



**CARACTERIZACIÓN GEOHIDROLÓGICA CON TOMOGRAFÍA ELÉCTRICA
DEL PARQUEADERO DE LA UNIVERSIDAD ANTONIO NARIÑO SEDE USME**

ALEJANDRA PIAMBA SAPUYES

PAULA ANDREA TRIANA URIBE

**UNIVERSIDAD ANTONIO NARIÑO
FACULTAD DE INGENIERIA AMBIENTAL Y CIVIL
INGENIERIA AMBIENTAL Y CIVIL
BOGOTÁ, COLOMBIA.**

2022

**CARACTERIZACIÓN GEOHIDROLÓGICA CON TOMOGRAFÍA ELÉCTRICA
DEL PARQUEADERO DE LA UNIVERSIDAD ANTONIO NARIÑO SEDE USME**

Alejandra Piamba Sapuyes

Paula Andrea Triana Uribe

**Proyecto de grado presentado como requisito parcial para optar al título de:
Ingeniera Ambiental e Ingeniera Civil.**

DIRECTOR:

Ph.D Carlos Martín Molina Gallego

Línea de Investigación:

Hidrogeología

Grupo de Investigación:

Semillero Análisis y modelación hidrológica, hidráulica e hidrogeológica.

**UNIVERSIDAD ANTONIO NARIÑO
FACULTAD DE INGENIERIA AMBIENTAL Y CIVIL
INGENIERIA AMBIENTAL Y CIVIL
BOGOTÁ, COLOMBIA.**

2022.

NOTA DE ACEPTACIÓN

El trabajo de grado titulado

_____.

Cumple con los requisitos para optar

Al título de _____.

Firma del Tutor

Firma del jurado

Firma del jurado

Bogotá, día 15 de mayo de 2022

Dedicatoria

Principalmente a Dios por ser nuestra guía y soporte a lo largo de nuestras carreras, por brindarnos paciencia y sabiduría para lograr nuestras metas propuestas.

A nuestros padres quienes con esfuerzo, amor y dedicación nos dieron el apoyo necesario para cumplir y culminar nuestra carrera universitaria.

A nuestros hermanos, abuelos y sobrinos quienes son nuestros compañeros incondicionales en este camino, y nos brindaron el apoyo necesario para continuar.

A todas las personas que a lo largo de este camino nos han apoyado y han hecho que el trabajo se realice con éxito en especial a aquellos que nos abrieron las puertas y compartieron sus conocimientos.

Agradecimientos

A nuestra familia por apoyarnos en cada etapa de este proyecto, por ayudarnos tanto emocionalmente en la toma de decisiones y como físicamente en la toma de datos en campo.

A nuestro director de Tesis profesor Ph.D Carlos Molina, por orientarnos y guiarnos en la realización de este proyecto.

Al profesor Alcibíades Bohórquez, por ser nuestro guía y gran apoyo en el manejo del tomógrafo eléctrico en campo.

Al profesor Juan Pablo Rodríguez, por su apoyo junto con el semillero de investigación en la toma de datos en campo.

Al programa de Ingeniería Ambiental e Ingeniería Civil de la Universidad Antonio Nariño por el apoyo brindado y los equipos prestados para la toma de datos.

Tabla de contenido

1	Introducción	1
2	Objetivos	3
2.1	Objetivo general	3
2.2	Objetivos específicos	3
3	Marco conceptual.....	4
3.1	Estratos del subsuelo.....	4
3.2	Agua subterránea	5
3.3	Métodos eléctricos	7
3.4	Tomografía eléctrica (TER).....	7
3.5	Propiedades eléctricas de las rocas	8
3.6	Resistividad.....	8
3.7	Inversión de datos Geoeléctricos	9
3.8	Técnicas de inversión.....	11
3.9	Marco legal	12
4	Estado del Arte.....	12
4.1	Método Schlumberger.....	14
4.2	Método Wenner	16
5	Planteamiento del problema	17
6	Metodología	19
6.1	Área de estudio	20
6.2	Análisis del área de estudio.....	22
6.2.1	Estructura ecológica.....	23

6.2.2	Usos del suelo	24
6.2.3	Sistema hídrico.....	24
6.2.4	Contexto.....	25
6.2.5	Búsqueda de mapas y estudios geológicos.....	26
6.3	Adquisición de datos con el tomógrafo eléctrico.....	30
6.3.1	Configuración Wenner	30
6.3.2	Configuración Schlumberger	33
6.4	Análisis de la información del suelo en el área escogida de la sede Usme	36
6.4.1	Utilización del software ZondRes3D	36
6.4.2	Utilización del software Ipi2Win	38
7	Resultados.....	39
7.1	Método Wenner	41
7.1.1	TOMO_Línea1	42
7.1.2	TOMO_Línea2.....	43
7.1.3	TOMO_Línea3.....	43
7.1.4	TOMO_Línea4.....	44
7.1.5	3D del terreno	45
7.2	Método Schlumberger.....	45
7.2.1	S.E.V.1	46
7.2.2	S.E.V.2.....	47
7.2.3	S.E.V.3.....	48
7.2.4	S.E.V.4.....	49
7.2.5	Corte geoelectrico	50
8	Discusión	51
9	Conclusiones	52
10	Recomendaciones	53
11	Referencias.....	54

Lista de figuras

Figura 1: Mapa plan parcial2

Figura 2: Métodos geofísicos.....7

Figura 3: Línea de Tomografía Eléctrica8

Figura 4: Calculo para la resistividad aparente mediante tres métodos.9

Figura 5: Inversión de datos9

Figura 6: Inversión de datos ZondRes10

Figura 7: Datos Ipi2win11

Figura 8: Arreglos.....14

Figura 9: Dispositivo Schlumberger15

Figura 10: Metodología19

Figura 11: Predio Universidad Antonio Nariño20

Figura 12: Parqueadero.....20

Figura 13: Área de estudio.....21

Figura 14: Zona de estudio22

Figura 15: Estructura ecológica23

Figura 16: Suelo24

Figura 17: Sistema hídrico.....24

Figura 18: Drenaje rio Tunjuelo24

Figura 19: Mapa plan parcial 325

Figura 20: Universidad Antonio Nariño25

Figura 21: Geología polígono 327

Figura 22: Hidrogeología.....28

Figura 23: Geomorfología polígono 329

Figura 24: Configuración Wenner	30
Figura 25: Procedimiento Wenner	31
Figura 26: Instalación método Wenner.....	31
Figura 27: GeoAmp303 y ASM001.....	32
Figura 28: Componentes ASM001	32
Figura 29: Configuración Schlumberger	33
Figura 30: Procedimiento Schlumberger	34
Figura 31: Configuración Schlumberger	34
Figura 32: GeoAmp303	35
Figura 33: Componentes GeoAmp303	35
Figura 34: Resistividad rocas y minerales.	37
Figura 35: Resistividad de metales.	38
Figura 36: Superposición geología: mapa vs imagen satelital (Google Earth)	40
Figura 37: Superposición Geomorfología.....	41
Figura 38: TOMO_ Línea 1	43
Figura 39: TOMO_ Línea 2.....	43
Figura 40: TOMO_ Línea 3.....	44
Figura 41: TOMO_ Línea 4.....	44
Figura 42: Imagen 3D del terreno.....	45
Figura 43: S.E.V.1	46
Figura 44: S.E.V.2.....	47
Figura 45: S.E.V.3	48
Figura 46: S.E.V.4	49
Figura 47. Correlación total S.E.V	50

Lista de tablas

Tabla 1: Marco conceptual	4
Tabla 2: Permeabilidad según la textura del suelo.....	4
Tabla 3: Permeabilidad según estructura del suelo.....	5
Tabla 4: Coordenadas área de estudio	21
Tabla 5: Resistividad materiales térreos.....	37
Tabla 6: Tipos de resistividad.....	39
Tabla 7: Probabilidad media de investigación (Z_e/a y Z_e/L).....	42
Tabla 8: Características S.E.V	46
Tabla 9: Análisis S.E.V.1	46
Tabla 10: Análisis S.E.V.2	47
Tabla 11: Análisis S.E.V.3	48
Tabla 12: Análisis S.E.V.4	49
Tabla 13: Leyes	60
Tabla 14: Decretos Distritales	60
Tabla 15: Resoluciones.....	61

Resumen

En la localidad de Usme busca generar y fortalecer procesos de organización y construcción por lo anterior se estableció un proyecto llamado “Operación Estratégica Nuevo Usme - Eje de integración Llanos “dónde se establecieron así varios planes parciales, en el caso del polígono 3 del Plan de Ordenamiento Zonal que corresponde a la ubicación de la Universidad Antonio Nariño, se generó el plan parcial “parque tecno ecológico”, para apoyar el crecimiento de la localidad.

Con el fin de aportar estudios geofísicos a los documentos existentes sobre el suelo de la universidad, la realización de este proyecto de investigación tiene como objetivo caracterizar el suelo de una parte de la universidad Antonio Nariño, específicamente la zona del parqueadero, utilizando dos métodos de resistividad, Wenner y Sondeo Eléctrico Vertical Schlumberger, a través de la tomografía eléctrica, en los estudios se obtuvo:

Tanto para el método Wenner como para el de Schlumberger se estudiaron 4 líneas de 120 m de longitud cada una, de 16.6 m y 40 m de profundidad respectivamente. De la información obtenida se concluyó que hay presencia de agua subterránea en las capas 2 y 4 del primer sondeo, en las capas 3, 4 y 5 del segundo, en las capas 1, 2, 4 y 5 del tercero y en las capas 1 y 2 del cuarto, como también que la composición de los primeros 9 m de suelo son mayormente arcillas saturadas, seguidas de arcillas no saturadas y gravas no saturadas, la composición hasta los 40 m de profundidad varía entre rocas fracturada, limos saturados y no saturados.

Palabras claves: Resistividad, tomografía eléctrica, sondeo eléctrico vertical, calicata, hidrogeología.

Abstract

In the locality of Usme seeks to generate and strengthen organizational and construction processes, a project called “New Usme Strategic Operation – Axis of Integration Llanos” was established, where several partial plans were established, in the case of polygon 3 of the Zonal Development Plan, which corresponds to the location of the Antonio Nariño University, the partial plan “ecological technology park” was generated, to support the growth of the locality.

In order to contribute geophysical studies to the existing documents on the soil of the University, the realization of this research project aims to characterize the soil of a part of the University Antonio Nariño, specifically the area of the parking lot, using two resistivity methods, Wenner and Schlumberger Vertical Electric Sounding, by means of electric tomography:

In both the Wenner and Schlumberger methods, four lines 120 m long each, 16.6 m and 40 m deep respectively were studied. From the information obtained, it was concluded that groundwater is present in layers 2 and 4 of the first borehole, layers 3, 4 and 5 of the second borehole, layers 1, 2, 4 and 5 of the third borehole and layers 1 and 2 of the fourth borehole, as well as that the composition of the first 9 m of soil is mostly saturated clay followed by unsaturated clay and unsaturated gravel, the composition up to 40 m depth varies between fractured rocks, saturated and unsaturated silt.

Keywords: Resistivity, electric tomography, vertical electric sounding, calicate, hydrogeology.

1 Introducción

Bogotá se encuentra situada en el centro geográfico del territorio nacional a 2.600 metros sobre el nivel del mar, presentando dos tipos de suelos: urbano y rural; para un área total de 1776 km².

La capital de Colombia se divide en veinte (20) localidades: Antonio Nariño, Los mártires, Chapinero, Santa Fe, Tunjuelito, Bosa, Kennedy, Rafael Uribe Uribe, Engativá, Suba, Usaquén, Barrios Unidos, Teusaquillo, Puente Aranda, Fontibón, Candelaria, San Cristóbal, Ciudad Bolívar, Usme y Sumapaz, siendo esta última el territorio más grande de la capital, con un suelo rural en casi toda su extensión; otra de las localidades que presenta este comportamiento es la localidad de Usme, con suelo tanto urbano, rural como de expansión (Secretaría Distrital de Planeación, 2021a).

Desde el año 2004 se han contemplado proyectos para el desarrollo urbano en la localidad de Usme (Decreto 190, 2004), “con el fin de generar y fortalecer procesos de construcción, organización y empoderamiento cultural campesino” (Secretaría Distrital de Planeación, 2015).

Por lo anterior, se ha establecido un proyecto llamado: Operación Estratégica Nuevo Usme - Eje de integración Llanos y el Plan de Ordenamiento Zonal de Usme varios análisis de los planes parciales, en este caso en el polígono 3 perteneciente a la universidad, con el fin del análisis del suelo para la construcción de diferentes tipos de edificios aportando al contexto urbano que se desea desarrollar.

El proyecto, anteriormente nombrado, fue dividido en diferentes zonas a manejar, en la figura 1 se localiza cada plan parcial generado para la localidad de Usme, notando, que el plan parcial 3 corresponde al polígono donde se encuentra ubicada la Universidad Antonio Nariño.

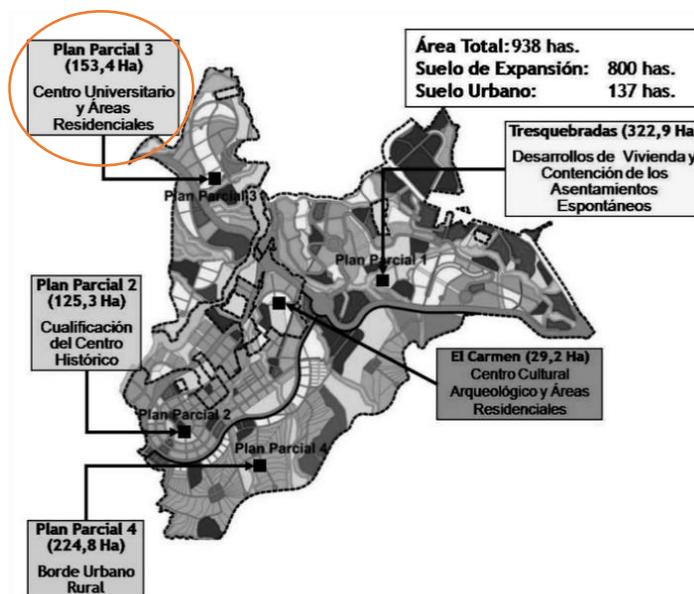


Figura 1: Mapa plan parcial
Fuente: (Artículo 50 del (Decreto 252, 2007))

Es por ello, que la Universidad Antonio Nariño, ubicada sobre la vertiente occidental del río Tunjuelo, coordenadas $4^{\circ}29'14.40''N$ y $74^{\circ}7'28.38''E$, y alturas entre 2650 y 2775 msnm (Uribe Sardiña & Torres M, 2018), encontrándose en las zonas de expansión urbana genera el plan parcial parque tecno ecológico, apoyando el crecimiento de la ciudad e implementa una serie de análisis de suelos, geológicos, geotécnicos, entre otros, para determinar las características adecuadas para la construcción de diversos edificios.

Por ello, el objetivo de este proyecto de investigación es realizar una caracterización geohidrológica en la Universidad Antonio Nariño sede Usme con el uso de tomografía eléctrica, más específicamente en la zona del parqueadero, para aportar las características del subsuelo que son viables de establecer con estudios geofísicos a los documentos existentes sobre el terreno de la universidad, y con ello, ayudar en la toma de decisiones en el desarrollo de diversos proyectos o actividades futuras que se deseen implementar en esta zona de la Universidad.

2 Objetivos

2.1 Objetivo general

Realizar una caracterización geohidrológica del parqueadero de la Universidad Antonio Nariño sede Usme con el uso de tomografía eléctrica.

2.2 Objetivos específicos

- Buscar la posible presencia de agua subterránea por medio de sondeos eléctricos verticales, en el parqueadero de la Universidad Antonio Nariño sede Usme.
- Caracterizar los estratos del subsuelo con el tomógrafo eléctrico, en el parqueadero de la sede Usme de la UAN.
- Interpretar los datos obtenidos en campo, con los softwares Ipi2win y ZondRes2D.

3 Marco conceptual

En el desarrollo de proyectos de construcción civil, son necesarios los estudios de suelo, los cuales pueden ser tanto geotécnicos como geofísicos, por ello, el campo de estudio en el que se desarrollará este proyecto, se presenta en la tabla 1.

Tabla 1: Marco conceptual

Disciplina	Ingeniería ambiental y civil
Campo de estudio	Hidrogeología
Variable de análisis	Resistividad eléctrica

Fuente: Autoría propia

3.1 Estratos del subsuelo

“El suelo es una mezcla compleja de organismos vivos, materia orgánica, minerales, agua y aire (...) según su textura, estructura y consistencia, los diversos tipos de suelos retienen mayor o menor cantidad de agua y aire” (FAO, 2018a). A esto se le denomina permeabilidad del suelo, los suelos permeables no retienen agua, ya que esta se filtra por el mismo. Mientras que los suelos impermeables si pueden retener el agua.

La permeabilidad de los suelos puede variar según la textura del suelo (FAO, 2018b):

Tabla 2: Permeabilidad según la textura del suelo

Suelo	Textura	Permeabilidad
Suelos arcillosos	Fina	De muy lenta a muy rápida
	Moderadamente fina	
Suelos Limosos	Moderadamente gruesa	De muy lenta a muy rápida
	Gruesa	

Suelos arenosos**Gruesa**

Fuente: (FAO, 2018b)

La permeabilidad de los suelos puede variar según la estructura del suelo (FAO, 2018b):

Tabla 3: Permeabilidad según estructura del suelo

Tipo de estructura	Permeabilidad
Laminar	Gran traslapo
	Ligero traslapo
En bloque	De lenta a
Prismática	Muy rápida
Granular	

Fuente: ((FAO, 2018b)

3.2 Agua subterránea

La Tierra contiene unos 1386 millones de Km³, de los cuales, se calcula que el 97% es agua salada y sólo el sólo el 2.5% del agua que existe en la Tierra se considera dulce. Del porcentaje de agua dulce que hay en el planeta, el 90% se encuentra en la Antártida, el 0.5% se encuentra en depósitos subterráneos y el 0.01% en ríos y lagos. Sin embargo, no toda el agua dulce es potable, por lo cual, de toda el agua existente en la Tierra, sólo el 0.007% es potable, para el consumo humano (Fundacion Aquae, 2018).

Es aquí, donde entra en juego, el ciclo hidrológico en la Tierra pues, este es “el mecanismo global que hace posible la transferencia de agua desde los océanos a la superficie y desde la superficie al subsuelo” (UNESCO, 2008) las principales variables naturales de los procesos del ciclo hidrológico son: precipitación, infiltración, escorrentía, evaporación, condensación y transpiración.

Durante, el proceso del ciclo del agua, las partículas acuosas, líquidas o sólidas caen de una nube al suelo, donde pasan por diferentes procesos, dentro de ellos, la infiltración, que es la formación de un paso de agua en forma de conducto, por donde, el agua se percola (Rodríguez, 2017b) almacenándose en lo que es llamado, agua subterránea.

De acuerdo a la RAE, un acuífero, es un volumen subterráneo de roca y arena que contiene agua (...) sus componentes son: zona de recarga o de alimentación, zona de circulación y zona de descarga (Rodríguez, 2017a). Existen cuatro (4) tipos de acuíferos (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible & Instituto de Hidrología, 2015):

- Acuífugo: No posee capacidad de circulación ni de retención de agua.
- Acuícludo: Contiene agua en su interior, incluso hasta la saturación, pero no la transmite.
- Acuícardo: Contiene agua y la transmite muy lentamente.
- Acuífero: Almacena agua en los poros y circula con facilidad por ellos.

