



**CARACTERIZACIÓN DEL SUB-SUELO CON TOMOGRAFÍA ELÉCTRICA
EN UNA ZONA DE LA SEDE USME DE LA UNIVERSIDAD ANTONIO
NARIÑO.**

David Felipe Martínez Colmenares

10481718844

Universidad Antonio Nariño

Programa Ingeniería Civil

Facultad de Ingeniería Civil

Bogotá, Colombia

2022

**CARACTERIZACIÓN DEL SUB-SUELO CON TOMOGRAFÍA ELÉCTRICA
EN UNA ZONA DE LA SEDE USME DE LA UNIVERSIDAD ANTONIO
NARIÑO.**

David Felipe Martínez Colmenares

Director (a):

Ph.D., Carlos Martin Molina Gallego

Línea de Investigación:

Proyecto de Investigación

Grupo de Investigación:

GRESIA

Universidad Antonio Nariño

Programa Ingeniería Civil

Facultad de Ingeniería Civil

Ciudad, Colombia

Año 2022

NOTA DE ACEPTACIÓN

El trabajo de grado titulado

_____.

Cumple con los requisitos para optar

Al título de _____.

Firma del Tutor

Firma Jurado

Firma Jurado

16, Mayo / 2022.

(Dedicatoria)

Este trabajo va dedicado, a mi padre Raúl y mi madre Consuelo, quienes son mi motor y con sus sabios consejos me guiaron por el buen camino, a mis hermanos y hermanas quienes con su apoyo me motivaron a salir adelante pese a todas las dificultades que la vida nos ha puesto y a todas aquellas personas que de alguna u otra manera generaron una motivación en mi para poder desarrollar mi carrera de manera exitosa.

Agradecimientos

En primera instancia, quisiera agradecerle a Dios por la vida que me dio y por las bendiciones que ha puesto en mi camino, a mis padres, mis hermanos y mis hermanas, por creer en mi y apoyarme desde el inicio de este proyecto y de todos mis procesos personales, al profesor Carlos Molina por el acompañamiento, la paciencia y sus sabios consejos durante el desarrollo de este proyecto, al profesor Juan Pablo Rodríguez y al profesor Alcibíades por su gran ayuda en todo lo que se requirió en la Sede de Usme y en el préstamo del equipo para poder realizar este trabajo, a la Universidad Antonio Nariño por garantizar el espacio, los documentos y los equipos requeridos para poder realizar de manera satisfactoria mi trabajo de grado.

“Y por último y no menos importante, quiero agradecerme por creer en mí, quiero agradecerme por hacer todo este gran trabajo, quiero agradecerme por no tener días libres, quiero agradecerme por nunca renunciar, quiero agradecerme por siempre dar y tratar de dar más sin recibir, quiero agradecerme por tratar de hacer el bien más que el mal, quiero agradecerme por ser yo en todo momento”

-Snoop Dogg-

Resumen

La Universidad Antonio Nariño (UAN) plantea dentro de sus planes de ingeniería la construcción de un “Parque Tecnológico” en la sede Usme de dicha institución, si bien se tienen una serie de estudios previos de suelos se localizan también un conjunto de vacíos sobre los cuales no se tiene información detallada de la composición del suelo. De esta forma se plantea la opción de realizar una investigación más profunda con el fin de tener un conocimiento más amplio de los tipos de suelos presentes en esta locación, considerando lo anterior, la propuesta consiste en realizar la caracterización de una zona en específico dentro de la universidad utilizando la aplicación un método geofísico conocido como “ensayo de resistividad eléctrica del subsuelo” como complemento a los ensayos convencionales en lo que a estudios de caracterización suelos se refiere.

La presente investigación describe el proceso que se realizó en la sede Usme de la Universidad Antonio Nariño (UAN) para realizar una caracterización del subsuelo a partir de la aplicación de los conocimientos que se tienen sobre la resistividad eléctrica del suelo, para la adquisición de datos se utilizó un tomógrafo eléctrico de propiedad de la UAN, se realizaron 4 líneas de resistividad eléctrica paralelas con un espaciamiento de 5 metros entre los electrodos con un total de 32 electrodos para una longitud por línea de 160 metros y se utilizó el arreglo Wenner para el espaciamiento de los electrodos y toma de datos en campo, a partir de la aplicación de esta metodología se logró establecer un perfil del subsuelo junto con las anomalías encontradas allí con una profundidad máxima de 26 metros con respecto a la superficie

Palabras clave: *Resistividad eléctrica, Método Wenner, Tomografía eléctrica, Sub-suelo.*

Abstract

The Antonio Nariño University (UAN) proposes within its engineering plans the construction of a " Parque Tecnológico " in the Usme headquarters of this institution, although there are a series of previous soil studies, there are also a set of gaps about which there is no detailed information of the soil composition. Thus, the option of carrying out a deeper investigation in order to have a broader knowledge of the types of soils present in this location is proposed, considering the above, the proposal is to perform the characterization of a specific area within the university using the application of a geophysical method known as "electrical resistivity test of the subsoil" as a complement to conventional tests as far as soil characterization studies are concerned.

The present research describes the process that was carried out at the Usme campus of the Antonio Nariño University (UAN) proposes within its engineering plans the construction of a Technological-ecological Park at the Usme campus of this institution, although there are a series of previous soil studies, there are also a number of gaps on which there is no detailed information on the soil composition. Thus, the option of carrying out a deeper investigation in order to have a broader knowledge of the types of soils present in this location is proposed, considering the above, the proposal is to perform the characterization of a specific area within the university using the application of a geophysical method known as "electrical resistivity test of the subsoil" as a complement to conventional tests as far as soil characterization studies are concerned.

This research describes the process that was carried out at the Usme headquarters of the Universidad Antonio Nariño (UAN) to perform a subsoil characterization based on the application of the knowledge of the electrical resistivity of the soil, for the acquisition of data an electrical tomograph owned by the UAN was used, 4 parallel electrical resistivity lines were made with a spacing of 5 meters between electrodes with a total of 32 electrodes for a length per line of 160 meters and the Wenner arrangement was used for the spacing of the electrodes and data collection in the field, from the application of this methodology it was possible to establish a profile of the subsoil along with the anomalies found there with a maximum depth of 26 meters from the surface.

Key words: Electrical resistivity, Wenner method, Electrical tomography, Subsoil.

Contenido

PÁG.

Contenido

1. INTRODUCCIÓN.....	1
2. OBJETIVOS	3
2.1. GENERAL:.....	3
2.2. ESPECÍFICOS:	3
3. MARCO CONCEPTUAL.....	4
3.1. RESISTIVIDAD DEL SUELO.	4
3.1.1. <i>Factores que influyen en la resistividad del suelo.</i>	7
3.2. CARACTERÍSTICAS DE INTERES DE LOS MATERIALES Y DEL SUELO. :.....	8
3.3. ARREGLOS PARA LA DISPOSICIÓN DE LOS ELECTRODOS:	10
3.3.1. <i>Método Wenner:</i>	11
3.3.2. <i>Método Schlumberger:</i>	11
3.3.3. <i>Método Dipolo-Dipolo:</i>	12
4. ESTADO DEL CONOCIMIENTO.	13
4.1. ANTECEDENTES DE ESTUDIOS EN LA SEDE USME.	13
4.2. CONTEXTO DEL USO DE LA TOMOGRAFÍA ELÉCTRICA.	19
5. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	21
6. METODOLOGÍA.	22
6.1. ÁREA DE ESTUDIO.	22
6.2. DISEÑO GEOMÉTRICO Y ADQUISICIÓN DE DATOS.....	25
6.3. CONSOLAS E IMPLEMENTOS.	27
7. RESULTADOS.....	30
7.1. RESULTADOS POR LÍNEA.	30
7.2. MODELO 3D.....	34
8. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	36
8.1. LÍNEA 1:.....	36
8.2. LÍNEA 2:.....	38
8.3. LÍNEA 3:.....	39
8.4. LÍNEA 4:.....	40
8.5. MODELO 3D:.....	40
9. CONCLUSIONES.....	42
10. RECOMENDACIONES	43
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	44

Lista de Ilustraciones

Figura 3-1 Esquema básico de los métodos de resistividad eléctrica.	4
Figura 3-2 Método Wenner.....	11
Figura 3-3 Método Schlumberger.....	12
Figura 3-4 Método Dipolo-Dipolo.....	13
Figura 4-1 Localización de las perforaciones realizadas por la UAN como parte de los estudios de suelos previos.	15
Figura 4-2 Geología local, unidades geológicas superficiales.....	16
Figura 4-3 Sobreposición de imágenes del área de estudio / Geología local.....	17
Figura 4-4 Sobreposición de imágenes área de estudio / Perforaciones realizadas.....	17
Figura 4-5 Resultados perforación P9 realizado por la UAN.....	18
Figura 6-1 UPZ USME.....	23
Figura 6-2 Localización Área de Estudio.....	24
Figura 6-3 Perfil Elevación Área de Estudio.....	24
Figura 6-4 Área de estudio delimitada por las líneas de resistividad 1 - 4.....	25
Figura 6-5 Instalación GeoAmp para la adquisición de datos.....	26
Figura 6-6 Variación del espaciamiento de acuerdo a la profundidad utilizando el arreglo Wenner.....	27
Figura 6-7 Consola ASM-001.....	28
Figura 6-8 Consola GEOAMP-303.....	29
Figura 6-9 Montaje de los Equipos in situ.....	29
Figura 6-10 Valores de Resistividad por color.....	30
Figura 6-11 Resultados Línea 1.....	31
Figura 6-12 Resultados Línea 2.....	32
Figura 6-13 Resultados Línea 3.....	32
Figura 6-14 Resultados Línea 4.....	33
Figura 6-15 Modelo 3D líneas 1 – 4 integradas a 0 metros para ver su relación.....	34
Figura 6-16 Modelo 3D líneas 1 – 4 integradas a 10 metros para ver su relación.....	35
Figura 6-17 Modelo 3D líneas 1 – 4 integradas a 20 metros para ver su relación.....	35

Lista de tablas

Tabla 3-1 Algunos Valores típicos de resistividad y conductividad del suelo.	9
Tabla 3-2 Algunos valores típicos de resistividad del suelo de acuerdo a las condiciones climáticas a las que está sometido.	10
Tabla 3-3 Resistividades de terrenos	10
Tabla 6-1 Coordenadas satelitales por línea de resistividad eléctrica.....	25
Tabla 6-2 Perfil geológico estimado línea 1.	36
Tabla 6-3 Perfil geológico estimado línea 2.	38
Tabla 6-4 Perfil geológico estimado línea 3.	39
Tabla 6-5 Perfil geológico estimado línea 4.	40

1. Introducción

A lo largo de los años, la aplicación de métodos geofísicos para realizar exploraciones de campo se ha incrementado sustancialmente, en específico, para la caracterización de suelos ha sido una práctica que se ha vuelto cada vez más común en la rama de la ingeniería civil y afines, esto se debe a que, a diferencia de las perforaciones manuales o mecánicas, las cuales cabe mencionar resultan ser las metodologías más comunes para realizar estudios de suelos, por lo general son métodos no intrusivos y que permiten realizar una descripción detallada de algunos componentes de interés del suelo, tal es el caso del ensayo de resistividad eléctrica sobre el cual se va a enfocar la ejecución de este trabajo, dicha práctica permite interpretar y caracterizar el subsuelo a partir de modelos en 2D y 3D las propiedades geofísicas presentes en el, es importante resaltar que la mayor parte de los materiales que componen el subsuelo de la Tierra conducen electricidad, en algunos esta conductividad eléctrica es más marcada que en otros, pero en su mayoría este valor es medible.

Para poder realizar bien dicha caracterización, es importante tener en consideración la resistencia de los materiales al paso de la corriente, pues en pocas palabras, el método consiste en realizar una serie de descargas eléctricas al suelo a través de unos elementos llamados electrodos, cabe resaltar que el espaciamiento de estos electrodos y la profundidad a la cual se va a realizar el estudio depende del arreglo que se vaya a aplicar, en la actualidad los 3 métodos más utilizados son Wenner, Wenner-Schlumberger y Dipolo-Dipolo; esto dependiendo del objetivo de la exploración.

En la actualidad, la Universidad Antonio Nariño encuentra en su proyecto llamado “Parque Tecnoecológico una de las iniciativas más importantes e interesantes en su historia en cuanto a urbanización y construcciones civiles, es por ello que la caracterización del subsuelo que se realizó para el desarrollo de este proyecto fue dentro de las instalaciones de la sede Usme de la universidad con el fin de determinar que características tiene el subsuelo que hay en esta locación y así brindar un soporte que sirva de apoyo en futuros estudios de suelos en ese lugar.

2. Objetivos

2.1. General:

Realizar la caracterización geofísica del subsuelo presente en una zona ubicada dentro de las instalaciones de la sede Usme de la Universidad Antonio Nariño a través de ensayos de resistividad eléctrica utilizando el tomógrafo eléctrico utilizando el método Wenner.

2.2. Específicos:

- Analizar la información obtenida en las exploraciones en campo realizadas con el tomógrafo eléctrico en el área de estudio.

