: Malla de prospección con Penetrologger.



Los datos con los que se programó el equipo se pueden ver en la **Tabla 2-2** a continuación.

Tabla 2-3: Datos de programación del Penetrologger.

| Eijkelkamp Penetroviewer versión 6.08 | | | | | | |
|--|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| <i>Datos Penetrologger</i> | <i>Salida 1</i> | | <i>Salida 2</i> | | <i>Salida 3</i> | |
| <i>Nombre Fosa</i> | <i>D1</i> | <i>D2</i> | <i>D1</i> | <i>D2</i> | <i>D1</i> | <i>D2</i> |
| <i>Nombre proyecto</i> | 20NOVD1 | 20NOVD2 | 5FEBD1 | 5FEBD2 | 16FEBD1 | 16FEBD2 |
| <i>Nombre usuario</i> | UAN | UAN | UAN | UAN | UAN | UAN |
| <i>Fecha parcela</i> | 20-nov-19 | 20-nov-19 | 5-feb-20 | 5-feb-20 | 16-feb-20 | 16-feb-20 |
| <i>Numero parcelas (Líneas)</i> | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 |
| <i>Número penetraciones/parcela</i> | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 |
| <i>Número penetraciones Realizadas</i> | 24 | 24 | 24 | 24 | 24 | 24 |
| <i>Tipo de cono</i> | 3.3cm ² (60°) |
| <i>Unidades profundidad</i> | cm | cm | cm | cm | cm | cm |
| <i>Unidades penetración</i> | Mpa | Mpa | Mpa | Mpa | Mpa | Mpa |

2.4 Análisis y evaluación de los perfiles y datos obtenidos

2.4.1 Análisis de los datos obtenidos con tomógrafo Eléctrico

Todas las tablas y graficas del “Tratamiento de datos del tomógrafo eléctrico” se pueden consultar en el **Anexo E** de este documento. Todos los datos presentados como ejemplo en este análisis corresponden con los datos de una línea de prospección hecha el 20 de noviembre de 2019 para las fosas A1, B1, C1, D1, aplicando los métodos Wenner como técnica base de comparación y Dipolo-Dipolo como técnica de investigación propuesta.

Inicialmente se obtienen los datos de procesamiento de las salidas de campo en formato txt, estos para mayor comprensión se deben tratar en Microsoft Excel, para así conocer con que información se cuenta inicialmente y mediante las herramientas del programa notar los valores máximos y mínimos de resistividad, niveles de profundidad y separación entre electrodos para cada suministro de corriente al subsuelo, esta información ya tratada juega un importante papel a la hora de parametrizar el software de modelamiento.

La extracción de los datos se realizó en la sede circunvalar de la Universidad Antonio Nariño, para ello se tuvo que programar una visita con la cual se garantizó tener el acceso a la computadora de campo y así cuidadosamente seguir la ruta de almacenamiento de datos creada en las salidas de campo, mediante un pendrive se sustraen los archivos de las salidas de manera organizada para así no perder ningún tipo de información.

A continuación, se presenta la **Tabla 2-3** con los datos ya tratados y aplicada la limpieza correctiva. Para efectos de comprensión se destacan solo las columnas las cuales poseen una incidencia directa al momento de tratar la información.

Tabla 2-4: Datos de tomógrafo eléctrico para línea 4 de la salida a campo del día 20/11/2019 aplicando método Wenner y Dipolo-Dipolo. Para observar la tabla completa consultar el Anexo E.

| LÍNEA 4 WENNER | | | | | LÍNEA 4 DIPOLO-DIPOLO | | | | |
|----------------|---|--|---|---|-----------------------|---|---|---|---|
| ítem | Punto en el que se esta tomando la medida (m) | Separación entre electrodos que emiten corriente (m) | Resistividad aparente tomada ($\Omega.m$) | Resistividad organizada de menor a mayor valor ($\Omega.m$) | ítem | Punto en el que se esta tomando la medida (m) | Separación entre electrodos que emiten corriente(m) | Resistividad aparente tomada ($\Omega.m$) | Resistividad organizada de menor a mayor valor ($\Omega.m$) |
| 1 | 0,750 | 0,500 | 20,954 | 15,850 | 1 | 0,750 | 0,500 | 29,441 | 0,012 |
| 2 | 1,250 | 0,500 | 22,495 | 16,014 | 2 | 1,000 | 0,500 | 19,041 | 0,037 |
| 3 | 1,750 | 0,500 | 16,424 | 16,293 | 3 | 1,250 | 0,500 | 18,084 | 0,048 |
| 4 | 2,250 | 0,500 | 19,016 | 16,369 | 4 | 1,500 | 0,500 | 18,233 | 0,073 |
| 5 | 2,750 | 0,500 | 27,326 | 16,424 | 5 | 1,750 | 0,500 | 15,268 | 0,121 |
| 6 | 3,250 | 0,500 | 23,986 | 16,797 | 6 | 2,000 | 0,500 | 15,161 | 0,122 |
| 7 | 3,750 | 0,500 | 32,978 | 16,901 | 7 | 2,250 | 0,500 | 15,784 | 0,243 |
| 8 | 4,250 | 0,500 | 31,561 | 17,024 | 8 | 2,500 | 0,500 | 12,527 | 0,556 |
| 9 | 4,750 | 0,500 | 23,831 | 17,035 | 9 | 1,250 | 0,500 | 15,199 | 0,660 |
| 10 | 5,250 | 0,500 | 25,054 | 17,059 | 10 | 1,500 | 0,500 | 15,106 | 0,662 |
| 11 | 5,750 | 0,500 | 19,989 | 17,459 | 11 | 1,750 | 0,500 | 16,417 | 0,666 |
| 12 | 6,250 | 0,500 | 17,561 | 17,561 | 12 | 2,000 | 0,500 | 14,131 | 0,857 |
| 13 | 6,750 | 0,500 | 24,686 | 17,586 | 13 | 2,250 | 0,500 | 15,944 | 0,866 |
| 14 | 7,250 | 0,500 | 22,895 | 17,680 | 14 | 2,500 | 0,500 | 16,176 | 0,869 |
| 15 | 7,750 | 0,500 | 27,913 | 17,689 | 15 | 2,750 | 0,500 | 12,523 | 0,874 |
| 16 | 8,250 | 0,500 | 33,499 | 17,770 | 16 | 3,000 | 0,500 | 17,890 | 1,096 |
| 17 | 8,750 | 0,500 | 24,515 | 17,832 | 17 | 1,750 | 0,500 | 13,097 | 1,102 |
| 18 | 9,250 | 0,500 | 28,161 | 17,946 | 18 | 2,000 | 0,500 | 18,053 | 1,106 |
| 19 | 9,750 | 0,500 | 18,536 | 18,456 | 19 | 2,250 | 0,500 | 15,535 | 1,109 |
| 20 | 10,250 | 0,500 | 17,024 | 18,490 | 20 | 2,500 | 0,500 | 19,638 | 1,113 |
| 21 | 10,750 | 0,500 | 25,210 | 18,535 | 21 | 2,750 | 0,500 | 18,875 | 1,116 |
| 22 | 11,250 | 0,500 | 18,960 | 18,536 | 22 | 3,000 | 0,500 | 15,988 | 1,319 |
| 23 | 11,750 | 0,500 | 28,375 | 18,572 | 23 | 3,250 | 0,500 | 20,284 | 1,327 |
| 24 | 12,250 | 0,500 | 25,951 | 18,573 | 24 | 3,500 | 0,500 | 7,625 | 1,327 |
| 25 | 12,750 | 0,500 | 20,245 | 18,648 | 25 | 2,250 | 0,500 | 7,489 | 1,335 |

- **Primera columna (de izquierda a derecha):** corresponde al número de datos con los cuales se dispone a realizar el desarrollo del procesamiento.
- **Segunda columna (de izquierda a derecha):** punto en metros donde se está tomando la medida, se toma como referencia el sitio en el que se encuentra puesto el primer electrodo.
- **Tercera columna (de izquierda a derecha):** corresponde a la separación que presentan los electrodos que emiten corriente al subsuelo, esta distancia aumenta dependiendo el nivel aplicado para el método.
- **Cuarta columna (de izquierda a derecha):** Será el dato de resistividad aparente otorgado por el subsuelo y captado por el equipo de campo.
- **Quinta columna (de izquierda a derecha):** Será el dato de resistividad aparente organizado de menor a mayor.

Conociendo las variables y datos ya obtenidos se procede a ejecutar la simulación, para ello se deben tener consideraciones fundamentales para el tratamiento y limpieza de los datos, se puede consultar este procedimiento detallado en el **Anexo D** de este documento.

Una vez ya ejecutado el procedimiento y con los archivos modificados adecuadamente, los cuales no deben presentar anomalías se procede a realizar la simulación de los perfiles obtenidos, mediante el software geofísico de resistividad **ZonDRes2D** y utilizando los datos en formato txt.

Acerca del programa utilizado para el procesamiento de datos obtenidos se puede decir que este un programa versátil y liviano de origen ruso, creado en San Petersburgo y capaz de realizar una interpretación bidimensional de datos de tomografía eléctrica por resistividad, además si se quiere se puede aplicar métodos de polarización inducida en casos donde se requiera analizar tierra, pozos y agua. El programa no presenta mayor dificultad en su manejo ya que cuenta con el idioma ingles y además está acompañado de un manual elaborado también en inglés. Tanto las imágenes obtenidas como la corrección de los datos se realizan de manera práctica y entendible.

Para el caso de la simulación fue necesario guiarse por el manual del programa y también por archivos de tipo paso a paso adecuados para al ámbito forense, algunos de estos documentos fueron elaborados por el estudiante egresado de la universidad Antonio Nariño, Andrés Suárez y docentes especialistas en este ámbito, Realmente fue una ayuda muy importante contar con el manual de parámetros, en este encontramos una guía muy detallada acerca de la limpieza y preparación de la información.

Aplicando los condicionantes principales como los son: Método de inversión (*Smoothness constrained*), Angulo de corte para imagen 2D (*Cutting*) y Modelo de visualización (*smooth-section*), los cuales fueron ajustados para cada línea procesada teniendo en cuenta sus valores de resistividad y tipos de métodos. Para ver todos los parámetros programados para la simulación de cada línea, consultar el **Anexo D**.

Una vez hecho esto se obtienen las siguientes simulaciones, en la **Figura 2-14** para el método Wenner y en la **Figura 2-15** para el método Dipolo-Dipolo.

Para mayor entendimiento del desarrollo metodológico, se presentarán las simulaciones para línea 4 en la cual se encuentran los enterramientos simulados y además se mostrará la línea 5 o también llamada de control, esto se hace necesario ya que así se podrá diferenciar los comportamientos que presenta el subsuelo en relación a la variable resistividad eléctrica para cuando este análisis se desarrolle dentro o fuera de la fosa.

Para entender las figuras se debe anotar que estas se rigen bajo una escala de colores de tipo RGB, las cuales están dispuestas así:

- Color azul: Representa un nivel bajo de resistividad eléctrica
- Color verde-amarillo: Representa un nivel medio de resistividad eléctrica
- Color fucsia: Representa niveles altos de resistividad

Asimismo, la simulación es entregada bajo una escala de distancias ubicadas a manera de grafica de la siguiente manera:

- Eje Y: Nivel de profundidad de prospección dada en metros
- Eje x: Longitud abarcada en campo para la prospección

En la **Figura 2-14** se presenta el modelamiento de inversión para Wenner, el cual cuenta con características principales de parametrización, en su rango de inversión se le aplico al valor máximo de resistividad un aumento de $10 \Omega\text{m}$, para ver todos los parámetros y tratamientos aplicados consultar **Anexo D**.

Figura 2-14: Modelamiento para la línea 4 aplicando método Wenner. Dentro de la fosa

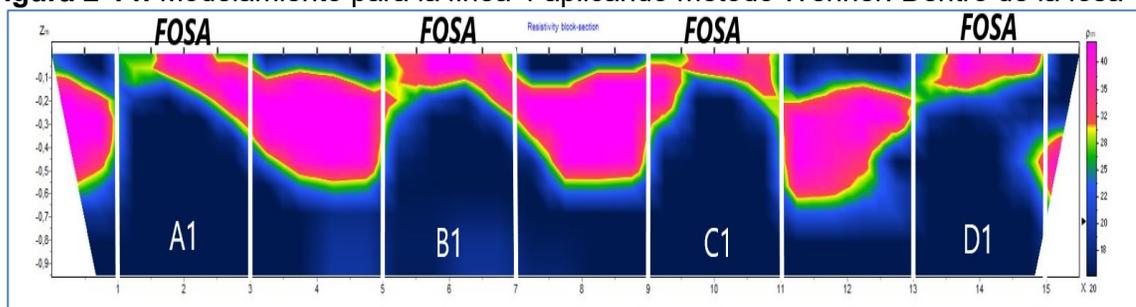
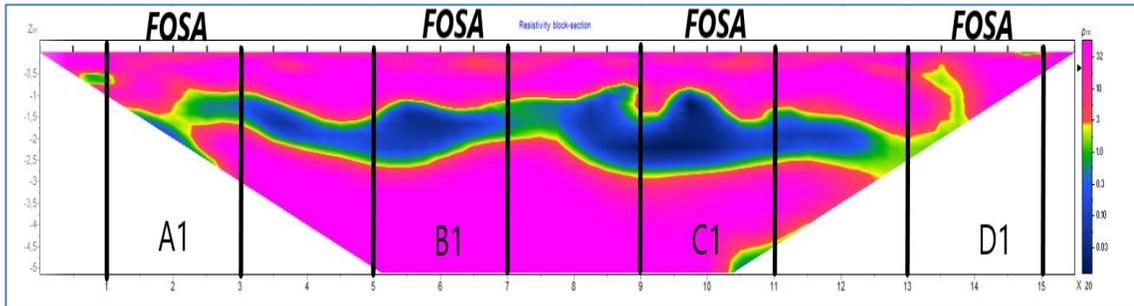


Figura 2-15: Modelamiento para la línea 4 aplicando el método Dipolo-Dipolo. Dentro de la fosa



Con las imágenes en dos dimensiones obtenidas para estas líneas se procede a realiza el escalamiento por fosas, ver **Figura 2-16** y **Figura 2-17**, pero en este caso para la línea 5 de la salida del día 20 de noviembre de 2019. Esta línea comprende una característica especial y es que fue desarrollada en una zona de control o zona en la cual no se ha presentado enterramiento o remoción de terreno.

Figura 2-16: Modelamiento para la línea 5 (control) aplicando método Wenner. Fuera de la fosa

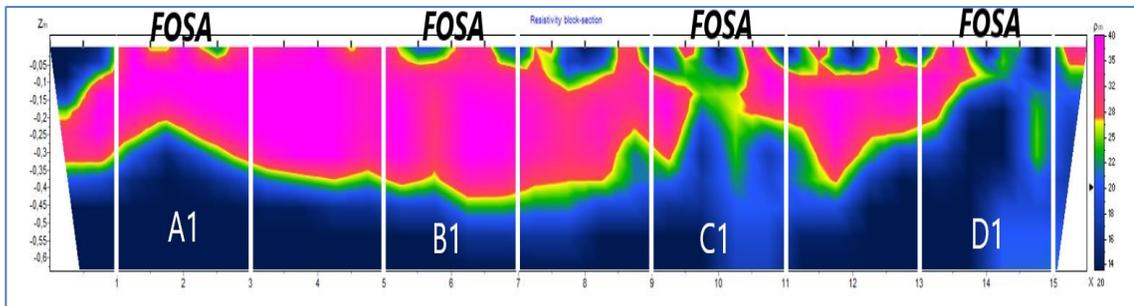
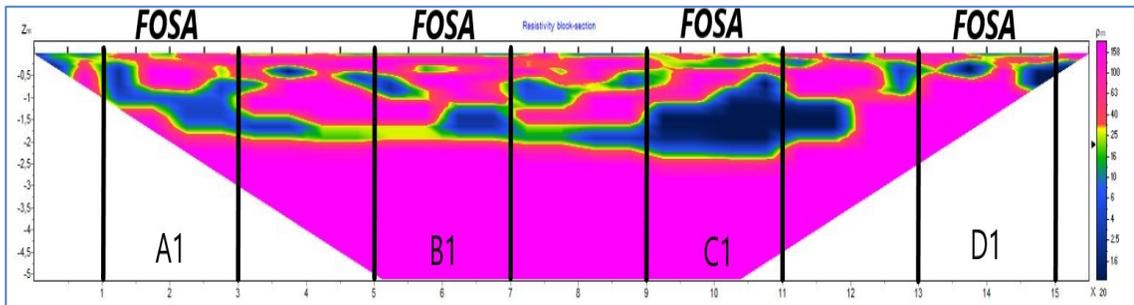


Figura 2-17: Modelamiento para la línea 5 (control) aplicando método Dipolo-Dipolo. Fuera de la fosa.