También, dentro de la clasificación de acuíferos, existen tres (3) sistemas de acuíferos (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible & Instituto de Hidrología, 2015):

- Acuífero libre: Una zona impermeable sirve de base a una zona permeable saturada de agua; más arriba, existe una franja permeable, sin saturar.
- Acuífero confinado: La roca permeable queda encajada por encima y por debajo en terrenos impermeables.
- Acuífero semiconfinado: En su parte superior hay un acuícardo mientras que, en la inferior, se encuentra un terreno impermeable.

3.3 Métodos eléctricos

Aplicación de flujo de energía en la zona de estudio, después se procede a determinar la resistividad de la masa a este flujo eléctrico. Existen tres maneras de aplicar este método: Los sondeos eléctricos verticales (SEV), tomografía eléctrica (TER) y calicatas (Rodríguez Padilla, 2021).

Para el estudio de la composición y estructura de los recursos naturales como el agua, vapor, minerales y petróleo se utilizan métodos geofísicos, tales como: el monitoreo de flujo, transporte de contaminantes y un mapeo de eventos geológicos (Alvarez Manilla, 2003). En la figura 2 se presenta un resumen de los diferentes métodos geofísicos y el método seleccionado en este caso de estudio, el método eléctrico.

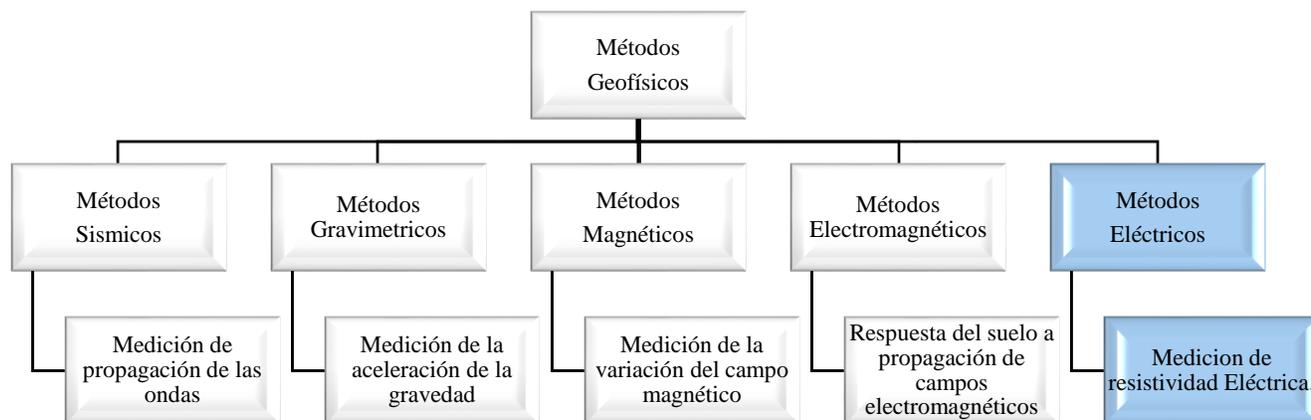


Figura 2: Métodos geofísicos
Fuente: Autoría propia

3.4 Tomografía eléctrica (TER)

Es un método de resistividad a detalle, donde se emplean técnicas numéricas para la modelización 2D del terreno, esta herramienta de investigación es de fácil empleo gracias al

avance instrumental de esta época además de ser un método no destructivo (Montoya Colonna, 2019).

Este es un método muy utilizado, su principio físico es simple y eficaz, las mediciones se realizan en la superficie, obteniendo así resistividades aparentes, donde se representa la variación de las mismas en el subsuelo, y sus alteraciones horizontales o verticales (Rodríguez Padilla, 2021).

En la figura 3 se puede ver un ejemplo de la toma de datos del tomógrafo eléctrico, con su respectiva escala de resistividad.

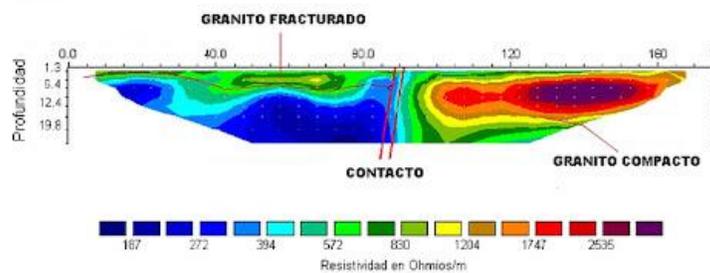


Figura 3: Línea de Tomografía Eléctrica
Fuente: (Montoya Colonna, 2019).

3.5 Propiedades eléctricas de las rocas

El método de tomografía eléctrica es uno de los métodos eléctricos de prospección con el cual son analizadas las rocas, el método consiste en inyectar un flujo de corriente al terreno, el flujo se dispersa en todas las direcciones pasando por las rocas y minerales, son 3 las maneras por las que propagan (Montoya Colonna, 2019).

3.6 Resistividad

“Dado un volumen de material cualquiera, su resistencia al paso de corriente será proporcional a una cantidad llamada Resistividad Eléctrica” (Montoya Colonna, 2019) dependiendo de la

longitud y composición de la muestra, también es inversamente proporcional a la sección transversal.

Como lo indica (US EPA, 2016) los métodos de resistividad eléctrica comúnmente se representan con valores de resistividad aparente, siendo esta la resistividad que se genera después de la inyección de conductividad por electrodos aun medio y la distancia entre el electrodo y el medio. En la figura 4 se pueden evidenciar algunas formas para el cálculo de la resistividad aparente.

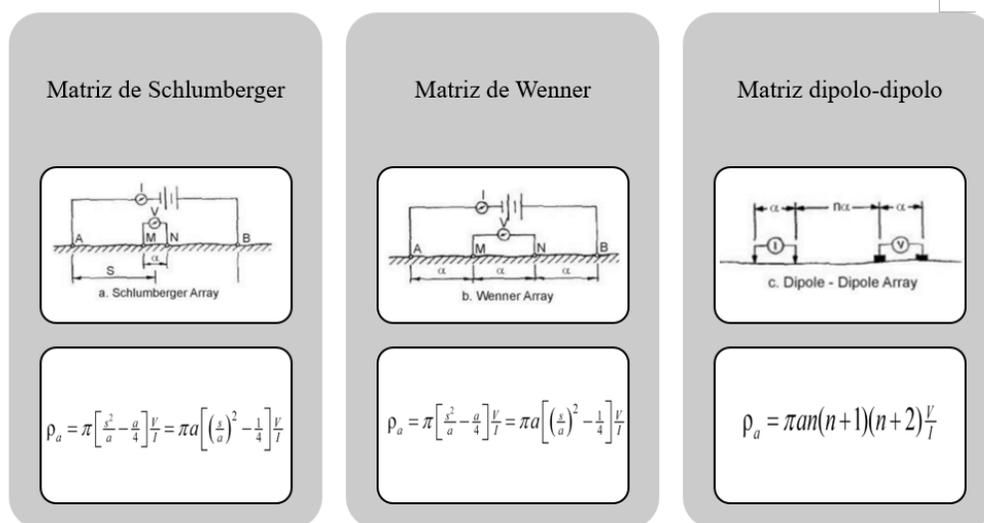


Figura 4: Cálculo para la resistividad aparente mediante tres métodos.
Fuente: (US EPA, 2016)

3.7 Inversión de datos Geoeléctricos

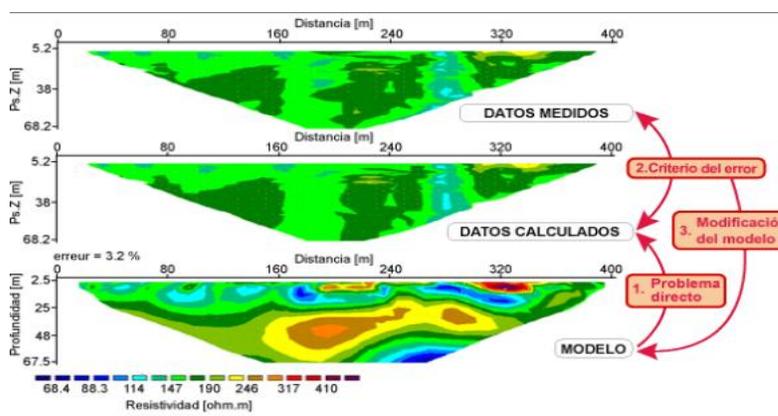


Figura 5: Inversión de datos
Fuente: (Molina, 2006)

Mediante las mediciones de campo, se obtienen valores de resistividades aparentes del terreno de estudio y mediante la inversión se obtienen las resistividades reales. Mediante iteraciones se logra conseguir un modelo de resistividades verdaderas, las cuales pueden explicar las aparentes que fueron medidas en campo (Molina, 2006).

ZondRes2d es un software diseñado para la interpretación de datos realizados en la tomografía eléctrica, esta técnica incluye métodos de observaciones de campo y los datos de IP. En sus características se encuentra la reutilización múltiple como receptor y fuente de la misma posición de electrodos fijos en una línea de perfil.

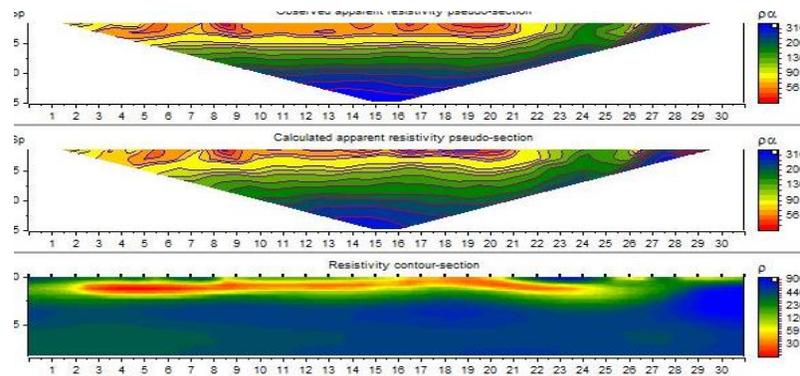


Figura 6: Inversión de datos ZondRes
Fuente: (Díaz, 2010)

Ipi2win es un software diseñado para la interpretación de datos de un sondeo eléctrico vertical a lo largo de un perfil, donde, la curva del sondeo eléctrico vertical, es ajustada por curvas de sondeo teórica y calculada.

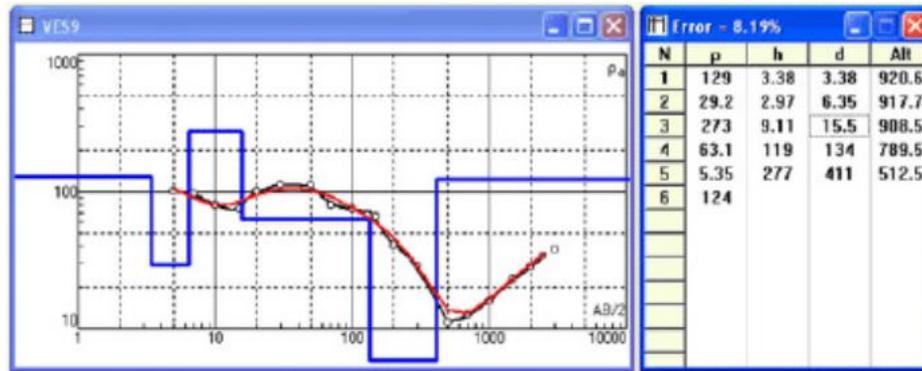


Figura 7: Datos Ipi2win
Fuente: (Sultan et al., 2010)

3.8 Técnicas de inversión

El estudio busca obtener modelos 3D y 2D a partir de las resistividades aparentes, para esto se necesitan programas de inversión, los cuales realizan todo un proceso iterativo para obtener un modelo de resistividades reales, las técnicas de inversión se pueden clasificar en dos grandes grupos, Smoothness- constrained inversión method y Block inversión method (Xu et al., 2019).

“Smoothness-Constrained least squares Inversión Method” este método es el más óptimo, en el análisis de problemas con mediciones graduales de resistividad, el método usa técnicas como la de Gauss- Newton least-squares, método de optimización, además de no requerir un modelo inicial (Montoya Colonna, 2019), aparte de esta técnica, se encuentran: el método de optimización y cálculo de la matriz Jacobiana, opciones de inversión en el RES2DINV y la Selección de inversión Robusta.

“Block inversión method” es mayormente utilizando cuando el terreno estudiado presenta grandes contrastes de resistividad, es decir, la resistividad sea homogénea en el interior de una capa, pero muy diferenciada a la resistividad de las capas adyacentes. Dado que en problemas de filtración de agua en el suelo las variaciones de resistividad suelen ser graduales, esta técnica no es eficiente (Xu et al., 2019).

3.9 Marco legal

Para mayor información remitirse al apartado de anexos.

4 Estado del Arte

La geofísica es una ciencia que estudia la estructura y dinámica de la Tierra realizando mediciones de sus campos gravitacionales, magnéticos, eléctricos, electromagnéticos, la radiactividad y el paso de ondas elásticas. Estudia fenómenos como terremotos y volcanes, el movimiento de los continentes, la formación de montañas y cuencas oceánicas (Durrheim et al., 2021). De esta ciencia, se derivan algunos métodos tales como la resistividad eléctrica, los métodos de redar de penetración terrestre, entre otros, todos encaminados con diferentes objetivos de acuerdo a los estudios que se les vaya a dar, ya sea por estudios de contaminación del subsuelo, estudios arqueológicos, estudios geotécnicos, entre muchas otras variedades.

La caracterización cuantitativa de las propiedades del subsuelo es fundamental para muchas aplicaciones ambientales y sirve como base para simular y comprender mejor los procesos dinámicos del subsuelo. Los métodos de obtención de imágenes geofísicas permiten obtener imágenes de las distribuciones de propiedades del subsuelo y monitorear sus cambios espacio-temporales de una manera mínimamente invasiva (Wagner & Uhlemann, 2021). Además de utilizar diferentes softwares, ya sean de forma privada o de forma pública, con el fin de generar una mayor cobertura en los estudios del suelo, sus componentes, fallas, problemas o funciones agrícola.

El contenido de agua y porosidad en las rocas está relacionado con su resistividad, este parámetro es de utilidad para la determinación geométrica de acuíferos y evaluación de la calidad de las aguas (Brunet et al., 2010). En Valle de Aburrá se han realizado estudios para conocer el

estado físico y químico del agua subterránea, pues el incremento acelerado de la población en la última década impulsó esta necesidad, la recopilación de los datos presentan una caracterización geológica e hidrogeológicas detalladas (Ospina Benítez & Vanegas Cubillos, 2020).

La caracterización del suelo subterráneo y la determinación de la resistencia del suelo son requisitos previos para el diseño de cimientos de importantes estructuras de ingeniería civil (Sudha et al., 2009) es por ello, que se realizan estudios geofísicos cuya metodología es indirecta, para la determinación de un suelo basado en la resistividad eléctrica de este, la técnica de Tomografía de Resistividad Eléctrica (ERT) proporciona la imagen eléctrica del suelo subterráneo y se ha convertido en una herramienta importante para la caracterización eléctrica del suelo, como lo demuestra la investigación para una planta de energía térmica y están ubicados en Aligarh y Jhansi en Uttar Pradesh (UP), India, 2009.

En un caso de estudio en la cuenca de Vallaccia (centro de Italia), se investigó la viabilidad del método de resistividad para el estudio de las variaciones espaciales y temporales de la humedad del suelo. El enfoque de este estudio experimental fue explorar la efectividad del método de resistividad eléctrica para delinear los patrones espaciales de humedad del suelo y seguir sus variaciones temporales. Esto lo elaboraron, analizando las propiedades estadísticas de la humedad del suelo y los datos de distribución de resistividad eléctrica del suelo (Calamita et al., 2012)

Otro de los trabajos, que se pueden realizar el método ERT, son en zonas frías como lo demuestra el trabajo, en el que se delimita eficazmente las zonas congeladas y descongeladas y se demuestra que es un método muy prometedor para la detección y el seguimiento indirectos y no intrusivos de las características del permafrost desde la superficie del suelo. El ERT ha

demostrado ser una herramienta geofísica no intrusiva útil en estudios de permafrost en regiones árticas (Li et al., 2021).

Para determinar el modelo o teoría matemática que relacione la superficie con la tensión diferencial, se debe buscar un modelo que se ajuste a los requerimientos y al principio de reciprocidad de transferencia de energía (Giménez Tortosa & Gasulla Forner, 1999).

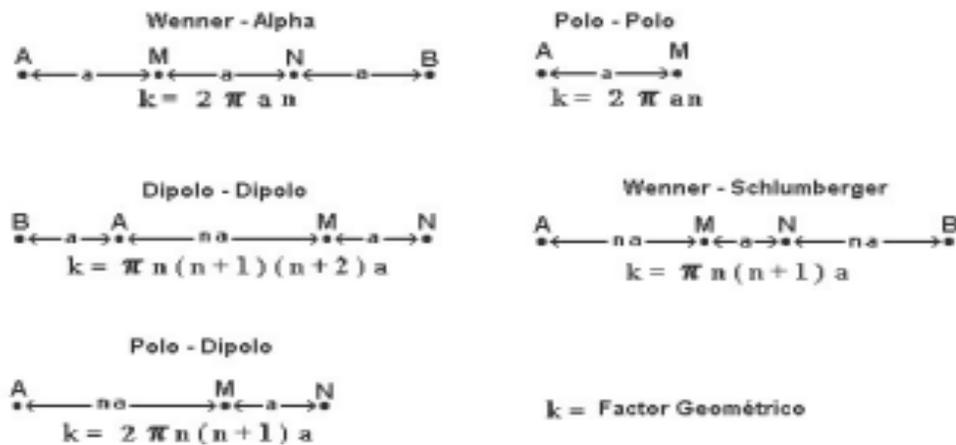


Figura 8: Arreglos
Fuente: (Modella Basurco, 2019)

La distancia para los arreglos de electrodos no suele pasar los 200 metros, pues las profundidades a los que llegan los estudios no exceden unas pocas decenas metros, en este caso el área de estudio no debe superarlos y la condición que debe cumplir es la separación de AB igual o mayor que 5m (Rodrigo Molina et al., 2004).

4.1 Método Schlumberger

Un método utilizado para estudios ambientales, como el determinar presencia de agua subterránea y componentes de esta misma (Modella Basurco, 2019) es un método de sondeo que separa progresivamente los electrodos inyectores de corriente “A” y “B”, los detectores de

voltaje “M” y “N” se deben dejar fijos en torno a un punto central “P”. La representación de este sondeo muestra en ordenadas la resistividad “ ρ_a ” ($\Omega.m$) y en abscisas la distancia “AB/2” m.

De acuerdo a las condiciones del terreno de estudio geofísico, se emplea el dispositivo Schlumberger, la línea de extensión AB/2 llega hasta una distancia promedio de x metros. Se ejecuta x SEV con medidas a partir de $AB/2 = 5$ metros y $MN = x$ metros, respectivamente. “La profundidad de penetración de la corriente eléctrica depende de la separación de los electrodos de corriente AB, si la distancia entre los electrodos AB aumenta, la corriente circula a mayor profundidad” (Díaz, 2010).