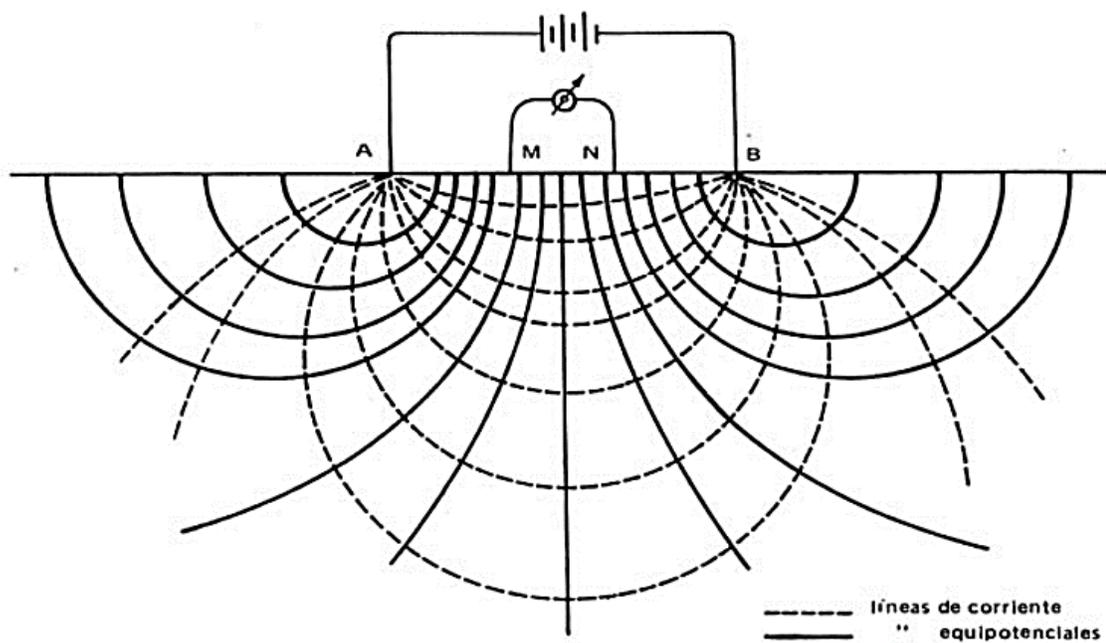
- Definir la composición geofísica del subsuelo del área de estudio a través de mediciones de resistividad eléctrica.

- Modelar en 2 y 3 dimensiones los resultados obtenidos en campo utilizando el software ZondRes2D y realizar un perfil geofísico de las líneas de resistividad realizadas.

3. Marco Conceptual.

Al realizar un estudio de resistividad eléctrica en suelos, es importante tener en cuenta una serie de factores importantes en el desarrollo del ensayo, como la distribución espacial de los electrodos (ver Figura 3-1), así mismo, las propiedades de los materiales juegan un factor clave en este tipo de estudios, pues será con base en estas propiedades que se realizará el respectivo desarrollo y análisis de resultados, a continuación se plantean los principales factores a tener en cuenta:

Figura 3-1 Esquema básico de los métodos de resistividad eléctrica.



Fuente: (Serrano, 2003).

3.1. Resistividad del suelo.

La Resistividad del suelo ρ (Ωm) se puede definir como la resistencia que hay entre las caras de un cubo que tiene de lado 1 m, el cual es llenado con la fracción de subsuelo

que se desea analizar (Moreno et al., 2007), ésta puede propagarse debajo de la superficie de tres maneras diferentes dependiendo de sus propiedades: conductividad eléctrica, conducción electrónica, y conducción electrolítica, con base en lo anterior, se establece que la conducción electrolítica es el modo de propagación más relevante para este informe, pues es con base en está en el que se establecen los métodos de resistividad (Serrano, 2003).

Con base en lo anterior se tiene que:

$$R = \rho \frac{L}{A} \quad (1)$$

$$\rho = R \frac{A}{L} \quad (2)$$

Donde:

R es la Resistencia eléctrica entre las caras del cubo medida en ohmios (Ω)

L es la longitud del material medida en metros (m)

A es el área transversal medida en metros cuadrados (m^2)

ρ es la resistividad medida en ohmios metro (Ωm)

Suponiendo un Semiespacio uniforme e isotrópico, el valor del potencial V de un punto en particular con una separación r a con respecto a un electrodo en específico se puede expresar de la siguiente forma (Serrano, 2003):

$$V = \frac{I\rho}{2\pi r} \quad (3)$$

Donde:

V es el potencial eléctrico

I es la intensidad a la que es sometido el sistema

r es la distancia con respecto al electrodo

ρ es la resistividad medida en ohmios metro (Ωm)

De igual forma, tomado como referencia la ecuación 3, para una distribución electródica como la que es mostrada en la Figura 3-1, el potencial medido por los electrodos M y N será (Serrano, 2003):

$$V_M = \frac{I\rho}{2\pi r} \left[\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} \right] \quad (4)$$

$$V_N = \frac{I\rho}{2\pi r} \left[\frac{1}{AN} - \frac{1}{BN} \right] \quad (5)$$

Así mismo, se tiene que la diferencia de potencial ΔV_{MN} se plantea de la siguiente forma.

$$\Delta V_{MN} = \frac{I\rho}{2\pi r} \left[\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{BN} \right] \quad (6)$$

La resistividad se puede entender como una medición de la facilidad o dificultad con la que la corriente eléctrica se desplaza a través de un material en específico, de esta forma, se establece que la resistividad ρ_a en el punto medio del sistema se puede expresar como (Serrano, 2003):

$$\rho_a = \frac{\Delta V}{I} K \quad (7)$$

Donde:

El término K es el Coeficiente del dispositivo y dependerá de la distancia de los electrodos del montaje, así mismo se puede entender de la siguiente forma.

$$K = \frac{2\pi}{\left[\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{BN}\right]} \quad (8)$$

Para cada arreglo el valor de K varia dado que el espaciamiento de los electrodos no es el mismo, por ende, se plantean los siguientes valores de K de acuerdo al configuración aplicada (Serrano, 2003).

$$K = 2a \quad (\text{Wenner})$$

$$K = \frac{(a + b) - 2a}{a} \quad (\text{Schlumberger})$$

3.1.1. Factores que influyen en la resistividad del suelo.

Es importante establecer previamente qué valores pueden ser variables o constantes dentro de los factores que influyen al momento de realizar una lectura de resistividad del suelo, dentro de los valores constantes, se puede establecer el tipo de suelo, la estratificación que posee y el nivel de compactación del terreno sobre el cual se hace la exploración, pues se consideran propiedades inherentes de la formación geológica del suelo, en contraste a lo anterior, algunos aspectos que se pueden considerar variables son el contenido de humedad, pues a mayor contenido de esta es menor la resistividad, de igual forma, a medida que la resistividad incrementa, el suelo es mas seco, todo esto se debe que el agua presenta una alta conductividad eléctrica, por lo cual, un suelo muy saturado presenta un bajo valor de resistividad eléctrica (Spers, 2020), con base en lo anterior, cuando se realizan lecturas de resistividad electrica se deben considerar tambien las condiciones climaticas bajo las cuales se ejetuan las lecturas de resistividad eléctrica, pues el contenido de humedad del suelo va ligado tambien al verano o al invierno al que está sometido el terreno a intervenir (Giles, 2021); la temperatura, ya que la teoría indica que por debajo de los 0° C la resistividad del

terreno incrementa debido a que el agua contenida en el suelo se encuentre congelada lo que representa que la conductividad es casi nula; la composición química y su concentración (Briceño, 2015).

3.2. Características de interés de los materiales y del suelo.:

Cada material posee una serie de características como humedad, densidad, dureza, entre otras, sin embargo, si bien es cierto que todas estas afectan de alguna u otra manera la lectura que se hace de la resistividad del terreno debido a que está no es un valor constante, no obstante, diferentes autores y normas especializadas en la instalación de puestas a tierra tales como el Código Eléctrico Colombiano (NTC 2050, 1998) y el reglamento electrónico para baja tensión e ITC en su título 18 (ITC-BT-18, 2002), que sugieren tanto los métodos como algunos valores orientativos de resistividades del suelo, en las tablas 3-1, 3-2 y 3-3 algunas resistividades típicas de los materiales (Cárdenas Valencia & Galvis García, 2011):

Tabla 3-1 Algunos Valores típicos de resistividad y conductividad del suelo.

Material	Resistividad (ohm.m)	Conductividad (Siemens)
Rocas Ígneas y Metamórficas		
Granito	$5 \times 10^3 - 10^6$	$10^{-6} - 2 \times 10^{-4}$
Basalto	$10^3 - 10^6$	$10^{-6} - 10^{-3}$
Pizarra	$6 \times 10^3 - 4 \times 10^6$	$2 \times 10^{-8} - 1.7 \times 10^{-3}$
Mármol	$10^2 - 2.5 \times 10^8$	$4 \times 10^{-9} - 10^{-2}$
Cuarcita	$10^2 - 2 \times 10^8$	$5 \times 10^{-9} - 10^{-2}$
Rocas Sedimentarias		
Arenisca	$8 - 4 \times 10^3$	$2.5 \times 10^{-4} - 0.125$
Esquisto	$20 - 2 \times 10^3$	$5 \times 10^{-4} - 0.05$
Limolita	$50 - 4 \times 10^2$	$2.5 \times 10^{-3} - 0.02$
Suelos y Agua		
Arcilla	1 - 100	0.01 - 1
Aluvión	10 - 800	$1.25 \times 10^{-3} - 0.1$
Agua Fresca	10 - 100	0.01 - 0.1
Agua de Mar	0.2	5
Químicos		
Hierro	9.074×10^{-8}	$1.102 - 10^7$
0.01 M Cloruro de Potasio	0.708	1.413
0.01 M Cloruro de Sodio	0.843	1.185
0.01 M Ácido Acético	6.13	0.163
Xileno	6.998×10^{16}	1.429×10^{-17}

Fuente: (López et al., 2010)

Tabla 3-2 Algunos valores típicos de resistividad del suelo de acuerdo a las condiciones climáticas a las que está sometido.

Tipo de suelo	Condiciones climáticas			
	A Precipitaciones normales y abundantes (más de 500 mm por año)		B Precipitaciones escasas y condiciones desérticas (menos de 500 mm por año)	C Aguas subterráneas salinas
	Valor más probable	Gama de valores medidos	Gama de valores medidos	Gama de valores medidos
	Ωm	Ωm	Ωm	Ωm
Aluvial y arcillas livianas	5	*	*	1 a 5
Arcillas (excluy. al aluvial)	10	5 a 20	10 a 100	3 a 10
Greda	20	10 a 20	50 a 300	3 a 10
Tierra calcárea porosa (por ejemplo greda)	50	30 a 100	50 a 300	3 a 10
Arenisca porosa	100	30 a 300	> 1000	10 a 30
Cuarzos y piedra caliza compacta y cristalina	300	100 a 1000	> 1000	30 a 100
Pizarras arcillosas y esquistos pizarrosos	1000	300 a 3000	> 1000	30 a 100
Granito	1000	300 a 3000	> 1000	30 a 100
Pizarras rajadizas, rocas ígneas	2000	> 1000	>1000	30 a 100

Fuente: (Eléctricas, 2017)

Tabla 3-3 Resistividades de terrenos

Resistividades de terrenos	
Tipo de suelo	Resistividad Ωm
Terrenos pantanosos	de 1 a 30
Limo	20 a 100
Humus	10 a 150
Turba húmeda	5 a 100

Fuente: (Eléctricas, 2017)

3.3. Arreglos para la disposición de los electrodos:

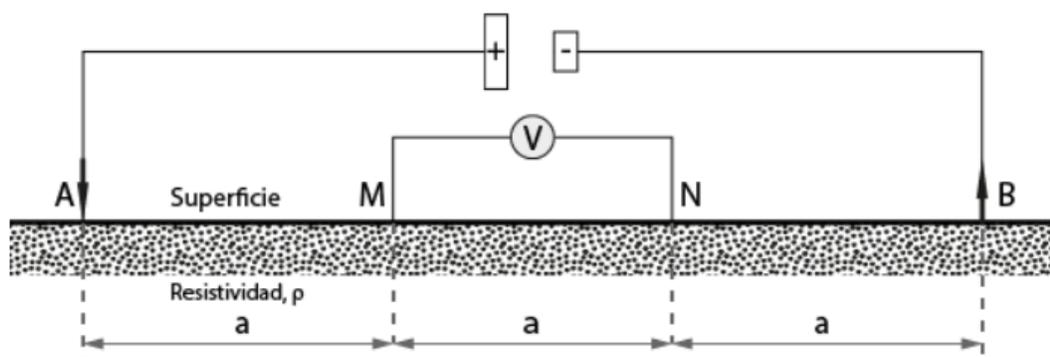
Existen diferentes tipos de diseños geométricos o arreglos para realizar el montaje y la distribución espacial de los electrodos, para el desarrollo de este trabajo, se plantean los siguientes dos arreglos:

3.3.1. Método Wenner:

Este método consiste en la disposición de 4 electrodos en el suelo de tal forma que formen un ángulo de 180° entre sí, es decir, una línea recta; de igual forma la separación “a” entre dichos electrodos debe ser igual tal como lo muestra la Figura 3-2, adicional a eso, la profundidad a la que están enterrados los electrodos debe ser al menos $a > 20 b$ donde b sea la profundidad a la cual está enterrado el electrodo, a través del aparato o dispositivo con el cual se esté trabajando, se realiza una descarga eléctrica por los electrodos externos y se recibe la caída de potencial de potencial V con los electrodos internos, luego de esto el aparato muestra la resistencia aparente mediante la relación V/I , esta relación está dada en ohmios. Para medir la resistividad aparente (P_a) se tiene la siguiente ecuación: (Villa Acevedo et al., 2019).

$$P_a = 2\pi * a * R \quad (9)$$

Figura 3-2 Método Wenner.