Para el procesamiento y visualización de resultados también fue importante hacer uso de la herramienta otorgada por el programa de modelamiento 3D, con este procedimiento se pueden realizar comparaciones de una manera más rápida y eficiente. Ya que el diseño en tres dimensiones ofrece la creación de parámetros tales como el espaciamiento entre líneas, cortes transversales y sistemas multi-lineales de visualización.

A continuación, se presenta la **Figura 2-18**, en la cual se realiza el modelamiento 3D para las líneas 4 y 5 aplicando el método Wenner, en la **Figura 2-19**, se realiza el modelamiento 3D para las líneas 4 y 5 aplicando el método Dipolo-Dipolo.

Figura 2-18: Modelamiento 3D para línea 4 y línea 5 aplicando método Wenner.

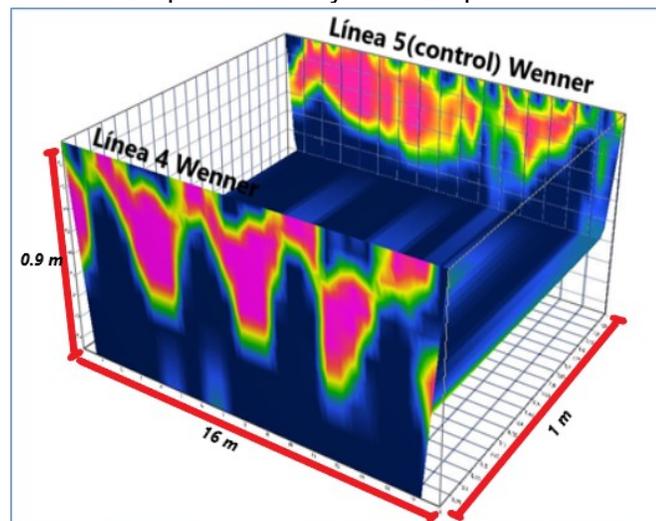
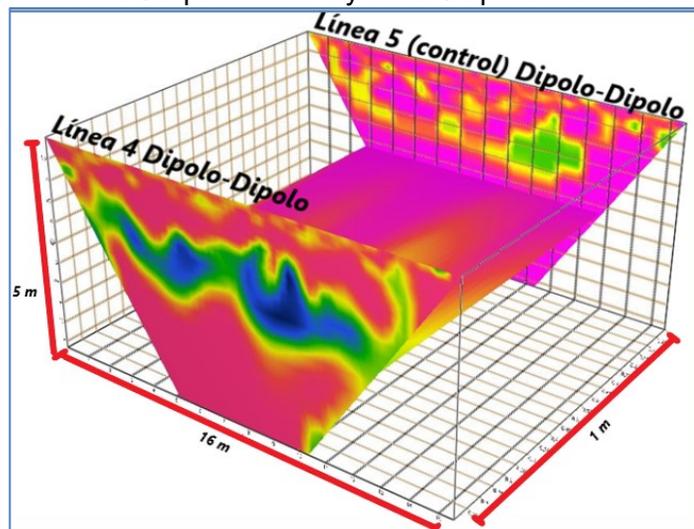


Figura 2-19: Modelamiento 3D para línea 4 y línea 5 aplicando método Dipolo-Dipolo.



2.4.2 Análisis de los datos obtenidos con Penetrologger

Todas las tablas y graficas del tratamiento de datos del Penetrologger se pueden consultar en el **Anexo C** de este documento.

El análisis de los datos del Penetrologger se realizó en el siguiente orden:

- Tabulación de datos en Excel con escala de colores.
- Perfiles de cada una de las penetraciones con líneas de tendencia.
- Tabulación del promedio de penetraciones para cada punto de la malla de prospección entre las tres salidas de campo.
- Perfiles del promedio de cada punto de la malla de prospección entre las tres salidas de campo.
- Superposición de perfiles para cada línea de la malla de prospección (6 penetraciones).
- Tablas del promedio de penetraciones al interior y exterior de las fosas para cada línea con desviación estándar.
- Perfiles del promedio de penetraciones de cada línea con desviación estándar y línea de tendencia.
- Superposición de perfiles promedio de cada línea (4 líneas) al interior y exterior de cada fosa.
- Tablas promedio de perfiles de líneas en la totalidad de cada fosa.
- Perfiles promedio de la totalidad de cada fosa al interior y exterior.
- Análisis estadísticos ANOVA del promedio de datos global de las fosas.
- Tablas del promedio de penetraciones global de las fosas al interior y exterior con desviación estándar.
- Perfiles definitivos del promedio global de las fosas al interior y exterior con desviación estándar, línea de tendencia y modelo matemático.

Para realizar el respectivo tratamiento se extrajeron los datos del Penetrologger a través del software Penetroviewer 6.08 al PC y posteriormente usando Excel se crearon tablas como se muestra en la **Tabla 2-5**. Cada columna corresponde a una penetración o punto de la malla de prospección (A, B, C, D, E y F) y cada fila representa el nivel de profundidad alcanzado por el equipo en cada penetración.

Esta tabla tiene incluida una escala de colores que permite ver con mayor detalle el cambio en el valor de la resistencia mecánica en cada columna. Las columnas A y F son las penetraciones que se encuentran por fuera de la fosa, por lo que se espera presenten tonos de colores más rojos que las demás. Las celdas que aparecen en blanco son niveles de profundidad que el Penetrologger no lo logro alcanzar, esto se debe a una resistencia mecánica demasiado alta o a que existe en el terreno algún objeto rígido que interrumpe el recorrido de penetración hecho por el equipo.

Tabla 2-5: Datos del Penetrologger Línea 1 (Fosa D1).

| GPS | N04 40,929 W074 12,798 | N04 40,929 W074 12,799 | N04 40,928 W074 12,799 | N04 40,927 W074 12,800 | N04 40,927 W074 12,800 | N04 40,927 W074 12,800 |
|--------------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| DATOS DEL PENETROLOGGER | | | | | | |
| <i>Profundida d</i> | <i>A</i> | <i>B</i> | <i>C</i> | <i>D</i> | <i>E</i> | <i>F</i> |
| 0 cm | 0,6 MPa | 0,2 MPa | 0,3 MPa | 0,3 MPa | 0,5 MPa | 0,3 MPa |
| 1 cm | 0,8 MPa | 0,3 MPa | 0,7 MPa | 0,3 MPa | 0,5 MPa | 0,6 MPa |
| 2 cm | 0,9 MPa | 0,4 MPa | 0,7 MPa | 0,7 MPa | 0,5 MPa | 0,8 MPa |
| 3 cm | 0,9 MPa | 0,4 MPa | 0,4 MPa | 0,8 MPa | 0,6 MPa | 0,8 MPa |
| 4 cm | 0,8 MPa | 0,4 MPa | 0,4 MPa | 0,7 MPa | 0,6 MPa | 0,8 MPa |
| 5 cm | 0,8 MPa | 0,4 MPa | 0,4 MPa | 0,7 MPa | 0,6 MPa | 0,8 MPa |
| 6 cm | 0,8 MPa | 0,4 MPa | 0,4 MPa | 0,7 MPa | 0,6 MPa | 0,8 MPa |
| 7 cm | 0,8 MPa | 0,4 MPa | 0,4 MPa | 0,7 MPa | 0,5 MPa | 0,6 MPa |
| 8 cm | 0,8 MPa | 0,4 MPa | 0,4 MPa | 0,7 MPa | 0,5 MPa | 0,6 MPa |
| 9 cm | 0,8 MPa | 0,4 MPa | 0,4 MPa | 0,7 MPa | 0,5 MPa | 0,6 MPa |
| 10 cm | 0,8 MPa | 0,4 MPa | 0,4 MPa | 0,7 MPa | 0,5 MPa | 0,6 MPa |
| 11 cm | 0,8 MPa | 0,4 MPa | 0,4 MPa | 0,6 MPa | 0,5 MPa | 0,6 MPa |
| 12 cm | 0,8 MPa | 0,4 MPa | 0,4 MPa | 0,6 MPa | 0,5 MPa | 0,6 MPa |
| 13 cm | 0,7 MPa | 0,4 MPa | 0,4 MPa | 0,6 MPa | 0,5 MPa | 0,6 MPa |
| 14 cm | 0,7 MPa | 0,4 MPa | 0,4 MPa | 0,5 MPa | 0,5 MPa | 0,7 MPa |
| 15 cm | 0,7 MPa | 0,4 MPa | 0,4 MPa | 0,5 MPa | 0,4 MPa | 0,7 MPa |
| 16 cm | 0,9 MPa | 0,4 MPa | 0,4 MPa | 0,5 MPa | 0,4 MPa | 0,7 MPa |
| 17 cm | 0,9 MPa | 0,4 MPa | 0,3 MPa | 0,5 MPa | 0,4 MPa | 0,9 MPa |
| 18 cm | 0,9 MPa | 0,4 MPa | 0,3 MPa | 0,5 MPa | 0,4 MPa | 0,9 MPa |
| 19 cm | 0,9 MPa | 0,4 MPa | 0,3 MPa | 0,5 MPa | 0,4 MPa | 0,8 MPa |
| 20 cm | 1,0 MPa | 0,4 MPa | 0,3 MPa | 0,5 MPa | 0,4 MPa | 0,9 MPa |
| 21 cm | 1,0 MPa | 0,4 MPa | 0,3 MPa | 0,5 MPa | 0,4 MPa | 0,9 MPa |
| 22 cm | 1,0 MPa | 0,3 MPa | 0,3 MPa | 0,5 MPa | 0,3 MPa | 0,9 MPa |
| 23 cm | 0,9 MPa | 0,3 MPa | 0,3 MPa | 0,5 MPa | 0,3 MPa | 0,9 MPa |
| 24 cm | 0,9 MPa | 0,3 MPa | 0,3 MPa | 0,5 MPa | 0,3 MPa | 0,9 MPa |
| 25 cm | 0,9 MPa | 0,3 MPa | 0,3 MPa | 0,3 MPa | 0,3 MPa | 0,9 MPa |
| 26 cm | 0,9 MPa | 0,3 MPa | 0,3 MPa | 0,3 MPa | 0,2 MPa | 0,9 MPa |
| 27 cm | 0,8 MPa | 0,3 MPa | 0,3 MPa | 0,3 MPa | 0,2 MPa | 1,0 MPa |
| 28 cm | 1,0 MPa | 0,2 MPa | 0,3 MPa | 0,3 MPa | 0,2 MPa | 1,0 MPa |
| 29 cm | 0,8 MPa | 0,2 MPa | 0,3 MPa | 0,3 MPa | 0,2 MPa | 1,0 MPa |
| 30 cm | 0,9 MPa | 0,2 MPa | 0,3 MPa | 0,3 MPa | 0,2 MPa | 1,0 MPa |
| 31 cm | 1,1 MPa | 0,2 MPa | 0,3 MPa | 0,3 MPa | 0,2 MPa | 1,1 MPa |
| 32 cm | 1,3 MPa | 0,1 MPa | 0,2 MPa | 0,3 MPa | 0,2 MPa | 1,1 MPa |
| 33 cm | 0,7 MPa | 0,1 MPa | 0,2 MPa | 0,3 MPa | 0,2 MPa | 1,1 MPa |
| 34 cm | | 0,1 MPa | 0,2 MPa | 0,3 MPa | 0,2 MPa | 1,1 MPa |
| 35 cm | | 0,1 MPa | 0,2 MPa | 0,3 MPa | 0,2 MPa | 1,1 MPa |
| 36 cm | | 0,1 MPa | 0,2 MPa | 0,3 MPa | 0,2 MPa | 1,2 MPa |
| 37 cm | | 0,1 MPa | 0,2 MPa | 0,3 MPa | 0,2 MPa | 1,2 MPa |
| 38 cm | | 0,1 MPa | 0,2 MPa | 0,3 MPa | 0,2 MPa | 1,2 MPa |
| 39 cm | | 0,1 MPa | 0,2 MPa | 0,3 MPa | 0,2 MPa | 1,1 MPa |
| 40 cm | | 0,1 MPa | 0,2 MPa | 0,3 MPa | 0,2 MPa | 1,1 MPa |

ESQUEMA DE COLORES

| | | |
|----------------------------------|-----------------------------------|----------------------------------|
| RESISTENCIA MECÁNICA BAJA | RESISTENCIA MECÁNICA MEDIA | RESISTENCIA MECÁNICA ALTA |
|----------------------------------|-----------------------------------|----------------------------------|

Para ver la tabla completa consultar **Anexo C**.

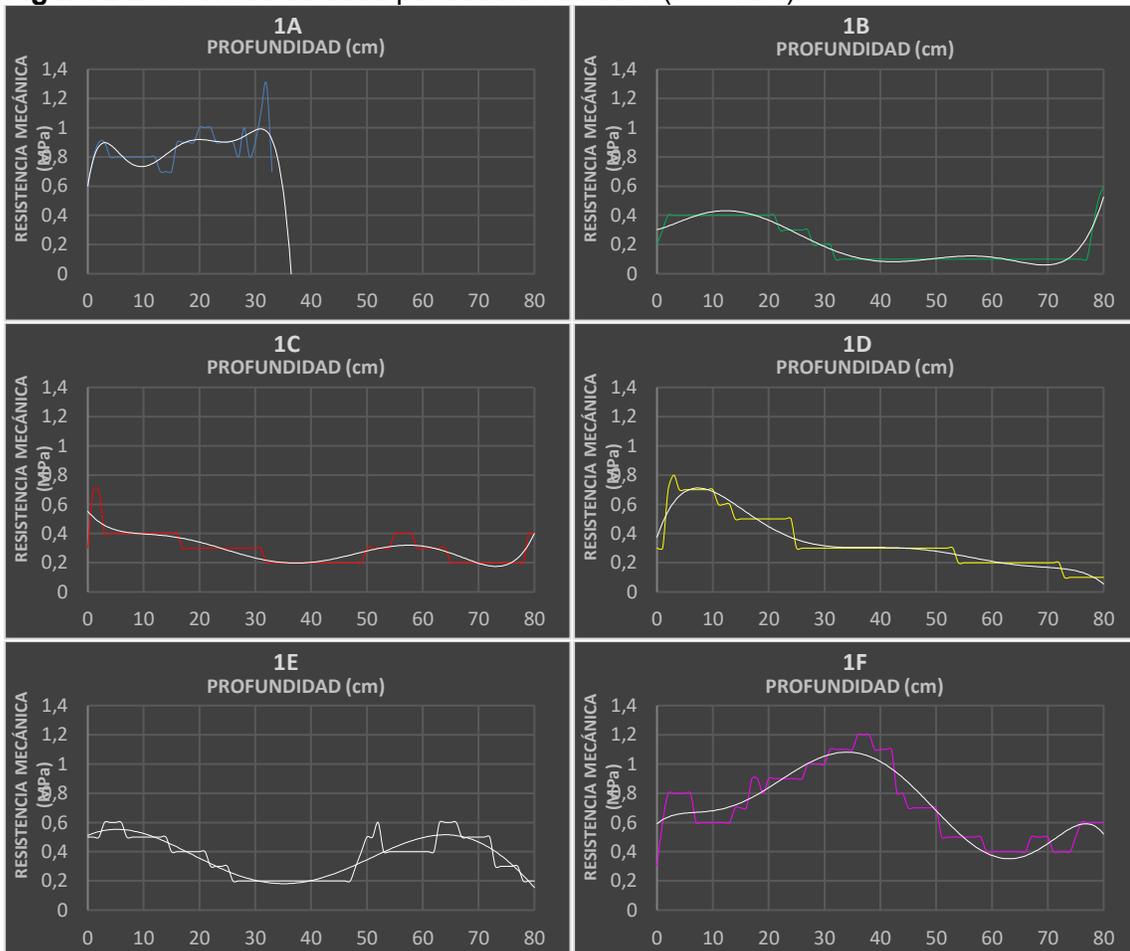
Usando las tablas se crearon perfiles de “Profundidad vs Resistencia mecánica” para cada penetración, como se muestra en la **Figura 2-20**.

Cada perfil muestra como varía la resistencia mecánica con respecto a la profundidad, se asignó un color para cada penetración:

- A: Azul
- B: Verde
- C: Rojo
- D: Amarillo
- E: Blanco
- F: Violeta

Se añadió una línea de tendencia a cada perfil con el fin de ver el comportamiento de la resistencia con respecto a la profundidad.