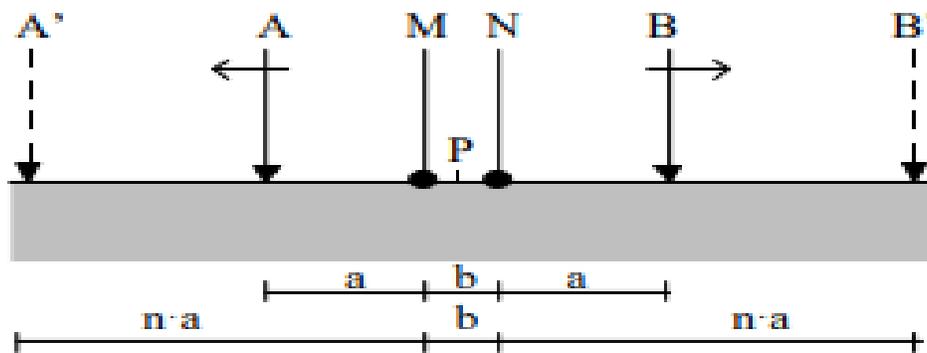


Figura 9: Dispositivo Schlumberger
Fuente: (Modella Basurco, 2019)

Los electrodos A y B se abren progresivamente mientras M Y N se encuentran fijos.

Las estimaciones de las propiedades del suelo como la capacidad de intercambio catiónico (CEC), el contenido de agua, las características del tamaño de grano y la permeabilidad son importantes en la ingeniería geotécnica, siendo los métodos geofísicos utilizados cada vez más para estimar la textura del suelo con fines ambientales (Revil et al., 2021).

4.2 Método Wenner

El método de Wenner es un método que mide la resistividad del suelo, al ubicar en línea recta una serie de electrodos espaciados con una distancia a entre cada uno y enterrados a una profundidad de 15 cm dentro del electrodo al suelo (Villa-Acevedo et al., 2019).

Para el estudio de terrenos el método Wenner es el más utilizado, pues la constante geométrica de este método es la más pequeña de todas, haciendo así la señal más fuerte, este método se emplea para estudios superficiales y profundos, dependiendo de la distancia entre cada electrodo, este dispositivo con separación interelectrónica “ a ”, consiste en el aumento progresivo del valor de la separación entre electrodos “ a ” manteniendo un punto central fijo “ O ” La cantidad mínima recomendada de electrodos para el dispositivo tipo Wenner es de 21 a 25 (Solana Capilla, 2014).

En Colombia se han realizado estudios que han cubierto cerca del 15% del territorio. “Se cuenta con una cartografía hidrogeológica de todo el territorio nacional en escala 1:2.500.000 elaborada por Ingeominas en el año de 1989 con el patrocinio del Programa Hidro-geológico Internacional de la Unesco” (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible & Instituto de Hidrología, 2015).

Estos estudios fueron enfocados al reconocimiento de fuentes acuíferas, la definición de regímenes de flujo, la determinación de la calidad del agua y caracterización de parámetros hidrogeológicos. Estos estudios, se iniciaron por parte de Ingeominas desde 1950, con el objetivo de abastecimiento para poblaciones con problemas en la adquisición del agua potable superficial. Los territorios estudiados fueron: el Valle del Cauca, Boyacá, Cauca, Cundinamarca, Huila, Córdoba y Antioquia. “Hacia los años 90 se concretan convenios con Autoridades Ambientales que permiten la realización de estudios regionales en el valle del Patía, la sabana de Bogotá, Urabá antioqueño y en los departamentos de César, Huila, Tolima, Magdalena, Sucre,

Córdoba y la Isla de San Andrés (Ibíd.)” (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible & Instituto de Hidrología, 2015). En el Estudio Nacional del Agua (2014) se identifican sesenta y un (61) Sistemas Acuíferos distribuidos en 16 provincias hidrogeológicas con diferentes niveles de conocimiento.

La Universidad Antonio Nariño, sede Usme, cuenta con algunos estudios como “Importancia de la tomografía de resistividad eléctrica en la ingeniería Civil” (Parra & Torres, 2020), “estudios preliminares de suelos, geológico, geomorfológico y geotécnico plan parcial universidad Antonio Nariño localidad de Usme contexto urbano S.A” (Uribe Sardiña & Torres M, 2018) y “Caracterización hidrogeológica del riachuelo de la quebrada Fucha” (Vega Cárdenas & Quiroga Belalcáz, 2019), donde se realiza una tesis de pregrado, cuyo objetivo es, estimar parámetros de infiltración del suelo a través de información de entidades que tengan relación con el tema y/o autores que hayan realizado trabajos de campo enlazados a la temática, en donde, se expone el perfil de un área determinada por la tesis de pregrado de Angie Viviana Vega Cárdenas y Jason S. Quiroga Belalcázar, logrando estratificar en función de la infiltración, el subsuelo, por medio del programa de libre acceso llamado SoilGrids 3D.

5 Planteamiento del problema

El suelo se utiliza como material de construcción en proyectos de ingeniería civil y cimientos estructurales, (Das, 2013), es esta razón, por la cual, se estudian las propiedades del suelo, tales como su origen, distribución caracterizada por estratos, la capacidad que tienen de drenar el agua, capacidad de soporte, entre otras características, propia de la mecánica de los suelos, y de esta forma generar cimentaciones estables para las diversas construcciones que genera día a día el ser humano; para realizar dichos estudios, se han generado varias ramas en el estudio de los suelos, siendo una de estas, la geofísica aplicada cuyo objetivo es identificar en el subsuelo,

estratos capaces de resistir o soportar obras civiles, además de localizar yacimientos de petróleo, arqueológicos, gases, vapor, minerales de interés económico, la presencia de acuíferos (cuerpos de agua presentes en el ciclo del agua), entre otras (Alvarez Manilla, 2003).

Cabe destacar, que la geofísica aplicada, tiene diversos métodos para realizar los objetivos mencionados anteriormente, encontrado métodos tales como: los métodos geoelectricos, electromagnéticos, sísmicos, gravimétricos y magnetométricos. De los cuales, destaca la tomografía eléctrica, un método de medición de la resistividad eléctrica de los materiales del subsuelo, utilizado para la caracterización de los estratos del suelo, la detección del nivel freático y la detección de zonas afectadas por intrusión salina como sus principales características.

Para casos en Colombia, existen empresas, las cuales realizan estudios tomográficos o diseñan sismógrafos de exploración y equipos geoelectricos como (Subsuelo3D S.A.S., 2019) de esta empresa, la Universidad Antonio Nariño, dispone del GeoAmo 303, con este dispositivo, se han desarrollado diversas investigaciones tales como: (Parra & Torres, 2020) para estudios realizado por ingenieros civiles, (Vega Cárdenas & Quiroga Belalcáz, 2019) y (Coronado Perna & Neita Arévalo, 2018) para estudios realizados por ingenieros ambientales.

Como se menciona anteriormente, se han realizado algunos estudios en diferentes áreas del campus Universitario, sin embargo, se debe de considerar, que esta sede es una de las que más hectáreas tiene, hablando de las sedes de la ciudad de Bogotá, por lo cual no todo el terreno que posee la universidad tiene estudios, sobre todo, en los casos para el desarrollo de cimentaciones o construcciones que se planteen en futuro. Por lo cual, el presente trabajo pretende investigar por medio del método geofísico del tomógrafo eléctrico, inyectando corriente continua al subsuelo a profundidad, para conocer la variación de resistividad, identificando las diferencias en cada

estrato, (Cartomex, 2015), en el parqueadero de la sede Usme de la Universidad Antonio Nariño, esta metodología se desarrollará bajo mediciones en campo.

6 Metodología

Consiste en el análisis teórico del área de estudio mediante documentos proporcionados del estudio preliminar de suelos, geológico, geomorfológico y geotécnico del plan parcial universidad Antonio Nariño localidad de Usme contexto urbano. Para proceder con estudios de campo con el Tomógrafo Eléctrico, en dos de sus funcionalidades, primero utilizándolo con el método Schlumberger y posteriormente con el método Wenner. Por último, realizar el análisis de los datos generados por el tomógrafo eléctrico en los softwares Ipi2win y ZondRes2D. En la figura 10, se especifican las actividades que se van a realizar.

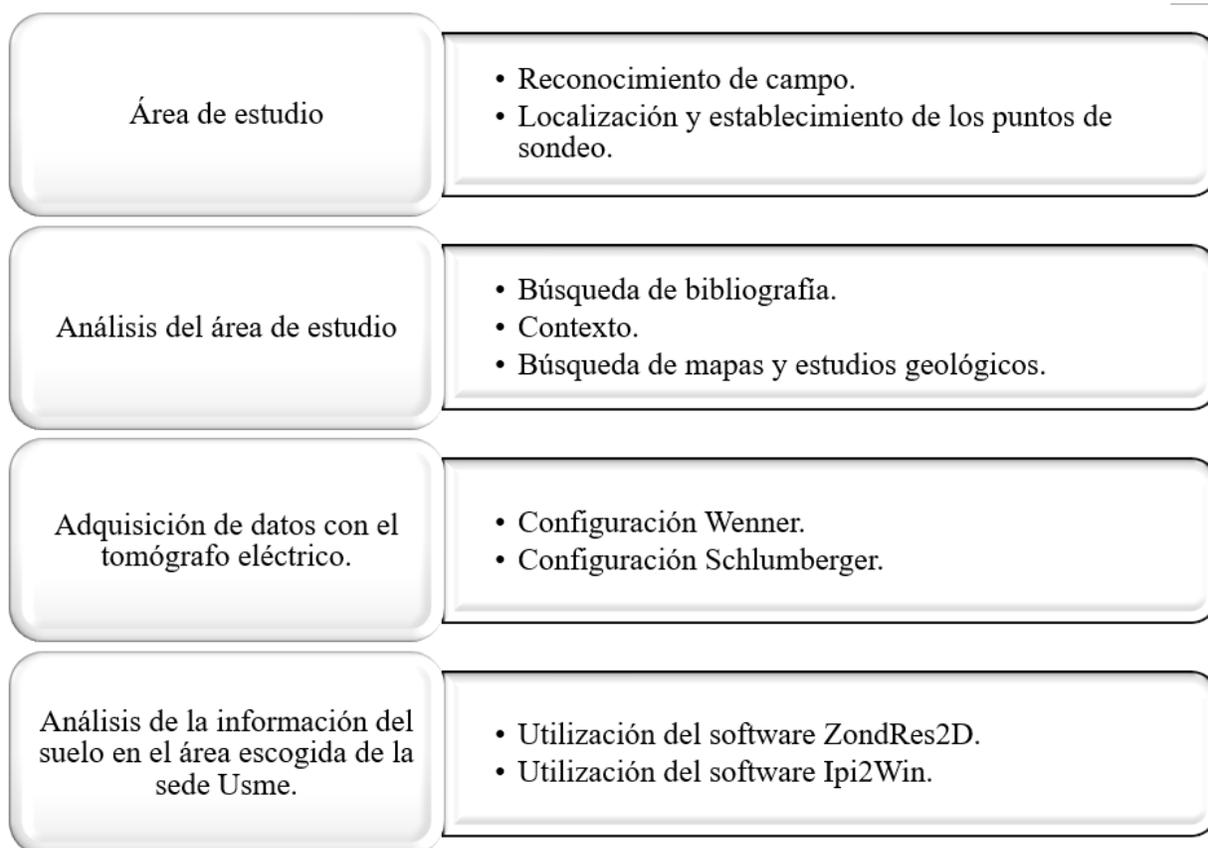


Figura 10: Metodología
Fuente: Autoría propia

6.1 Área de estudio

Como se puede evidenciar en la figura 11, el área de estudio se ubica en la sede Usme de la Universidad Antonio Nariño al sur de Bogotá, “sobre la vertiente occidental del río Tunjuelo, en las coordenadas $4^{\circ}29'14.40''N$ y $74^{\circ}7'28.38''E$, y alturas entre 2650 y 2775 msnm se adentra por la vía interna que conduce a las instalaciones de la sede de la Universidad Antonio Nariño de Usme” (Uribe Sardiña & Torres M, 2018).

Mientras que, en la figura 12 se indica el área específica que se utilizó para realizar la toma de datos, siendo esta, el parqueadero de la universidad.



Figura 11: Predio Universidad Antonio Nariño
Fuente: Google Earth Pro



Figura 12: Parqueadero
Fuente: Google Earth Pro

- Para el área de estudio se delimita un rectángulo de 20 metros x 120 metros:



Figura 13: Área de estudio
Fuente: Autoría propia

Para tomar las coordenadas de cada punto en el rectángulo de la figura 13, se utilizó la app: Mi ubicación GPS tomando los puntos como se muestra en la Tabla 4. Mientras que, en la figura 14 se evidencian tomas del terreno en el que se trabajó.

Tabla 4: Coordenadas área de estudio

Puntos	Latitud	Longitud	Altitud (m)
1	4.48312	-74.1244	2740.4568
2	4.48326	-74.1244	2721.864
3	4.48329	-74.12524	2692.2984
4	4.48323	-74.12517	2707.2336

Fuente: Mi ubicación GPS



Figura 14: Zona de estudio
Fuente: Autoría propia

6.2 Análisis del área de estudio

“Bogotá se encuentra distribuido por áreas destinadas a usos urbanos con infraestructura vial, redes primarias de energía, acueducto y alcantarillado, áreas en proceso de urbanización, áreas de suelo en expansión y áreas rurales” (Secretaría Distrital de Planeación, 2021a).

Por otro lado, el suelo rural se encuentra constituido por los terrenos no aptos para el uso urbano, por razones de oportunidad, o por su destinación a usos agrícolas, ganaderos, forestales, de explotación de recursos naturales y actividades análogas (Secretaría Distrital de Planeación, 2021b).

El Plan de Ordenamiento Territorial - POT de Bogotá adoptó, como parte del modelo de ordenamiento de la ciudad, la definición de suelos de expansión urbana con base en las previsiones de crecimiento de esta como parte de esta medida, estableció suelos de expansión en (Secretaría Distrital de Planeación, 2021a):

Zona Norte (localidades de Suba y Usaquén): 700 ha

Zona sur de la ciudad (Localidades de Usme y Ciudad Bolívar). 800 ha

Zona Occidental (Localidades Fontibón y Kennedy): 1.000 ha

La localidad 5: Usme situada en el sur de Bogotá, limita al norte con las localidades San Cristóbal (4), Rafael Uribe Uribe (18) y Tunjuelito (6); al oriente con los municipios de Chipaque y Une; al sur con la localidad de Sumapaz (20); y al occidente con la localidad Ciudad Bolívar (19), con el Río Tunjuelo de por medio y los municipios de Pasca y Soacha.

Esta localidad tiene una extensión de 21.506 hectáreas (ha), de estas 2.104 ha corresponden a suelo urbano, 902 ha se clasifican como suelo de expansión urbana y las restantes 18.500 ha constituyen suelo rural. Usme ocupa el segundo lugar entre las localidades con mayor superficie dentro del Distrito Capital, en primer lugar, está la localidad de Sumapaz.

6.2.1 Estructura ecológica

Gran parte del suelo rural de la localidad de Usme se encuentra dentro de la Reserva Forestal Protectora Bosque Oriental de Bogotá y la Reserva Forestal Protectora-Productora Cuenca Alta del Río Bogotá, clasificado dentro de la Estructura Ecológica Principal.



Figura 15: Estructura ecológica
 Fuente: (Secretaría Distrital de Planeación, 2021a).

6.2.2 Usos del suelo

En la localidad de Usme se desarrollan diferentes usos del suelo: residencial, y comercial, principalmente. En la Reserva Forestal Nacional Protectora Bosque Oriental de Bogotá, declarada mediante.

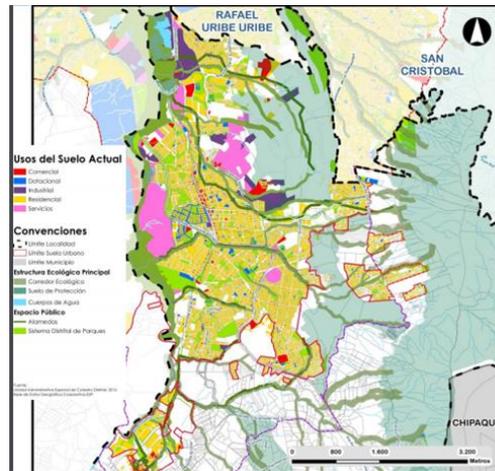


Figura 16: Suelo
Fuente: (Secretaría Distrital de Planeación, 2021a).

6.2.3 Sistema hídrico

El río Tunjuelo, tiene una longitud de 73 Km, siendo el más largo después del río Bogotá, además, el POZ de Usme describe 16 quebradas. Para mayor información remitirse a los Anexos.

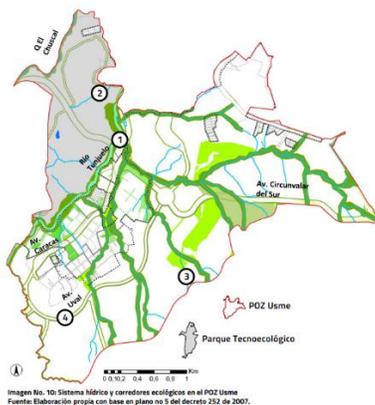


Figura 17: Sistema hídrico
Fuente: (Secretaría distrital de planeación, 2020).

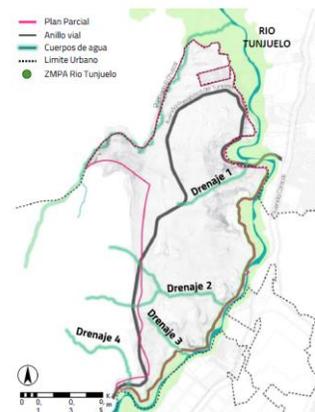


Figura 18: Drenaje río Tunjuelo
Fuente: (Secretaría distrital de planeación, 2020)

6.2.4 Contexto

Plan parcial Antonio Nariño: Parque tecnocológico

Este plan parcial de acuerdo al Poz de Usme se encuentra en el plan parcial 3 o polígono 3 designado como: Centro universitario y áreas residenciales como se muestra en la figura 19 y la figura 20. En el polígono 3 se encuentran los terrenos de la universidad Antonio Nariño, que presenta un suelo en desarrollo.