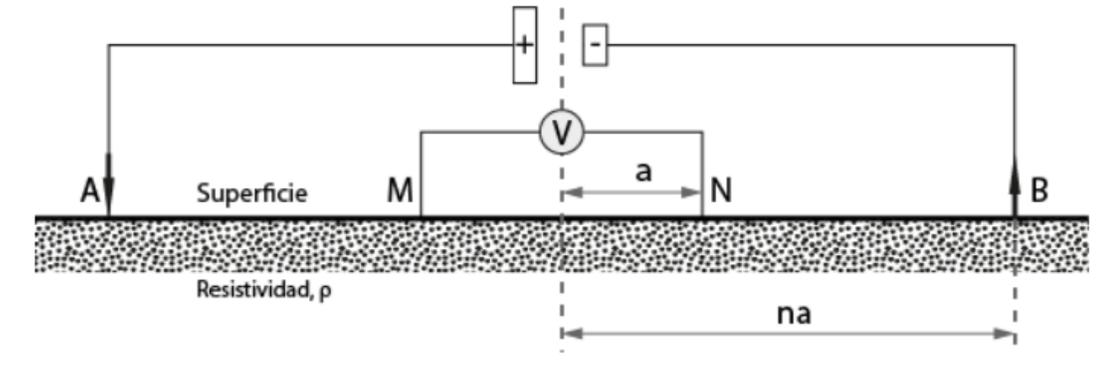
Fuente: (OCSA, 2022).

3.3.2. Método Schlumberger:

En este arreglo es muy similar al anterior, sin embargo, la separación de los electrodos MN y AB aumentan teniendo en consideración a los electrodos NB, pero

conservando una relación de n veces la distancia a , tal como lo muestra la Figura 3-3 (Weinzettel et al., 2009).

Figura 3-3 Método Schlumberger



Fuente: (OCSA, 2022).

3.3.3. Método Dipolo-Dipolo:

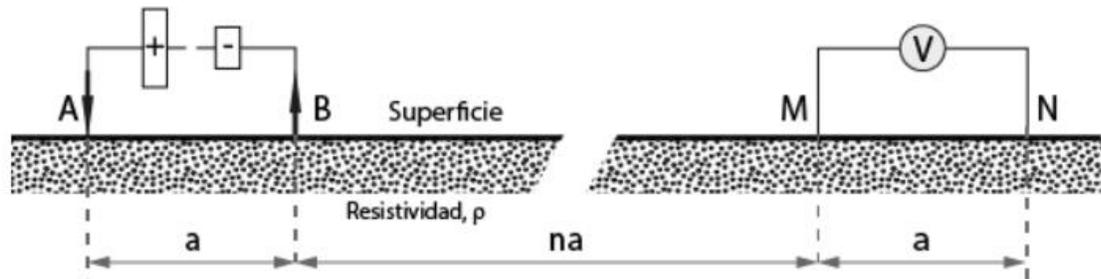
El método Dipolo-Dipolo consiste en hacer pasar una corriente a través de un par de electrodos A y B distanciados entre ellos a una distancia a , y medir la diferencia de potencial en un segundo par de electrodos M y N separados entre sí por una distancia na (Oliver Ocaño et al., 2019), (ver la Figura 3-4), es muy utilizado en geingeniería debido a su capacidad para representar la resolución de la superficie terrestre y la presencia de variaciones geológicas laterales debido a la gran cantidad de mediciones, esto presenta una ventaja para localizar fallas, fracturas, diaclasas, socavaciones y oquedades (Acahuana Mollo, 2019).

La resistividad aparente (P_a) se tiene la siguiente ecuación:

$$P_a = \pi n * (n + 1) * (n + 2) * a * \frac{\Delta V}{I} \quad (10)$$

Donde n es el nivel de asignación y tiene relación con la separación de los electrodos.

Figura 3-4 Método Dipolo-Dipolo



Fuente: (OCSA, 2022).

4. Estado del conocimiento.

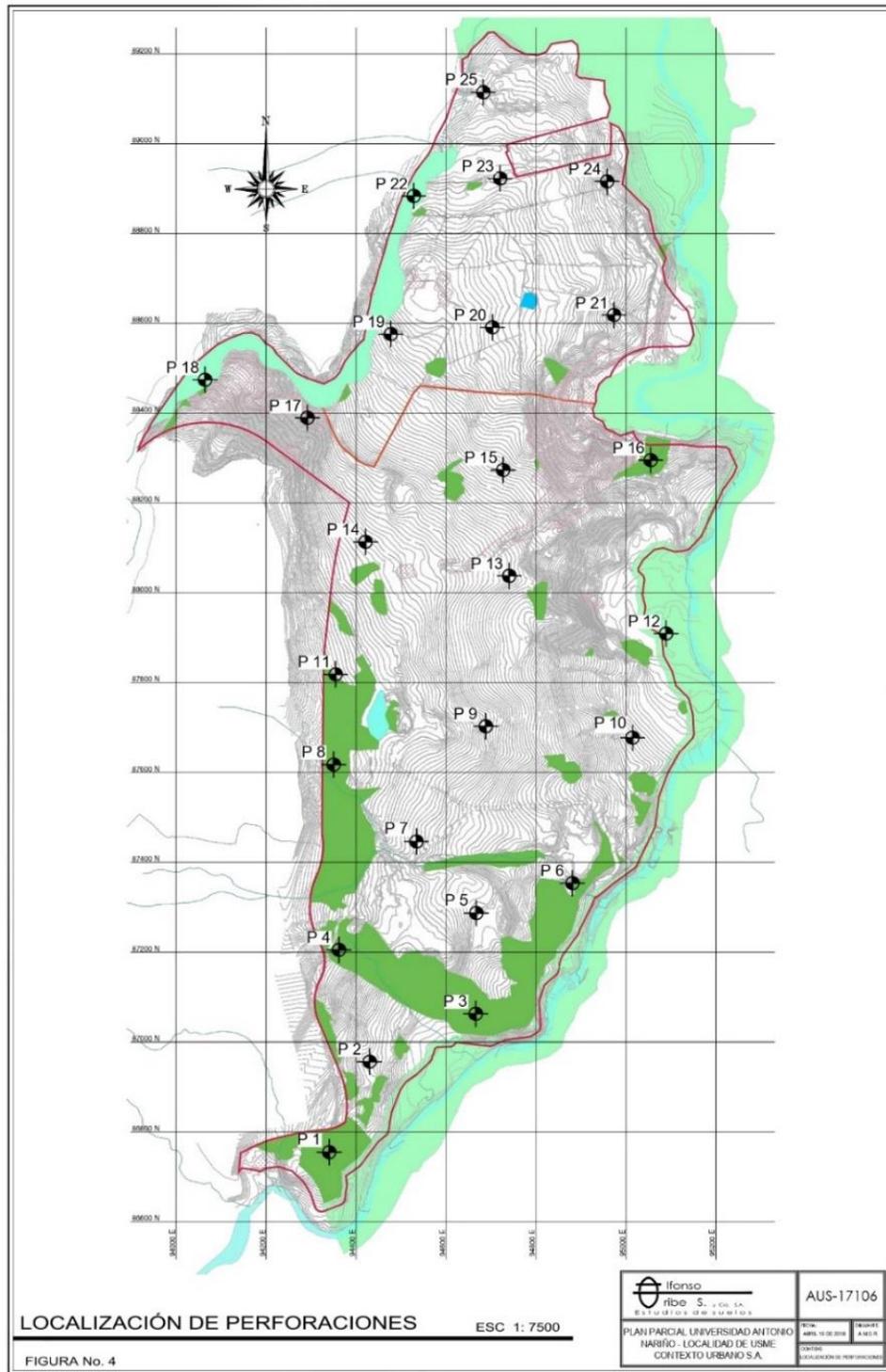
Dentro del entorno en el cual se realizó este estudio, es importante establecer hasta qué punto se tiene conocimiento del área de estudio, es decir, las formaciones geológicas y las intervenciones previas realizadas en esta locación, así mismo, hay que establecer cuál es el contexto que tiene la tomografía eléctrica en diferentes partes del mundo para determinar la ruta de trabajo adecuada, a continuación se muestran algunos resultados de interés en cuanto a estudios de suelos previos realizados en la universidad Antonio Nariño y el contexto de la tomografía eléctrica en algunas partes del mundo.

4.1. Antecedentes de estudios en la sede Usme.

Para realizar las exploraciones en campo previamente, se solicitó en el departamento de infraestructura de la Universidad Antonio Nariño el acceso a los estudios de suelos realizados entre los años 2016 y 2017 en esta locación para la realización del plan parcial del parque tecnocológico; el objetivo de esta solicitud fue realizar una caracterización teórica previa de la zona y así establecer qué tipo de suelos se tienen allí presentes, y hasta

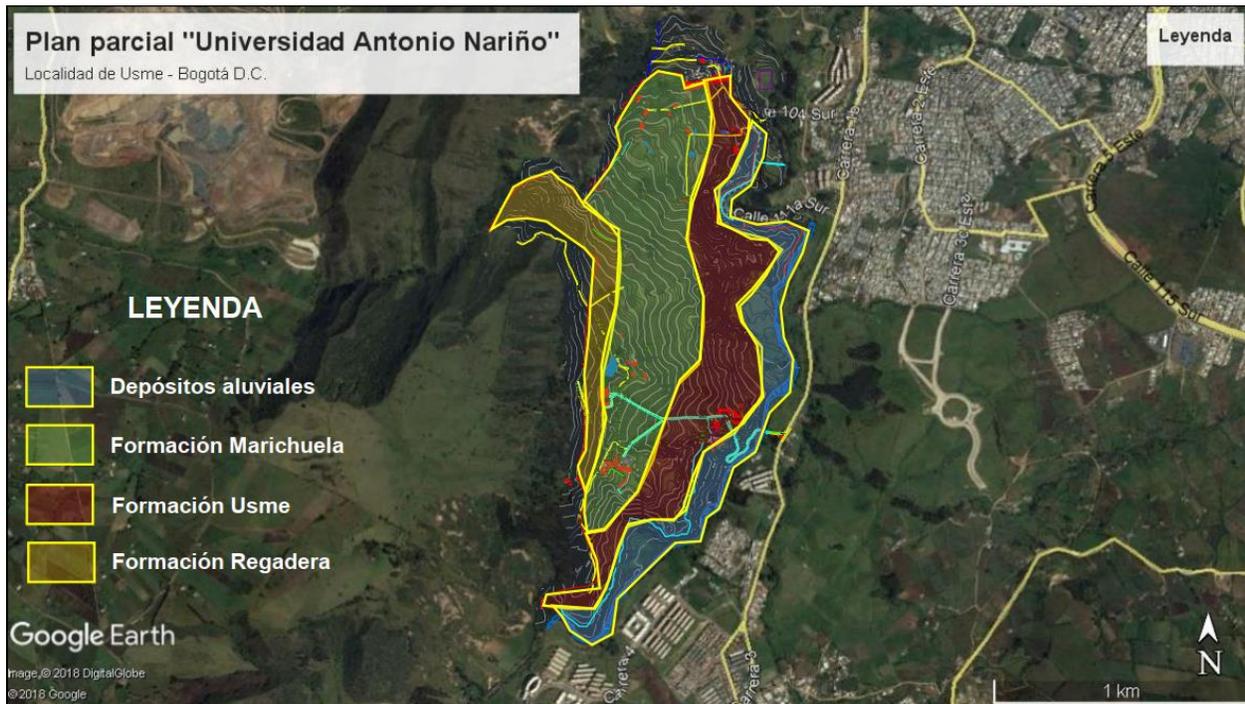
donde se tiene conocimiento de los mismos, al realizar una revisión a estos documentos se observa que realizaron 25 perforaciones (ver Figura 4-1) cuya profundidad oscila entre los 6 y 15 metros, así mismo, dichos ensayos se complementaron con ensayos de veleta de corte de campo y ensayos de resistencia a la penetración estándar SPT; sumado a lo anterior, analizaron un considerable número de muestras inalteradas en tubos Shelby en el laboratorio con las cuales ejecutaron ensayos como consolidación, compresión inconfiada y clasificación, entre otros. De esta forma, se establecieron varios aspectos interesantes con base en los resultados obtenidos en los estudios brindados por la universidad, con los cuales se puede establecer un punto de partida para realizar los ensayos de resistividad planteados, inicialmente a manera de resumen se muestran las formaciones geológicas, en donde se destaca la presencia de rocas y suelos de origen sedimentario derivado de las formaciones geológicas que se encuentran presentes en esta zona (ver Figura 4-2).

Figura 4-1 Localización de las perforaciones realizadas por la UAN como parte de los estudios de suelos previos.



Fuente: (UAN, 2017)

Figura 4-2 Geología local, unidades geológicas superficiales



Fuente: (UAN, 2017)

Al realizar una superposición de imágenes utilizando la herramienta google earth tal como se muestra en la Figura 4-3, se observa que la zona de estudio se encuentra ubicada entre la formación Marichuela y la formación Usme, de igual forma, en la figura 4-4, se observa que la perforación más cercana es la número 9 ubicada aproximadamente a 400 metros del área de estudio, donde se evidencia la presencia de arcillas de consistencia dura hasta los 13 metros y arcillolitas de consistencia muy dura de los 13 metros en adelante, tal cual como se muestra en la figura 4-5.