Figura 2-20: Perfiles de cada penetración Línea 1 (Fosa D1).



Se elaboran tablas del promedio de penetraciones de cada punto de la malla de prospección entre las tres salidas de campo con su desviación estándar como se observa en la **Tabla 2-6**, esto nos brinda información de la variación y comportamiento de los datos involucrando el cambio de las condiciones climáticas en cada salida de campo.

Tabla 2-6: Promedio de cada punto de la malla, Línea 1 (Fosa D1).

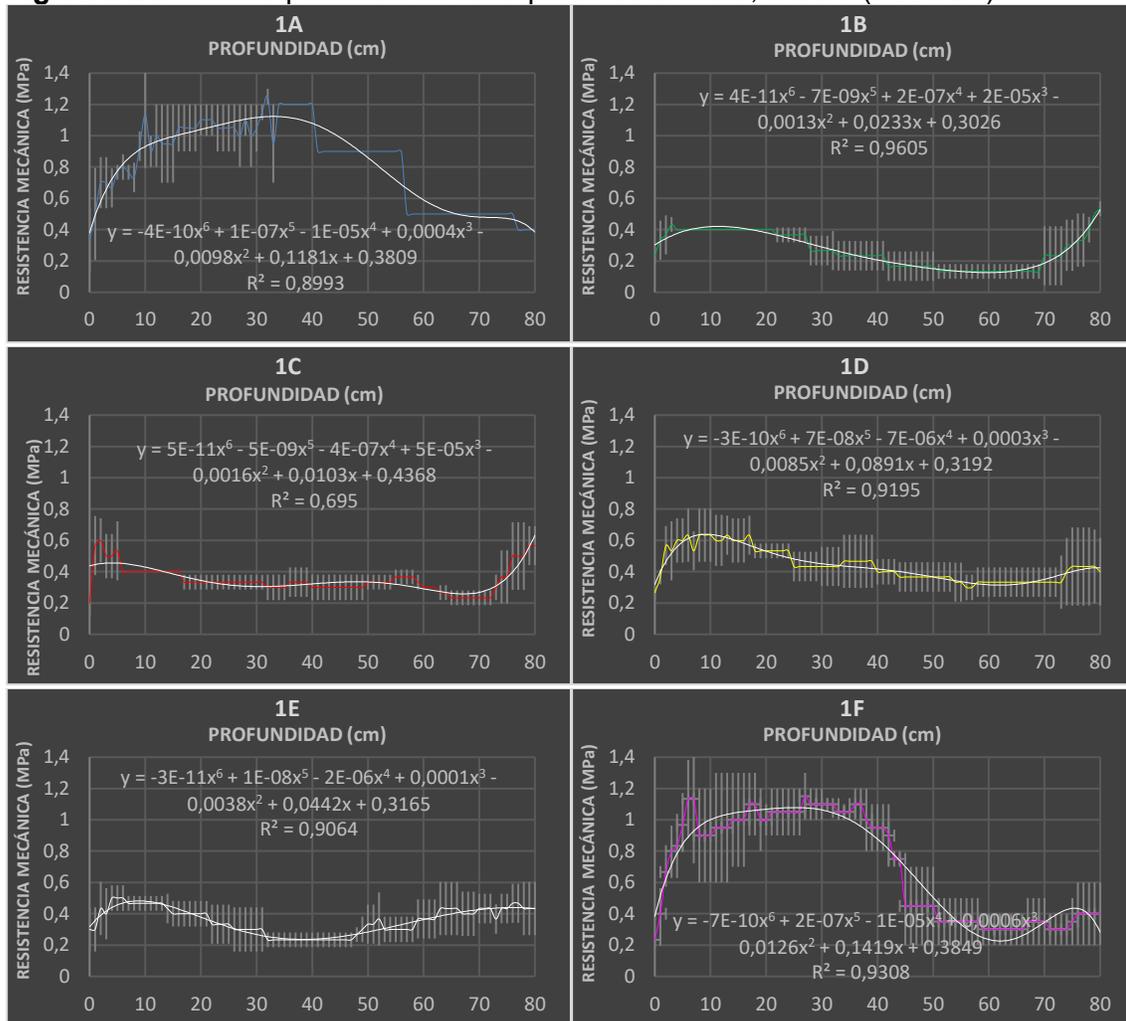
| DATOS DEL PENETROLOGGER | | | | | | | | | | | | |
|-------------------------|---------|---------------------|---------|---------------------|---------|---------------------|---------|---------------------|---------|---------------------|---------|---------------------|
| Profundidad | A | Desviación Estándar | B | Desviación Estándar | C | Desviación Estándar | D | Desviación Estándar | E | Desviación Estándar | F | Desviación Estándar |
| 0 cm | 0,3 MPa | 0,205480467 | 0,2 MPa | 0,047140452 | 0,2 MPa | 0,081649658 | 0,3 MPa | 0,047140452 | 0,3 MPa | 0,141421356 | 0,2 MPa | 0,047140452 |
| 1 cm | 0,5 MPa | 0,294392029 | 0,3 MPa | 0,124721913 | 0,6 MPa | 0,188561808 | 0,4 MPa | 0,047140452 | 0,3 MPa | 0,141421356 | 0,4 MPa | 0,163299316 |
| 2 cm | 0,7 MPa | 0,163299316 | 0,4 MPa | 0,124721913 | 0,6 MPa | 0,141421356 | 0,6 MPa | 0,124721913 | 0,4 MPa | 0,169967317 | 0,7 MPa | 0,094280904 |
| 3 cm | 0,7 MPa | 0,163299316 | 0,4 MPa | 0,047140452 | 0,5 MPa | 0,141421356 | 0,5 MPa | 0,188561808 | 0,4 MPa | 0,163299316 | 0,8 MPa | 0,163299316 |
| 4 cm | 0,7 MPa | 0,124721913 | 0,4 MPa | 5,55112E-17 | 0,5 MPa | 0,141421356 | 0,6 MPa | 0,141421356 | 0,5 MPa | 0,081649658 | 0,8 MPa | 0,205480467 |
| 5 cm | 0,8 MPa | 0,047140452 | 0,4 MPa | 5,55112E-17 | 0,5 MPa | 0,188561808 | 0,6 MPa | 0,141421356 | 0,5 MPa | 0,081649658 | 1,0 MPa | 0,169967317 |
| 6 cm | 0,8 MPa | 0,081649658 | 0,4 MPa | 5,55112E-17 | 0,4 MPa | 5,55112E-17 | 0,6 MPa | 0,169967317 | 0,5 MPa | 0,081649658 | 1,1 MPa | 0,249443826 |
| 7 cm | 0,8 MPa | 0,047140452 | 0,4 MPa | 5,55112E-17 | 0,4 MPa | 5,55112E-17 | 0,5 MPa | 0,124721913 | 0,5 MPa | 0,047140452 | 1,1 MPa | 0,410960934 |
| 8 cm | 0,7 MPa | 0,094280904 | 0,4 MPa | 5,55112E-17 | 0,4 MPa | 5,55112E-17 | 0,6 MPa | 0,169967317 | 0,5 MPa | 0,047140452 | 0,9 MPa | 0,3 |
| 9 cm | 0,9 MPa | 0,094280904 | 0,4 MPa | 5,55112E-17 | 0,4 MPa | 5,55112E-17 | 0,6 MPa | 0,169967317 | 0,5 MPa | 0,047140452 | 0,9 MPa | 0,3 |
| 10 cm | 1,1 MPa | 0,339934634 | 0,4 MPa | 5,55112E-17 | 0,4 MPa | 5,55112E-17 | 0,6 MPa | 0,169967317 | 0,5 MPa | 0,047140452 | 0,9 MPa | 0,3 |
| 11 cm | 0,9 MPa | 0,1 | 0,4 MPa | 5,55112E-17 | 0,4 MPa | 5,55112E-17 | 0,6 MPa | 0,163299316 | 0,5 MPa | 0,047140452 | 1,0 MPa | 0,35 |
| 12 cm | 1,0 MPa | 0,2 | 0,4 MPa | 5,55112E-17 | 0,4 MPa | 5,55112E-17 | 0,6 MPa | 0,163299316 | 0,5 MPa | 0,047140452 | 1,0 MPa | 0,35 |
| 13 cm | 1,0 MPa | 0,25 | 0,4 MPa | 5,55112E-17 | 0,4 MPa | 5,55112E-17 | 0,6 MPa | 0,124721913 | 0,5 MPa | 0,047140452 | 1,0 MPa | 0,35 |
| 14 cm | 1,0 MPa | 0,25 | 0,4 MPa | 5,55112E-17 | 0,4 MPa | 5,55112E-17 | 0,6 MPa | 0,141421356 | 0,4 MPa | 0,094280904 | 1,0 MPa | 0,3 |
| 15 cm | 1,0 MPa | 0,25 | 0,4 MPa | 5,55112E-17 | 0,4 MPa | 5,55112E-17 | 0,6 MPa | 0,141421356 | 0,4 MPa | 0,081649658 | 1,0 MPa | 0,3 |
| 16 cm | 1,1 MPa | 0,15 | 0,4 MPa | 5,55112E-17 | 0,4 MPa | 5,55112E-17 | 0,6 MPa | 0,141421356 | 0,4 MPa | 0,081649658 | 1,0 MPa | 0,3 |
| 17 cm | 1,1 MPa | 0,15 | 0,4 MPa | 5,55112E-17 | 0,3 MPa | 0,047140452 | 0,6 MPa | 0,124721913 | 0,4 MPa | 0,081649658 | 1,1 MPa | 0,2 |
| 18 cm | 1,1 MPa | 0,15 | 0,4 MPa | 5,55112E-17 | 0,3 MPa | 0,047140452 | 0,5 MPa | 0,047140452 | 0,4 MPa | 0,081649658 | 1,1 MPa | 0,2 |
| 19 cm | 1,1 MPa | 0,15 | 0,4 MPa | 5,55112E-17 | 0,3 MPa | 0,047140452 | 0,5 MPa | 0,047140452 | 0,4 MPa | 0,081649658 | 1,0 MPa | 0,2 |
| 20 cm | 1,1 MPa | 0,1 | 0,4 MPa | 5,55112E-17 | 0,3 MPa | 0,047140452 | 0,5 MPa | 0,047140452 | 0,4 MPa | 0,081649658 | 1,0 MPa | 0,1 |
| 21 cm | 1,1 MPa | 0,1 | 0,4 MPa | 5,55112E-17 | 0,3 MPa | 0,047140452 | 0,5 MPa | 0,047140452 | 0,4 MPa | 0,081649658 | 1,1 MPa | 0,15 |
| 22 cm | 1,1 MPa | 0,1 | 0,4 MPa | 0,047140452 | 0,3 MPa | 0,047140452 | 0,5 MPa | 0,047140452 | 0,3 MPa | 0,124721913 | 1,1 MPa | 0,15 |
| 23 cm | 1,1 MPa | 0,15 | 0,4 MPa | 0,047140452 | 0,3 MPa | 0,047140452 | 0,5 MPa | 0,047140452 | 0,3 MPa | 0,124721913 | 1,1 MPa | 0,15 |
| 24 cm | 1,1 MPa | 0,15 | 0,4 MPa | 0,047140452 | 0,3 MPa | 0,047140452 | 0,5 MPa | 0,047140452 | 0,3 MPa | 0,124721913 | 1,1 MPa | 0,15 |
| 25 cm | 1,1 MPa | 0,15 | 0,4 MPa | 0,047140452 | 0,3 MPa | 0,047140452 | 0,4 MPa | 0,094280904 | 0,3 MPa | 0,124721913 | 1,1 MPa | 0,15 |
| 26 cm | 1,1 MPa | 0,15 | 0,4 MPa | 0,047140452 | 0,3 MPa | 0,047140452 | 0,4 MPa | 0,094280904 | 0,3 MPa | 0,141421356 | 1,1 MPa | 0,15 |
| 27 cm | 1,0 MPa | 0,2 | 0,4 MPa | 0,047140452 | 0,3 MPa | 0,047140452 | 0,4 MPa | 0,094280904 | 0,3 MPa | 0,141421356 | 1,2 MPa | 0,15 |
| 28 cm | 1,1 MPa | 0,1 | 0,3 MPa | 0,094280904 | 0,3 MPa | 0,047140452 | 0,4 MPa | 0,094280904 | 0,3 MPa | 0,141421356 | 1,1 MPa | 0,1 |
| 29 cm | 1,0 MPa | 0,2 | 0,3 MPa | 0,094280904 | 0,3 MPa | 0,047140452 | 0,4 MPa | 0,094280904 | 0,3 MPa | 0,141421356 | 1,1 MPa | 0,1 |
| 30 cm | 1,1 MPa | 0,15 | 0,3 MPa | 0,094280904 | 0,3 MPa | 0,047140452 | 0,4 MPa | 0,124721913 | 0,3 MPa | 0,141421356 | 1,1 MPa | 0,1 |
| 31 cm | 1,2 MPa | 0,05 | 0,3 MPa | 0,094280904 | 0,3 MPa | 0,047140452 | 0,4 MPa | 0,124721913 | 0,3 MPa | 0,141421356 | 1,1 MPa | 0 |
| 32 cm | 1,3 MPa | 0,05 | 0,3 MPa | 0,124721913 | 0,3 MPa | 0,081649658 | 0,4 MPa | 0,124721913 | 0,2 MPa | 0,047140452 | 1,1 MPa | 0 |
| 33 cm | 1,0 MPa | 0,25 | 0,2 MPa | 0,094280904 | 0,3 MPa | 0,081649658 | 0,4 MPa | 0,124721913 | 0,2 MPa | 0,047140452 | 1,1 MPa | 0,05 |
| 34 cm | 1,2 MPa | 0 | 0,2 MPa | 0,094280904 | 0,3 MPa | 0,081649658 | 0,5 MPa | 0,169967317 | 0,2 MPa | 0,047140452 | 1,1 MPa | 0,05 |
| 35 cm | 1,2 MPa | 0 | 0,2 MPa | 0,094280904 | 0,3 MPa | 0,081649658 | 0,5 MPa | 0,169967317 | 0,2 MPa | 0,047140452 | 1,1 MPa | 0,05 |
| 36 cm | 1,2 MPa | 0 | 0,2 MPa | 0,094280904 | 0,3 MPa | 0,094280904 | 0,5 MPa | 0,169967317 | 0,2 MPa | 0,047140452 | 1,1 MPa | 0,1 |
| 37 cm | 1,2 MPa | 0 | 0,2 MPa | 0,094280904 | 0,3 MPa | 0,094280904 | 0,5 MPa | 0,169967317 | 0,2 MPa | 0,047140452 | 1,1 MPa | 0,1 |
| 38 cm | 1,2 MPa | 0 | 0,2 MPa | 0,094280904 | 0,3 MPa | 0,094280904 | 0,5 MPa | 0,169967317 | 0,2 MPa | 0,047140452 | 1,0 MPa | 0,2 |
| 39 cm | 1,2 MPa | 0 | 0,2 MPa | 0,094280904 | 0,3 MPa | 0,094280904 | 0,5 MPa | 0,169967317 | 0,2 MPa | 0,047140452 | 1,0 MPa | 0,15 |
| 40 cm | 1,2 MPa | 0 | 0,2 MPa | 0,094280904 | 0,3 MPa | 0,081649658 | 0,4 MPa | 0,081649658 | 0,2 MPa | 0,047140452 | 1,0 MPa | 0,15 |



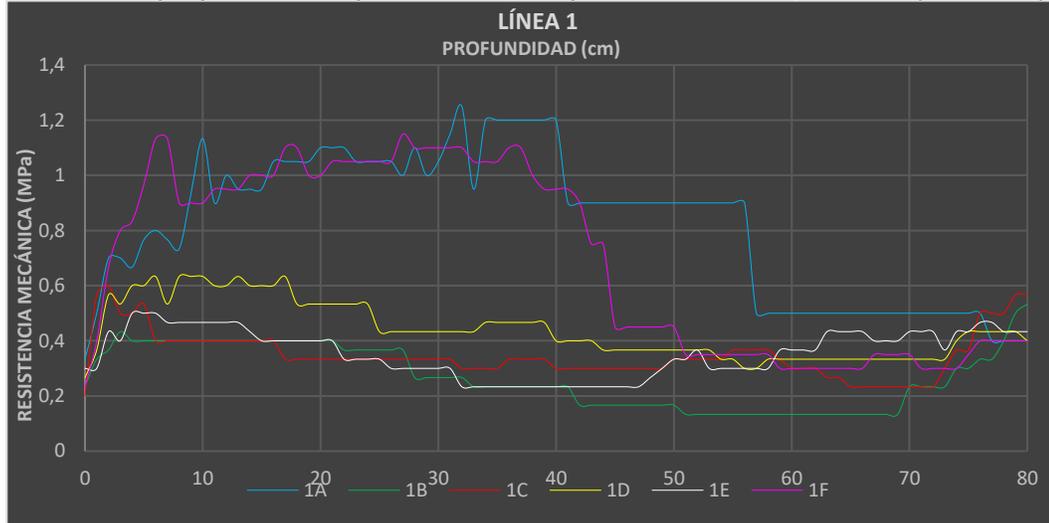
Para ver la tabla completa consultar **Anexo C**.