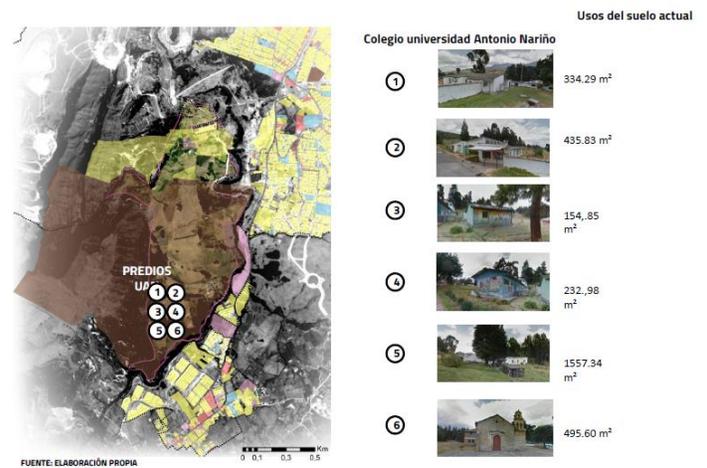
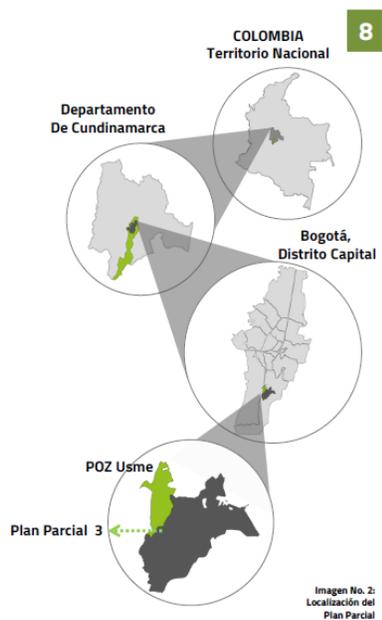


Figura 19: Mapa plan parcial 3
Fuente: (Secretaría distrital de planeación, 2020)

Figura 20: Universidad Antonio Nariño
Fuente: (Secretaría distrital de planeación, 2020)

Alfonso Uribe S. y Cía. S.A., (Uribe Sardiña & Torres M, 2018), realizó estudios preliminares del subsuelo del terreno perteneciente a la sede Usme de la universidad Antonio Nariño, el cual incluye estudios de geología, hidrología y geomorfología, donde se describen los procesos por los cuales ha pasado el terreno de la universidad a través de millones de años hasta lo que es hoy día, estudios, para el Plan Parcial Universidad Antonio Nariño que se desarrolla en la localidad de Usme.

6.2.5 Búsqueda de mapas y estudios geológicos

6.2.5.1 Geología

Para poder entender los procesos de modificación por los cuales ha pasado el terreno de la sede Usme de la universidad Antonio Nariño, se debe de entender la geología regional donde se encuentra, es decir la de Bogotá, donde “La Sabana de Bogotá forma parte de una cuenca sedimentaria plegada y tectonizada, constituida por varios ejes anticlinales y sinclinales, donde afloran unidades de roca constituidas, principalmente, por areniscas y arcillolitas” (Uribe Sardiña & Torres M, 2018). Para estudiar la geología regional, también se toman en cuenta las fallas predominantes que puedan estar circundantes a la zona de estudio, encontrando fallas de estructura rumbo, es decir, fallas horizontales con deslizamiento predominante lateral u oblicuo.

En la zona de estudio, las estructuras más importantes son: el Sinclinal de Usme, afectado por un sistema de fallas denominado Zona de Falla de Mochuelo.

“Los registros obtenidos de las perforaciones realizadas en la zona de estudio (polígono 3) y las observaciones de campo, permiten concluir que en el área se presentan rocas y suelos de origen sedimentario (formaciones Regadera, Usme y Marichuela) cubiertos en parte por depósitos recientes de origen aluvial”(Uribe Sardiña & Torres M, 2018) cómo se puede evidenciar en la figura 21.

Para mayor información, de la geología presente en la zona que se estudió por Alfonso Uribe S. y Cía. S.A en el polígono 3 en el Poz Usme, perteneciente al Plan Parcial Universidad Antonio Nariño sede Usme en el sur de Bogotá, remitirse a los Anexos.

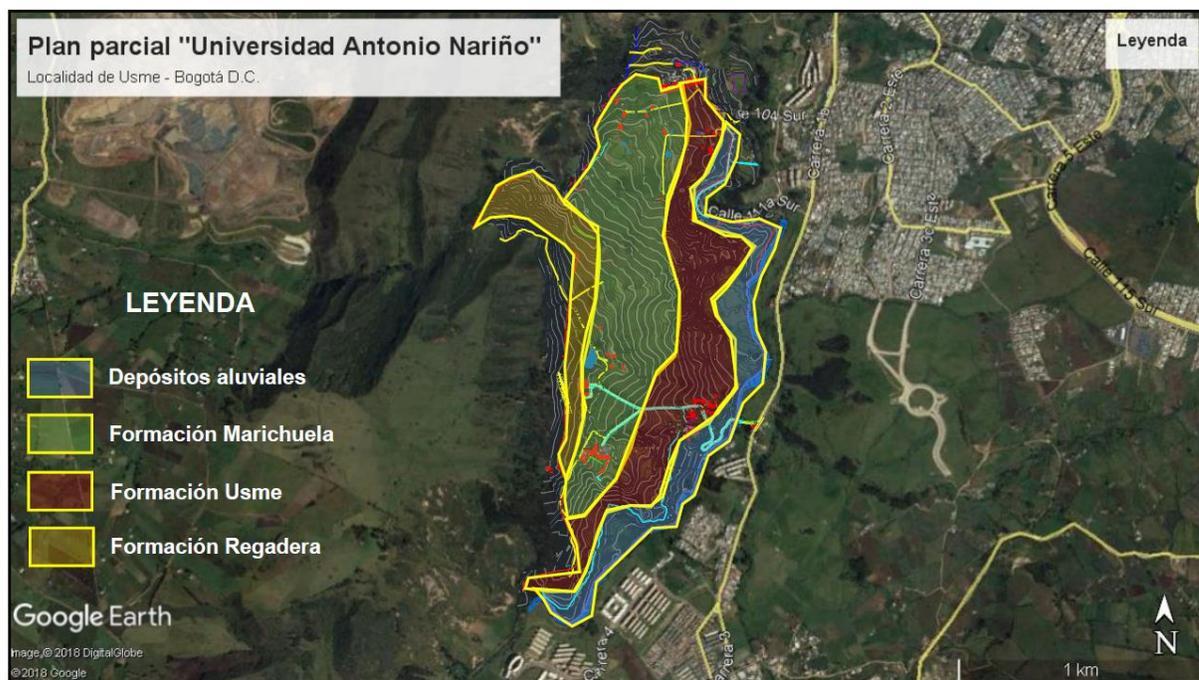


Figura 21: Geología polígono 3.

Fuente: (PP UAN_PP UAN_estudio técnico plan parcial universidad Antonio Nariño Localidad de Usme, 2018)

6.2.5.2 Hidrogeología

La hidrogeología es un aspecto relevante en la zona de estudio, puesto que, en la universidad pasa un trayecto del río Tunjuelo, por lo cual la interacción entre el agua y el suelo es bastante significativa, y en este caso, el polígono 3 se encuentra controlado por materiales con permeabilidad primaria elevada, sobre todo en los depósitos de la formación Marichuela y los depósitos aluviales, “Las perforaciones exploratorias, confirman la presencia de niveles de agua entre 1 y 3 m en promedio, dentro de los materiales de dichos depósitos (...) Con base en las características anotadas, es de esperar en la zona fluctuaciones importantes de los niveles de agua, pero dentro de los materiales anotados” (Uribe Sardiña & Torres M, 2018).

La principal cuenca de drenaje corresponde al río Tunjuelo que forma parte de la cuenca media del río Bogotá. Al igual que el resto de los tributarios de la margen izquierda del río Bogotá, está orientado y drenando sus aguas en dirección sur-norte; todos ellos enmarcados por la

continuación de la cadena montañosa que en Bogotá se denomina Reserva Forestal Cerros Orientales. La cuenca del río Tunjuelo es la más meridional de las cuencas afluentes (ESCALA, 2018). En la figura 22 se puede evidenciar la red de drenaje generalizada sobre la margen izquierda del río Tunjuelo, marcando en un rectángulo negro, el área de estudio. Para mayor información remitirse a los Anexos.

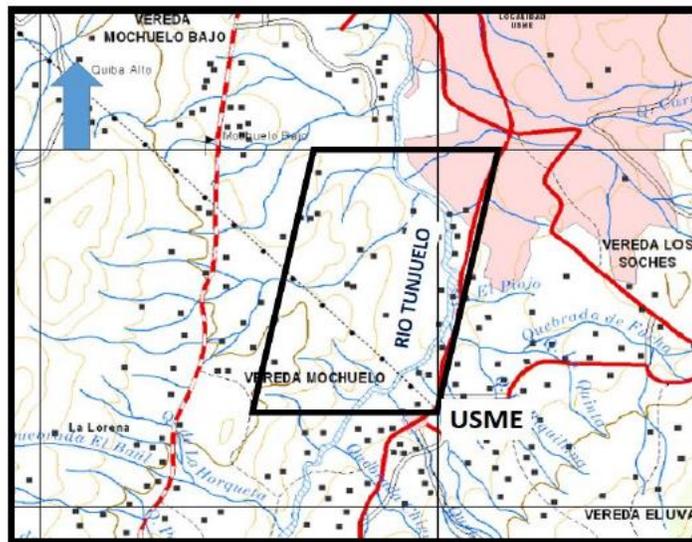


Figura 22: Hidrogeología
Fuente: (ESCALA, 2018)

6.2.5.3 Geomorfología

Para entender cuál es el comportamiento del terreno se estudió su geomorfología y el cambio que está presentado de acuerdo a la composición de su morfología, encontrando que el área del proyecto se puede dividir en dos unidades bien definidas: una montañosa y otra de laderas semiplanas e inundables, las cuales corresponden a unidades de tipo estructural plegada, donde la morfogénesis predominante es denudativa y estructural; y la de tipo agradacional o acumulativa a partir del material arrastrado por corrientes y procesos erosivos, asociados en las últimas etapas a procesos de acumulación (ESCALA, 2018).

“Es importante mencionar, que a partir de la fotointerpretación se puede afirmar que el sector de estudio no ha sido intervenido por actividades extractivas (como fuentes de materiales de construcción)” (Uribe Sardiña & Torres M, 2018). Para este estudio, se identificaron, cuatro tipos de modelados geomorfológicos, que se muestran en la figura 23. Para mayor información remitirse a los Anexos.

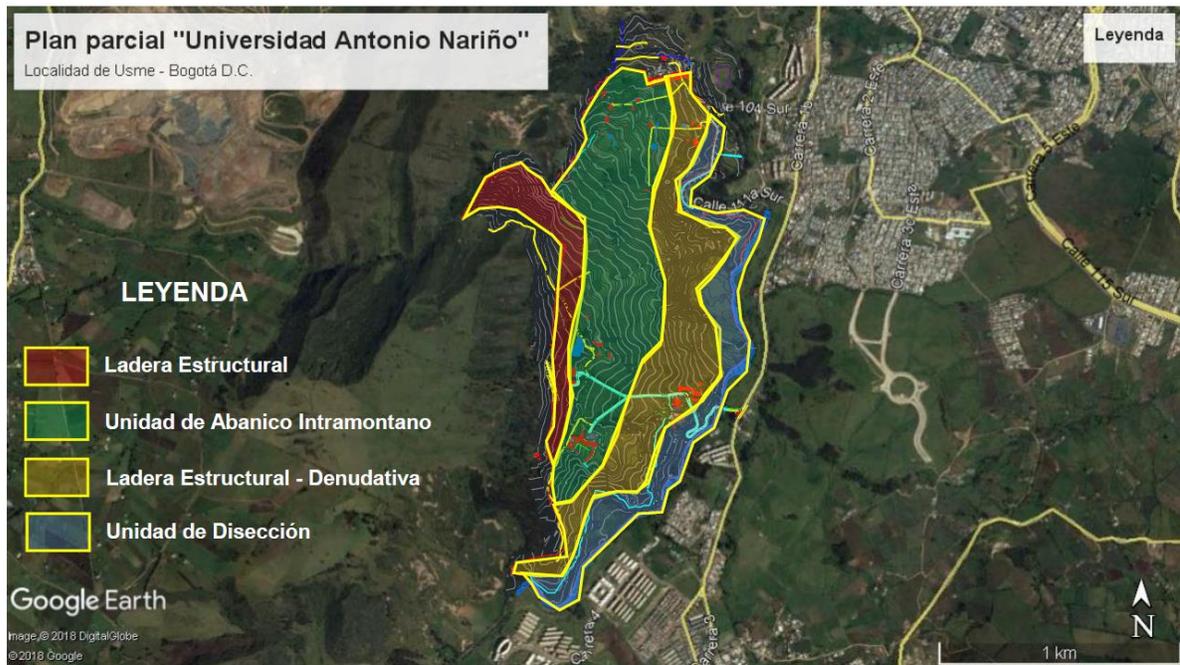


Figura 23: Geomorfología polígono 3
Fuente: (Uribe Sardiña & Torres M, 2018).

6.3 Adquisición de datos con el tomógrafo eléctrico

6.3.1 Configuración Wenner

Se realizaron cuatro (4) líneas con una separación de cinco (5) metros cada una. Y treinta y dos (32) electrodos con una separación de tres (3) metros entre los mismos.

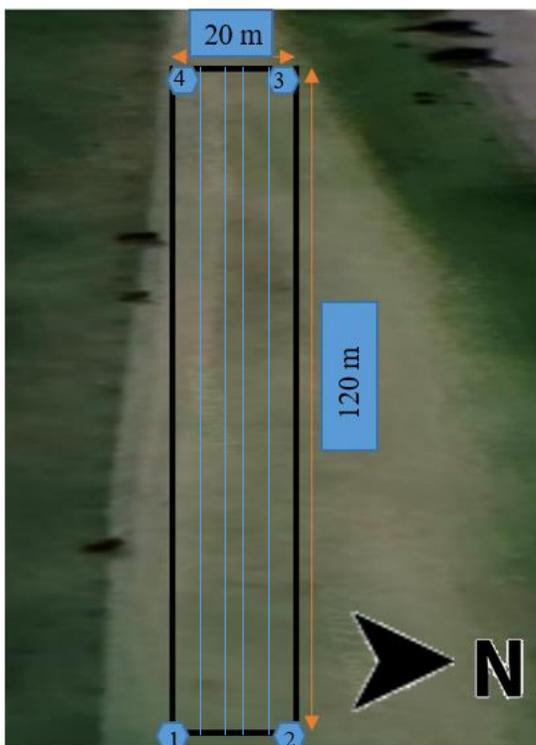


Figura 24: Configuración Wenner
Fuente: Autoría propia

En la figura 25 se especifica el procedimiento para realizar la configuración Wenner, mientras que, en la figura 26, se muestra una imagen de campo de la estudiante y compañeros del semillero realizando la instalación del tomógrafo eléctrico para la toma de datos.

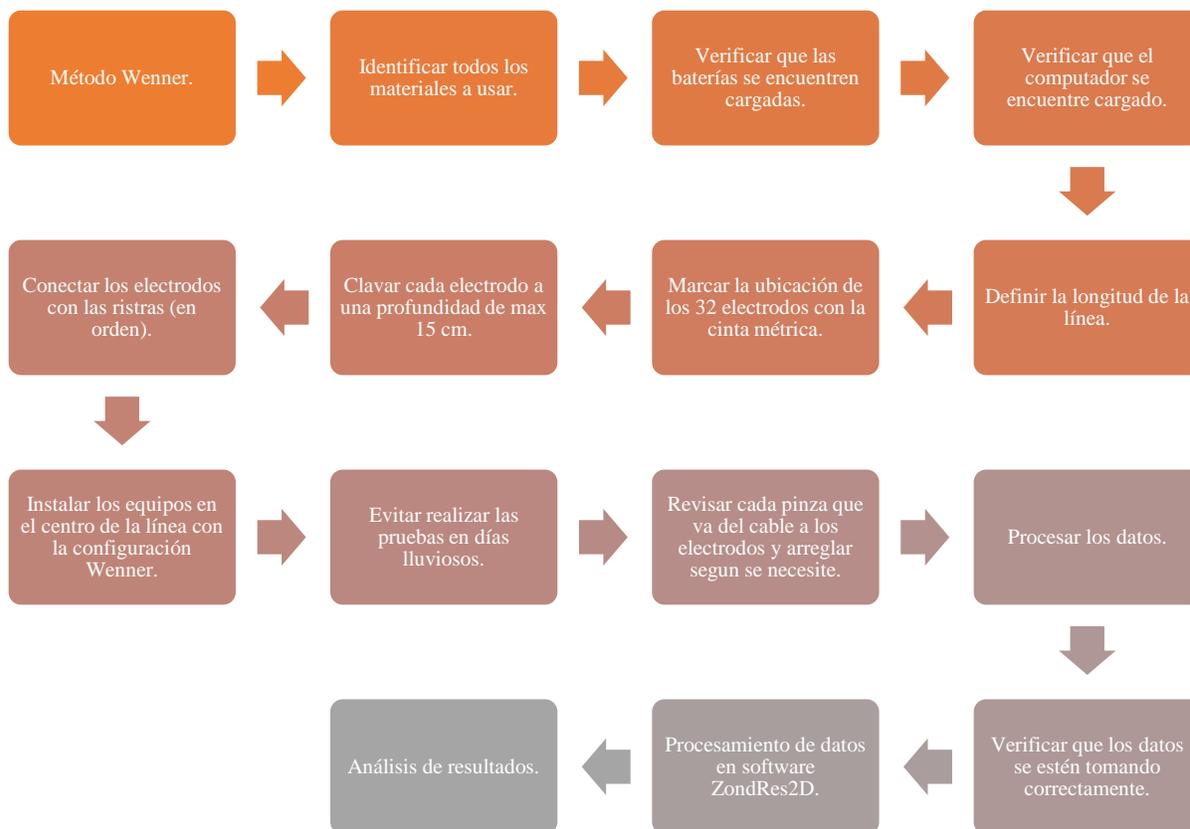


Figura 25: Procedimiento Wenner
Fuente: Autoría propia



Figura 26: Instalación método Wenner
Fuente: Autoría propia

6.3.1.1 Equipo

Se uso el equipo ASM001 “es un conmutador automático que se conecta con el equipo GeoAmp303 para realizar tomografías eléctricas 2D”(Subsuelo3d, 2017b). Con este equipo, se utilizan treinta y dos (32) electrodos para realizar líneas de máximo treientos diez (310) metros de longitud. “En conjunto con el GeoAmp303 permite obtener imágenes del subsuelo para aplicaciones como: (1) Exploración de aguas subterráneas; (2) Detección de plumas de contaminación; (3) Detección de cavernas y oquedades; (4) Estudios geotécnicos; (5) Estudios de identificación de sedimentos y rocas en el subsuelo” (Subsuelo3d, 2017b).

En la figura 27, se encuentran, las dos consolas que conforman el tomógrafo eléctrico, para la configuración Wenner. Mientras que en la figura 28 se especifican los componentes del equipo.



Figura 27: GeoAmp303 y ASM001
Fuente: (Subsuelo3d, 2017b).

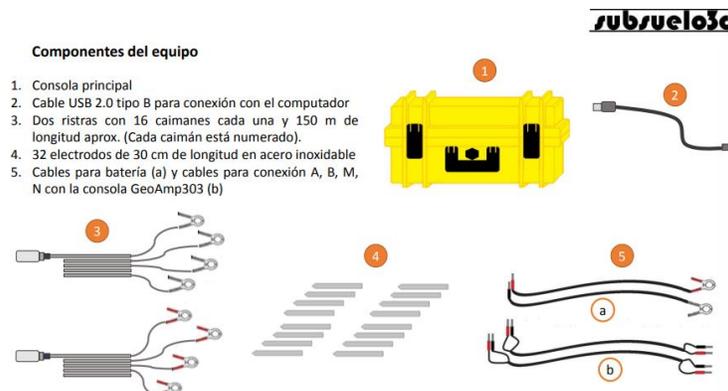


Figura 28: Componentes ASM001
Fuente: (Subsuelo3d, 2017b).

6.3.2 Configuración Schlumberger

Se realizaron separaciones entre los electrodos de un (1) metro cada uno, para proceder a tomar los datos según indicaba el equipo. Se realizó hasta que el equipo indicó una medición de ciento veinte (120) metros, elegidos por las estudiantes, puesto que el terreno solo permitía estas dimensiones.