Figura 4-3 Sobreposición de imágenes del área de estudio / Geología local.

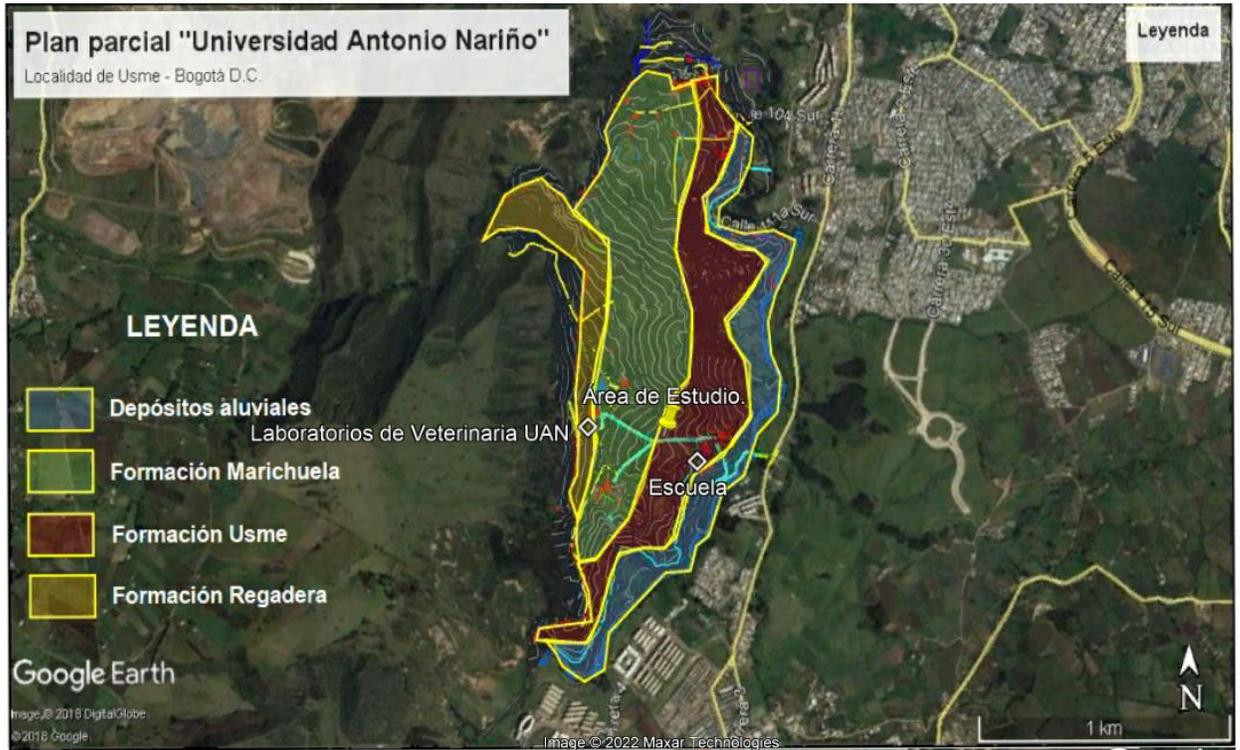


Figura 4-4 Sobreposición de imágenes área de estudio / Perforaciones realizadas.

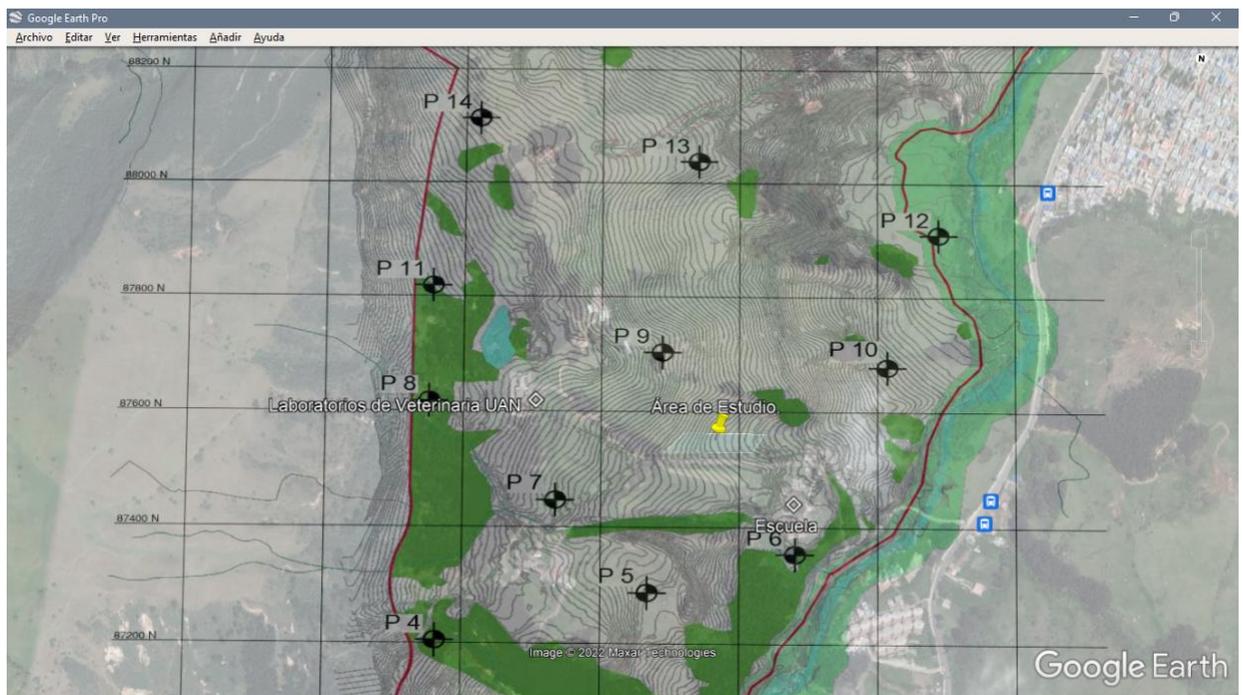
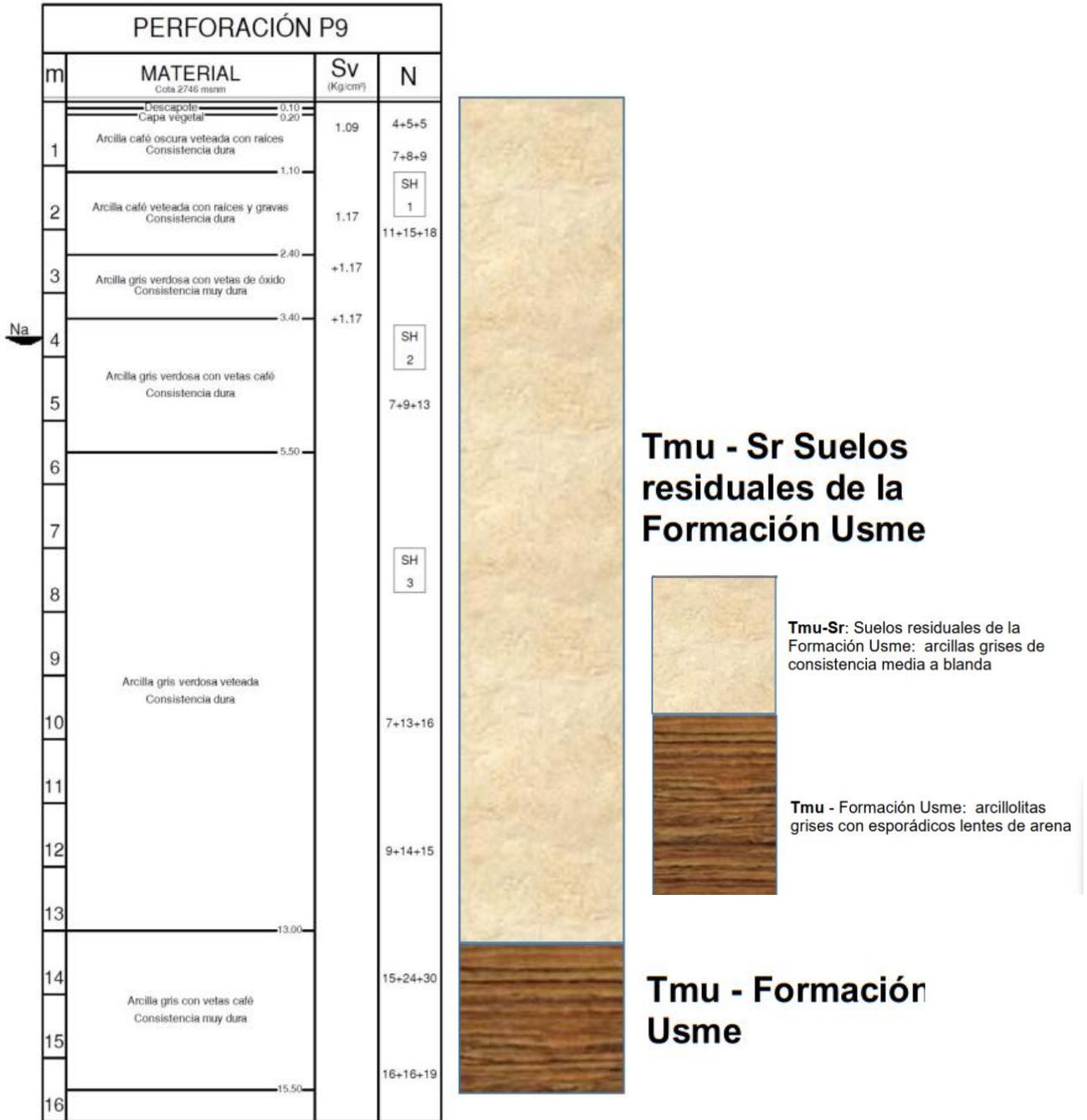


Figura 4-5 Resultados perforación P9 realizado por la UAN



Fuente: (UAN, 2017)

4.2. Contexto del uso de la tomografía eléctrica.

Es importante resaltar algunas investigaciones de forma más puntual y detallada del uso y manejo de esta tecnología.

En el Estado de Coahuila (México) se seleccionaron 3 sectores de la cuenca carbonífera “Sabinas”, en estos sectores se realizaron ensayos de tomografía eléctrica para identificar cavidades en el suelo las cuales fueron originadas por la minería de carbón que allí se practica, Los datos de la Tomografía de Resistividad Eléctrica (ERT) se recolectaron mediante el uso de un tomógrafo eléctrico utilizando matrices de Schlumberger, Wenner y Dipolo-dipolo (con espaciamento de electrodos de 10 m y 20 m), La interpretación de los resultados de este estudio tuvo como objetivo; localizar cavidades, mostrar las características del entorno geológico que se relacionan con el hundimiento observado en la superficie de la carretera y adivinar la probabilidad de que este proceso ocurra en el futuro, por ultimo gracias a este estudio llegaron a la conclusión de que las cavidades que hay dentro de estos sectores han generado una serie de hundimientos y un sistema de fracturas en la superficie (Rodríguez et al., 2019).

En Malasia, se realizaron ensayos de resistividad eléctrica para identificar las estructuras y los vacíos del subsuelo en la piedra caliza de Kuala Lumpur en el área de las cuevas Batu de Darul Ehsan, Selangor. Se midió un total de 17 líneas ER utilizando una matriz de electrodos Wenner con espaciamento de 2 m. Se estableció la relación entre resistencia, factor de formación y porosidad para todas las muestras. Las representaciones bidimensionales y tridimensionales del terreno del subsuelo se realizan utilizando programas informáticos comerciales. Los resultados muestran brechas y sumideros en algunas

secciones del área de estudio. Este trabajo puede ayudar a los ingenieros y administradores ambientales al proporcionar la información necesaria para desarrollar planes de gestión sostenible para evitar el colapso estructural catastrófico y otros problemas sísmicos (Bakhshipour et al., 2013).