Los perfiles geomecánicos de la tabla anterior se observan en la **Figura 2-21** en donde observamos la dispersión de los datos y la ecuación que describe el comportamiento para cada punto de la malla de prospección, podemos notar que los perfiles A y F presentan una dispersión de los datos demasiado grande, por lo tanto, no es posible establecer un modelo matemático como una medida del comportamiento real para las penetraciones realizadas al exterior de las fosas.

Figura 2-21: Perfiles promedio de cada punto de la malla, línea 1 (Fosa D1).



Se creo una superposición de perfiles para cada Línea de prospección con el fin de comparar cada perfil con respecto a las demás. Como se observa en la **Figura 2-22**. En esta superposición podemos observar que las dos líneas que presentan picos de resistencia mecánica más altos que las demás (azul y violeta) corresponden con las penetraciones promedio realizadas al exterior de la fosa.

Figura 2-22: Superposición de perfiles de cada punto de la malla, Línea 1 (**Fosa D1**).

Para encontrar diferencias entre las medidas que se encuentran al interior y el exterior de la fosa y que permitan delimitar el área de esta, se realizaron perfiles clasificando las penetraciones promedio de cada punto de acuerdo a su posición en la malla de prospección:

- Al interior de la fosa se encuentran las penetraciones B, C, D y E.
- Al exterior de la fosa se encuentran las penetraciones A y F.

Por lo tanto, se crearon tablas de cada Línea de prospección, realizando un promedio general de las resistencias mecánicas en cada nivel de profundidad y su desviación estándar, con el fin de visualizar la dispersión entre los perfiles promedio de cada punto de la malla, como se muestra en la **Tabla 2-7**.

La escala de colores es la misma para todo el análisis expresado en el documento, en estas dos tablas se aprecia un cambio en el valor de la resistencia por cada nivel de profundidad y como se espera los colores rojos son más abundantes al exterior de la fosa.

Tabla 2-7: Promedio de perfiles de cada punto de la malla, Línea 1 (Fosa D1). 1) Interior de la fosa 2) Exterior de la fosa.

| DENTRO DE LA FOSA | | | FUERA DE LA FOSA | | |
|--------------------|--------------------|---------------------|--------------------|-------------------|---------------------|
| Profundidad | PROMEDIO (B-C-D-E) | DESVIACION ESTANDAR | Profundidad | PROMEDIO (A-F) | DESVIACION ESTANDAR |
| 0 cm | 0,25 | 0,0372678 | 0 cm | 0,283333333 | 0,05 |
| 1 cm | 0,391666667 | 0,103749163 | 1 cm | 0,45 | 0,05 |
| 2 cm | 0,491666667 | 0,09537936 | 2 cm | 0,683333333 | 0,016666667 |
| 3 cm | 0,466666667 | 0,052704628 | 3 cm | 0,75 | 0,05 |
| 4 cm | 0,5 | 0,070710678 | 4 cm | 0,75 | 0,083333333 |
| 5 cm | 0,508333333 | 0,072168784 | 5 cm | 0,866666667 | 0,1 |
| 6 cm | 0,483333333 | 0,095742711 | 6 cm | 0,966666667 | 0,166666667 |
| 7 cm | 0,45 | 0,05527708 | 7 cm | 0,95 | 0,183333333 |
| 8 cm | 0,475 | 0,09537936 | 8 cm | 0,816666667 | 0,083333333 |
| 9 cm | 0,475 | 0,09537936 | 9 cm | 0,916666667 | 0,016666667 |
| 10 cm | 0,475 | 0,09537936 | 10 cm | 1,016666667 | 0,116666667 |
| 11 cm | 0,466666667 | 0,081649658 | 11 cm | 0,925 | 0,025 |
| 12 cm | 0,466666667 | 0,081649658 | 12 cm | 0,975 | 0,025 |
| 13 cm | 0,475 | 0,09537936 | 13 cm | 0,95 | 0 |
| 14 cm | 0,458333333 | 0,08291562 | 14 cm | 0,975 | 0,025 |
| 15 cm | 0,45 | 0,08660254 | 15 cm | 0,975 | 0,025 |
| 16 cm | 0,45 | 0,08660254 | 16 cm | 1,025 | 0,025 |
| 17 cm | 0,441666667 | 0,113956619 | 17 cm | 1,075 | 0,025 |
| 18 cm | 0,416666667 | 0,072648316 | 18 cm | 1,075 | 0,025 |
| 19 cm | 0,416666667 | 0,072648316 | 19 cm | 1,025 | 0,025 |
| 20 cm | 0,416666667 | 0,072648316 | 20 cm | 1,05 | 0,05 |
| 21 cm | 0,416666667 | 0,072648316 | 21 cm | 1,075 | 0,025 |
| 22 cm | 0,391666667 | 0,08291562 | 22 cm | 1,075 | 0,025 |
| 23 cm | 0,391666667 | 0,08291562 | 23 cm | 1,05 | 0 |
| 24 cm | 0,391666667 | 0,08291562 | 24 cm | 1,05 | 0 |
| 25 cm | 0,366666667 | 0,040824829 | 25 cm | 1,05 | 0 |
| 26 cm | 0,358333333 | 0,049300665 | 26 cm | 1,05 | 0 |
| 27 cm | 0,358333333 | 0,049300665 | 27 cm | 1,075 | 0,075 |
| 28 cm | 0,333333333 | 0,062360956 | 28 cm | 1,1 | 0 |
| 29 cm | 0,333333333 | 0,062360956 | 29 cm | 1,05 | 0,05 |
| 30 cm | 0,333333333 | 0,062360956 | 30 cm | 1,075 | 0,025 |
| 31 cm | 0,333333333 | 0,062360956 | 31 cm | 1,125 | 0,025 |
| 32 cm | 0,308333333 | 0,07592028 | 32 cm | 1,175 | 0,075 |
| 33 cm | 0,3 | 0,081649658 | 33 cm | 1 | 0,05 |
| 34 cm | 0,308333333 | 0,09537936 | 34 cm | 1,125 | 0,075 |
| 35 cm | 0,308333333 | 0,09537936 | 35 cm | 1,125 | 0,075 |
| 36 cm | 0,316666667 | 0,095742711 | 36 cm | 1,15 | 0,05 |
| 37 cm | 0,316666667 | 0,095742711 | 37 cm | 1,15 | 0,05 |
| 38 cm | 0,316666667 | 0,095742711 | 38 cm | 1,1 | 0,1 |
| 39 cm | 0,316666667 | 0,095742711 | 39 cm | 1,075 | 0,125 |
| 40 cm | 0,291666667 | 0,068211273 | 40 cm | 1,075 | 0,125 |
| ESQUEMA DE COLORES | RESISTENCIA BAJA | | ESQUEMA DE COLORES | RESISTENCIA BAJA | |
| | RESISTENCIA MEDIA | | | RESISTENCIA MEDIA | |
| | RESISTENCIA ALTA | | | RESISTENCIA ALTA | |

Para ver la tabla completa consultar **Anexo C**.

Los perfiles de “Profundidad vs Resistencia Mecánica” de estas tablas se presentan como se muestran en la **Figura 2-23** y **Figura 2-24** con sus líneas de tendencia, se añadió la desviación estándar con el fin de ver la dispersión de los perfiles promedio de cada punto de la malla entre cada línea de penetraciones.

A cada Línea se le asignó el siguiente color:

- Línea 1: Azul
- Línea 2: Verde
- Línea 3: Rojo
- Línea 4: Amarillo

Esto se puede apreciar en la **Figura 2-24**.

Figura 2-23: Perfil promedio, Línea 1 (**Fosa D1**). Interior de la fosa

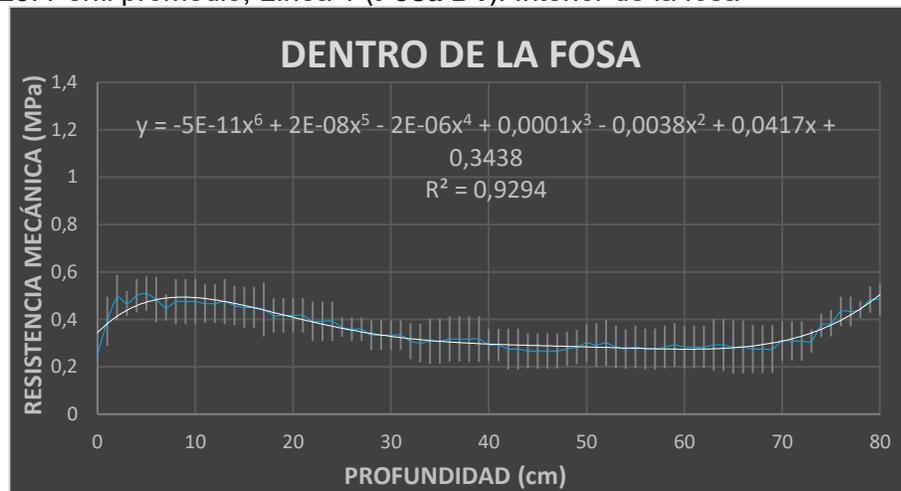


Figura 2-24: Perfil promedio, Línea 1 (**Fosa D1**). Exterior de la fosa



En la **Figura 2-23** el perfil promedio de la línea al interior de la fosa muestra que en general los picos de la gráfica no superan 0,8 MPa de Resistencia Mecánica, mientras el perfil promedio de la línea en la **Figura 2-24** al exterior de la fosa si lo hace.

Se realiza la superposición de los perfiles promedio de cada línea con el fin de visualizar el comportamiento de cada una de estas en la fosa de manera general, tanto al interior como al exterior, como se aprecia en la **Figura 2-25** y **Figura 2-26**. En ellas se logra apreciar visualmente un comportamiento similar entre los perfiles promedio de las 4 líneas de prospección al interior de la fosa, mientras al exterior se observan líneas muy dispersas.

Figura 2-25: Superposición de promedios de cada Línea (**Fosa D1**). Interior de la fosa

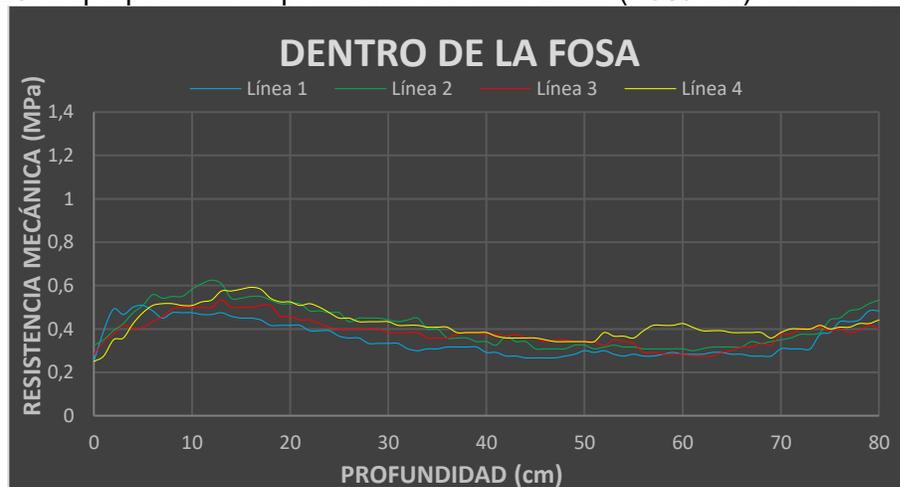


Figura 2-26: Superposición de promedios de cada Línea (**Fosa D1**). Exterior de la fosa



Por último, se realizó el promedio de todas las líneas de la malla de prospección para abarcar la totalidad de la fosa, tanto al interior como al exterior de esta, las tablas del promedio general para la fosa se muestran en la **Tabla 2-8**, se añadió su desviación estándar con el fin de visualizar la dispersión entre los perfiles de cada línea de la malla.

Tabla 2-8: Promedio total (Fosa D1) 1) Interior de la fosa 2) Exterior de la fosa.

| TOTAL, DENTRO DE LA FOSA | | | TOTAL, FUERA DE LA FOSA | | |
|--------------------------|-------------------|---------------------|-------------------------|-------------------|---------------------|
| Profundidad | PROMEDIO | DESVIACION ESTANDAR | Profundidad | PROMEDIO | DESVIACION ESTANDAR |
| 0 cm | 0,277083333 | 0,030830518 | 0 cm | 0,304166667 | 0,032004774 |
| 1 cm | 0,339583333 | 0,041822625 | 1 cm | 0,404166667 | 0,046210569 |
| 2 cm | 0,402083333 | 0,053804882 | 2 cm | 0,633333333 | 0,077280154 |
| 3 cm | 0,416666667 | 0,038640077 | 3 cm | 0,733333333 | 0,042491829 |
| 4 cm | 0,45 | 0,039528471 | 4 cm | 0,85 | 0,084162541 |
| 5 cm | 0,475 | 0,040824829 | 5 cm | 0,841666667 | 0,162660177 |
| 6 cm | 0,495833333 | 0,045069391 | 6 cm | 0,845833333 | 0,079604055 |
| 7 cm | 0,491666667 | 0,038640077 | 7 cm | 0,85 | 0,073833521 |
| 8 cm | 0,508333333 | 0,028259708 | 8 cm | 0,83125 | 0,102803582 |
| 9 cm | 0,508333333 | 0,027003086 | 9 cm | 0,8625 | 0,039308255 |
| 10 cm | 0,516666667 | 0,040397332 | 10 cm | 0,904166667 | 0,086301313 |
| 11 cm | 0,525 | 0,052374188 | 11 cm | 0,866666667 | 0,054962108 |
| 12 cm | 0,53125 | 0,059035947 | 12 cm | 0,889583333 | 0,066242138 |
| 13 cm | 0,547916667 | 0,049782513 | 13 cm | 0,89375 | 0,069315853 |
| 14 cm | 0,51875 | 0,043849094 | 14 cm | 0,93125 | 0,067023783 |
| 15 cm | 0,51875 | 0,049432544 | 15 cm | 0,95625 | 0,077811872 |
| 16 cm | 0,522916667 | 0,053155628 | 16 cm | 0,88125 | 0,083619301 |
| 17 cm | 0,520833333 | 0,052869073 | 17 cm | 0,95625 | 0,095810686 |
| 18 cm | 0,5 | 0,049651564 | 18 cm | 0,96875 | 0,090786494 |
| 19 cm | 0,479166667 | 0,044292274 | 19 cm | 0,95625 | 0,077811872 |
| 20 cm | 0,479166667 | 0,044292274 | 20 cm | 0,95625 | 0,083619301 |
| 21 cm | 0,470833333 | 0,042695628 | 21 cm | 0,9 | 0,146841752 |
| 22 cm | 0,458333333 | 0,046770717 | 22 cm | 0,90625 | 0,201846941 |
| 23 cm | 0,45 | 0,043700369 | 23 cm | 0,90625 | 0,171732896 |
| 24 cm | 0,4375 | 0,03796014 | 24 cm | 0,93125 | 0,199511121 |
| 25 cm | 0,422916667 | 0,042235698 | 25 cm | 0,9125 | 0,1875 |
| 26 cm | 0,410416667 | 0,035047091 | 26 cm | 0,90625 | 0,180602291 |
| 27 cm | 0,410416667 | 0,035047091 | 27 cm | 0,975 | 0,220085211 |
| 28 cm | 0,404166667 | 0,044682522 | 28 cm | 0,94375 | 0,184030398 |
| 29 cm | 0,404166667 | 0,044682522 | 29 cm | 0,93125 | 0,165241301 |
| 30 cm | 0,397916667 | 0,043451362 | 30 cm | 0,925 | 0,16863422 |
| 31 cm | 0,391666667 | 0,038188131 | 31 cm | 0,95 | 0,181142209 |
| 32 cm | 0,3875 | 0,050173311 | 32 cm | 0,9625 | 0,194052184 |
| 33 cm | 0,3875 | 0,055746201 | 33 cm | 0,93125 | 0,136215592 |
| 34 cm | 0,36875 | 0,039692831 | 34 cm | 0,9375 | 0,152581945 |
| 35 cm | 0,36875 | 0,039692831 | 35 cm | 0,9375 | 0,152581945 |
| 36 cm | 0,360416667 | 0,032475953 | 36 cm | 0,9375 | 0,159589317 |
| 37 cm | 0,358333333 | 0,025685058 | 37 cm | 0,925 | 0,178535711 |
| 38 cm | 0,360416667 | 0,027243118 | 38 cm | 0,9 | 0,183711731 |
| 39 cm | 0,35625 | 0,028489155 | 39 cm | 0,86875 | 0,174441072 |
| 40 cm | 0,347916667 | 0,036024201 | 40 cm | 0,86875 | 0,174441072 |
| ESQUEMA DE COLORES | RESISTENCIA BAJA | | ESQUEMA DE COLORES | RESISTENCIA BAJA | |
| | RESISTENCIA MEDIA | | | RESISTENCIA MEDIA | |
| | RESISTENCIA ALTA | | | RESISTENCIA ALTA | |

Para ver la tabla completa consultar **Anexo C**.