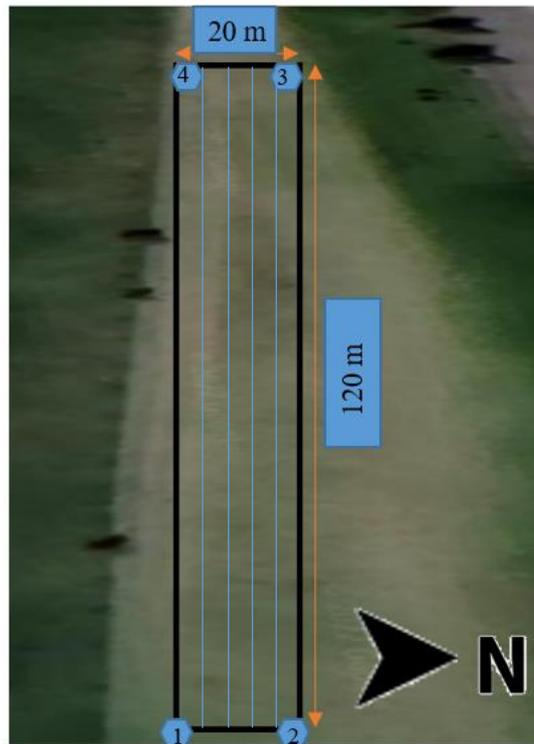


Figura 29: Configuración Schlumberger
Fuente: Autoría propia

En la figura 30 se especifica el procedimiento para realizar la configuración Wenner, mientras que, en la figura 31, se muestra una imagen de campo de la instalación del equipo, para la configuración de Schlumberger.

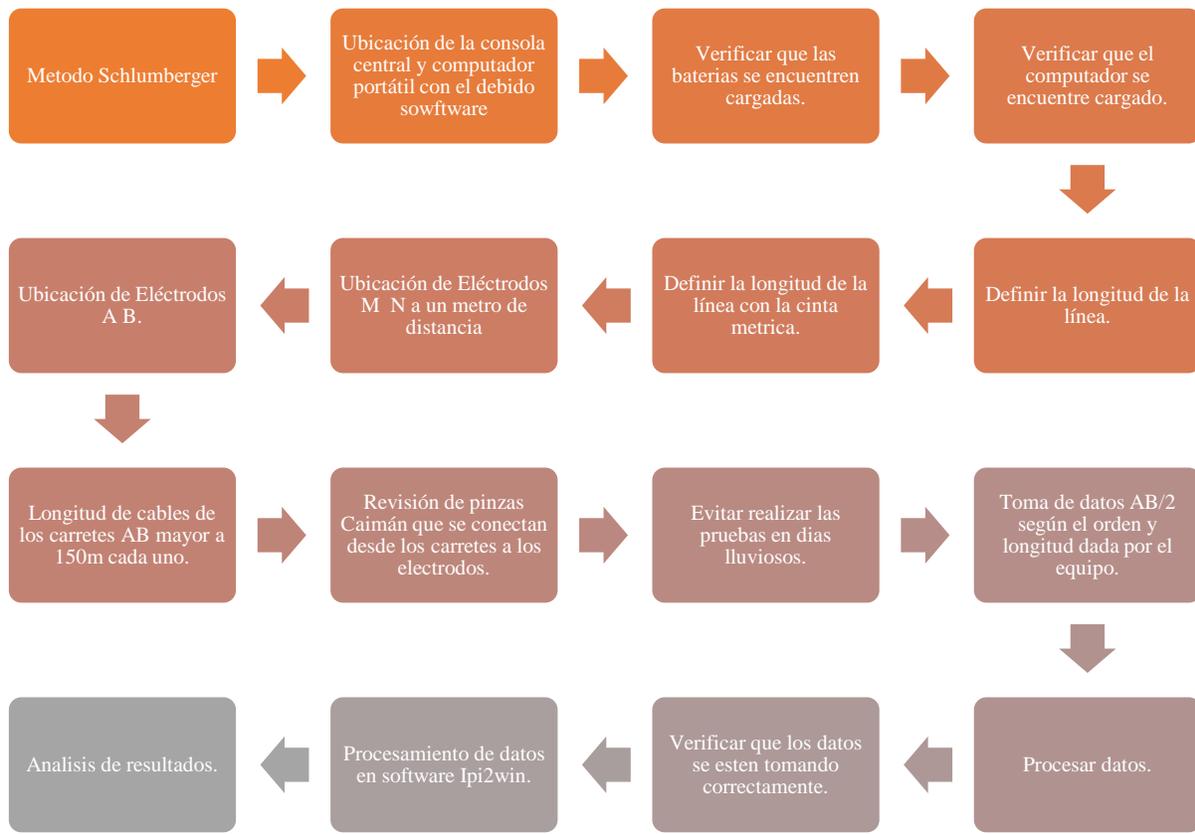


Figura 30: Procedimiento Schlumberger
Fuente: Autoría propia



Figura 31: Configuración Schlumberger
Fuente: Autoría propia

6.3.2.1 Equipo

Se uso el equipo GeoAmp303, este equipo se usa para la prospección geoelectrica, con él se pueden realizar sondeos eléctricos verticales (SEV), también se puede usar para tomografías eléctricas, pero necesita estar acompañado por el equipo Switch ASM001. “Sus principales aplicaciones son: (1) Exploración de aguas subterráneas; (2) Detección de plumas de contaminación; (3) Detección de cavernas y oquedades; (4) Estudios geotécnicos; (5) Estudios de identificación de sedimentos y rocas en el subsuelo.” (Subsuelo3d, 2017c).

En la figura 32, se encuentra, la consola que conforma el tomógrafo eléctrico, para la configuración Schlumberger. Mientras que en la figura 33 se especifican los componentes del equipo.



Figura 32: GeoAmp303
Fuente: (Subsuelo3d, 2017c).



Figura 33: Componentes GeoAmp303
Fuente: (Subsuelo3d, 2017c).

6.4 Análisis de la información del suelo en el área escogida de la sede Usme

6.4.1 Utilización del software ZondRes3D

Este software está diseñado para la interpretación bidimensional de datos de tomografía eléctrica por resistividad y método de polarización inducida en el suelo (Zond-geo, 2001).

Se evaluarán los datos obtenidos mediante el modelo de resistividades obtenido por el programa ZondRES2D, lo cual permite caracterizar a partir de los valores de resistividad encontrados en cada una de las capas su comportamiento geoelectrico, proporcionando información litoestratigrafica; esto, con el objetivo de diagnosticar las posibles concentraciones en el área de estudio. Por otro lado, se detallarán las tomografías obtenidas a partir de la inversión de las resistividades.

Los resultados de levantamientos por resistividad eléctrica pueden delimitar una frontera entre un material de baja resistividad, como un suelo fino o una roca sana, también, el investigar anomalías (Civil Docs, 2011). Por lo cual, se tomarán en cuenta tres (3) tipos de tablas para la comparación de los datos obtenidos, donde se muestran diferentes tipos de materiales con su respectiva resistividad. En la figura 34 se evidencia una imagen que contiene diferentes tipos de resistividades, para rocas y minerales, sin embargo, se usa la tabla 5 para materiales térreos (arcillas, limos, arenas, rocas), y la figura 35 para otro tipo de materiales como metales.

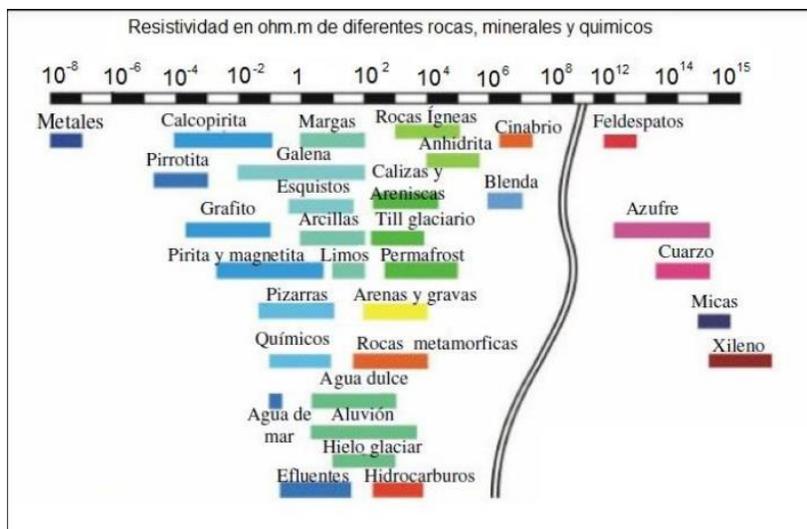


Figura 34: Resistividad rocas y minerales.
Fuente: (Subsuelo3d, 2017a)

Tabla 5: Resistividad materiales téreos.

Material	Resistividad (ohmios-cm)
Arcilla y limo saturado	0–10,000
Arcilla arenosa y arena limosa húmeda	10,000–25,000
Arena arcillosa y arena saturada	25,000–50,000
Arena	50,000–150,000
Grava	150,000–500,000
Roca meteorizada	100,000–200,000
Roca sana	150,000–4,000,000

Fuente: (Civil Docs, 2011)

Material	Resistividad eléctrica ($\rho/\Omega\cdot m$) a 20°C (293K)	Conductividad eléctrica ($\sigma.m/S$) a 20°C (293K)	Tipo de Material
Agua de mar	$2,00.10^{-1}$	5,00	Semiconductor
Germanio	$4,60.10^{-1}$	2,17	Semiconductor
Agua potable	Entre $2,00.10^1$ y $2,00.10^3$	Entre $5,00.10^{-4}$ y $5,00.10^{-2}$	Semiconductor

Figura 35: Resistividad de metales.
Fuente: (YuBrain, n.d.)

6.4.2 Utilización del software Ipi2Win

IPI2Win está diseñado para la interpretación automática o semi-automática de datos de sondeo eléctrico vertical obtenidos con varios de los arreglos utilizados con más frecuencia en la prospección eléctrica (Bobachev et al., 2000).

Se siguieron los conductos generales de interpretación para este tipo de datos, teniendo en cuenta aspectos, como el análisis cuantitativo, las magnitudes asociadas a las rocas y objetos que se encuentran o se presumen, se encuentran en el lugar, de acuerdo a la tabla 6.

Tabla 6: Tipos de resistividad

Material	Resistividad (Ωm)
Basamento. Roca sana con diaclasas espaciadas	>10000
Basamento. Roca fracturada	1500-5000
Basamento. Roca fracturada saturada con agua corriente	100-2000
Basamento. Roca fracturada saturada con agua salada	1-100
Gruss no saturado	500-1000
Gruss saturado	40-60
Saprolito no saturado	200-500
Saprolito saturado	40-100
Gravas no saturadas	500-2000
Gravas saturadas	300-500
Arenas no saturadas	400-700
Arenas saturadas	100-200
Limos no saturados	100-200
Limos saturados	20-100
Limos saturados con agua salada	5-15
Arcillas no saturadas	20-40
Arcillas saturadas	5-20
Arcillas saturadas con agua salada	1-10
Andosoles secos	1000-2000
Andosoles no saturados	300-1000
Andosoles saturados	100-300

Fuente: (Arias et al., 2012)

7 Resultados

De acuerdo con la bibliografía consultada, se realizó una superposición de mapas en el software Google Earth Pro y se obtuvieron las siguientes imágenes correspondientes a geología y geomorfología. La zona de estudio se encuentra dentro del ovalo negro, dentro de las franjas amarillas, que delimitan la formación Usme y la ladera estructural-denudativa:



Figura 36: Superposición geología: mapa vs imagen satelital (Google Earth)
Fuente: Autoría propia

En la figura 36, se encuentra, que la zona de estudio se encuentra en la formación Usme (Tmu), presentando suelos arcillosos residuales tipo Tmu-Sr “suelos residuales de la Formación Usme: arcillas grises de consistencia media a blanda” (Uribe Sardiña & Torres M, 2018). “Regularmente esta formación presenta un horizonte de meteorización, dando como resultado la generación de suelos arcillosos y limosos de consistencia dura, con esporádicas intercalaciones de lentes de arena; en las áreas expuestas al ambiente estos materiales son susceptibles a la generación de surcos y cárcavas” (como fuentes de materiales de construcción)” (ESCALA, 2018).

La geomorfología, como se puede evidenciar en la figura 37, presenta un suelo de ladera Estructural-Denudativa (Ued) esto quiere decir, “Se presenta en un sector de vertiente media, caracterizada por la presencia de materiales blandos en superficie y controlados por planos estructurales con pendientes medias de 20 a 30°”(Uribe Sardiña & Torres M, 2018).



Figura 37: Superposición Geomorfología
Fuente: Autoría propia

7.1 Método Wenner

El procesamiento de los datos con la configuración Wenner fueron procesados en el software ZondRes2D, en el cual se generó cuatro (4) imágenes de mapas de resistividad en 2D pertenecientes a cada línea analizada, y un (1) 3D que integra todas las anteriores para mostrar los estratos del subsuelo.

Para el análisis de los datos, se tiene que “los valores altos (rojos) son positivos siendo estos malos conductores y los valores bajos (azules) son negativos siendo estos buenos conductores de electricidad” (Pacheco, 2022).

La profundidad máxima mapeada se determina al multiplicar la máxima longitud del arreglo “L”, por el factor apropiado de nivel de profundidad, el valor para el factor apropiado, se encuentra en la tabla 7.

Tabla 7: Probabilidad media de investigación (Z_e/a y Z_e/L).

Tipo de Modalidad	z_e/a	z_e/L	Factor Geométrico
Wenner	0.519	0.173	6.2832

Fuente: (Díaz, 2010)

En este caso:

$$L = 120 \text{ metros} \quad Z_e/L = 0.173$$

Por ende, la profundidad máxima mapeada para este caso esta alrededor de: 16.6 metros.

Cabe recordar, que los estudios realizados por Alfonso Uribe S. y Cía. S.A., (Uribe Sardiña & Torres M, 2018), para el Plan Parcial Universidad Antonio Nariño que se desarrolla en la localidad de Usme, fueron 25 perforaciones que alcanzaron profundidades comprendidas entre 6 y 15 m bajo la superficie.

7.1.1 TOMO_Línea1

En la figura 38, perteneciente a la línea 1, se divide en 3 capas. En su parte superior (mayormente al lado izquierdo) y parte central, se encuentran, anomalías negativas de gran tamaño perteneciente a los valores entre $0.037 \Omega\text{m}$ y $0.068 \Omega\text{m}$. Rodeando las anomalías se encuentra otra capa de valores entre $0.23 \Omega\text{m}$ y $0.78 \Omega\text{m}$. Por último, en la parte inferior derecha se encuentran valores de entre $1.44 \Omega\text{m}$ y $9 \Omega\text{m}$. Todo a una profundidad Z_m de aproximadamente 15m.

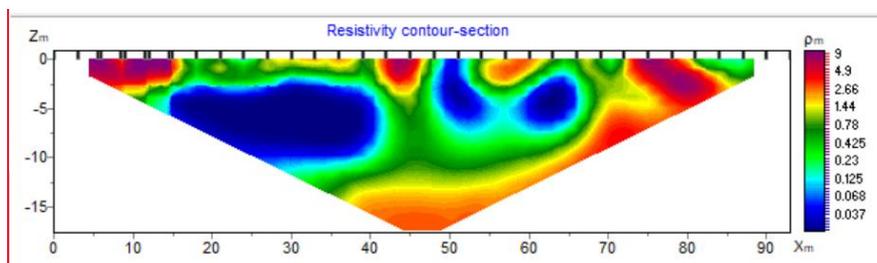


Figura 38: TOMO_Línea 1
Fuente: Autoría propia

7.1.2 TOMO_Línea2

En la figura 39, perteneciente a la línea 2, se divide en 3 capas. En su parte superior y mayormente en los laterales, anomalías negativas pertenecientes a los valores entre $0.0176 \Omega\text{m}$ y $0.055 \Omega\text{m}$, siendo rodeada por otra capa de valores entre $0.17 \Omega\text{m}$ y $0.53 \Omega\text{m}$. Por último, en la parte inferior, hay una capa que tiene los valores de $1.63 \Omega\text{m}$ y $9 \Omega\text{m}$. Todo a una profundidad Z_m de aproximadamente 16m.

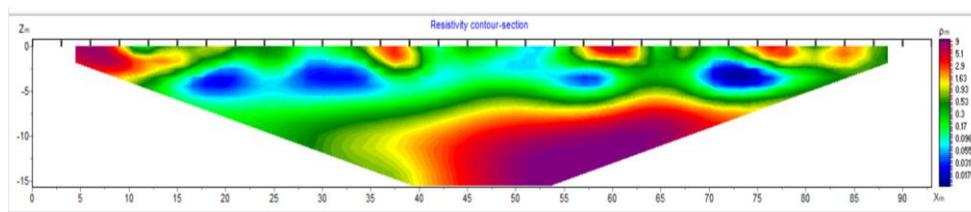


Figura 39: TOMO_Línea 2
Fuente: Autoría propia

7.1.3 TOMO_Línea3

En la figura 40, perteneciente a la línea 3, se divide en 3 capas. En su parte superior, se encuentran distribuidas, anomalías negativas perteneciente a los valores entre $0.0173 \Omega\text{m}$ y $0.052 \Omega\text{m}$. Rodeando las anomalías se encuentra otra capa de valores entre $0.09 \Omega\text{m}$ y $0.8 \Omega\text{m}$. Por último, una capa distribuida completamente en la parte inferior se encuentran valores de entre $1.4 \Omega\text{m}$ y $7.3 \Omega\text{m}$. Todo a una profundidad Z_m de aproximadamente 16m.

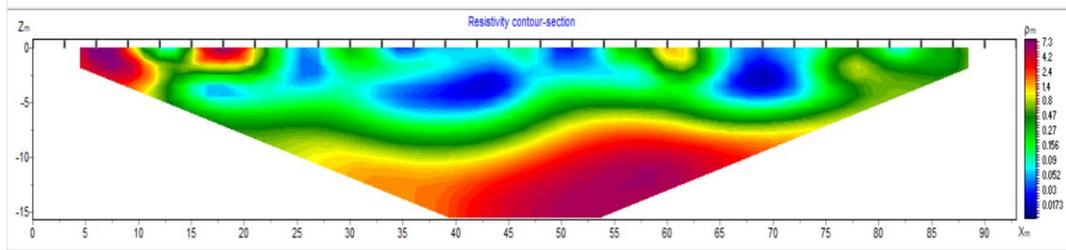


Figura 40: TOMO_Línea 3
Fuente: Autoría propia

7.1.4 TOMO_Línea4

En la figura 41, perteneciente a la línea 4, se divide en 3 capas. En su parte superior, se encuentran distribuidas, anomalías negativas perteneciente a los valores entre $0.0176 \Omega\text{m}$ y $0.055 \Omega\text{m}$ en menor medida que en los anteriores mapeos. Rodeando las anomalías se encuentra otra capa de valores entre $0.17 \Omega\text{m}$ y $0.93 \Omega\text{m}$. Por último, una capa distribuida completamente y en mayor media que en los anteriores mapeos, en la parte inferior se encuentran valores de entre $2.9 \Omega\text{m}$ y $9 \Omega\text{m}$. Todo a una profundidad Z_m de aproximadamente 16m.