Otro estudio utilizó un tomógrafo llamado ABEM Terrameter LS para imágenes de resistividad con el fin de estudiar condiciones ácidas en laderas estériles. La recopilación de datos de campo se basó en las matrices de Schlumberger y Wenner, mientras que el software RES2DINV se utilizó para analizar y crear modelos 2D del subsuelo que se estaba investigando. Con base en los resultados de las pruebas de resistividad, se encuentra que las pendientes ácidas probadas constan de dos áreas principales que representan suelo residual (valor de resistividad = 10 - 600 Ω m) y esquisto (valor de resistividad = 10 - 600 Ω m). Los resultados del valor de resistividad se correlacionan con los mapas físicos y las pruebas in situ de la sonda Mackintosh para su verificación. Debido a la capacidad limitada para penetrar en el suelo, la profundidad máxima que ha explorado la sonda Mackintosh es de 1,8 m. Sin embargo, el resultado de la parte de resistividad fue capaz de alcanzar mayores profundidades, hasta 40 m. Por lo tanto, la correlación entre la resistividad y los resultados de la sonda Mackintosh solo se puede obtener a cierta profundidad en una figura de canalón ácido, mientras que el mapeo físico puede determinar la longitud total de la estructura de canalón inclinado. Finalmente, los resultados de la calibración de resistividad concuerdan bien con los datos de Mackintosh y los datos del mapa físico, lo que sugiere que la técnica es adecuada para evaluar el gradiente ácido sin carga del subsuelo y puede complementarse con datos de pozos y otros datos de mapas. , mayor velocidad, mayor cobertura de datos y mejor entorno (Azhar et al., 2016)

En Cuiabá, estado de Mato Grosso (Brasil) se realizaron SEV (Sondeos eléctricos verticales) con el fin de estudiar el perfil hidrológico de una zona en específico para realizar una caracterización de la problemática ambiental que afecta a esta región provocada por el vertedero de basura Cuiabá, realizaron 7 líneas de resistividad eléctrica utilizando el método Schlumberger estableciendo profundidades teóricas de 7.5 metros, 15 y 30 metros, esto con el fin de delimitar el área que está siendo contaminada por la filtración de agua contaminada; dentro de los resultados que obtuvieron con esta investigación, establecieron una capa de suelo contaminado de entre 8 y 10 metros de profundidad, así mismo, mediante el análisis de las anomalías y teniendo en cuenta los valores de resistividad obtenidos de unas líneas en específico pudieron establecer las fracciones de suelo que están saturados por aguas contaminadas o por otro tipo de desechos (Shiraiwa et al., 2002).

5. Planteamiento del Problema.

La Universidad Antonio Nariño es una institución que busca constantemente mejorar para la comunidad académica y la sociedad, prueba de ello es la propuesta que se plantea para la urbanización y construcción de diferentes tipos de obras civiles en la sede Usme de esta institución, el proyecto llamado “**Parque Tecnoecológico**” tiene como objetivo *“Proveer a la periferia sur de la ciudad de Bogotá de un enclave dotacional de infraestructura que brinde niveles de equidad social y ambiental, mediante la incorporación de escenarios de investigación científica y tecnológica acompañada por una oferta educativa amplia y diversa, soportada por el uso residencial y sus actividades complementarias de comercio y servicios”*(UAN, 2018); Si bien es cierto que existe una serie de estudios preliminares previos realizados y contratados por la universidad, al realizar

un análisis detallado de los informes otorgados por la universidad para el desarrollo de este trabajo, se observa que la profundidad de las exploraciones realizadas no superan los 15 metros, así mismo, considerando las características de las formaciones del suelo y que en la mayoría de los resultados se observa que hay una alta presencia de arcillas y al evaluar las características de las estructuras que se plantean construir en la universidad, se considera necesario realizar una exploración a más profundidad detallada del subsuelo de esta locación, y sumado a lo anterior, al analizar la figura 4-4, no se observa que en el área de estudio donde se plantearon las líneas de resistividad eléctrica del suelo se haya realizado algún tipo de perforación o ensayo que permita realizar una caracterización a detalle de esta locación.

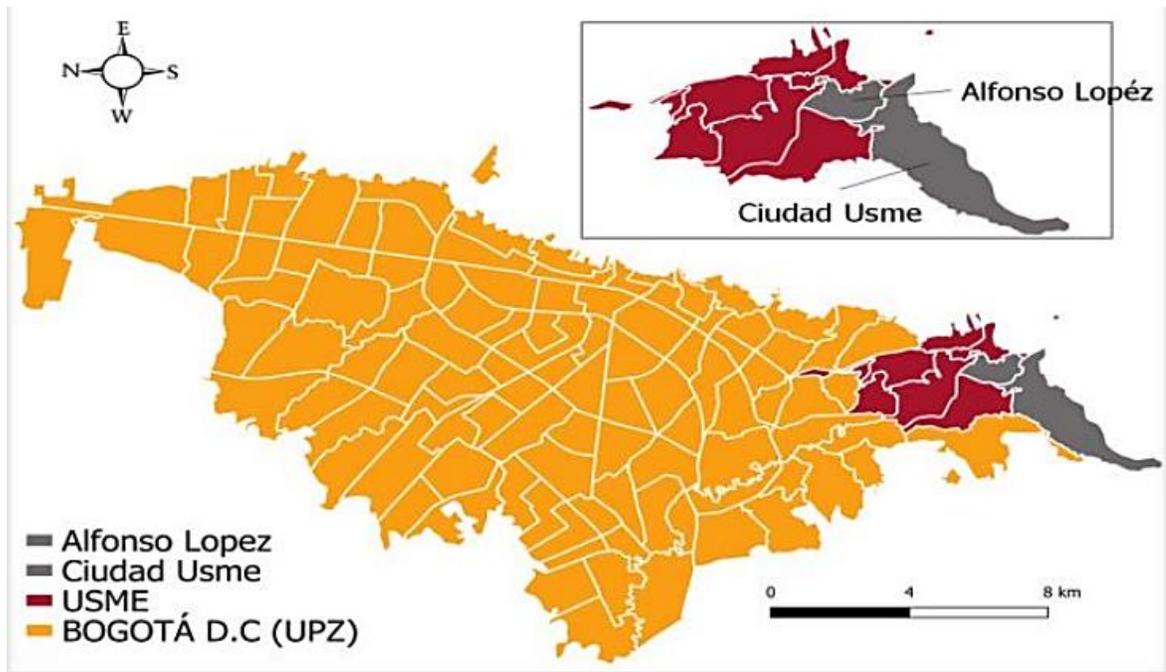
6. Metodología.

6.1. Área de Estudio.

El área de estudio determinada para realizar los ensayos se encuentra en las coordenadas $4^{\circ}29'1.35''N - 74^{\circ}7'31.25''O$ ubicada dentro de la sede Usme de la Universidad Antonio Nariño, dicha sede esta situada en la localidad de Usme al sur de la ciudad de Bogotá (ver Figura 6-1); en cuanto a la zona donde se realizaron las líneas de resistividad eléctrica, esta se encuentra situada al norte del terreno donde actualmente está el parqueadero del colegio Antonio Nariño (ver figura 6-2) dicho terreno presenta una pendiente de occidente a oriente tal como lo muestra la figura 6-3 y es utilizado para el alojamiento de ovejas y ganado, a su vez, en algunos sectores donde se dispusieron los electrodos se pueden observar como las pisadas de estos animales alteraron la superficie terreno, la adquisición de datos se realizo entre los meses de abril y mayo, meses en los que

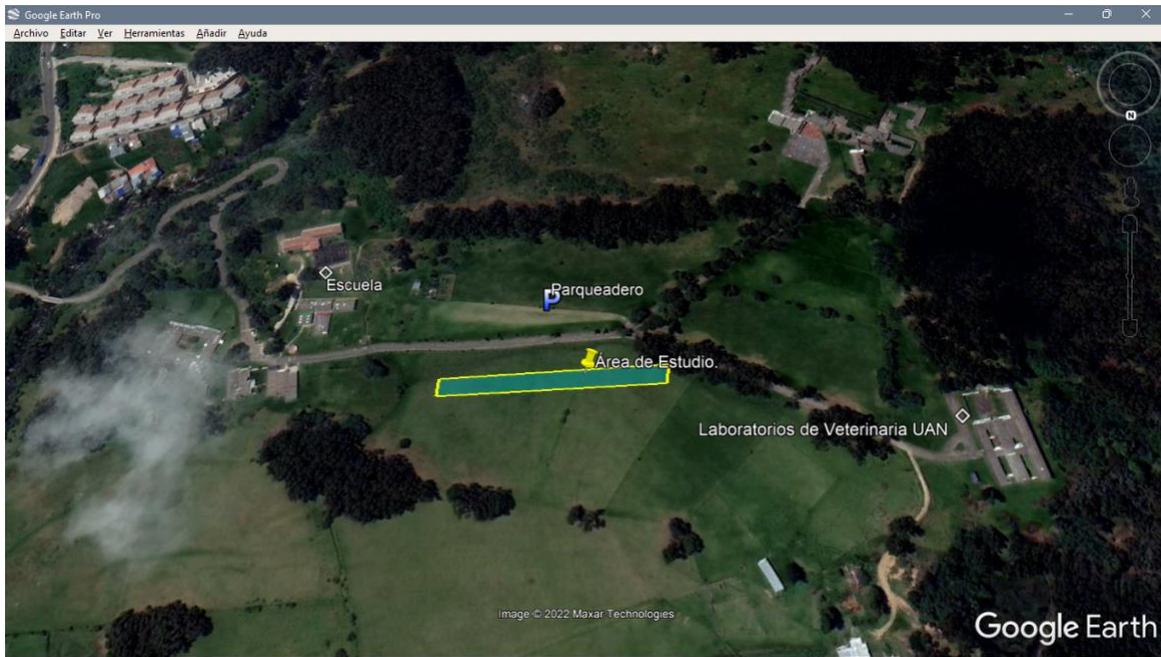
se presentó una alta presencia de lluvias con tormentas eléctricas en la ciudad de Bogotá; por último, las coordenadas de los 4 puntos donde se ubica el tomógrafo eléctrico para realizar las 4 líneas paralelas de resistividad eléctrica se muestran en la tabla 6-1 de igual forma, en la Figura se muestran los extremos de las líneas de resistividad eléctrica que se muestran en la tabla.

Figura 6-1 UPZ USME



Fuente: (Veeduría Distrital., 2017)

Figura 6-2 Localización Área de Estudio



Fuente: (Google Earth, 2022)

Figura 6-3 Perfil Elevación Área de Estudio



Fuente: (Google Earth, 2022)

Figura 6-4 Área de estudio delimitada por las líneas de resistividad 1 - 4



Fuente: (Google Earth, 2022)

Tabla 6-1 Coordenadas satelitales por línea de resistividad eléctrica.

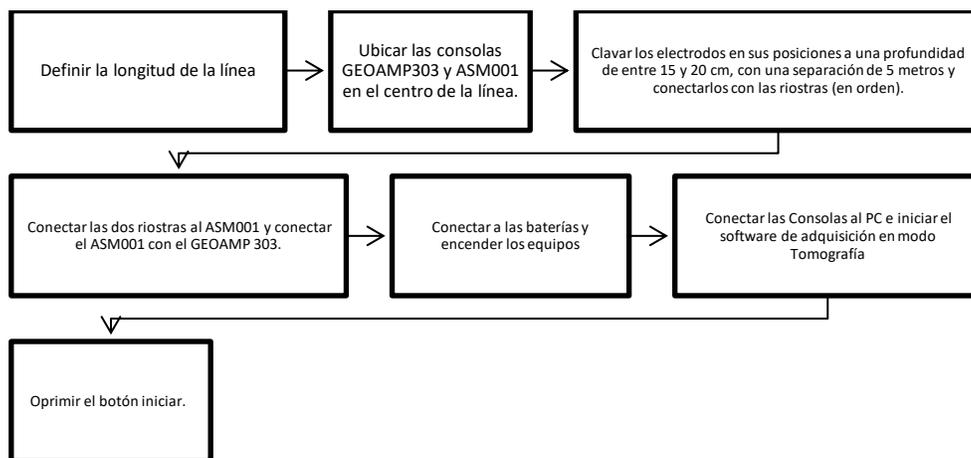
Línea #	Izquierdo		Centro		Derecho	
	Latitud	Longitud	Latitud	Longitud	Latitud	Longitud
1	4°29'1.34"N	74° 7'27.90"O	4°29'1.24"N	74° 7'30.39"O	4°29'1.15"N	74° 7'33.22"O
2	-	-	4°29'1.42"N	74° 7'30.35"O	-	-
3	-	-	4°29'1.57"N	74° 7'30.31"O	-	-
4	4°29'1.80"N	74° 7'27.86"O	4°29'1.73"N	74° 7'30.27"O	4°29'1.67"N	74° 7'33.12"O

6.2. Diseño geométrico y adquisición de datos.

Teniendo en cuenta el objetivo del estudio se determino el arreglo Wenner como el más pertinente y acertado para realizar la caracterización, ya que comparado con los otros 2

métodos planteados (Shulmberger y Dipolo-Dipolo), y considerando el Código Electrico Colombiano (NTC 2050, 1998), es el más utilizado para medir la resistividad aparente del terreno, así mismo, considerando la longitud de las líneas de resistividad es el que consume menos energía para realizar la caracterización y permite medir la resistividad promedio de espacios con una gran cantidad de suelos naturales (Arpi Deleg & Marca Chuva, 2011); para determinar el número de líneas de resistividad eléctrica, la distancia de las mismas y el espaciamiento de los electrodos, se realizaron mediciones con un decámetro con lo cual se determinaron líneas de 160 metros de longitud con un espaciamiento de 5 metros entre los electrodos y un total de 32 electrodos, sumado a lo anterior, el espaciamiento entre línea y línea es de 5 metros hasta llegar a desarrollar la lectura de 4 líneas paralelas entre sí, para completar un área de estudio de 160 metros de largo x 15 metros de ancho, con este tipo de montaje se espera tener una caracterización con un alto nivel de detalle y de información del subsuelo. Para realizar la instalación del equipo es necesario tener en cuenta los siguientes pasos:

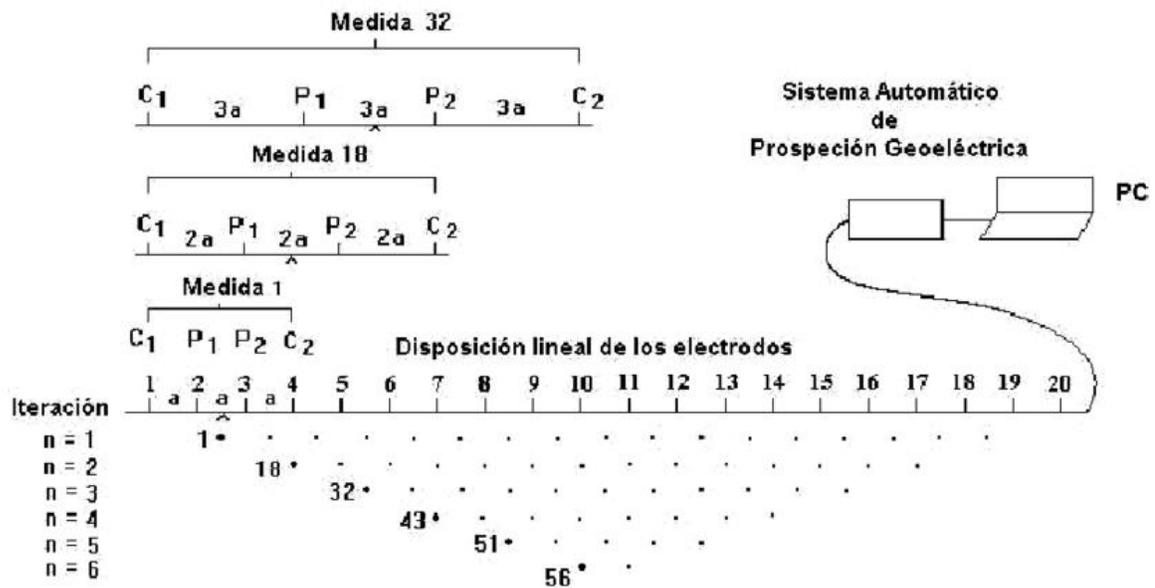
Figura 6-5 Instalación GeoAmp para la adquisición de datos



Fuente: (Manual de Usuario Switch ASM-001)

En cuanto a la adquisición de datos, el equipo se encuentra conectado a un computador el cual es el encargado de realizar la recepción de la información obtenida por la consola a través del programa PowerDAQ, en cuanto a las descargas eléctricas que realiza el equipo utilizando el método Wenner, en la figura 6 - 6 se observa una representación gráfica de como varia el espaciamiento a medida que incrementa la profundidad del estudio y cuales son los electrodos que realizan la descarga y cuales reciben la información.

Figura 6-6 Variación del espaciamiento de acuerdo a la profundidad utilizando el arreglo Wenner



Fuente: (Molina, 2004)

6.3. Consolas e Implementos.

Para la adquisición de datos se utilizó un tomógrafo eléctrico multielectrodo de 32 canales de marca GeoAmp de propiedad de la UAN, el cual dispone de 2 consolas; una

llamada ASM001 (ver figura 6 - 7), la cual es un computador automático y otra llamada geoamp 303 (ver figura 6 - 8), la cual es un equipo para prospección geoelectrica y está diseñado para emitir y recibir altas corrientes eléctricas;, dichas consolas se conectan entre sí a unas baterías como lo muestra la Figura 6 - 9; los electrodos tienen una longitud de 30 cm y son de acero inoxidable, la potencia de salida máxima de este equipo según el manual de usuario es de 600W y el voltaje de salida máximo es de 150 VDC; la longitud total de las ristras o cables es de 300 metros (incluyendo conectores a la consola) y cada ristra cuenta con 16 conectores los cuales son conectados a los electrodos; por ultimo el software que utiliza el equipo para adquirir datos se llama PowerDAQ_1_0020156.

Para el procesamiento de los datos se utilizó el software ZondRes2D, el cual es una herramienta que permite modelar los resultados que arroja este equipo en un esquema de 2 y 3 dimensiones donde se pueden observar anomalías, la ubicación y resistividad de cada material entre otras funciones.

Figura 6-7 Consola ASM-001



Fuente: (Manual de Usuario Switch ASM-001)

Figura 6 -8 Consola GEOAMP-303



Fuente: (Manual de Usuario GEOAMP-303)

Figura 6-9 Montaje de los Equipos in situ.



Fuente: (Autor)

7. Resultados.

A continuación se muestran los resultados de los datos tomados utilizando el arreglo Wenner y procesados para su correcta interpretación, para esto se utilizó el software ZondRes 2D, al modelar la información en 2 dimensiones se podrán observar 3 imágenes en orden vertical; en la primera es posible observar los datos de resistencia observados en campo, en la segunda los datos de resistencia calculados por el software y la tercera es la sección de bloques de resistividad en la cual se pueden observar tanto las anomalías como las profundidades y la ubicación donde se encuentra cada una.

Por definición, la anomalía representa la diferencia entre el valor medido en un punto de un parámetro y el valor teórico de este mismo parámetro en el mismo punto. El cálculo del valor teórico se hace mediante un modelo teórico (Castillo, 2016).

7.1. Resultados por Línea.

A continuación se muestran los resultados obtenidos por línea, cada una tiene una profundidad de 26 metros con respecto a la superficie, de igual manera se muestra en la figura 6-10 la asignación de colores, en la cual las anomalías negativas se representan con el color azul y las anomalías positivas con el color morado.

Figura 6-10 Valores de Resistividad por color.

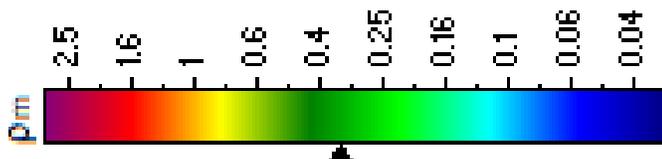
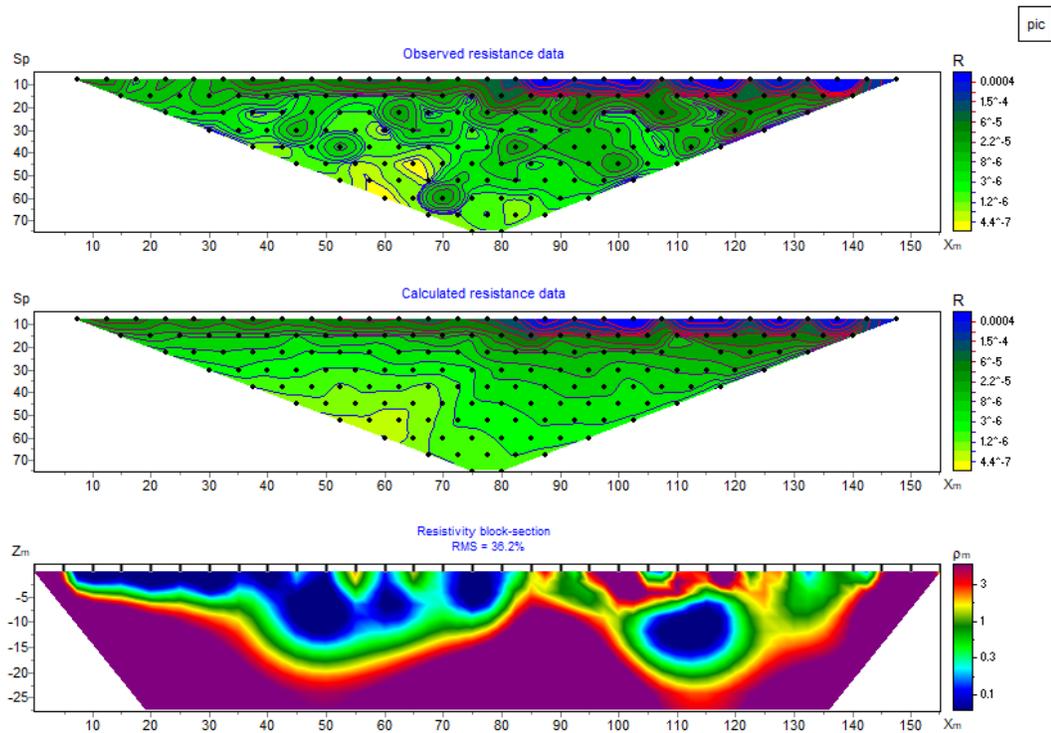
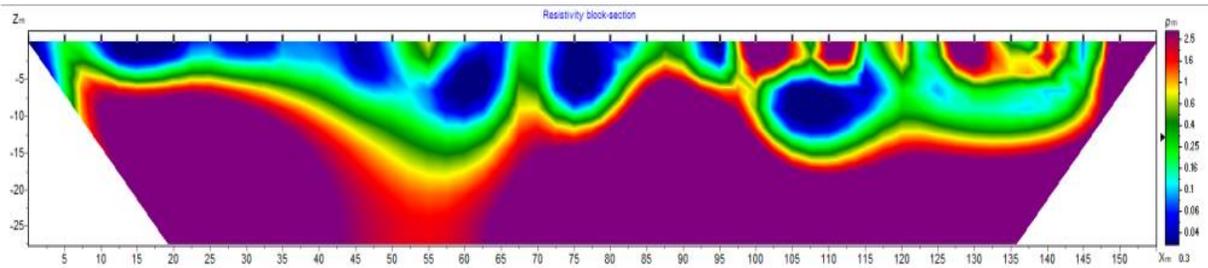


Figura 6-11 Resultados Línea 1.



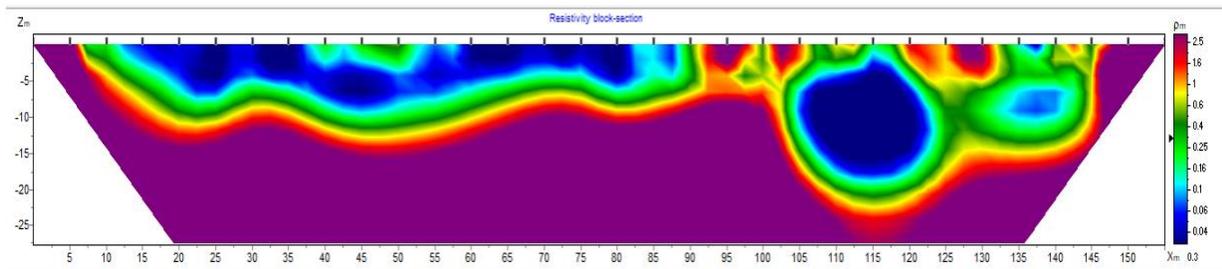
Nota: Profundidad de estudio 26 metros y 10 niveles, resistividad máxima es representada con colores rojos y violetas, presenta un valor de 4 y resistividad mínima es de 0.06 Ωm y está representada con el color azul rey y azul celeste, las anomalías negativas se encuentran localizadas entre los 0 m y los 20 metros de profundidad a lo largo de toda la línea de resistividad eléctrica y se es representada con una forma ovalada de color azul ubicada entre los puntos 100 y 120 del eje x de la gráfica .

Figura 6-12 Resultados Línea 2.



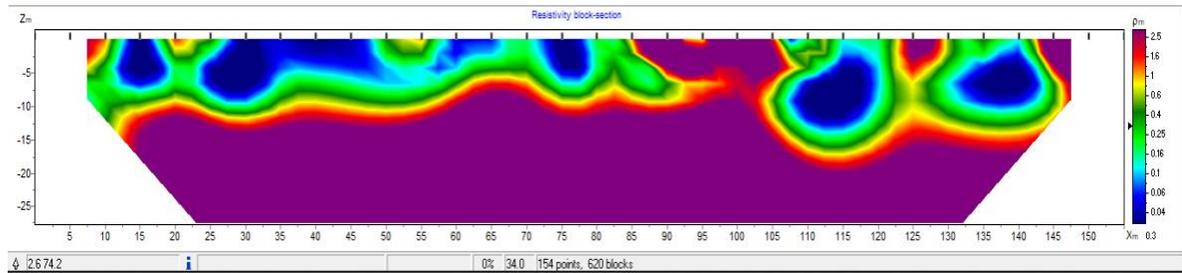
Nota: Profundidad de estudio 26 metros en 10 niveles, resistividad máxima 2.5 Ωm y resistividad mínima 0.04 Ωm , anomalías negativas localizadas entre los 0 m y los 15 metros de profundidad a lo largo de toda la línea de resistividad eléctrica y son representadas como figuras ovaladas de color azul rey.

Figura 6-13 Resultados Línea 3.



Nota: Profundidad de estudio 26 metros en 10 niveles, resistividad máxima 2.5 Ωm y resistividad mínima 0.04 Ωm , anomalías negativas localizadas entre los 0 m y los 10 metros de profundidad salvo por una sección ubicada entre los puntos 105 y 125 del eje x en la cual alcanza una profundidad de hasta 20 metros de profundidad y es representada con un color azul rey.

Figura 6-14 Resultados Línea 4.



Nota: Profundidad de estudio 26 metros en 10 niveles, resistividad máxima 2.5 Ωm y resistividad mínima 0.04 Ωm , anomalías negativas localizadas entre los 0 m y los 15 a lo largo de la mayor parte de la línea de resistividad eléctrica representadas por figuras ovaladas de color azul rey, salvo por el espacio que hay entre los puntos 90 al 105 del eje x del esquema.

7.2. Modelo 3D.

En el modelo 3D se ubican las 4 líneas de resistividad eléctrica con el respectivo espaciamiento que se tiene entre ellas, a su vez, se establece un plano que intersecta las 4 líneas con el fin de evaluar las anomalías a lo largo de toda la caracterización.