Al comparar estas dos tablas de datos se logra observar que la resistencia mecánica en el promedio de penetraciones hechas al interior de la fosa D1 mantiene un patrón de color regular, es decir: que la resistencia mecánica presenta pocas variaciones (lo cual concuerda con que esa parte del terreno fue alterada), también presenta una baja dispersión de los datos, lo cual permite que la línea de tendencia y su ecuación representen el comportamiento de un terreno con alteraciones, esto se puede visualizar con mayor claridad en la **Figura 2-27**, también se puede notar que estas líneas de tendencia presentan picos de resistencia mecánica con una marcada diferencia entre el interior y el exterior de la fosa.

Por otro lado, la tabla del promedio de penetraciones hechas al exterior de la fosa muestra una alta resistencia mecánica (colores más rojos) en la mayor parte de su extensión, las variaciones en el color pueden ser atribuidos a los diferentes horizontes del suelo, este es el comportamiento típico de un suelo sin alterar, En la **Figura 2-28** podemos visualizar el cambio entre los horizontes de suelo en los puntos máximos y mínimos de la curvatura de la gráfica.

Las gráficas que muestran el comportamiento de las tablas anteriores se muestran a continuación en la **Figura 2-27** y **Figura 2-28**.

Figura 2-27: Grafica promedio total (**Fosa D1**). Interior de la fosa.

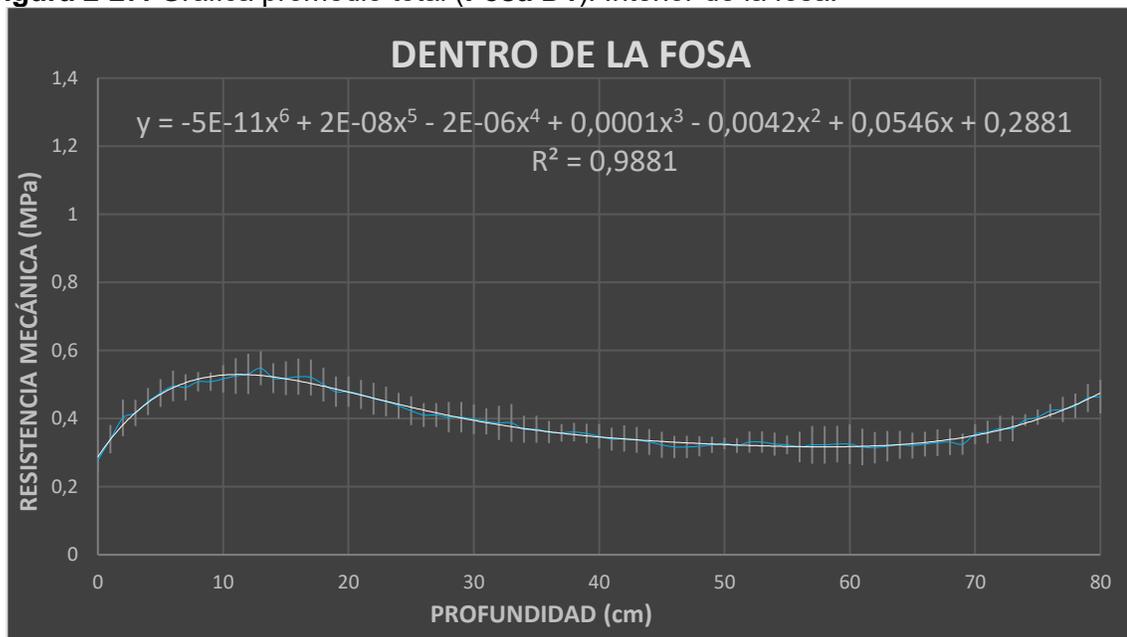
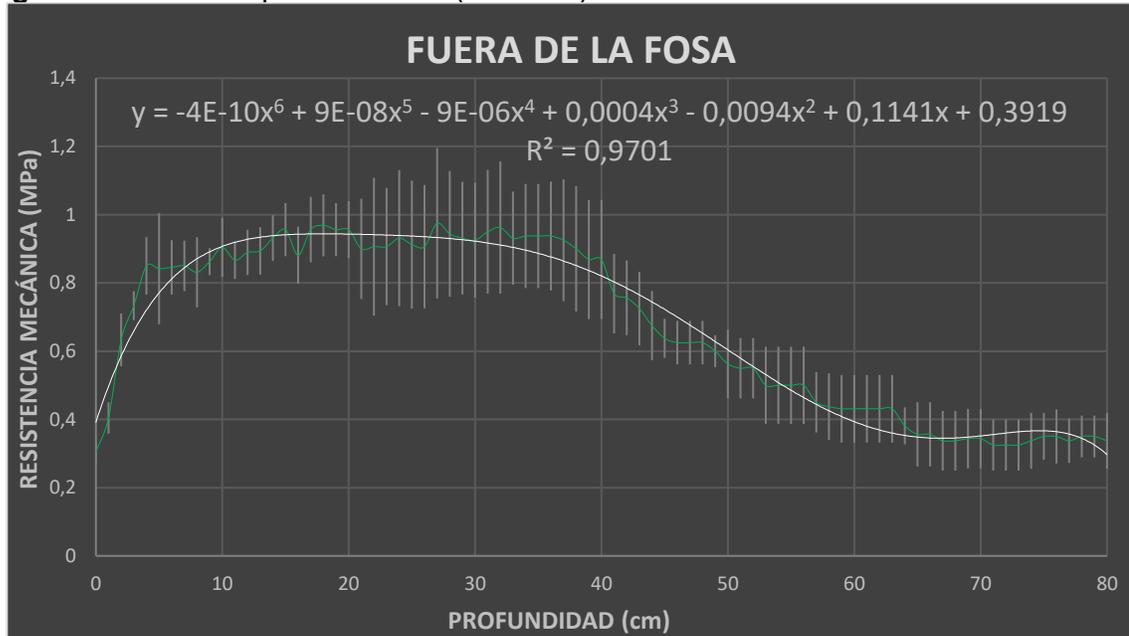


Figura 2-28: Grafica promedio total (**Fosa D1**). Exterior de la fosa.

Para determinar estadísticamente que tanto afectan las variaciones de los datos y saber si un terreno fue alterado, se realizaron 4 análisis de varianza (ANOVA) con un factor cada uno, como se describe a continuación:

1. El primer ANOVA fue realizado al promedio general de las penetraciones de la **Fosa D1** utilizando como factor la resistencia mecánica al interior y al exterior de la fosa, ver **Tabla 2-9**.
2. El segundo ANOVA fue realizado al promedio de las penetraciones de la **Fosa D2** utilizando como factor la resistencia mecánica al interior y al exterior de la fosa, ver **Tabla 2-10**.
3. El tercer ANOVA fue realizado al promedio de las penetraciones al interior de las fosas utilizando como factor la resistencia mecánica de la **Fosa D1** y la **Fosa D2**, ver **Tabla 2-11**.
4. El cuarto ANOVA fue realizado al promedio de las penetraciones al exterior de las fosas utilizando como factor la resistencia mecánica de la **Fosa D1** y la **Fosa D2**, ver **Tabla 2-12**.

Las celdas de color azul muestran el coeficiente estadístico F y su valor crítico, con el que podemos determinar en forma numérica si la variación del factor analizado es significativa (variación alta).

- Si “F” es mayor que el “valor crítico para F” entonces la variación de este factor es significativa.

Las celdas en color amarillo muestran el valor de la probabilidad para que el factor logre afectar la determinación de un terreno alterado.

- Si la “Probabilidad” es menor a 0,05 entonces la variación de este factor es significativa.

Tabla 2-9: Análisis de varianza de un factor (**Fosa D1** Interior y Exterior).

| ANÁLISIS DE VARIANZA | | | | | | |
|---------------------------|-------------------|--------------------|---------------------------|-------------|--------------|----------------------|
| Origen de las variaciones | Suma de cuadrados | Grados de libertad | Promedio de los cuadrados | F | Probabilidad | Valor crítico para F |
| Entre grupos | 3,153524414 | 1 | 3,153524414 | 98,28463701 | 2,574E-18 | 3,900988696 |
| Dentro de los grupos | 5,069529405 | 158 | 0,032085629 | | | |
| Total | 8,223053819 | 159 | | | | |

Tabla 2-10: Análisis de varianza de un factor (**Fosa D2** Interior y Exterior).

| ANÁLISIS DE VARIANZA | | | | | | |
|---------------------------|-------------------|--------------------|---------------------------|-------------|--------------|----------------------|
| Origen de las variaciones | Suma de cuadrados | Grados de libertad | Promedio de los cuadrados | F | Probabilidad | Valor crítico para F |
| Entre grupos | 8,170341676 | 1 | 8,170341676 | 222,8229578 | 4,02325E-32 | 3,900236172 |
| Dentro de los grupos | 5,866786265 | 160 | 0,036667414 | | | |
| Total | 14,03712794 | 161 | | | | |

Tabla 2-11: Análisis de varianza de un factor (**Fosa D1** y **D2** al Interior).

| ANÁLISIS DE VARIANZA | | | | | | |
|---------------------------|-------------------|--------------------|---------------------------|------------|--------------|----------------------|
| Origen de las variaciones | Suma de cuadrados | Grados de libertad | Promedio de los cuadrados | F | Probabilidad | Valor crítico para F |
| Entre grupos | 0,008312141 | 1 | 0,008312141 | 1,15881136 | 0,283332652 | 3,900236172 |
| Dentro de los grupos | 1,147678219 | 160 | 0,007172989 | | | |
| Total | 1,15599036 | 161 | | | | |

Tabla 2-12: Análisis de varianza de un factor (**Fosa D1** y **D2** al Exterior).

| ANÁLISIS DE VARIANZA | | | | | | |
|---------------------------|-------------------|--------------------|---------------------------|-------------|--------------|----------------------|
| Origen de las variaciones | Suma de cuadrados | Grados de libertad | Promedio de los cuadrados | F | Probabilidad | Valor crítico para F |
| Entre grupos | 1,398550696 | 1 | 1,398550696 | 22,51485626 | 4,59226E-06 | 3,900236172 |
| Dentro de los grupos | 9,938687093 | 160 | 0,062116794 | | | |
| Total | 11,33723779 | 161 | | | | |

Como se observa en la **Tabla 2-9** y **Tabla 2-10** el resultado de la variación es significativa, por lo tanto, se puede concluir que no existe similitud entre los datos de resistencia al interior y el exterior de las fosas para cada nivel de profundidad.

Por otro lado, con los resultados de la **Tabla 2-11** podemos ver que la variación de la resistencia mecánica resulta ser no significativa, esto quiere decir que las medidas de resistencia al interior de las dos fosas no tienen grandes variaciones una con respecto a la otra para cada nivel de profundidad y por ende es posible determinar que el terreno fue alterado.

Los resultados de la **Tabla 2-12** son significativos, y se puede determinar que no existe un patrón de comportamiento similar entre los promedios de penetraciones en un terreno que no ha sido alterado, esto se asocia a que un terreno sin alterar varía drásticamente en sus características, por lo tanto, no se espera encontrar similitud en la resistencia mecánica para cada nivel de profundidad.

Gracias al resultado de la **Tabla 2-11** y como último paso para poder establecer el comportamiento de un terreno alterado con la posible existencia de una fosa se realizó un promedio global entre los datos de los perfiles obtenidos para cada fosa, esto se puede observar en las tablas de la **Tabla 2-13** a continuación, se le añadió igualmente la desviación estándar con el fin de ver la dispersión entre los perfiles obtenidos para las Fosa D1 y Fosa D2.

La ecuación del perfil al interior de las fosas representa el comportamiento real de un suelo que ha sido alterado y por consiguiente con la posible existencia de fosa en las condiciones del terreno en este estudio, por otro lado la ecuación al exterior de las fosas solo puede ser usada para hacer una comparación aproximada y en forma visual del comportamiento del suelo en estado natural sin alteraciones, esto se debe a que un terreno presenta variaciones grandes en sus características de un punto a otro cuando no ha sido perturbado.

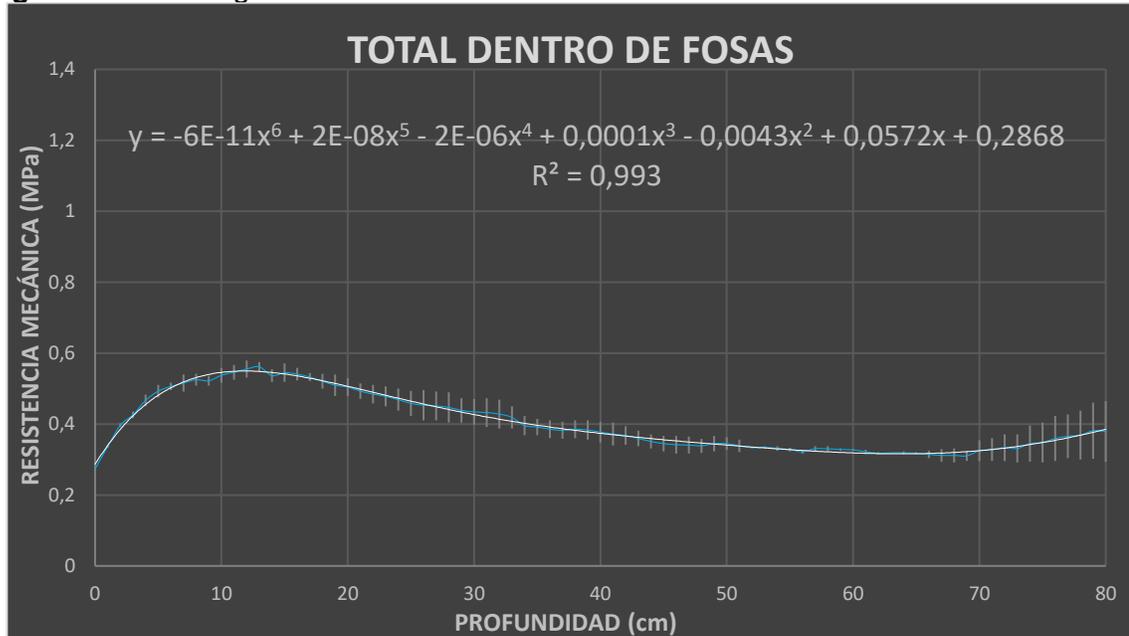
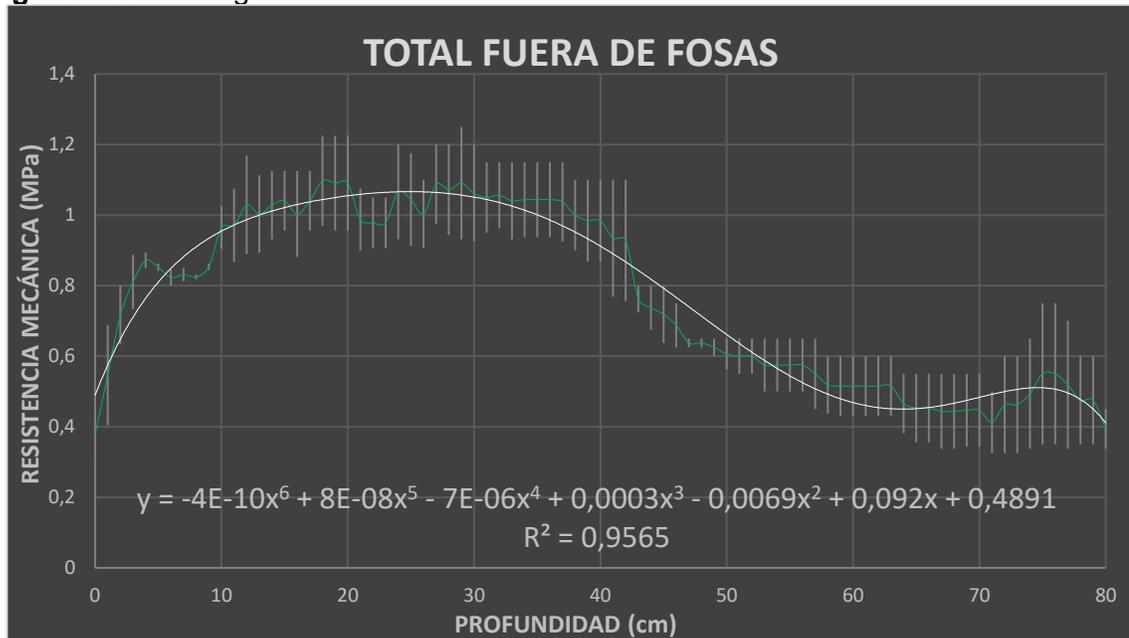
Tabla 2-13: Promedio global del terreno en estudio. 1) Interior de las fosas 2) Exterior de las fosas