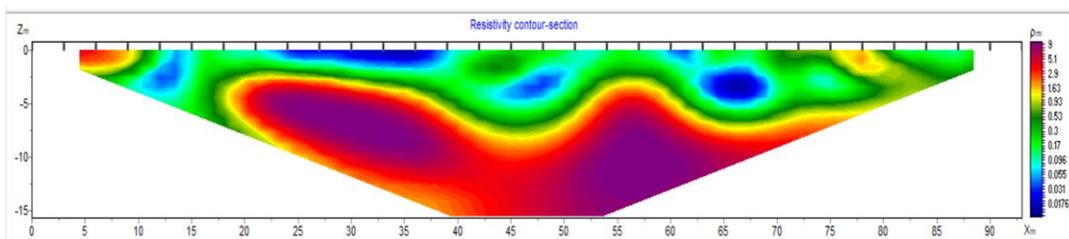


Figura 41: TOMO_Línea 4
Fuente: Autoría propia

7.1.5 3D del terreno

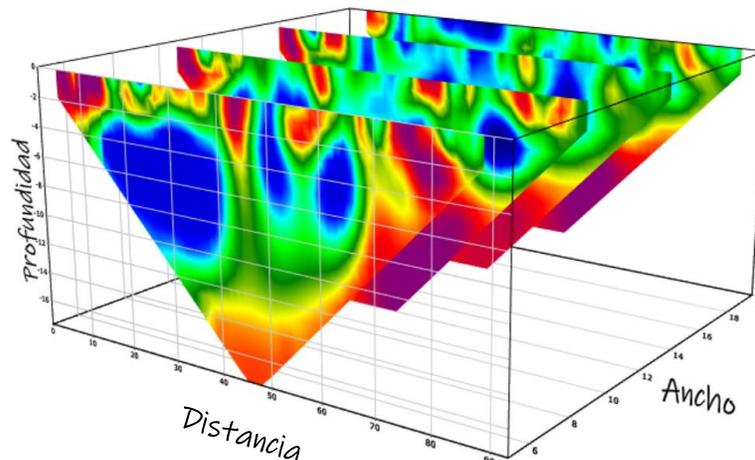


Figura 42: Imagen 3D del terreno
Fuente: Autoría propia

Como se evidencia en la figura 42, las cuatro (4) líneas comparten la característica de presentar en su parte superior anomalías de tonalidades azules, es decir, valores bajos, que corresponden a anomalías negativas, estando estos en los rangos de $0.0173 \Omega\text{m}$ y $0.068 \Omega\text{m}$ por lo cual, los materiales que se encuentran en esta zona son buenos conductores. En la figura 34, se evidencia que a valores bajos menores a 1, pasan a ser otro tipo de materiales como los metales. En la tabla 5, se puede analizar más detalladamente que en su mayoría el terreno presenta un comportamiento arcilloso y limoso saturado, muy probablemente, con presencia de algunos metales y minerales como lo sugiere la figura 35.

7.2 Método Schlumberger

Tomando la relación $AB/3$, en cada uno de los cuatro Sondeos Eléctricos Verticales (S.E.V) se llegó a un límite de 40 m como se muestra en la tabla x, este valor representa el máximo alcance de profundidad estudiado.

Tabla 8: Características S.E.V

S.E.V	Longitud total	AB/2	Profundidad estudiada (AB/3)
S.E.V.1 S.E.V.2 S.E.V.3 S.E.V.4	120 m	60 m	40 m

Fuente: Autoría propia

A partir de los datos obtenidos en cada uno de los cuatro S.E.V, se realiza un análisis para cada corte geológico según su resistividad eléctrica

7.2.1 S.E.V.1

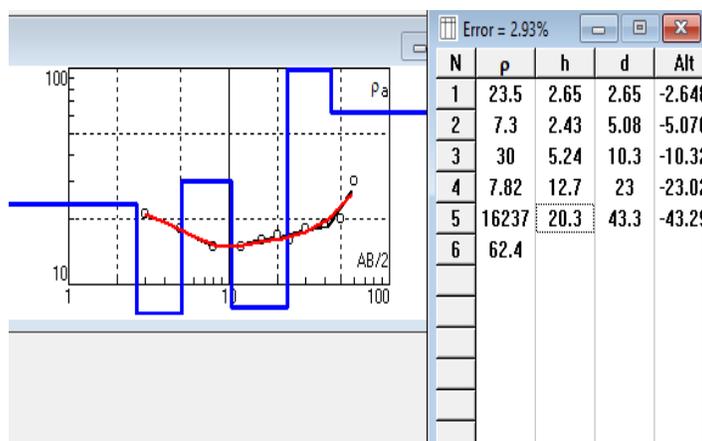


Figura 43: S.E.V.1
Fuente: Autoría Propia

Tabla 9: Análisis S.E.V.1

Profundidad (m)	Resistividad (Ωm)	Material
0 - 2.65	23.5	Arcillas no saturadas
2.65 – 5.08	7.3	Arcillas saturadas

5.08 – 10.3	30	Arcillas no saturadas
10.3 - 23	7.82	Arcillas saturadas
23 - 43.3	16237	Roca sana con diaclasas espaciadas

Fuente: Autoría propia

En la figura 43 se observan cinco capas que conforman el subsuelo con su debido espesor, el rango de resistividad se encuentra de 7.3 a 16237 Ωm y la profundidad máxima estudiada es de 43.3 m, la adecuada teniendo en cuenta la información de la tabla 8.

7.2.2 S.E.V.2

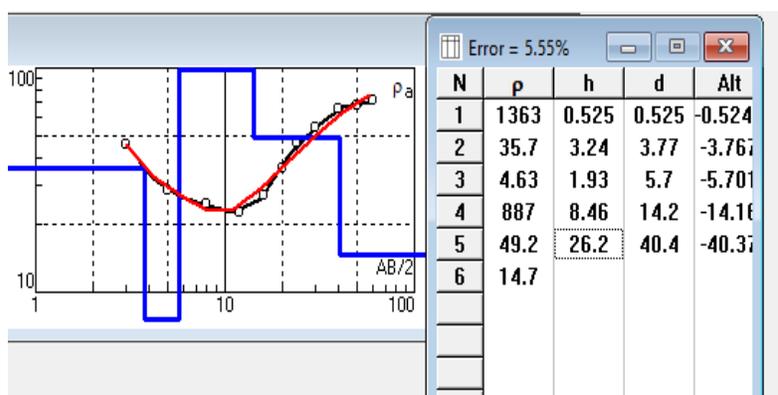


Figura 44: S.E.V.2
Fuente: Autoría propia

Tabla 10: Análisis S.E.V.2

Profundidad (m)	Resistividad (Ωm)	Material
0 - 0.525	1363	Gravas no saturadas
0.525 - 3.77	35.7	Arcillas no saturadas
3.77 – 5.7	5	Arcillas saturadas

5.7 – 14.2	887	Grass no saturado
14.2 - 40.4	49.2	Limos saturados

Fuente: Autoría propia

En la figura 44 se observan cinco capas que conforman el subsuelo con su debido espesor, el rango de resistividad se encuentra de 5 a 1363 Ωm y la profundidad máxima estudiada es de 40.4 m, la adecuada teniendo en cuenta la información de la tabla 8.

7.2.3 S.E.V.3

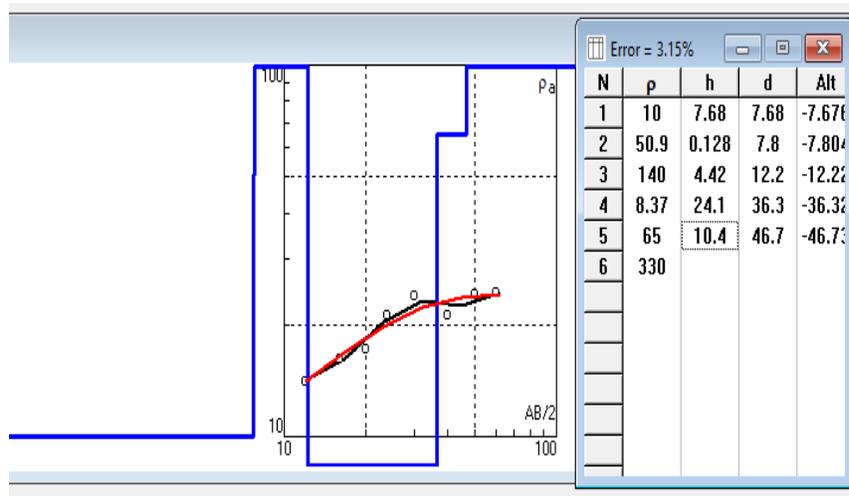


Figura 45: S.E.V.3
Fuente: Autoría propia

Tabla 11: Análisis S.E.V.3

Profundidad (m)	Resistividad (Ωm)	Material
0 - 7.68	10	Arcillas saturadas
7.68 - 7.8	50.9	Limos saturados
7.8 - 12.2	140	Limos no saturados

12.2 - 36.3	8.37	Arcillas saturadas
36.3 - 46.7	65	Limos saturados

Fuente: Autoría Propia

En la figura 45 se observan cinco capas que conforman el subsuelo con su debido espesor, el rango de resistividad se encuentra de 8.37 a 140 Ωm y la profundidad máxima estudiada es de 46.7 m, la adecuada teniendo en cuenta la información de la tabla 8.

7.2.4 S.E.V.4

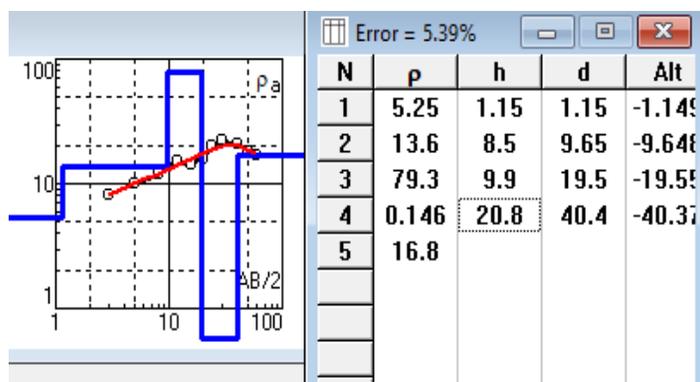


Figura 46: S.E.V 4
Fuente: Autoría propia

Tabla 12: Análisis S.E.V.4

Profundidad (m)	Resistividad (Ωm)	Material
0 - 9.65	5.25 – 13.6	Arcillas saturadas
9.65 – 19.5	79.3	Limos saturados
19.5 – 40.4	0.146	?

Fuente: Autoría propia

En la figura 46 se observan tres capas que conforman el subsuelo con su debido espesor, el rango de resistividad se encuentra de 8.37 a 140 Ωm y la profundidad máxima estudiada es de 40.4 m,

la adecuada teniendo en cuenta la información de la tabla 8, en la capa número 3 se identifica una resistividad muy baja, por lo cual se necesita de análisis cuantitativos y cualitativos mas detallados.

7.2.5 Corte geoelectrico

Se realizó una correlación entre los cuatro SEV, analizando en cada capa, su composición, su espesor y su resistividad, creando así un perfil geológico donde se puede observar la relación entre cada capa del terreno (Figura 47)

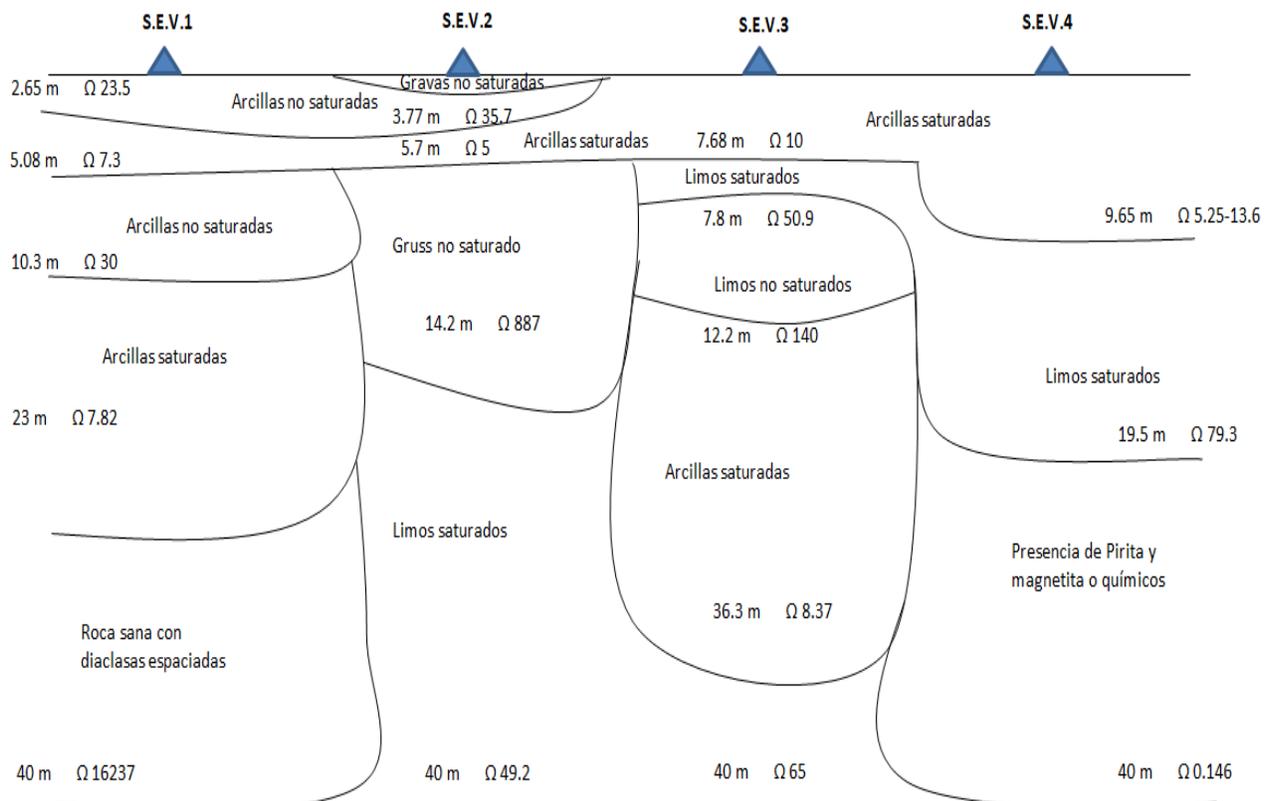


Figura 47. Correlación total S.E.V

Fuente: Autoría propia

8 Discusión

El estudio de resistividades por métodos Wenner y Schlumberger se realizaron en el parqueadero de la Universidad Antonio Nariño, el cual ha estado expuesto alrededor de 7 años a compactación por el estacionamiento de vehículos, su uso está dispuesto de lunes a viernes en horarios escolares, el terreno no presenta pendientes pronunciadas por lo cual la escorrentía superficial no es un factor determinante a la hora de analizar la presencia de agua subterránea.

La toma de datos se realizó en los meses de marzo y abril, meses declarados por el IDEAM como la primera temporada de lluvias (IDEAM, 2021), lo cual se cumplió en los días que se hizo la adquisición de los datos, por esta razón a pesar de ser un terreno compactado (poco permeable), se obtienen capas de arcillas y limos saturados, tanto en las primeras capas como en las últimas.

Por las características anteriormente mencionadas de la zona de estudio, se puede inferir que las anomalías negativas que se generaron en los mapas de resistividad, se refieren, a alteraciones del terreno por el factor de la compactación (compactación no homogénea), puesto que, la resistividad en el terreno disminuye al aumentar la compactación del mismo (Gómez Gerardino, 2016), por esta razón hasta los 10 m de profundidad se encuentra mayoritariamente la presencia de arcillas (figura 47), la resistividad de la tercera capa de SEV3, al realizar interpretaciones cuantitativas por medio de tablas de resistividad de los materiales y aunque la figura 35 manifiesta que podría ser agua salada (agua de mar), en el contexto de la geología, por las características del terreno y su ubicación, consideramos que no es viable esa posibilidad, por ende, se deduce que la resistividad tan baja, puede estar ocasionada por procesos de compactación en el terreno o también se podría indicar la presencia de agua contaminada.

9 Conclusiones

- De la información obtenida en SEV se concluye que hay presencia de agua subterránea en las capas 2 y 4 del SEV.1, en las capas 3,4 y 5 del SEV.2, en las capas 1, 2, 4 y 5 del SEV.3 y en las capas 1 y 2 del SEV.4.
- La composición de los primeros 9 m de suelo son mayormente arcillas saturadas, seguidas de arcillas no saturadas y gravas no saturadas, la composición hasta los 40 m de profundidad varía entre rocas fracturada, limos saturados y no saturados.
- Debido a que, en el método de Wenner la separación entre electrodos es de tres (3) metros, lo que se logra ver en el estudio, es mayor la resolución del terreno pero menor la información del mismo.
- Se encuentran anomalías negativas sobre todo en la parte superior, por lo cual, se infiere que esto es debido a la compactación del terreno por el movimiento de vehículos que se genera desde hace 7 años en esta zona de la universidad.
- Al realizar dos estudios con diferentes arreglos geométricos, como lo fueron la tomografía eléctrica por el método Wenner y el sondeo eléctrico vertical con el método Schlumberger, se obtiene una mejor caracterización de esta zona y se puede generar mayor información de la misma.

10 Recomendaciones

- Realizar estudios comparativos de cómo la compactación y otras variables pueden modificar los estratos del suelo en otros terrenos de la universidad, y cómo esto modifica las fuentes de agua subterránea que allí se encuentran.
- Realizar más investigaciones con el tomógrafo eléctrico, puesto que la sede Usme de la Universidad Antonio Nariño es muy extensa, por lo cual en este trabajo solo se logró analizar una muy pequeña parte de todo el campus universitario.
- Cuando se utiliza el software ZondRes2D es aconsejable corroborar los datos obtenidos con otro tipo de estudios o software, como se realizó en este trabajo, al usar el arreglo geométrico de Schlumberger y el software Ipi2win, ya que, esto nos permite una mejor caracterización del suelo al realizar cortes geoelectricos.
- Se recomienda realizar mantenimiento a las dos consolas GeoAmp303 y ASM001, como lo indican (Subsuelo3d, 2017c) y (Subsuelo3d, 2017b) en sus apartados de mantenimiento interno y externo. También la calibración de los equipos y el cargador de baterías para campo.
- Establecer mayor accesibilidad a los equipos tecnológicos de laboratorio en la Universidad Antonio Nariño sede Usme, específicamente del tomógrafo eléctrico, dado al gran potencial de estudio que hay en esta sede y a los futuros trabajos de grado que se realizarán.