Figura 6-15 Modelo 3D líneas 1 – 4 integradas a 0 metros para ver su relación.

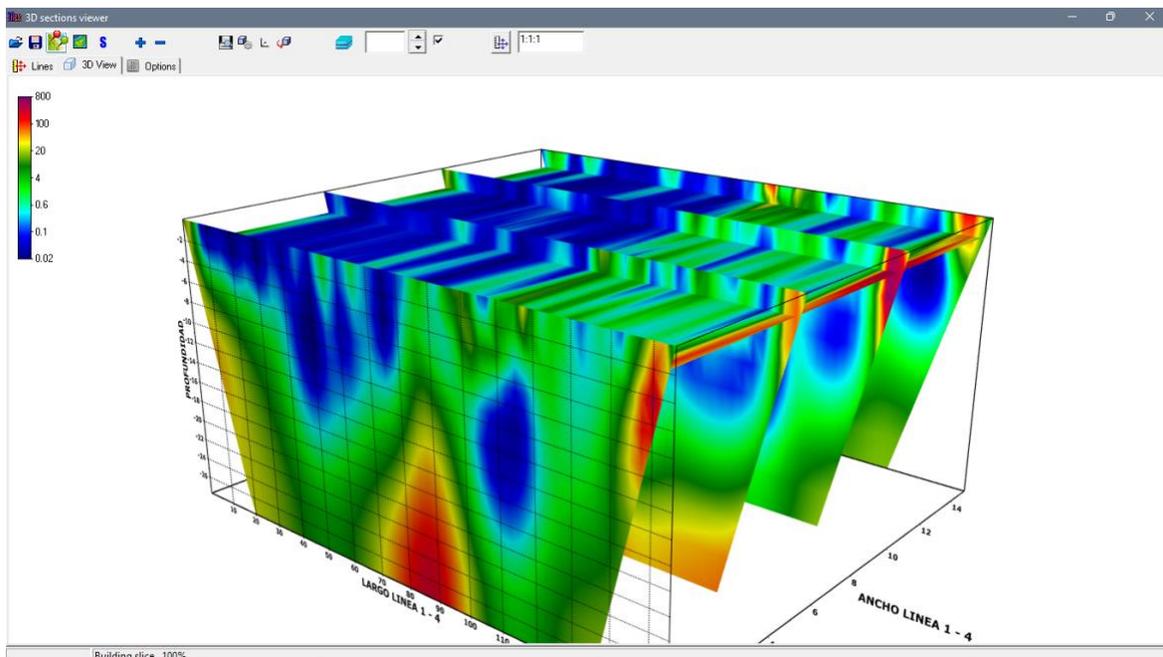


Figura 6-16 Modelo 3D líneas 1 – 4 integradas a 10 metros para ver su relación.

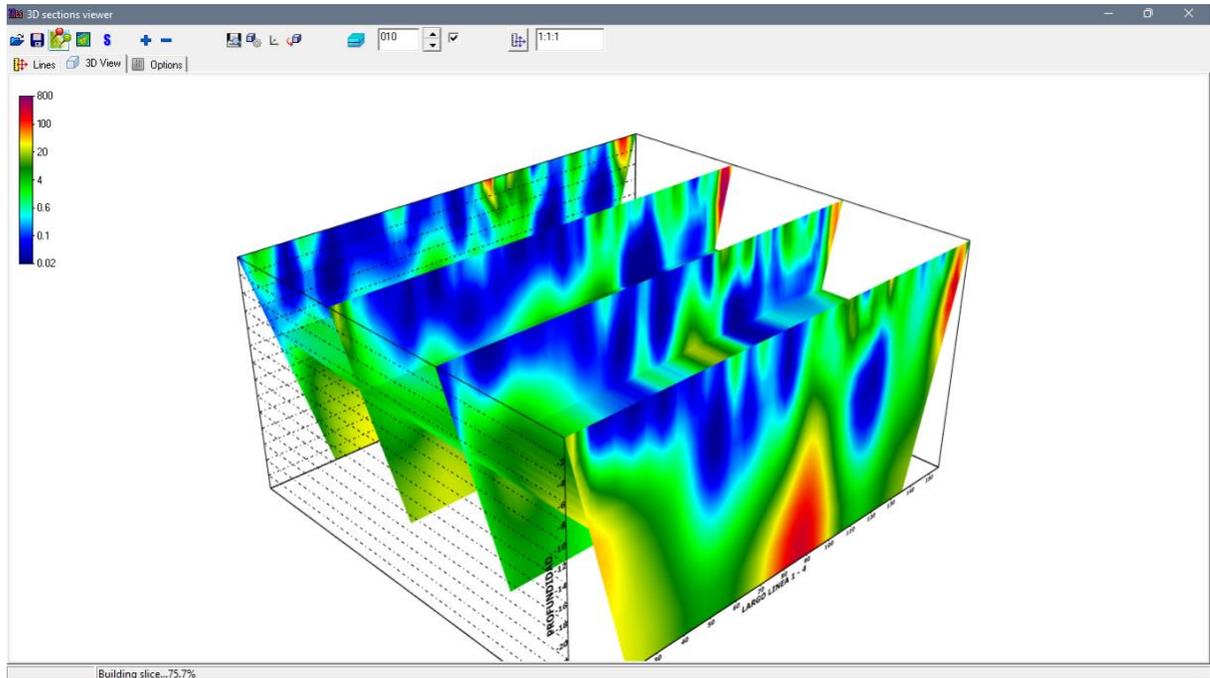
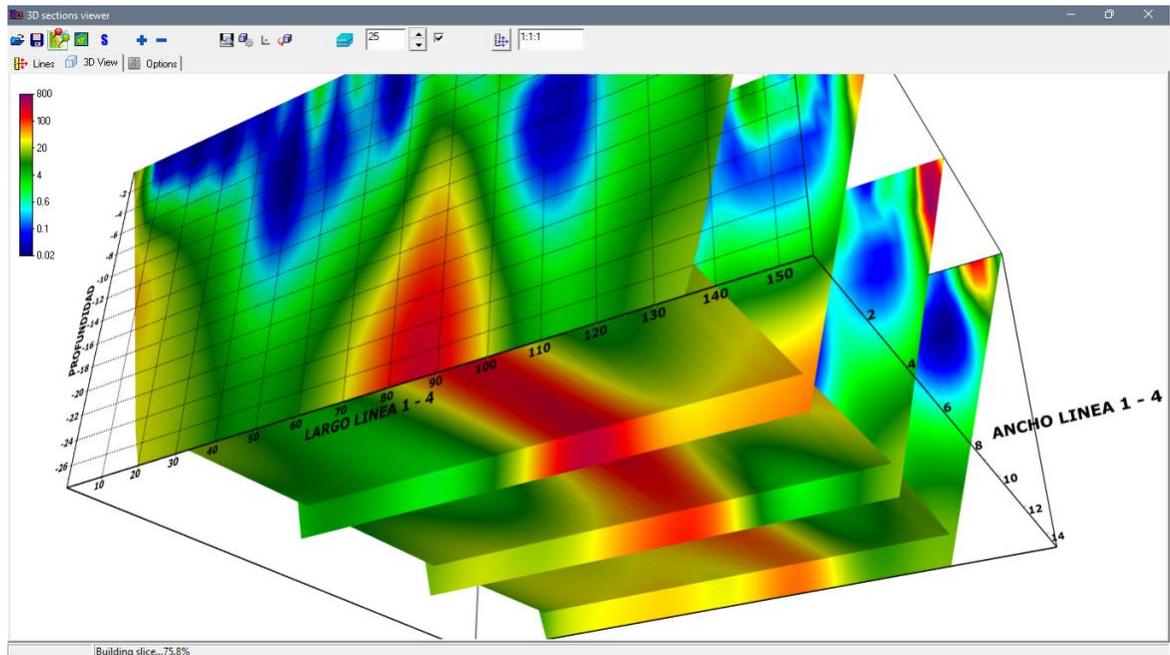


Figura 6-17 Modelo 3D líneas 1 – 4 integradas a 20 metros para ver su relación.



8. Análisis y discusión de resultados.

Inicialmente, se pueden observar varias coincidencias en las 4 líneas de resistividad eléctrica, tanto en el perfil del suelo obtenido como en la anomalía que se tiene en todo el modelo, sumado a lo anterior se observan valores de resistividad del suelo bastante bajos en todo el estudio, siendo el mas alto de 4 Ωm , esto se debe al nivel de saturación del suelo y el fuerte invierno bajo el cual se desarrolló el trabajo en campo, no obstante, al relacionar los resultados con los valores de resistividad orientativos que se tienen en el apartado 3.2, es posible un perfil geológico por cada línea de resistividad tal y como se muestra a continuación:

8.1. Línea 1:

Tabla 6-2 Perfil geológico estimado línea 1.

Perfil Geológico Estimado			
Línea 1			
Profundidad	Resistividad (Ωm)		Material Asociado
	Mínima	Máxima	
0-5	0.06	3.5	Terreno pantanoso con presencia de arcillas saturadas y limo orgánico
5-10	0.07	3.8	Arcillas saturadas, aluvial y arcillas con un alto contenido de humedad
10-15	0.06	4	Arcillas saturadas, aluvial y arcillas con un alto contenido de humedad
15-20	0.08	3.9	Suelo arcilloso con bajo contenido de humedad y anomalías de arcilla saturada
20-25	0.3	4	Suelo arcilloso con bajo contenido de humedad

En la figura 6-11 se observa que en los primeros 5 metros de profundidad y en algunas secciones entre los 5 y los 14 metros de profundidad el subsuelo se puede definir como pantanoso esto por su alto contenido de humedad lo que deriva en una baja resistividad, cabe resaltar que esa parte del potrero donde se realizo el estudio es utilizado para el alojamiento de ovejas y en algunas secciones donde se ubicaron los electrodos se evidencio esto, pues el suelo presentaba una consistencia blanda por lo que fue necesario desplazar unos centímetros los electrodos afectados por esta problematica con el fin encontrar un suelo con una mejor consistencia para garantizar una buena lectura, la tabla 6-2 permite observar tambien el tipo de suelo que se tiene presente en esta línea, donde sobresalen la presencia de arcillas las cuales son predominantes por debajo de los 15 metros con ese color violeta que representa resistividades por encima de los $3,5 \Omega m$, no obstante, entre los puntos 105 y 125 del eje x de la gráfica con una profundidad de entre 10 y 20 metros se encuentra una sección con una baja resistividad la cual tiene una forma ovalada de color azul, dicha sección se puede atribuir a un suelo compuesto por arcillas saturadas o con un alto contenido de humedad.

8.2. Línea 2:

Tabla 6-3 Perfil geológico estimado línea 2.

Perfil Geológico Estimado			
Línea 2			
Profundidad	Resistividad (Ωm)		Suelo Estimado
	Mínima	Máxima	
0-5	0.04	1.8	Terreno pantanoso con presencia de arcillas saturadas y limo orgánico
5-10	0.04	2.1	Arcillas saturadas, aluvial y arcillas con un alto contenido de humedad
10-15	0.05	2.5	Suelo arcilloso con bajo contenido de humedad y anomalías de arcilla saturada
15-20	0.25	2.5	Suelo aluvial y arcilloso con bajo contenido de humedad
20-25	1.3	2.5	Suelo arcilloso con bajo contenido de humedad

En la figura 6 - 12 se observa que en los primeros 5 metros de profundidad se encuentra un suelo pantanoso pero con un grado de compactación más alto, pues en comparación con la línea 1 no se ve tan profunda la anomalía negativa, por debajo de los 10 metros de profundidad ya se encuentra un suelo arcilloso hasta los 26 metros de profundidad salvo por un sección ubicada entre los puntos 45 y 65 del eje x de la gráfica con una profundidad de entre 10 y 26 metros donde se encuentra una sección con una baja resistividad levemente menor la cual se puede atribuir a suelos aluviales o a arcillas más saturadas, de igual forma, en la tabla 6-3, se establece a detalle la composición del suelo y la ubicación de cada material de acuerdo al valor de resistividad que se le atribuye.

8.3. Línea 3:

Tabla 6-4 Perfil geológico estimado línea 3.

Perfil Geológico Estimado			
Línea 3			
Profundidad	Resistividad (Ωm)		Suelo Estimado
	Mínima	Máxima	
0-5	0.04	1.6	Terreno pantanoso con presencia de arcillas saturadas y limo orgánico
5-10	0.05	2.2	Arcillas saturadas, aluvial y arcillas con un alto contenido de humedad
10-15	0.04	2.5	Suelo arcilloso con bajo contenido de humedad, aluvial y anomalías de arcilla saturada
15-20	0.05	2.5	Suelo arcilloso con bajo contenido de humedad y anomalías de arcilla saturada
20-25	1.6	2.5	Suelo arcilloso con bajo contenido de humedad

En cuanto a los resultados de la línea 3 (figura 6 - 13) se observan un perfil muy similar al obtenido en la línea 1, en donde se observa un suelo aluvial y arcilloso con un alto contenido de humedad hasta los 10 metros y de los 10 metros en adelante es posible ver como el perfil del suelo se torna más arcilloso en su mayoría tal como se evidencia en la tabla 6-4, no obstante, se observa también una gran anomalía en la sección ubicada entre los puntos 105 y 125 del eje x, y se encuentra desde la superficie hasta los 20 metros de profundidad, esto se debe a un depósito de suelo arcilloso saturado o con un alto contenido de humedad.