| PROMEDIO TOTAL DENTRO DE FOSAS | | | PROMEDIO TOTAL FUERA DE FOSAS | | |
|--------------------------------|-------------|---------------------|-------------------------------|-------------|---------------------|
| Profundidad | PROMEDIO | DESVIACION ESTANDAR | Profundidad | PROMEDIO | DESVIACION ESTANDAR |
| 0 cm | 0,276041667 | 0,001041667 | 0 cm | 0,377083333 | 0,072916667 |
| 1 cm | 0,344791667 | 0,005208333 | 1 cm | 0,545833333 | 0,141666667 |
| 2 cm | 0,401041667 | 0,001041667 | 2 cm | 0,716666667 | 0,083333333 |
| 3 cm | 0,430208333 | 0,013541667 | 3 cm | 0,810416667 | 0,077083333 |
| 4 cm | 0,467708333 | 0,017708333 | 4 cm | 0,871875 | 0,021875 |
| 5 cm | 0,492708333 | 0,017708333 | 5 cm | 0,852083333 | 0,010416667 |
| 6 cm | 0,50625 | 0,010416667 | 6 cm | 0,822916667 | 0,022916667 |
| 7 cm | 0,515625 | 0,023958333 | 7 cm | 0,83125 | 0,01875 |
| 8 cm | 0,526041667 | 0,017708333 | 8 cm | 0,825 | 0,00625 |
| 9 cm | 0,527083333 | 0,01875 | 9 cm | 0,853125 | 0,009375 |
| 10 cm | 0,542708333 | 0,026041667 | 10 cm | 0,964583333 | 0,060416667 |
| 11 cm | 0,551041667 | 0,026041667 | 11 cm | 0,970833333 | 0,104166667 |
| 12 cm | 0,559375 | 0,028125 | 12 cm | 1,029166667 | 0,139583333 |
| 13 cm | 0,5625 | 0,014583333 | 13 cm | 1,003125 | 0,109375 |
| 14 cm | 0,5375 | 0,01875 | 14 cm | 1,028125 | 0,096875 |
| 15 cm | 0,554166667 | 0,035416667 | 15 cm | 1,040625 | 0,084375 |
| 16 cm | 0,548958333 | 0,026041667 | 16 cm | 1,003125 | 0,121875 |
| 17 cm | 0,544791667 | 0,023958333 | 17 cm | 1,040625 | 0,084375 |
| 18 cm | 0,532291667 | 0,032291667 | 18 cm | 1,096875 | 0,128125 |
| 19 cm | 0,519791667 | 0,040625 | 19 cm | 1,090625 | 0,134375 |
| 20 cm | 0,514583333 | 0,035416667 | 20 cm | 1,090625 | 0,134375 |
| 21 cm | 0,503125 | 0,032291667 | 21 cm | 0,9875 | 0,0875 |
| 22 cm | 0,492708333 | 0,034375 | 22 cm | 0,978125 | 0,071875 |
| 23 cm | 0,486458333 | 0,036458333 | 23 cm | 0,978125 | 0,071875 |
| 24 cm | 0,477083333 | 0,039583333 | 24 cm | 1,065625 | 0,134375 |
| 25 cm | 0,469791667 | 0,046875 | 25 cm | 1,04375 | 0,13125 |
| 26 cm | 0,464583333 | 0,054166667 | 26 cm | 1,003125 | 0,096875 |
| 27 cm | 0,463541667 | 0,053125 | 27 cm | 1,0875 | 0,1125 |
| 28 cm | 0,459375 | 0,055208333 | 28 cm | 1,071875 | 0,128125 |
| 29 cm | 0,447916667 | 0,04375 | 29 cm | 1,090625 | 0,159375 |
| 30 cm | 0,44375 | 0,045833333 | 30 cm | 1,0625 | 0,1375 |
| 31 cm | 0,441666667 | 0,05 | 31 cm | 1,05 | 0,1 |
| 32 cm | 0,435416667 | 0,047916667 | 32 cm | 1,05625 | 0,09375 |
| 33 cm | 0,43125 | 0,04375 | 33 cm | 1,040625 | 0,109375 |
| 34 cm | 0,408333333 | 0,039583333 | 34 cm | 1,04375 | 0,10625 |
| 35 cm | 0,404166667 | 0,035416667 | 35 cm | 1,04375 | 0,10625 |
| 36 cm | 0,392708333 | 0,032291667 | 36 cm | 1,04375 | 0,10625 |
| 37 cm | 0,391666667 | 0,033333333 | 37 cm | 1,0375 | 0,1125 |
| 38 cm | 0,394791667 | 0,034375 | 38 cm | 1 | 0,1 |
| 39 cm | 0,392708333 | 0,036458333 | 39 cm | 0,984375 | 0,115625 |
| 40 cm | 0,3875 | 0,039583333 | 40 cm | 0,984375 | 0,115625 |

| | |
|--------------------|-------------------|
| ESQUEMA DE COLORES | RESISTENCIA BAJA |
| | RESISTENCIA MEDIA |
| | RESISTENCIA ALTA |

| | |
|--------------------|-------------------|
| ESQUEMA DE COLORES | RESISTENCIA BAJA |
| | RESISTENCIA MEDIA |
| | RESISTENCIA ALTA |

Los perfiles de las tablas anteriores se presentan en las **Figura 2-29** y **Figura 2-30**, en el que se puede visualizar el comportamiento definitivo para un terreno que fue alterado y uno que se encuentra en estado natural sin algún tipo de remoción de terreno.

Figura 2-29: Perfil global al interior de las fosas.**Figura 2-30:** Perfil global al exterior de las fosas.

2.5 Interpretación de resultados

2.5.1 Tomógrafo eléctrico

Para realizar una interpretación correcta de resultados se tuvo que elaborar una comparación para los dos métodos aplicados, entre las prospecciones de las líneas desarrolladas dentro de la fosa y las prospecciones para líneas estudiadas en las zonas fuera de la fosa que no presentaran enterramientos. Con los datos hallados de resistividad de cada línea se estableció un rango de resistividad para el procesamiento de datos en los cuales se observan las anomalías del subsuelo esperadas, para este proyecto y en especial para este tipo de terreno se definió que el rango para la visualización de la inversión sea de entre 1.160 Ωm y 224.498 Ωm .

Después de la comparación entre las imágenes de resistividad entregadas por el programa y con base en los resultados de tomografía eléctrica, se encontró que es posible determinar si un terreno ha sido alterado a partir de la no homogeneidad que muestren las inversiones, para este caso se denotan mediante una escala de colores, la cual indicara los sectores del campo en los que se tienen mayores o menores datos adquiridos de resistividad aparente.

A continuación, en las **Figuras 2-31 y Figura 2-32** se presentan las comparaciones entre las líneas 4 y 5, para las fosas B1 para el método Wenner y Dipolo-Dipolo respectivamente, en ellas lo se busca es poder observar la concentración de resistividad para cuando el método es aplicado fuera de la fosa, lo que puede indicar que dicho terreno no fue alterado, asimismo se denota una baja resistividad para la prospección hecha dentro de la fosa, lo que podría indicar que el suelo no posee una compactación uniforme y concuerda con las característica del terreno. Estos cambios se pueden percibir mediante los mapas de resistividad.

Figura 2-31: Mapa que describen la alteración (Dentro de la fosa) o no alteración (fuera de la fosa) del terreno, aplicando método Wenner en la fosa B1.

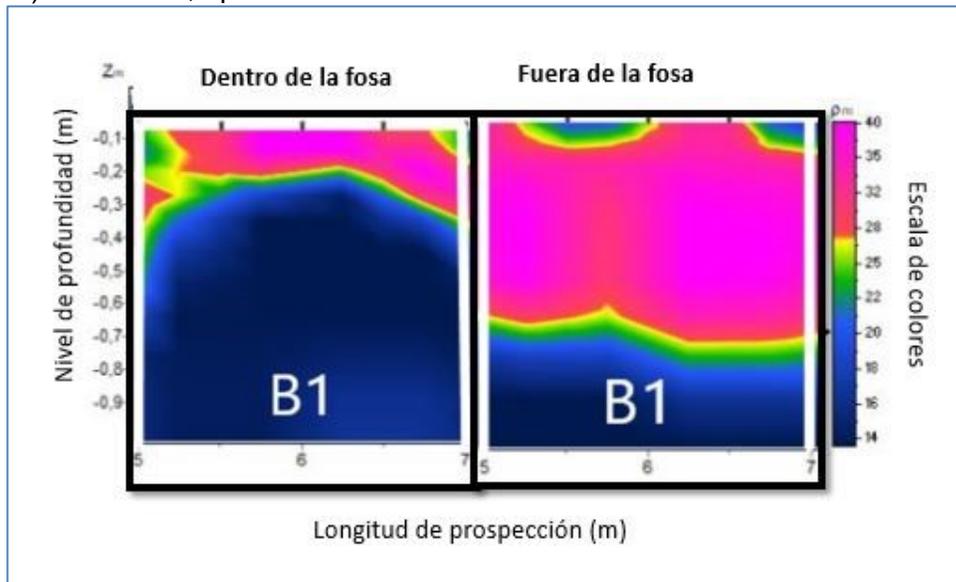
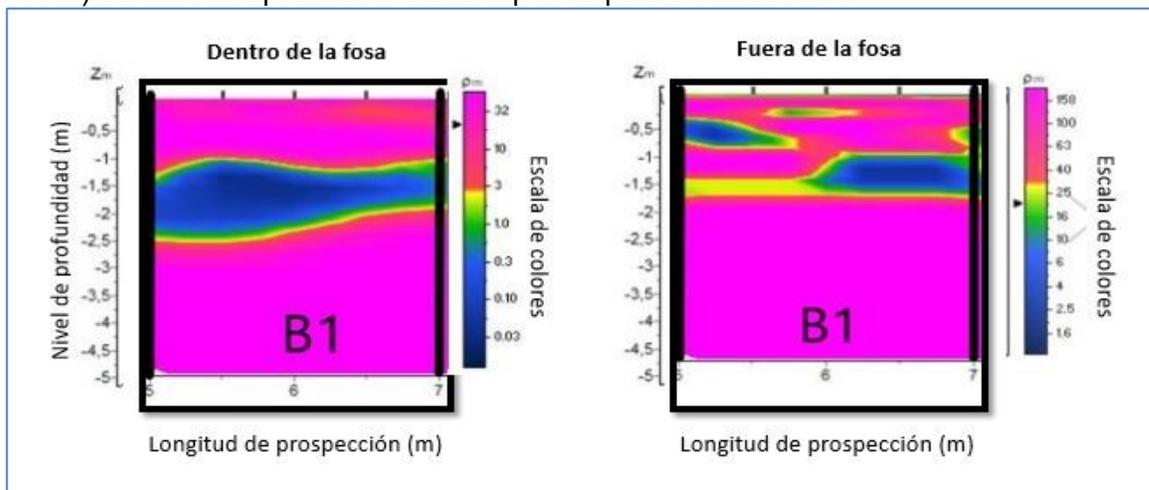


Figura 2-32: Mapa que describe la alteración (Dentro de la fosa) o no alteración (fuera de la fosa) del terreno aplicando método Dipolo-Dipolo en la fosa B1.



Se debe destacar que a diferencia del método Wenner, la técnica Dipolo-Dipolo recopiló datos de resistividad muy diferentes para las dos líneas, como se aprecia en la escala de colores de la **figura 2-32**.

Finalmente se presenta un modelamiento más general que permite interpretar resultados mediante las diferencias que puedan existir para cada segmento de las simulaciones, este

funciona bajo diseño tridimensional, como se presenta en la **Figura 2-33 y Figura 2-34**, en donde se ejecutan dos simulaciones que abordan todas las líneas de los dos métodos empleados para la salida a campo del día 20 de noviembre de 2019.

Figura 2-33: Modelamiento 3D de cinco líneas para método Wenner.

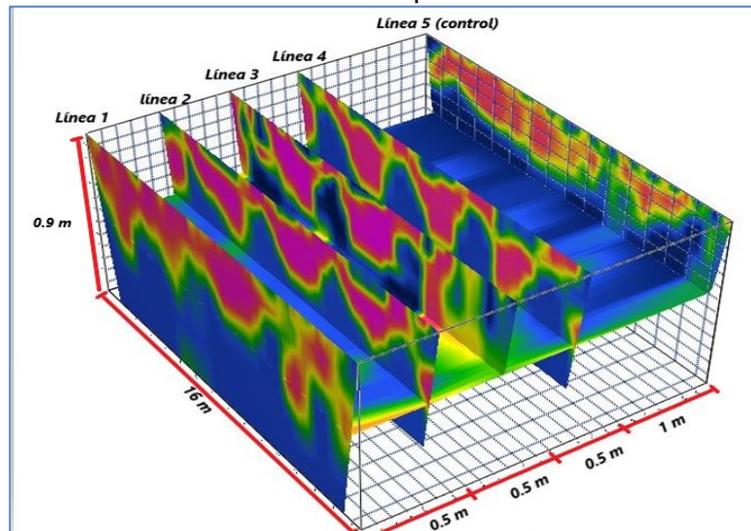
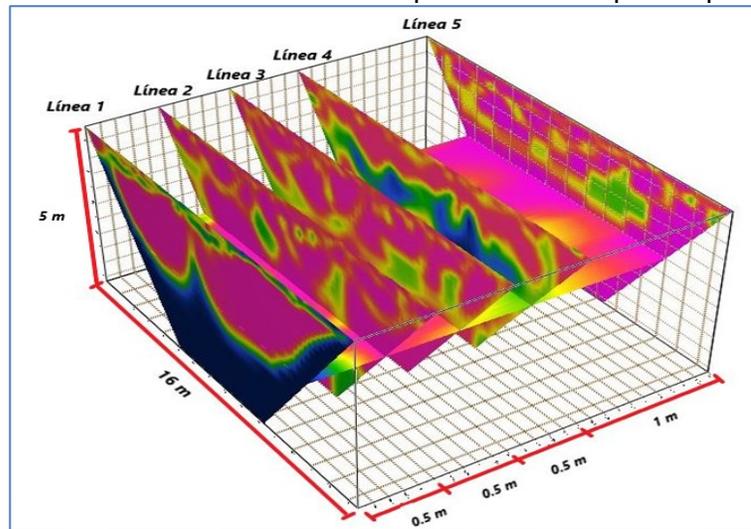


Figura 2-34: Modelamiento 3D de cinco líneas para método Dipolo-Dipolo.