11 Referencias

- Alvarez Manilla, A. (2003). Geofísica aplicada en los proyectos básicos de ingeniería civil. *Publicacion Tecnica Instituto Mexicano Del Transporte*, 229, 83.
- Arias, D. E., Echeverri Ramírez, O., & Hoyos Patiño, F. (2012). *RELACIONES GEOELECTRICAS EN LA EXPLORACION GEOTECNICA*. http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0120-36302012000100003
- Bobachev, I., A. A., Modin, N., & Shevnin, V. A. (2000). *IPI2Win Guía de Usuario*.
- Brunet, P., Clément, R., & Bouvier, C. (2010). Monitoring soil water content and deficit using Electrical Resistivity Tomography (ERT) - A case study in the Cevennes area, France. *Journal of Hydrology*, 380(1–2), 146–153. <https://doi.org/10.1016/J.JHYDROL.2009.10.032>
- Calamita, G., Brocca, L., Perrone, A., Piscitelli, S., Lapenna, V., Melone, F., & Moramarco, T. (2012). Electrical resistivity and TDR methods for soil moisture estimation in central Italy test-sites. *Journal of Hydrology*, 454–455, 101–112. <https://doi.org/10.1016/J.JHYDROL.2012.06.001>
- Cartomex. (2015). *Tomografía eléctrica resistiva | Prospección Eléctrica | ERT*. <https://www.cartomex.com/tomografia-electrica-resistiva.html>
- Civil Docs. (2011). *Exploración Geoeléctrica - Suelos.: Civil Docs*. <https://civildocs.blogspot.com/2011/05/exploracion-goelectrica-suelos.html>
- Coronado Perna, G., & Neita Arévalo, J. A. (2018). *Acumulación de agua subterránea en acuíferos de la provincia hidrogeológica cordillera oriental mediante uso de sensores remotos, sondeo eléctrico vertical y software newlocclim*. Universidad Antonio Nariño.
- Das, B. M. (2013). *Fundamentals of Geotechnical Engineering* (Cengage Learning Editores S.A., Ed.; 4th ed., Issue 1).
- Decreto 190. (2004). *Decreto 190 de 2004 Alcaldía Mayor de Bogotá, D.C.* <https://www.alcaldiabogota.gov.co/sisjur/normas/Norma1.jsp?i=13935>
- Decreto 252. (2007). *Decreto 252 de 2007 Alcaldía Mayor de Bogotá, D.C.* <https://www.alcaldiabogota.gov.co/sisjur/normas/Norma1.jsp?i=25478>
- Díaz, E. P. (2010). “IMPLEMENTACIÓN DEL CÓDIGO ZONDRES2D PARA LA MODELACIÓN DIRECTA E INVERSA DE DATOS DE TOMOGRAFÍA DE RESISTIVIDAD ELÉCTRICA 2D” [UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO]. <https://docplayer.es/77372684-Universidad-nacional-autonoma-de-mexico.html>
- Durrheim, R. J., Manzi, M. S. D., & Webb, S. J. (2021). Exploration Geophysics. *Encyclopedia of Geology*, 219–234. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-409548-9.12536-9>
- ESCALA. (2018). *PP UAN_ESTUDIO GEOMORFOLOGICO*.

- FAO. (2018a). 1. GENERALIDADES. https://www.fao.org/fishery/docs/CDrom/FAO_Training/FAO_Training/General/x6706s/x6706s01.htm
- FAO. (2018b). 9. PERMEABILIDAD DEL SUELO. https://www.fao.org/fishery/static/FAO_Training/FAO_Training/General/x6706s/x6706s09.htm
- Fundacion Aquae. (2018). *Cuánta agua potable hay en la Tierra | Fundación Aquae*. <https://www.fundacionaquae.org/wiki-aquae/cantidad-de-agua-potable-fuente-de-vida/>
- Giménez Tortosa, Josep., & Gasulla Forner, Manuel. (1999). *Obtención de imágenes de la distribución de resistividad eléctrica del subsuelo mediante métodos interactivos*.
- Gómez Gerardino, A. A. (2016, June 23). *La tierra y la resistividad by Alfredo Alejandro Gómez Gerardino* - *Issuu*. https://issuu.com/alfredoalejandrogomezgerardino/docs/la_tierra_y_la_resistividad
- IDEAM. (2021). *CLIMATOLÓGICO MENSUAL*. http://www.ideam.gov.co/web/tiempo-y-clima/climatologico-mensual/-/document_library_display/xYvIPc4uxk1Y/view/113579674
- Li, X., Jin, X., Wang, X., Jin, H., Tang, L., Li, X., He, R., Li, Y., Huang, C., & Zhang, S. (2021). Investigation of permafrost engineering geological environment with electrical resistivity tomography: A case study along the China-Russia crude oil pipelines. *Engineering Geology*, 291, 106237. <https://doi.org/10.1016/J.ENGCEO.2021.106237>
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, & Instituto de Hidrología, M. y de E. A. (Ideam) S. de Hidrología. (2015). *PRINCIPIOS BÁSICOS PARA EL CONOCIMIENTO Y MONITOREO DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS EN COLOMBIA*. <http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/023541/Principios.pdf>
- Modella Basurco, D. A. (2019). *UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN AGUSTÍN DE AREQUIPA FACULTAD DE GEOLOGÍA, GEOFÍSICA Y MINAS ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA GEOFÍSICA*.
- Molina. (2006). *Comparación de los Métodos 1-D Y 2-D de resistividad electrica por medio de sondeos tipo Wenner, Dipolo-Dipolo y Wenner-Schlumberger con la utilización de los programas DCINV, RES2DMOD y RES2DINV*.
- Montoya Colonna, V. V. (2019). *Caracterización del suelo e identificación de discontinuidades estructurales de deslizamientos mediante tomografía eléctrica 2D. El alto, Pampas de Majes, Arequipa, Perú*.
- Ospina Benítez, D., & Vanegas Cubillos, S. (2020). *Caracterización geoelectrica del acuífero libre del suroccidente del Valle de Aburrá, a partir de tomografías eléctricas calibradas con un modelo geológico inicial y de física de rocas*. <https://repository.eafit.edu.co/handle/10784/24948>
- Pacheco, E. (2022). *Estudios Geofísicos Método de Resistividad Eléctrica - YouTube*. <https://www.youtube.com/watch?v=OQ-LqPAy4y0>

- Parra, N. B., & Torres, J. J. (2020). *Importancia de la tomografía de resistividad eléctrica en la ingeniería civil*.
<http://repositorio.uan.edu.co/bitstream/123456789/2285/2/2020NicolasBarbosaParra.pdf>
- Revil, A., Schmutz, M., Abdulsamad, F., Balde, A., Beck, C., Ghorbani, A., & Hubbard, S. S. (2021). Field-scale estimation of soil properties from spectral induced polarization tomography. *Geoderma*, 403, 115380. <https://doi.org/10.1016/J.GEODERMA.2021.115380>
- Rodrigo Molina, G. A., Rinaldi, V. A., & Taborda, R. (2004). *TOMOGRAFÍA GEOELÉCTRICA: DESARROLLO Y POTENCIALES APLICACIONES EN GEOTECNIA*.
<https://doi.org/10.13140/2.1.3553.4089>
- Rodriguez Padilla, C. (2021). *Caracterización del suelo adyacente a fallas superficiales en Aguascalientes y evaluación de su capacidad de infiltración*. Aguascalientes.
- Rodríguez, V. (2017a). *Cuencas hidrográficas y acuíferos*.
- Rodríguez, V. (2017b). *Hidrología en la ingeniería*.
- Secretaría Distrital de Planeación. (2015). *Secretaría Distrital de Planeación - Alcaldía Mayor de Bogotá*.
<http://www.sdp.gov.co/portal/page/portal/PortalSDP/OrdenamientoTerritorial/OperacionesEstrategicas/Operaciones%20Estrategicas>
- Secretaria distrital de planeación. (2020). *PLAN PARCIAL ANTONIO NARIÑO*.
- Secretaría Distrital de Planeación. (2021a). *Documentos | Secretaría Distrital de Planeación*.
<https://www.sdp.gov.co/micrositios/pot/documentos>
- Secretaría Distrital de Planeación. (2021b). *Normatividad | Secretaría Distrital de Planeación*.
<https://www.sdp.gov.co/gestion-territorial/planes-parciales-de-desarrollo/normatividad>
- Solana Capilla, M. (2014). *Comparación de técnicas geofísicas para determinación de contaminación de suelos agrícolas - Archivo Digital UPM [E.T.S.I. de Minas y Energía (UPM)]*. <https://oa.upm.es/32832/>
- Subsuelo3d. (2017a). “*ESTUDIO DE GEOELÉCTRICA PARA PROSPECCIÓN Y EXPLORACIÓN DE AGUA SUBTERRÁNEA EN LA CABECERA MUNICIPAL DE JERUSALÉN – DEPARTAMENTO DE CUNDINAMARCA*”.
<https://sie.car.gov.co/bitstream/handle/20.500.11786/33646/Estudio%20de%20geoel%C3%A9ctrica.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Subsuelo3d. (2017b). *¿Qué es el equipo ASM001?*
- Subsuelo3d. (2017c). *¿Qué es el GeoAmp303?*
- Subsuelo3D S.A.S. (2019). *Geofísica Ambiental en Latino América*.
<https://www.subsuelo3d.com/>
- Sudha, K., Israil, M., Mittal, S., & Rai, J. (2009). Soil characterization using electrical resistivity tomography and geotechnical investigations. *Journal of Applied Geophysics*, 67(1), 74–79.
<https://doi.org/10.1016/J.JAPPGEO.2008.09.012>

- Sultan, S. A., Monteiro Santos, F. A., Abd Alla, M. A., & Mekhemer, H. M. (2010). Application of the resistivity/gravity joint inversion technique for Nubian sandstone aquifer assessment on the area located at the central part of Sinai, Egypt. *Journal of Geophysics and Engineering*, 7(1), 1–15. <https://doi.org/10.1088/1742-2132/7/1/001>
- UNESCO. (2008). *El Agua: una responsabilidad compartida, 2. informe de las Naciones Unidas sobre el desarrollo de los recursos hídricos en el mundo - UNESCO Biblioteca Digital*. https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000143120_spa
- Uribe Sardiña, A., & Torres M, L. N. (2018). *PP UAN_PP UAN_ESTUDIO TECNICO PLAN PARCIAL UNIVERSIDAD ANTONIO NARIÑO LOCALIDAD DE USME*.
- US EPA. (2016). *Resistivity Methods | Environmental Geophysics*. https://archive.epa.gov/esd/archive-geophysics/web/html/resistivity_methods.html
- Vega Cárdenas, A. V., & Quiroga Belalcáz, J. S. (2019). *Caracterización hidrogeológica del riachuelo de la quebrada Fucha*. Universidad Antonio Nariño.
- 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>
- Wagner, F. M., & Uhlemann, S. (2021). An overview of multimethod imaging approaches in environmental geophysics. *Advances in Geophysics*, 62, 1–72. <https://doi.org/10.1016/BS.AGPH.2021.06.001>
- Xu, D., Sun, R., Yeh, T. C. J., Wang, Y. L., Momayez, M., Hao, Y., Lee, C. H., & Hu, X. (2019). Mapping soil layers using electrical resistivity tomography and validation: Sandbox experiments. *Journal of Hydrology*, 575, 523–536. <https://doi.org/10.1016/J.JHYDROL.2019.05.036>
- YuBrain. (n.d.). *Tabla de resistividad y conductividad eléctrica - YuBrain*. Retrieved May 8, 2022, from <https://www.yubrain.com/ciencia/fisica/tabla-resistividad-conductividad-electrica/>
- Zond-geo. (2001). *ZondRes2D - software for 2D resistivity and IP imaging*. <https://web.archive.org/web/20201124093353/http://zond-geo.com/english/zond-software/ert-and-ves/zondres2d/>

12 Anexos

Marco legal

De acuerdo con el artículo 26 del Decreto Distrital 190 de 2004 “Por medio del cual se compilan las disposiciones contenidas en los Decretos Distritales 619 de 2000 y 469 de 2003” (Decreto 190 de 2004 Alcaldía Mayor de Bogotá, D.C.) en donde se menciona la operación estratégica Nuevo Usme nombra a “ La Operación Estratégica Nuevo Usme - Eje de integración Llanos y el Plan de Ordenamiento Zonal de Usme”, un instrumento que vincula las diferentes actuaciones, acciones urbanísticas e instrumentos de gestión urbana e intervenciones económicas y sociales en el ámbito de suelo urbano y de expansión que se encuentra en torno al eje de integración (Avenida el Llano) con los llanos orientales y el área de expansión de Usme y se adopta mediante el Decreto Distrital 252 del 21 de junio de 2007 “Por medio del cual se adopta la Operación Estratégica Nuevo Usme - Eje de integración Llanos y el Plan de Ordenamiento Zonal de Usme” (Decreto 252 de 2007 Alcaldía Mayor de Bogotá, D.C.). Los principales objetivos de este proyecto, son la integración del suelo rural con el suelo urbano, la conformación de viviendas y servicios urbanos y el acoplamiento de las zonas rurales con los suelos en expansión

Sin embargo, el Decreto Distrital 675 de 2018 “Por medio del cual se modifica el Decreto Distrital 252 de 2007: Por medio del cual se adopta la Operación Estratégica Nuevo Usme - Eje de integración Llanos y el Plan de Ordenamiento Zonal de Usme” (Decreto 675 de 2018 Alcaldía Mayor de Bogotá, D.C.).

Cabe destacar, que el Decreto Distrital 190 de 2004, finalmente fue derogado por el Decreto Distrital 555 de 2021 “Por el cual se adopta la revisión general del Plan de Ordenamiento Territorial de Bogotá D.C.” (Decreto 555 de 2021 Alcaldía Mayor de Bogotá, D.C.).

El Decreto referido contiene un Proyecto Urbanístico Integral de gran escala, que consiste en desarrollar proyectos para el uso del suelo en expansión urbana en el sur oriente de la ciudad y del suelo urbano con tratamiento de desarrollo, así como orientar la consolidación del sistema de áreas protegidas y las áreas rurales, mediante la incorporación de la aplicación coordinada de los distintos instrumentos de gestión del suelo previstos en la Ley 388 de 1997.

Tabla 13: Leyes

Tipo	Aspecto	Descripción
Leyes	Ley 2079 de 2021	Por medio de la cual se dictan disposiciones en materia de vivienda y hábitat.
	Ley 388 de 1997	Por la cual se modifica la Ley 9 de 1989, y la Ley 2 de 1991 y se dictan otras disposiciones.

Fuente: Autoría propia

Tabla 14: Decretos Distritales

Tipo	Aspecto	Descripción
Decretos	Decreto Distrital 555 de 2021	Por el cual se adopta la revisión general del Plan de Ordenamiento Territorial de Bogotá D.C.
	Decreto Distrital No. 675 de 2018.	Por medio del cual se modiflca el Decreto Distrital 252 de 2007 "Por medio del cual se adopta la Operación Estratégica Nuevo Usme - Eje de integración Llanos y el Plan de Ordenamiento Zonal de Usme.
	Decreto 1077 de 2015	Por medio del cual se expide el Decreto Único Reglamentario del Sector

	Vivienda, Ciudad y Territorio.
Decreto 252 de 2007	Por medio del cual se adopta la Operación Estratégica Nuevo Usme - Eje de integración Llanos y el Plan de Ordenamiento Zonal de Usme.
Decreto 436 de 2006	Por el cual se dictan disposiciones comunes a los planes parciales en tratamiento de desarrollo, y se establece la metodología para el reparto equitativo de cargas y beneficios.
Decreto Distrital 190 de 2004	Por medio del cual se compilan las disposiciones contenidas en los Decretos Distritales 619 de 2000 y 469 de 2003.
Decreto 327 de 2004	Por el cual se reglamenta el Tratamiento de Desarrollo Urbanístico en el Distrito Capital.

Fuente: Autoría propia

Tabla 15: Resoluciones

Tipo	Aspecto	Descripción
Resoluciones	Resolución 253 de 2020	Por la cual se declara el desistimiento de la formulación y revisión del Plan Parcial de Desarrollo “Polígono 3” denominado “Parque Tecnoecológico Universidad Antonio Nariño”.
	Resolución 1141 de 2006	Por la cual se adopta el plan de manejo ambiental de la zona de reserva forestal protectora bosque oriental de Bogotá y se establecen otras determinaciones.

Resolución 076 de 1977

Por la cual se aprueba un
Acuerdo de la Junta Directiva
del Instituto
Nacional de los Recursos
Naturales Renovables y del
Ambiente –INDERENA.

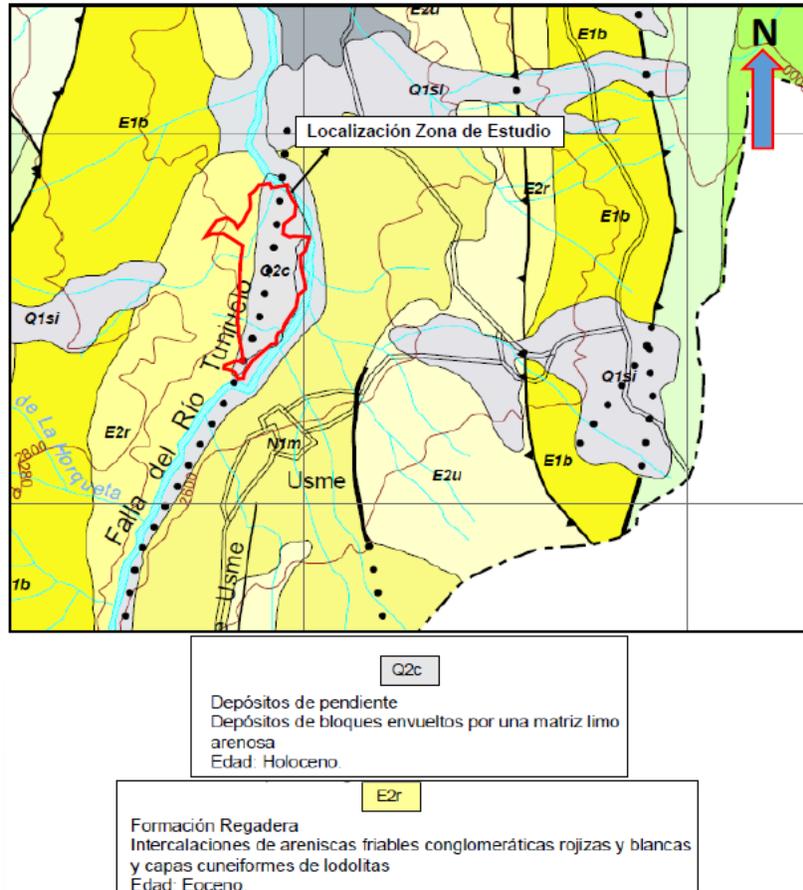
Fuente: Autoría propia

**Estudio preliminar de suelos, geológico, geomorfológico y geotécnico plan parcial
universidad Antonio Nariño localidad de Usme contexto urbano S.A.**

La siguiente información fue obtenida de (Uribe Sardiña & Torres M, 2018):

Geología Regional:

La Sabana de Bogotá forma parte de una cuenca sedimentaria plegada y tectonizada, constituida por varios ejes anticlinales y sinclinales, donde afloran unidades de roca constituidas, principalmente, por areniscas y arcillolitas, de edades Cretácicas tardías hasta Neógenas, depositadas en medios marinos (Grupo Guadalupe), transicionales (Formación Guaduas), hasta continentales (Formaciones Bogotá, Cacho, Regadera y Usme). Esas formaciones antiguas se erodaron en parte durante fases de plegamiento y de manera fuerte durante y después del levantamiento de la Cordillera Oriental a partir del Mioceno. Los materiales erodados y transportados fueron redepositados en las depresiones y dentro de la cuenca durante el Mio-Plioceno (formaciones Marichuela, Tilatá, Balsillas, etc.) y el Cuaternario (formaciones Subachoque, Sabana y Mondoñedo) y dieron lugar a gran variedad de depósitos no litificados de composición heterogénea, que recubren, en algunos casos parcial o totalmente, las formaciones antiguas. De estos depósitos, los más antiguos fueron sometidos a intemperismo en condiciones tropicales durante el Plioceno, y en condiciones de montaña tropical de altitud a partir del Pleistoceno. Por otro lado, en el transcurso del Plioceno y del Cuaternario se ha puesto en evidencia la existencia de niveles de cenizas, provenientes de los centros volcánicos de la Cordillera Central que hicieron erupción durante ese lapso (Ingeominas, 2003). El sector de estudio está incluido dentro del dominio geológico correspondiente al Bloque sur de la Sabana de Bogotá, dentro de la zona de Falla de Mochuelo.