8.4. Línea 4:

Tabla 6-5 Perfil geológico estimado línea 4.

Perfil Geológico Estimado			
Línea 4			
Profundidad	Resistividad (Ωm)		Suelo Estimado
	Mínima	Máxima	
0-5	0.04	2.1	Terreno pantanoso con presencia de arcillas saturadas y limo orgánico
5-10	0.04	2.0	Arcillas saturadas, aluvial y arcillas con un alto contenido de humedad
10-15	0.05	2.4	Suelo arcilloso con bajo contenido de humedad y anomalías de arcilla saturada
15-20	0.25	2.5	Aluvial y arcillas con bajo contenido de humedad
20-25	1.6	2.5	Suelo arcilloso

En cuanto a la línea 4 se posible observar el mismo patrón de las e líneas anteriores, tal como se puede ver en la figura figura 6 - 14, en donde se observa presencia de arcillas con un alto contenido de humedad, de igual forma, por debajo de los 10 metros se encuentran arcillas menos saturadas (ver tabla 6-5), por ultimo se ve la misma anomalía de la línea anterior pero con una magnitud mucho menor.

8.5. Modelo 3D:

En cuanto al modelo 3D que se realizó, este se dividió en 3 cortes para analizar cómo se comporta el perfil de todo el área de estudio, inicialmente se hizo el primer corte a nivel superficial, tal como lo muestra la figura 6 - 15, en el cual se observa que existe una similitud

en la presencia de suelos más húmedos a lo largo de toda el área de estudio y los cuales presentan una menor resistividad con respecto al resto del estudio, así mismo, se realizó un corte a 10 metros (figura 6 - 16) que fue donde por lo general el suelo presenta el cambio de material, también es posible observar el comportamiento de la anomalía caracterizada en el perfil a lo largo de las 4 líneas de resistividad permitiendo estimar su forma y su grado de saturación con base en los resultados obtenidos y analizados, en la figura 6 - 17 se realizó el último corte a una profundidad de 25 metros en donde se observa que al igual que la anomalía mencionada anteriormente, también se encuentra una sección de arcillas menos saturadas.

Dentro del desarrollo del trabajo se pudieron observar varios aspectos interesantes tanto en la ejecución en campo como en el análisis de los datos, por un lado, factores como la lluvia derivaron en un completo reto para la adquisición de datos, de igual forma, el terreno presenta zonas pantanosas debido al uso que se le da a esta locación, esto último se ve reflejado en el modelamiento superficial que se puede observar en la figura 6 - 15, donde se muestra que en la sección donde se ubican los electrodos del 1 - 8 se puede ver valores de resistividad bastante bajos, de esta forma y considerando las observaciones en campo, la sección donde se ubicaron los electrodos mencionados anteriormente es donde se encontraban las ovejas y se evidenciaban las pisadas del ganado que en ocasiones también alojan dentro de este potrero y sumado a las condiciones climáticas días previos a la toma de datos, se puede determinar que estos factores son los causantes de estos valores de resistividad.

Por otra parte, resulta interesante la anomalía que se presenta entre los puntos 100 y 120 del eje x del diagrama a lo largo de todo el estudio, pues considerando la profundidad a

la que se encuentra (aproximadamente 10 metros), supone una gran sección del suelo donde se encuentra un alto contenido de humedad.

9. Conclusiones

- Se realizo de manera exitosa la caracterización geofísica del terreno a partir de propiedades como la resistividad eléctrica del subsuelo y el contenido de humedad, estableciendo así un perfil geológico estimado y la ubicación de las anomalías encontradas, sumada a la ubicación de las anomalías, dimensiones realizados una aproximación de la forma y la magnitud de estas con base a los datos obtenidos utilizando el tomógrafo eléctrico y el posterior tratamiento de estos a través de modelos de 2 y 3 dimensiones.

- Este trabajo brinda información sobre el perfil del subsuelo que se encuentra en el área de estudio, ya que muestra una caracterización geofísica en profundidad que puede ser de utilidad en posteriores proyectos de ingeniería como el Parque Tecnoecológico u otros proyectos que se pretendan ejecutar en esta zona. Así mismo, este documento supone una base de datos guía para la comunidad académica que pretenda profundizar más en este tipo de estudios y sus aplicaciones.

- El contenido de humedad o las condiciones climáticas afectan e infieren de forma directa e indirectamente en el desarrollo de una investigación como está, ya que varían la conductividad del suelo y en consecuencia, la resistividad eléctrica de este, sin embargo, la adquisición de datos y su posterior tratamiento resultó exitoso.

- La aplicación de métodos geofísicos es cada vez más común dentro del campo de la ingeniería civil y ambiental ya sea para diseñar puestas a tierra o identificar acuíferos subterráneos; estudios como el de resistividad eléctrica permite realizar una

exploración no intrusiva y ágil que permite modelar y realizar una caracterización en 2D y 3D muy acertada de los minerales que se puedan encontrar en el subsuelo que se pretenda caracterizar y ofrece un estudio complementario a los estudios de suelos convencionales que se tienen en la actualidad.

10. Recomendaciones

- Se recomienda replicar este estudio en otra temporada del año bajo unas condiciones climáticas más cálidas, esto permitiría determinar la resistividad eléctrica de un suelo más seco y así evaluar el comportamiento tanto del perfil como la variación de las anomalías encontradas en este estudio.

- Se recomienda también garantizar una compactación del terreno en la cual se garantice el adecuado contacto del electrodo con el suelo ya que esto permite realizar tanto la descarga como la recepción de la energía de manera satisfactoria.

Referencias Bibliográficas

- 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”* [UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN AGUSTÍN DE AREQUIPA].
<http://repositorio.unsa.edu.pe/handle/UNSA/8904>
- Arpi Deleg, F. R., & Marca Chuva, J. F. (2011). *IMPLEMENTACIÓN DE UN INSTRUMENTO PARA PROSPECCIÓN GEOELECTRICA MEDIANTE EL MÉTODO WENNER-OFFSET* [Universidad de Cuenca].
<https://dspace.ucuenca.edu.ec/bitstream/123456789/710/1/te304.pdf>
- Azhar, A. T. S., Hazreek, Z. A. M., Aziman, M., Haimi, D. S., & Hafiz, Z. M. (2016). Acidic Barren Slope Profiling using Electrical Resistivity Imaging (ERI) at Ayer Hitam area Johor, Malaysia. *Journal of Physics: Conference Series*, 710(1).
<https://doi.org/10.1088/1742-6596/710/1/012008>
- Bakhshipour, Z., Huat, B. B. K., Ibrahim, S., Asadi, A., & Kura, N. U. (2013). Application of geophysical techniques for 3D geohazard mapping to delineate cavities and potential sinkholes in the northern part of kuala lumpur, Malaysia. *The Scientific World Journal*, 2013. <https://doi.org/10.1155/2013/629476>
- Briceño, J. (2015). *MANUAL PARA LA MEDICIÓN DE RESISTIVIDAD DEL SUELO* [University of the Andes].
https://www.researchgate.net/publication/271074412_MANUAL_PARA_LA_MEDICION_DE_RESISTIVIDAD_DEL_SUELO
- Cárdenas Valencia, J. D., & Galvis García, 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* [Universidad tecnológica de Pereria].
<https://repositorio.utp.edu.co/items/b517a458-a412-4b5b-abd1-18017f55db53>
- Castillo, L. (2016). *Curso básico de exploración geotérmica para la integración regional* (Vol. 5). Banco Interamericano de Desarrollo (BID).
https://issuu.com/ceddet/docs/m_dulo_5_exploraci_n_geof_sica_v
- Eléctricas, I. (2017). *Puesta a Tierra; instalaciones electromecánicas*. 43–27.
<https://ie2mmo.wordpress.com/2017/09/19/p43-27-puesta-a-tierra/>
- Giles, J. A. (2021). *Impactos locales y no locales de la variabilidad de la humedad del suelo en el clima de Sudamérica: de escala diurna a interanual* [Universidad de Buenos Aires]. https://bibliotecadigital.exactas.uba.ar/download/tesis/tesis_n6847_Giles.pdf
- ITC-BT-18. (2002). *INSTALACIONES DE PUESTAS A TIERRA*.
http://roble.pntic.mec.es/jcat0021/NUEVO_REBT/ARCHIVOS/INDICE_DE_LAS_INSTRUCCIONES_TECNICAS_COMPLEMENTARIAS_archivos/ITC-BT-18.htm
- López, A., Loke, M., & Fanton, G. (2010). *TÉCNICAS PRÁCTICAS PARA INVESTIGACION DE RESISTIVIDAD EN DOS Y TRES DIMENSIONES (TOMOGRAFÍA ELECTRICA 2D y 3D)*. <https://geotomosoft.com/Articulo.pdf>
- Molina, G. (2004, October 1). *SISTEMA AUTOMÁTICO PARA TOMOGRAFÍA GEOELÉCTRICA*.
https://www.researchgate.net/publication/266136626_SISTEMA_AUTOMATICO_PARA_TOMOGRFIA_GEOELECTRICA
- Moreno, G., Valencia, J. A., Cárdenas, C. A., & Villa, W. M. (2007). *Fundamentos e ingeniería de las puestas a tierra: Respuestas ante fallas eléctricas y rayos* (Vol. 1).

Editorial Universidad de Antioquia.

https://books.google.com.co/books?id=0_lfdN3rHNsC&pg=PR18&dq=resistividad+del+suelo+libro&hl=es&sa=X&ved=2ahUKewiCppm8oub2AhV2SjABHa5BAIAQ6AF6BAgCEAI#v=onepage&q=resistividad del suelo libro&f=false

NTC 2050. (1998). *NORMA TÉCNICA COLOMBIANA NTC 2050 (Primera actualización) CÓDIGO ELÉCTRICO COLOMBIANO. 1.*

OCSA. (2022). *Tomografía eléctrica - OCSA Técnicas Geofísicas*. <https://ocsa-geofisica.com/tomografia-electrica.html>

Oliver Ocaño, F. M., Laborín Moreno, J. A., & García López, C. F. (2019). APLICACIÓN DEL MÉTODO DE RESISTIVIDAD ELÉCTRICA EN LA EXPLORACIÓN DE YACIMIENTOS DE CARBÓN. *EPISTEMUS*, 13(27), 13–17. <https://doi.org/10.36790/EPISTEMUS.V13I27.111>

Rodríguez, J. A. B., Flores, M. A. P., Carmenates, Y. A., Hernández, M. B., Rodríguez, J. A. B., & Flores, M. A. P. (2019). Electrical Resistivity Tomography for the detection of subsurface cavities and related hazards caused by underground coal mining in Coahuila. *Geofisica Internacional*, 58(4), 279–293. <https://doi.org/10.22201/IGEOF.00167169P.2019.58.4.2058>

Serrano, J. (2003). TOMOGRAFÍA ELÉCTRICA 3.1 Introducción. *Universitat Politècnica de Catalunya*; *UPCommons*, 14–30. <https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/6231/07.pdf?sequence=8>

Shiraiwa, S., Lisovsky, S. P., Elis, V. R., Porsani, J. L., & Borges, W. R. (2002). Estudos geofísicos integrados no lixão de Cuiabá, MT, Brasil - Resultados preliminares. *Revista Brasileira de Geofísica*, 20(3), 181–186. <https://doi.org/10.1590/S0102->

- 261X2002000300004
- Spers, r E. E. (2020). *AGRÁRIAS: Pesquisa e inovação nas ciências que alimentam o mundo* (A. Carvalho de Oliveira, V. C. Mocellin, E. E. Spers, & M. A. Júnior (eds.); Editora Ar, Vol. 4). Editora Artemis. https://ri.conicet.gov.ar/bitstream/handle/11336/135079/CONICET_Digital_Nro.ad0a3c83-7c11-4f15-9e65-d912dc8ec01e_A.pdf?sequence=2&isAllowed=y
- UAN. (2017). *ESTUDIO PRELIMINAR DE SUELOS, GEOLÓGICO, GEOMORFOLÓGICO Y GEOTÉCNICO PLAN PARCIAL UNIVERSIDAD ANTONIO NARIÑO LOCALIDAD DE USME*. 1–74.
- UAN. (2018). *PLAN PARCIAL PARQUE TECNOECOLÓGICO*. http://www.sdp.gov.co/sites/default/files/07122018_dts_plan_parcial_parque_tecnoecologico_antonio_narino.pdf
- Veeduría Distrital. (2017). *Ficha UPZ: Alfonso Lopez + Ciudad Usme - USME*. <http://veedurriadistrital.gov.co/sites/default/files/files/UPZ/ALFONSO LOPEZ CIUDAD USME.pdf>
- Villa Acevedo, W. M., Rodríguez Serna, J. M., & Saldarriaga Loaiza, J. D. (2019). Estimation of Two-Layer Soil Parameters using Mean-Variance Mapping Optimization Algorithm. *Información Tecnológica*, 30(1), 299–310. <https://doi.org/10.4067/S0718-07642019000100299>
- Weinzettel, P., Varni, M., Diertich, S., & Usunoff, E. (2009). Evaluación de tres dispositivos de tomografía eléctrica para la identificación de horizontes petrocálcicos en el suelo. *Ciencia Del Suelo*, 27(1). http://www.scielo.org.ar/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1850-

20672009000100014