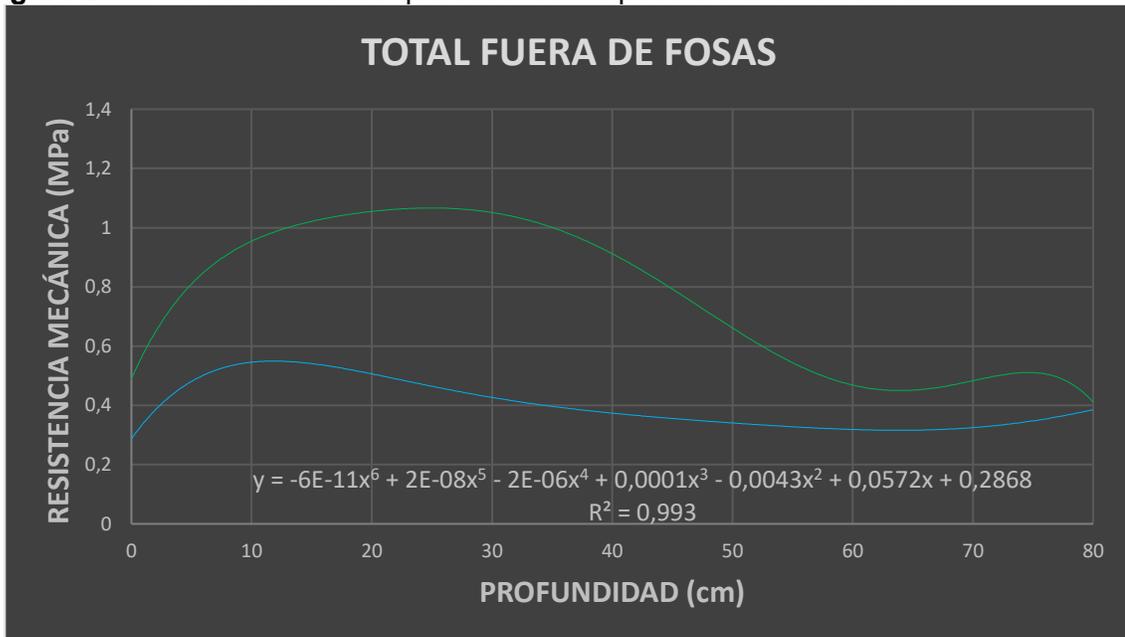


2.5.2 Penetrologger

Después del análisis de los resultados del Penetrologger se encontró que es posible determinar si un terreno fue alterado a partir de línea de tendencia del perfil de “Profundidad vs Resistencia Mecánica” al tener en cuenta los siguientes ítems:

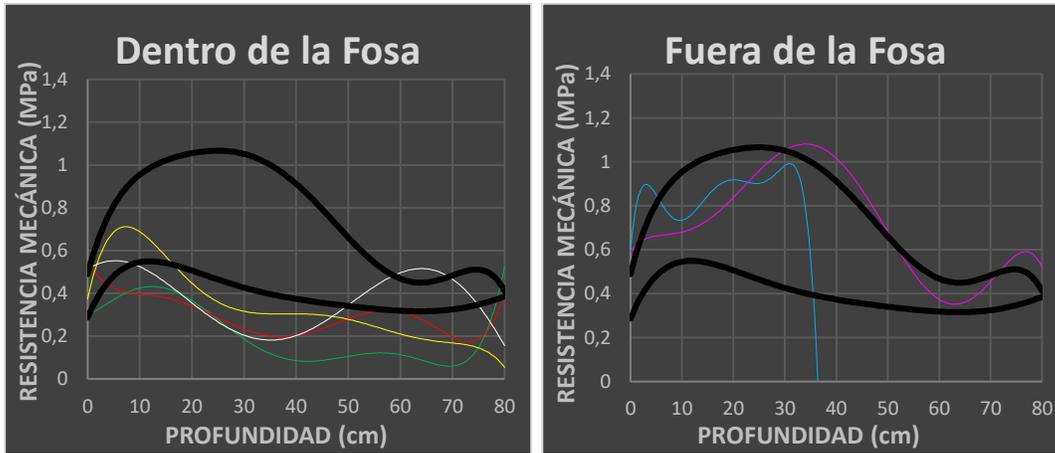
- Si la curva obtenida es visualmente similar o se aproxima a la curva inferior (color azul) de la **Figura 2-35**, quiere decir que el terreno pudo ser removido o alterado de alguna manera, lo que a su vez puede indicar la posible existencia de una fosa.
- Si la curva obtenida es visualmente similar o se aproxima a la curva superior (color verde) de la **Figura 2-35** entonces el terreno no ha sido alterado de ninguna manera, sin embargo, también se puede llegar a esta conclusión si la curva obtenida es muy diferente a la curva inferior.
- También es posible determinar que el terreno no ha sido alterado si la curva descrita es muy diferente a la curva inferior de la **Figura 2-35** y tiene picos de variaciones muy elevadas de resistencia mecánica.
- Estos resultados solo son confiables para terrenos con características similares a las del terreno analizado en este proyecto y en un tiempo no mayor a 5 años de haber sido excavadas las fosas.

Figura 2-35: Curvas definitivas que describen la posible alteración del terreno.



Por ejemplo, con las penetraciones de la **Fosa D1-Línea 1** del 20/11/19, se observa que en general las penetraciones que se hicieron al interior de la fosa muestran un comportamiento similar al de la curva inferior; mientras las que se hicieron por fuera se asemejan al comportamiento de la curva superior, ver **Figura 2-36**.

Figura 2-36: Ejemplo de aproximación de línea de tendencia de cada penetración a las líneas de tendencia encontradas.



3 Análisis de resultados

Método Dipolo-Dipolo

En el análisis de datos se obtuvieron imágenes en planos de dos y tres dimensiones, ver **Figura 2-15** y **Figura 2-19**, que permiten identificar anomalías pero que no otorgan diferencias visibles en las zonas en las que es más probable que existan fosas; para que este procedimiento arroje datos que puedan ser visualizados, es necesario aplicar filtros especiales sobre las series de datos que eliminen o disminuyan la cantidad de ruido y anomalías presentes.

Como se observa en la **Figura 2-31** debido a la sensibilidad de este método, la resolución en los resultados de las inversiones es mayor y logra tomar datos a una mayor profundidad, esto ocasiona que la cantidad de datos anómalos sea mayor y por consiguiente es más complicado diferenciar los sectores en los que se encuentran los enterramientos.

Método Wenner

En el análisis se obtuvieron datos de resistividad más acordes a la posición de las fosas en el terreno de estudio, los cuales dejan ver una tendencia similar en sus rangos de resistividad. En el procesamiento se consiguen imágenes de resistividad en dos y tres dimensiones como se aprecia en la **Figura 2-14** y **Figura 2-18**, por consiguiente, permitieron ver las anomalías y diferencias entre los sectores que sufrieron alteraciones y los sectores que no. Se confirmó que los resultados fueron acordes a los antecedentes e investigaciones previas realizadas por parte de la universidad Antonio Nariño en cabeza del ingeniero Martin Molina, ya que contaron con un patrón similar tanto en la adquisición de datos como en su procesamiento para las tres salidas a campo como se observa en la **Figura 2-30**.

Penetrologger

Se encontró que es una herramienta versátil, compacta, liviana y de fácil manejo, que permite a partir de datos de resistencia mecánica encontrar zonas en el terreno que evidencian algún tipo de alteración o remoción reciente del terreno. Se lograron además identificar curvas que pueden llegar a determinar si se está (**Figura 2-29**) o no (**Figura 2-30**) en presencia de un terreno con alteraciones siempre y cuando se realice en condiciones similares al terreno de este proyecto, lo que a su vez se puede asociar a la posible existencia de una fosa, sin embargo, estos resultados no pueden ser considerados totalmente confiables debido a que los suelos presentan características muy variables de un lugar a otro, esto se confirmó con los análisis estadísticos ANOVA (**Tabla 2-9, Tabla 2-10, Tabla 2-11 y Tabla 2-12**).

Podemos decir que en cuanto a lo que se esperaba con los resultados de este proyecto se lograron utilizar los equipos de esta investigación para mejorar la forma en que se determina la existencia de una fosa, ya que se pudo evidenciar que el Penetrologger (siendo un equipo que nunca se ha aplicado en este campo) arroja resultados que pueden ser interpretados fácilmente y en un tiempo muy corto para saber si el terreno fue removido, por lo menos en un tiempo no mayor a 5 años, y que el tomógrafo presenta una mejor visualización de las fosas a través del método Wenner que el método Dipolo-Dipolo; al usar los dos equipos en conjunto se puede caracterizar de manera mucho más precisa el terreno y del mismo modo identificar los lugares en los que potencialmente pueda existir una fosa.

4 Conclusiones y recomendaciones

4.1 Conclusiones

- Los equipos utilizados en este proyecto fueron puestos a prueba y se elaboraron protocolos para la implementación en la prospección y el trabajo en campo, arrojando datos que permitieron realizar un análisis interesante con respecto al comportamiento del suelo.
- Con los perfiles geoeléctricos y geomecánicos obtenidos se realizaron graficas que permitieron diferenciar características del terreno con las que se puede identificar la posible perturbación del suelo en condiciones parecidas a las del terreno estudiado (andisol con sedimentos lacustres y ceniza volcánica, con un horizonte superior de materia orgánica seguido de una textura franco arcillosa roja), sin embargo, por la gran variación de las características de los suelos no se puede garantizar completamente la efectividad para encontrar fosas comunes.
- Los perfiles analizados a través de un análisis relacional en cada una de las tres salidas de campo realizadas brindaron información similar, y en cada una se lograron encontrar diferencias entre las partes del terreno sin alteraciones y las partes del terreno con fosas en su interior, corroborando que los resultados encontrados son acertados.
- Los protocolos de prospección creados tanto para el Penetrologger como para el Tomógrafo Eléctrico, permiten ahorrar bastante tiempo en la búsqueda de fosas clandestinas, y permiten obtener buenos resultados (aún más si se utilizan en conjunto) si los comparamos con los métodos tradicionales.
- El Penetrologger es un equipo versátil, compacto, liviano y de fácil manejo, con el que es posible identificar si el terreno fue removido o alterado en un periodo no mayor a 5 años aproximadamente y en las condiciones ambientales y geodésicas del terreno en esta investigación, se recomienda usarlo en primer lugar y

posteriormente acompañarlo con otro método de prospección de fosas más complejo.

- El Tomógrafo es un equipo que por su disposición logró realizar las mediciones pertinentes, el manejo de esta herramienta requiere mucha atención y control al tomar datos y en el tratamiento adecuado de estos, con él es posible identificar el tipo de materiales presentes al interior del terreno al comparar las resistividades eléctricas con las de la **Tabla 1-1**.
- El método Wenner resulto ser más conveniente para la búsqueda de fosas que el método Dipolo-Dipolo.
- Los análisis ANOVA realizados para el Penetrologer arrojaron resultados estadísticos con los cuales se puede inferir que zonas del terreno han sido perturbadas.
- Los objetivos de este proyecto se cumplieron y representan un avance para el estudio en la búsqueda de fosas en Colombia y el mundo.

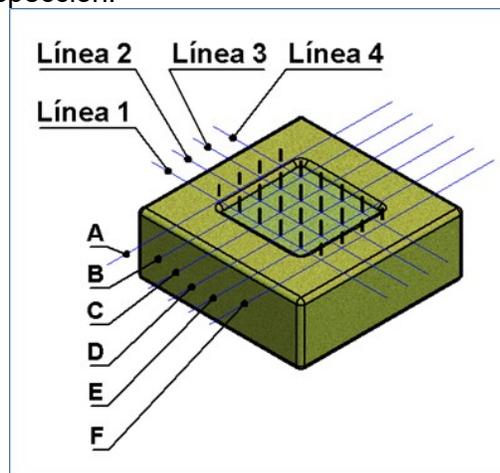
4.2 Recomendaciones

- Realizar nuevas investigaciones aplicando el método Dipolo-Dipolo para profundizar en el correcto manejo de esta técnica para la búsqueda de fosas clandestinas en el ámbito forense.
- Aplicar el uso de estos equipos en condiciones diferentes a las de esta investigación, para establecer si arroja buenos resultados.
- Implementar un sistema autónomo, liviano y compacto de energía eléctrica para alimentar los equipos en campo.
- Se sugiere probar con distintas técnicas de limpieza de datos para el tratamiento de datos con Dipolo-Dipolo.

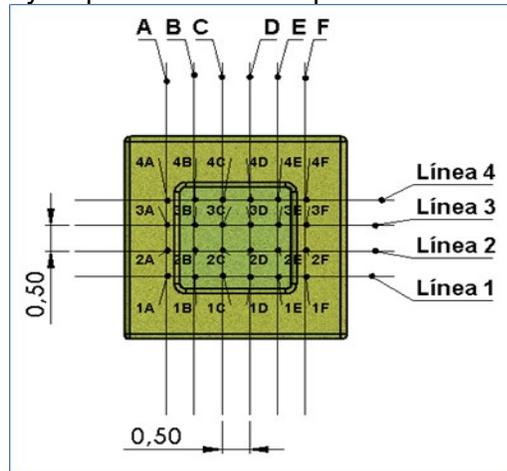
A. Anexo: Protocolo de prospección para la detección de fosas con Penetrologger

- 1) Documentar toda la prospección a través de fotos, videos y apuntes pertinentes.
- 2) Crear una malla de prospección o de puntos de penetración que garantice que la zona de investigación, es decir, donde se sospecha puede existir una fosa, sea cubierta por completo y se extienda un poco más para delimitar a través de los resultados el tamaño de la fosa.

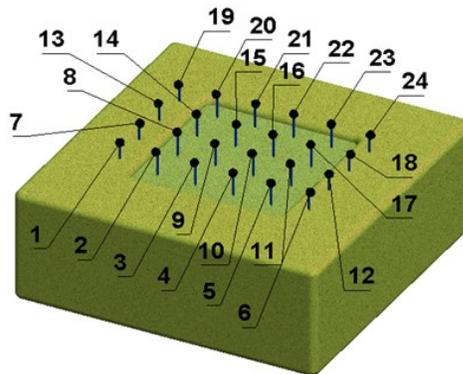
Figura 5-1: Malla de prospección.



- 3) Los puntos de la malla de prospección deben estar separados una distancia uniforme o constante.

Figura 5-2: Nomenclatura y disposición de cada punto de la malla de prospección.

- 4) Cada punto de la malla se debe marcar con estacas clavadas en el suelo, se debe identificar el orden en que realizan las penetraciones sobre la malla.

Figura 5-3: Orden de penetraciones sobre la malla de prospección.

- 5) Programar el Penetrologger con el software "Penetroviewer 6.08", como se indica el Manual de uso de Penetrologger en el **Anexo D**, de acuerdo a las condiciones del suelo y tamaño de la malla de prospección establecida.
- 6) Se deben tomar medidas del clima antes, durante y después de la prospección.
- 7) Comprobar el estado de los equipos y accesorios.

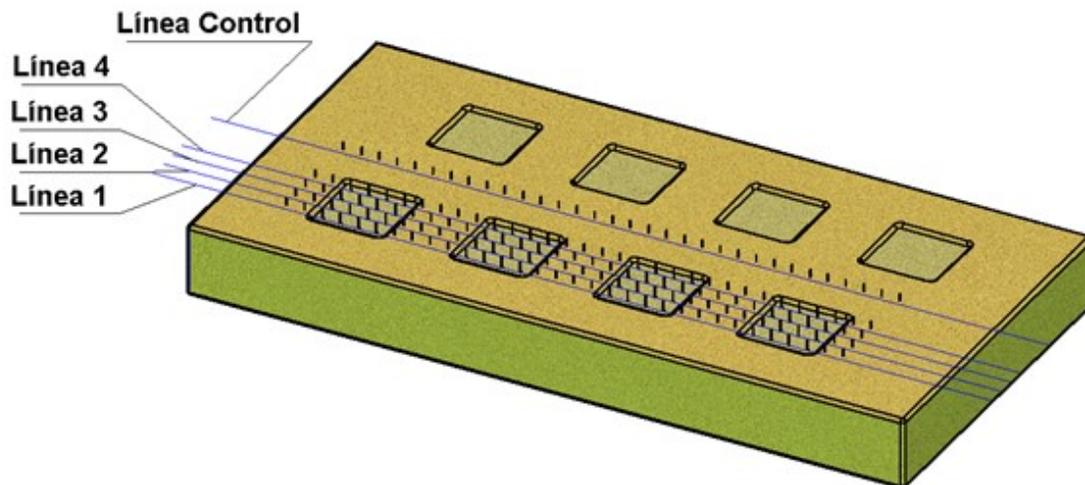
- 8)** Mantener limpio en todo momento los sensores y la placa metálica sobre la que se mide el nivel de profundidad que alcanza en Penetrologger.
- 9)** Ajustar bien la sonda metálica y el cono al Penetrologger.
- 10)** Comenzar la toma de datos siguiendo los puntos de la malla de prospección.
- 11)** Descargar los datos del Penetrologger una vez terminada la prospección con el software "Penetroviewer 6.08".
- 12)** Hacer el tratamiento de los datos

B. Anexo: Protocolo de prospección para fosas con Tomógrafo Eléctrico

Disposición del terreno y organigrama de trabajo

- 1) Se debe crear una medida fija o punto inicial, este será el punto referencia de donde partirán todas las líneas de prospección.

Figura 5-4: Se observan líneas de prospección, para este caso se cuenta con cuatro fosas(simuladas) y sobre ellas cuatro líneas en las cuales se establecieron los 32 electrodos para la ejecución del método el cual se basará en desarrollarlo línea por línea.



- 2) La separación de los electrodos debe ser la misma para las líneas que se tengan dispuestas a estudiar, asimismo la distancia entre líneas tendrá que ser igual.
- 3) Incrustar los electrodos en el suelo, estos deben estar situados a la misma distancia entre ellos a lo largo la línea y sobre el terreno sobre el que se sospecha se encuentra el enterramiento.

- 4) Realiza el tendido del cable encargado de establecer la conexión entre el tomógrafo y los electrodos.

Preparación de equipo y puesta en marcha

- 5) Fijar las todas las conexiones necesarias tales como: Fuentes de Voltaje- equipo, equipo- electrodos.
- 6) Programar y definir el método de prospección de datos, esto se hace usando un computador o un dispositivo en el cual se pueda definir la técnica manualmente.
- 7) En el pc se debe dar nombre al archivo que se destinó para esa línea y crear una carpeta para el respectivo almacenamiento de datos para esa salida a campo, esto con el fin de que el procesamiento de datos sea organizado y no se presente pérdida de información.
- 8) Antes de iniciar, verificar todas las conexiones
- 9) Dar inicio al proceso y comprobar de que el equipo se encuentra recolectando datos.
- 10) repetir los pasos del 4 al 10 para las siguientes líneas hasta terminar todas las líneas de prospección.
- 11) Acabado el estudio, se deben sustraer los datos recolectados, estos se entregan por el equipo en formato txt.
- 12) Realizar el procesamiento de los datos.

C. Anexo: Tratamiento de datos del Penetrologger

Ver archivos adjuntos

- Microsoft Excel "Tratamiento de datos y resultados con Penetrologger".
- Fotos y Videos de Prospección en campo.
- PDF "Manual Penetrologger".

D. Anexo: Protocolo de procesamiento para tomógrafo eléctrico

Ver archivos adjuntos

- PDF “Anexo D Protocolo de procesamiento para tomógrafo eléctrico”.
- PDF “Manual de operación para ZonedRes2D(inglés)”.

E. Anexo: Tratamiento de datos del Tomógrafo Eléctrico

Ver archivos adjuntos

- Microsoft Excel "Tratamiento de datos y resultados con tomógrafo eléctrico"
- Fotos y videos de prospección en campo

Bibliografía

- Acuña, J., Iglesias, M., Jara, J., & Morales, N. (2011). *Medida de Resistividad de Terreno*. Universidad de Chile, Departamento de Ingeniería Eléctrica, Santiago, Chile.
Obtenido de https://www.academia.edu/download/38618576/1_Informe_Resistividad_de_Suelo.pdf
- Asociación Notio. (s.f.). *Técnica Geofísica del Georradar*. Toledo. Obtenido de <https://www.notio.es/wp-content/uploads/2019/07/georradar-NOTIO.pdf>
- Auge, M. (2008). *Métodos Geoeléctricos para la Prospección de Agua Subterránea*. Universidad de Buenos Aires, Buenos Aires, Argentina. Obtenido de <http://tierra.rediris.es/hidrored/ebooks/miguel/ProspeccGeoelec.pdf>
- Campos Magaña, S. G., López López, J. A., Cadena Zapata, M., Reynolds Chávez, M. A., Cuervo Piña, N., & Ramírez Fuentes, G. (2015). Desarrollo de un penetrómetro integrado con tecnología GPS-RTK para la generación de mapas de resistencia a la penetración del suelo. *Terra Latinoamericana*, vol. 33(no. 2), pp. 119-128.
Obtenido de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0187-57792015000200119&lng=es&tlng=es.
- Cárdenas Valencia, J. D., & Galvis Garcia, E. (2011). *Manual para la interpretación del perfil de resistividad obtenido al realizar el estudio de la resistividad del suelo a partir de las configuraciones del método de Wenner*. Proyecto de grado, Universidad Tecnológica de Pereira, Facultad de Tecnologías, Programa de Tecnología Eléctrica, PEREIRA. Obtenido de http://www.academia.edu/download/52476502/medicion_de_tierra.pdf
- Chiappini, A. (29 de 03 de 1996). Ecología y Enseñanza Rural. En A. C. Schlegel.
Obtenido de Wikipedia, La enciclopedia libre.: <http://www.fao.org/3/w1309s/w1309s04.htm>

- Cuevas Zambrano, A. (11 de 10 de 2002). *Normatividad Forense - Resolución 000485*.
Obtenido de Instituto Nacional de Medicina Legal y Ciencias Forenses:
<https://www.medicinalegal.gov.co/documents/20143/69278/32-+Resolucion+000485-2002.pdf>
- Demuner Molina, G., Cadena Zapata, M., & Campos Magaña, S. G. (10 de 09 de 2013).
Resistencia a la penetración en un suelo franco arcilloso a dos años de manejo
con tres sistemas de labranza. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, Vol. 22,
pp. 68-71. Obtenido de
http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2071-00542013000500012&lng=es&tlng=pt.
- Domínguez Palacio, D., Pozo Gálvez, C., & León Sánchez, M. A. (12 de 07 de 2018).
Estimación de la densidad volumétrica y porosidad total usando el penetrómetro.
Cultivos Tropicales, Vol. 39(No. 4), pp. 34-41. Obtenido de
http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0258-59362018000400005&lng=es&tlng=en.
- Duque Piedrahita, M. A. (03 de 12 de 2004). *Normatividad Forense - Resolución 001019*.
Obtenido de Instituto Nacional de Medicina Legal y Ciencias Forenses:
<https://www.medicinalegal.gov.co/documents/20143/69383/1019.pdf>
- E. van den Bogaard. (2014). *Penetrologger*. Obtenido de Eijkelpamp Soil & Water:
https://www.eijkelpamp.com/download.php?file=M10615SAe_Penetrologger_d12b.pdf
- EcuRed contributors. (2019). *Penetrómetro*. Obtenido de EcuRed:
<https://www.ecured.cu/index.php?title=Penetr%C3%B3metro&oldid=3361675>
- Franco Maz, P. G. (12 de 03 de 2008). *Normatividad Forense-Resolución 000281*.
Obtenido de Instituto Nacional de Medicina Legal y Ciencias Forenses:
<https://www.medicinalegal.gov.co/documents/20143/69393/9-+Resolucion+000281-2008.pdf>

Franco Maz, P. G. (06 de 08 de 2009). *Normatividad Forense - Resolución 000733*.

Obtenido de Instituto Nacional de Medicina Legal y Ciencias Forenses:

<https://www.medicinalegal.gov.co/documents/20143/69396/5-+Resolucion+000733-2009.pdf>

Geophysical Studies. (s.f.). *Potencial inducido*. Obtenido de

<https://www.geophysicalstudies.cl/dipolodipolo.html>

Gómez Giraldo, J. C., & Osorio Canal, M. R. (2013). *Manual de prácticas de campo y del laboratorio de suelos*. Bogotá: Servicio Nacional de Aprendizaje (SENA). Obtenido de <https://hdl.handle.net/11404/2785>

Griem-Klee, S. (2016). Métodos eléctricos: resistividad basándose en la transmisión de corriente directa . En S. Griem-Klee, *Apuntes Geología*. Región de Atacama, Chile: www.geovirtual2.cl. Obtenido de <https://www.geovirtual2.cl/EXPLORAC/TEXT/070-electrico-resistividad-configuracion-electrodos.htm>

Henríquez, C., Ortiz, O., Largaespada, K., Portugués, P., Vargas, M., Villalobos, P., & Gómez, D. (2011). *Determinación de la resistencia a la penetración, al corte tangencial, densidad aparente y temperatura en un suelo cafetalero, Juan Viñas, Costa Rica*. Sede del Atlántico de la Universidad de Costa Rica, Centro de Investigaciones Agronómicas, San José, Costa Rica. Obtenido de https://www.scielo.sa.cr/scielo.php?pid=S0377-94242011000100010&script=sci_arttext

Instituto Nacional de Medicina Legal y Ciencias Forenses. (2020). *Registro nacional de desaparecidos (RND)*. Consultas publicas (Desaparecidos y Cadáveres), Bogotá, Colombia. Obtenido de <https://siclico.medicinalegal.gov.co/consultasPublicas/>

INTA PRECOP. (2014). *Ensayo de compactación: Radiales vs. Convencionales en cosecha*. Obtenido de <https://mitreyelcampo.cienradios.com/ensayo-de-compactacion-radiales-vs-convencionales-en-cosecha/>

- LH, B. (s.f.). *Factores que influyen en la resistividad*. Montaje de las puestas a tierra. Obtenido de https://ikastaroak.ulhi.net/edu/es/IEA/IEI/IEI05/es_IEA_IEI05_Contenidos/website_411_factores_que_influyen_en_la_resistividad.html
- Lorusso, F. (2020). *Fosas clandestinas y ley de búsqueda de desaparecidos en Guanajuato*. Obtenido de <https://www.zonadocs.mx/2020/03/04/fosas-clandestinas-y-ley-de-busqueda-de-desaparecidos-en-guanajuato/>
- Losinno, B. N., Sainato, C. M., Malleville, H. J., & Galindo, G. (01 de 09 de 2008). Tomografía de Resistividad Eléctrica Aplicada a la Caracterización de Sitios Contaminados en Tambos. *Ciencia del suelo*, Vol. 26(No 2), p. 141-152. Obtenido de http://www.suelos.org.ar/publicaciones/vol_26n2/26-2%20Losinno.pdf
- Minaya Lizárraga, A., & Acahuana Mollo, M. B. (2019). *Estudio Geofísico de Resistividad Eléctrica aplicando la configuración Dipolo – Dipolo para localización de cavidades en el municipio de solidaridad, playa del Carmen, estado de Quintana, ROO, Mexico “Proyecto Predio 3.04 HAS”*. Facultad De Geología, Geofísica Y Minas. Arequipa – Perú: Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa. Obtenido de <http://repositorio.unsa.edu.pe/handle/UNSA/8904>
- Molina Gallego, C. M. (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*. Tesis Doctorado, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá. Obtenido de <http://www.bdigital.unal.edu.co/52016/>
- Molina, C. M. (2020). Testing Application of Geographical Information Systems, Forensic Geomorphology and Electrical Resistivity Tomography to Investigate Clandestine Grave Sites in Colombia, South America. *Journal of Forensic Sciences*, 65(1), p. 266-273. doi:10.1111/1556-4029.14168
- Morales Martínez, P. E. (2018). *Las Labores Forenses de Búsqueda e Identificación de Desaparecidos en Colombia*. Bogotá, Colombia: Universidad de los Andes.

Obtenido de <https://uniandes.edu.co/es/noticias/derecho/las-labores-forenses-de-busqueda-e-identificacion-de-desaparecidos-en-colombia>

Perdomo, S., & Ainchil, J. E. (2009). *Tomografía eléctrica en apoyo de la investigación arqueológica*. Tesis de grado, Universidad Nacional de La Plata, Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas, Perdomo, Santiago. Obtenido de <http://digital.cic.gba.gob.ar/handle/11746/3031>

Quintana Berlanga, Á. R., & Teixidó I Ullod, T. (2013). *Aplicación de la Tomografía Eléctrica en la Caracterización del Deslizamiento de Doña Mencía*. Tesis de Máster, Universidad de Granada, Granada, España. Obtenido de https://www.juntadeandalucia.es/export/drupaljda/20130924_Tomografia_electrica_TFM_GEOMET_AQB.pdf

Rondón Quintana, H. A., & Guzmán Millán, M. L. (2010). Influencia de la granulometría sobre la resistencia mecánica de una mezcla asfáltica modificada con desecho de policloruro de vinilo (PVC). *Studiositas, Vol. 5(Nº. 3)*, p. 69-84. Obtenido de <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=3951159>

Sagripanti, G. L., Villalba, D., Aguilera, D., & Giaccardi, A. (2017). *Avances de la Geología Forense en Argentina: Búsqueda con Métodos No Invasivos de Personas Víctimas de Desaparición Forzada*. Universidad Industrial de Santander, Argentina. doi: <http://dx.doi.org/10.18273/revbol.v39n3-2017004>

Sagripanti, G., Villalba, D., Aguilera, D., & Giaccardi, A. (27 de 01 de 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*. Obtenido de <https://pdfs.semanticscholar.org/32a1/1090b82dc2929581381f999d717824a06ad7.pdf>

Sánchez Escolano, L. M., & Ruíz Moya, N. (2019). Nuevos Territorios y Enfoques para el Desarrollo Local. El Olivar de Alcolea de las Alpujarras (Almería). *Espacio, Tiempo y Forma, Serie VI(No 12)*, pp. 215-240. doi:10.5944/etfvi.12.2019.23909

- Sanhueza, C. & Villavicencio, G. (30 de 06 de 2010). Estimación de Parámetros Resistentes a Partir del Ensayo de Penetración PANDA y su Aplicación en el Cálculo de la Capacidad de Soporte y Asentamientos del Suelo de Fundación (1a parte). *Revista de la Construcción, Volumen 9 No 1 - 2010*, 120 - 131.
doi:<http://dx.doi.org/10.4067/S0718-915X2010000100013>
- Santelli, P., Ribeiro Calbo, M. E., & Gimenez Calbo, A. (2009). Fisiología pós-colheita de frutos da palmeira *Mauritia vinifera* Mart. (Arecaceae). *Acta Botanica Brasílica*, vol.23(no.3), pp. 697-702. doi:<https://doi.org/10.1590/S0102-33062009000300008>
- Sepúlveda, R. B. (2007). *La relación entre la densidad aparente y la resistencia mecánica como indicadores de la compactación del suelo*. Universidad de Málaga, Málaga, España. Obtenido de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-31952009000300002&lng=es&tling=es.
- Shaxson, F. &. (2008). Optimizacion De La Humedad Del Suelo Para La Produccion Vegetal-el Significado De La Porosidad Del Suelo. *Food & Agriculture Org., 79*. Obtenido de Wikipedia, La enciclopedia libre.:
<https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=K-JwJZw1hMwC&oi=fnd&pg=PP10&dq=humedad+suelo&ots=ghzMcbzr4J&sig=0K0Kb0C0yBgpfaDa73Q56QQKUI>
- Tenza Pongutá, J. P. (2016). *Estudio de las propiedades mecánicas de suelos agrícolas a partir de pruebas in situ y de laboratorio para modelos de labranza y tracción*. Magister en Ingeniería – Ingeniería Agrícola, Universidad Nacional de Colombia, Departamento de Ingeniería Civil y Agrícola, Bogotá D.C. Obtenido de <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/58073>
- Toledo Baca, J. C. (2016). *Aplicación de los métodos geoelectricos en la prospección geofísica*. Tesis, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Facultad de Ciencias Físicas, EAP. de Física, Lima, Perú. Obtenido de <http://hdl.handle.net/123456789/4984>

Toledo Bruzual, V., & Millán Boadas, Z. (06 de 04 de 2016). Construcción y calibración de un penetrómetro de impacto para medir los efectos del senderismo. *Ciencia, Docencia y Tecnología*, Vol. 27(Núm. 52). Obtenido de <http://pcient.uner.edu.ar/cdyt/article/view/141>

Valdes Moreno, C. E. (29 de 07 de 2015). *Normatividad Forense - Resolución 000580*. Obtenido de Instituto Nacional de Medicina Legal y Ciencias Forenses: <https://www.medicinalegal.gov.co/documents/20143/69406/RESOLUCI%C3%93N+000580+%281%29.pdf>

Villavicencio, G. , Breul, P., Espinace, R., & Valenzuela, P. . (19 de 06 de 2012). Control de compactación con penetrómetro ligero en tranques de relaves, considerando su variabilidad material y estructural. *Revista de la Construcción*, Vol. 11(No 1), pp. 119 - 133. doi:<http://dx.doi.org/10.4067/S0718-915X2012000100011>

Weinzettel, P., Varni, M., Dietrich, S., & Usunoff, E. (2009). *Evaluación de tres dispositivos de tomografía eléctrica para la identificación de horizontes petrocálcicos en el suelo*. Universidad Nacional del Centro de la Provincia, Comisión de Investigaciones Científicas de la Provincia de Buenos Aires, Azul (Buenos Aires). Obtenido de http://www.suelos.org.ar/publicaciones/vol_27n1/Weinzettel.pdf