Litoestratigrafía:

Formación Usme (Tmu)

Hubach (1957) define como Formación Usme a la secuencia de origen marino que aflora en el Sinclinal del Tunjuelo (Sinclinal de Usme en este trabajo), representada por areniscas intercaladas con cascajos y arcillas grises claras.

Julivert (1963), distingue dos niveles, el inferior lutítico, con intercalaciones de areniscas y la parte superior areniscas de grano grueso y conglomerados.

Hoom, et al (1987) le asigna un espesor de 300 m y diferencia dos miembros con base en la litología y ambiente de depositación; el inferior son 100 m de arcillolitas cafés y grises y se

considera como el tope la aparición de la primera arenisca. El miembro superior compuesto por 200 m de arcillolitas limosas varicoloreadas y areniscas amarillas; en la parte más superior hay numerosas capas de lignito y remanentes orgánicos.

Posición estratigráfica y edad: la Formación Usme es discordante sobre la Formación Regadera y es cubierta discordantemente por depósitos cuaternarios. La edad de esta formación con base en palinología es Eoceno superior y Oligoceno inferior (Hoorn, et al., 1987).

Características físicas de la roca en el área tipo: como se anotó al comienzo de este capítulo las rocas de la Formación Usme en la zona de estudio, se encuentran cubiertas por depósitos gravitacionales de la Formación Marichuela y por suelos orgánicos de esta misma formación. Los niveles de la Formación Usme en la zona se componen de arcillas duras a arcillolitas con esporádicos lentes de arena.

Se encuentran subyaciendo a niveles de suelos arcillosos residuales (Tmu-Sr), se componen de arcillolita gris de consistencia dura.

En esta zona la Formación Usme forma secuencias de montaña con laderas de mediana pendiente que finalizan en llanuras aluviales sobre la margen izquierda del río Tunjuelo. Gran parte de la secuencia de estas rocas se encuentra cubierta por depósitos recientes; sin embargo, regionalmente se destaca la morfología de estas rocas, compuestas en su mayoría por estratos de arcillolita, que contrasta con el relieve abrupto de las formaciones arenosas de la Formación Regadera al occidente y depósitos de origen aluvial de baja pendiente al oriente.

Regularmente esta formación presenta un horizonte de meteorización, dando como resultado la generación de suelos arcillosos y limosos de consistencia dura, con esporádicas intercalaciones

de lentes de arena; en las áreas expuestas al ambiente estos materiales son susceptibles a la generación de surcos y cárcavas.

Esta unidad se caracteriza por presentar buenas condiciones de resistencia, aumentando progresivamente con la profundidad y el perfil de meteorización. La secuencia de roca se encuentra buzando entre 20 y 22° hacia el oriente, es decir en forma desfavorable.

Geología estructural regional:

Sinclinal de Usme:

Esta estructura tiene una orientación NS con pequeñas ondulaciones hacia el oriente y hacia el occidente, con cierre en el extremo sur que geográficamente corresponde al Páramo de Sumapaz en las proximidades de los ríos Taque y Taquecito; sus flancos se abren hacia el NE hasta la altura de la Sabana de Bogotá. Los flancos se encuentran afectados por fallas tanto en el sentido perpendicular al rumbo del eje como paralelo a éste, controlando localmente el valle del río Tunjuelo; el flanco oriental, al norte de la quebrada Piedragorda, está invertido, lo cual se aprecia claramente en las areniscas de la Formación La Regadera. También este flanco se encuentra afectado por una falla transversal, con dirección SW-NE, en el sitio Las Areneras, el flanco occidental en el sitio Buenavista está afectado por una falla paralela al río Tunjuelo, la cual ocasiona un cambio en el buzamiento de las areniscas de Formación La Regadera, que es contrario a la continuidad estructural de este flanco, además se nota la presencia de varias fallas transversales que afectan dicho flanco.

El núcleo del pliegue está conformado por las arcillolitas de la Formación Usme, que en muchos sectores están cubiertas por depósitos fluvio-glaciares y flujos de tierra del Cuaternario.

Geología local:

Columna estratigráfica generalizada del área de estudio:



Aspectos hidrogeológicos:

La hidrogeología del sector, se encuentra controlada por la existencia de materiales con permeabilidad primaria elevada, como es el caso de los depósitos de la Formación Marichuela y los depósitos aluviales. Las perforaciones exploratorias, confirman la presencia de niveles de agua entre 1 y 3 m en promedio, dentro de los materiales de dichos depósitos. Esta característica es común dentro de estos materiales, debido a los distintos niveles de suelos finos, granulares y material heterogéneo. De esta forma el agua se infiltra más rápida y fácilmente a través de los niveles superiores granulares, hasta encontrar equilibrio hidrostático en capas inferiores de baja permeabilidad primaria como son las arcillas. Con base en las características anotadas, es de esperar en la zona fluctuaciones importantes de los niveles de agua, pero dentro de los materiales anotados. Es importante destacar la importancia que tiene el efecto de drenaje en la zona, debido a la susceptibilidad que presentan algunos niveles y materiales de estos depósitos superficiales, frente a la concentración de flujos de agua.

Geomorfología:

La zona de interés se encuentra en medio de una ladera erosiva desarrollada sobre la vertiente occidental del valle del río Tunjuelo, a través del cual se generan depósitos de abanico torrencial en dirección Oriente-Occidente. Este valle es ancho y corresponde a la disección que realizan depósitos de avalancha o gravitacionales, sobre rocas preexistentes con rumbo Norte.

De otra parte, corresponde a una zona de falla o de debilidad física, que favorece los procesos erosivos que dieron origen al valle y al abanico intra-montano. Este se caracteriza por una pendiente general de 20° (usualmente entre 16 a 20°). Es importante mencionar, que a partir de

la fotointerpretación se puede afirmar que el sector de estudio no ha sido intervenido por actividades extractivas (como fuentes de materiales de construcción). Se observan algunos movimientos en masa activos en pocos sectores y la gran mayoría relacionados con cortes para vías y en zonas de escasa cobertura vegetal.

En el sector estudiado se observaron cuatro tipos de modelados geomorfológicos a nivel local. A continuación, se detalla cada unidad geomorfológica.

Unidad de Abanico Intramontano (Uam)

Corresponde a la mayor parte del área de estudio, se desarrolla sobre depósitos coluviales antiguos (Formación Marichuela) con evidencias de estabilidad en el tiempo (los materiales tienen colores amarillentos y se encuentran meteorizados). Conservan en buena parte de ellas el cubrimiento de suelos oscuros orgánicos con influencia de depósitos de cenizas volcánicas.

Las pendientes varían entre 15 y 25°, con presencia local de movimientos en masa en sectores de cortes para vías.

Unidad de Ladera Estructural (Ule)

Se manifiesta como una geoforma de alta pendiente conformada por areniscas y conglomerados, controlados estructuralmente por la estratificación regional. Tiene como característica la afectación local en sectores de mayor pendiente por caída de roca y erosión profunda por carcavamiento.

Unidad de Ladera Estructural Denudativa (Ued)

Se presenta en un sector de vertiente media, caracterizada por la presencia de materiales blandos en superficie y controlados por planos estructurales con pendientes medias de 20 a 30°.

Presentan una buena cobertura vegetal que impide la afectación por erosión, aunque la susceptibilidad frente a dichos procesos es elevada.

Unidad de Disección Aluvial (Uda)

Corresponde a zonas de pendiente baja a media, muy disectadas, compuestas por depósitos de río de composición heterogénea. Esta unidad se presenta en la zona de influencia del río Tunjuelo, límite oriental del predio.

Estructura ecológica principal

La siguiente información fue suministrada por (Secretaría distrital de planeación, 2020)

39 2.1.1 ELEMENTOS DE LA ESTRUCTURA

La Estructura Ecológica Principal esta compuesta por corredores ambientales localizados dentro de la jurisdicción del Distrito Capital pero que al mismo tiempo están integrados a la Estructura Ecológica Regional.

Tiene como función principal sostener y conducir la biodiversidad y los procesos ecológicos a través del territorio, así como dotarlo de bienes y servicios ambientales para el desarrollo sostenible.

Esta zona se caracteriza por su riqueza natural: la presencia de vegetación nativa y exótica conforman las zonas de bosque. Es una zona poco urbanizada, **sin humedales**, y con potencial de desarrollo de actividades relacionadas con el medio ambiente y los recursos naturales.

Las actividades desarrolladas en la zona son principalmente agrícolas de pastoreo y de agricultura de pan comer. Por su colindancia con la zona rural de protección, también se desarrollan actividades de senderismo, caminatas ecológicas y avistamiento de flora y fauna.



Imagen No. 7: Vistas aéreas del plan parcial. Fuente: Elaboración Propia

PLAN PARCIAL ANTONIO NARIÑO

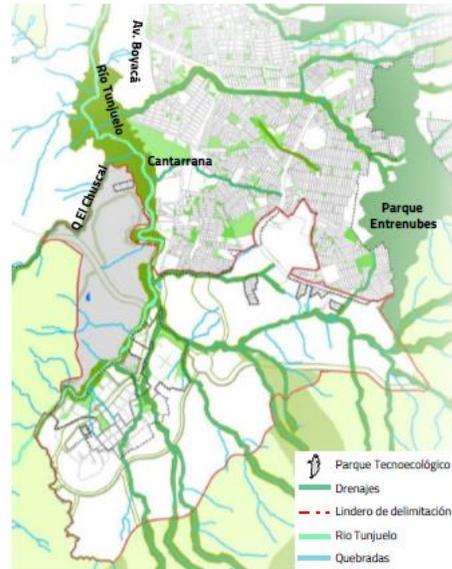


Imagen No. 6: Estructura ecológica principal Fuente: Elaboración propia con base en cartografía de la SDP.

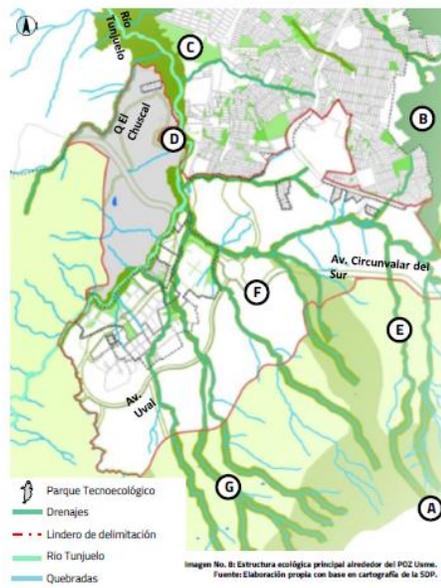


Imagen No. 8: Estructura ecológica principal alrededor del PCZ Usme. Fuente: Elaboración propia con base en cartografía de la SDP.

PLAN PARCIAL ANTONIO NARIÑO

1. SISTEMA DE ÁREAS PROTEGIDAS

Espacios con valores únicos y con importancia para el funcionamiento de los ecosistemas y la conservación de la biodiversidad para beneficio de los ciudadanos.

- (A) Área forestal distrital
- (B) Parque Entrenubes

2. PARQUES URBANOS

Espacios verdes de escala metropolitana y zonal con uso colectivo y representativos del patrimonio natural. Se organizan jerárquicamente y en red para garantizar el cubrimiento de toda la ciudad.

- (C) Embalse de Cantarrana

3. SISTEMA HÍDRICO Y CORREDORES ECOLÓGICOS

SISTEMA HÍDRICO

- (D) Rio Tunjuelo (sus márgenes no registran intervención antrópica de urbanización importante.)
- (E) Corrientes de agua como quebradas.

CORREDORES ECOLÓGICOS

- (F) **Corredor ecológico vial:** Busca la mitigación de los impactos ambientales propios de la red vial.
- (G) **Corredor ecológico de ronda:** Se orientan a la protección del ciclo hidrológico.

41 2.1.1 ELEMENTOS DE LA ESTRUCTURA

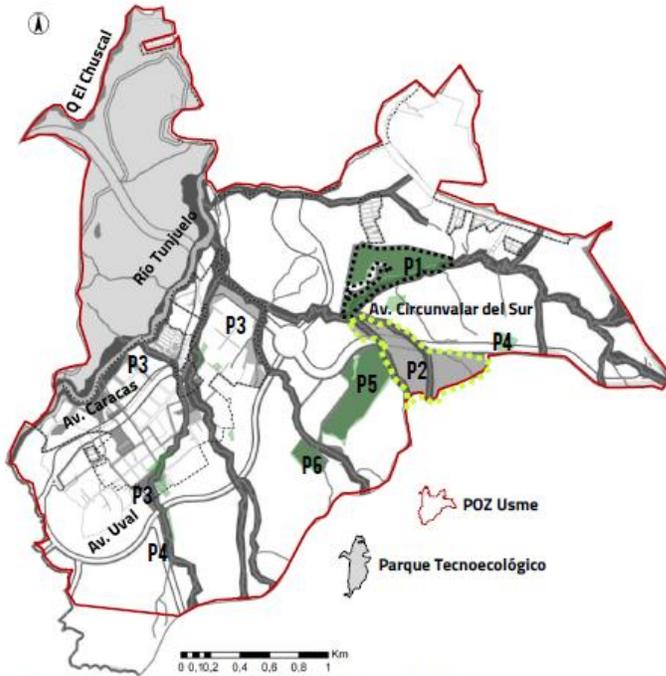


Imagen No. 9: Sistema de áreas protegidas y parque urbanos en el POZ Usme
Fuente: Elaboración propia con base en plano no 5 del decreto 252 de 2007.

1. SISTEMA DE ÁREAS PROTEGIDAS ■

Área forestal distrital

Corredor de Restauración La Requilina: Con una extensión de 21,85 Ha, se ubica al sur de la Avenida Circunvalar del Sur, entre la quebrada Carraco y la quebrada La Quinta. Su uso principal es la conservación de flora y recursos conexos.

2. PARQUES URBANOS ■

Para equilibrar el déficit de espacios recreativos causado por la proliferación de asentamientos ilegales, el POZ Usme propone consolidar una red de 6 parques de escala zonal, (Área entre 1 y 10 Ha) destinados a la recreación activa para un grupo de barrios, que pueden albergar equipamientos especializados como polideportivos, piscinas, canchas, pistas de patinaje, etc.

Parque	Área (m ²)	%
P1	141.730	40,5%
P2	1.160	0,3%
P3	22.880	6,5%
P4	10.580	3,0%
P5	143.610	41,1%
P6	29.860	8,5%
Total	349.820	100,0%

Tabla No. 4: Parques urbanos propuestos en el POZ Usme
Fuente: Decreto 252 de 2007

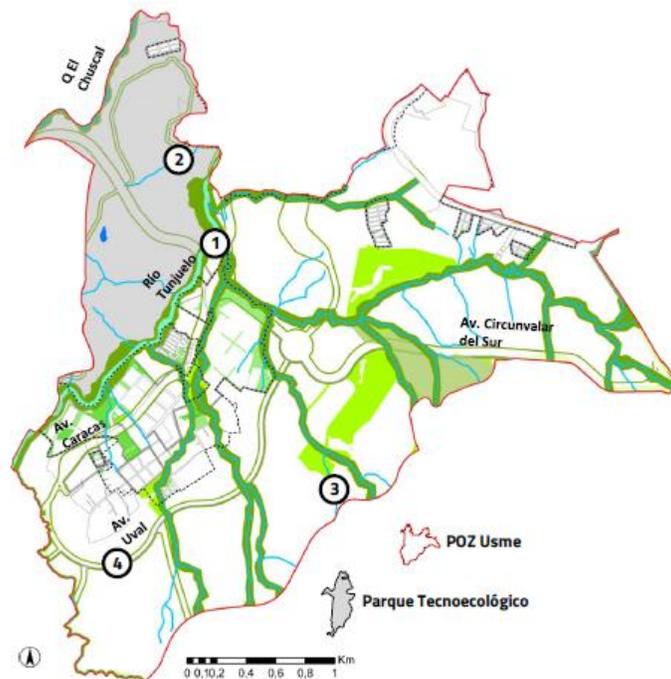


Imagen No. 10: Sistema hídrico y corredores ecológicos en el POZ Usme
Fuente: Elaboración propia con base en plano no 5 del decreto 252 de 2007.

SISTEMA HÍDRICO

- ① **Río Tunjuelo:** Según el oficio 2430001-2018-1593 es una de las fuentes hídricas más importantes de Bogotá. Además, tiene una longitud de 73km, siendo el más largo después del Río Bogotá. Por el ámbito del POZ Usme bordean 2,2 km de su longitud aproximadamente.

- ② **Quebradas:** En el inventario del POZ Usme se describen 16 quebradas..

CORREDORES ECOLÓGICOS

Diseñados para aumentar la permeabilidad entre el medio urbano y rural, y para facilitar el tránsito de las aves y otros elementos de la fauna regional que contribuyan a la dispersión de la flora nativa. Además se definen como un límite para facilitar el control del crecimiento urbano ilegal sobre la red hídrica y el suelo rural.

- ③ **Corredor ecológico de ronda:** Conformado por la ronda hidráulica y la zona de manejo y preservación ambiental -ZMPA de las quebradas La Fucha, La Requilina, El Piojo, Chiguaza y Parque Ecológico Corredor Río Tunjuelo..
- ④ **Corredor ecológico vial:** Alrededor de las vías de la malla vial arterial principal como: Avenida Paisajística del Tunjuelo, Sumapaz, Los Alisos, Usminia, El Uval, Caracas, Circunvalar del Sur y Autopista al Llano.

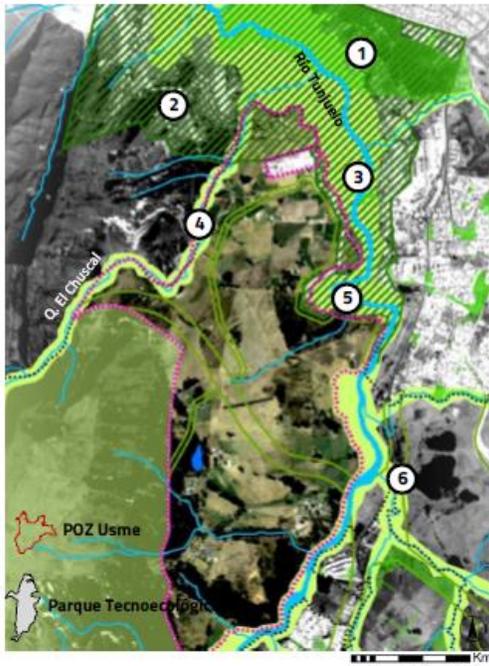


Imagen No. 11: Sistema hídrico y corredores ecológicos en el POZ Usme
Fuente: Elaboración propia con base en plano no 5 del decreto 252 de 2007.

- 1 **Parque Ambiental Cantarrana**
- 2 **DECLARATORIA DE UTILIDAD PÚBLICA Suelo de protección**
- 3 **CORREDOR ECOLÓGICO DE RONDA**
- 4 **QUEBRADA EL CHUSCAL**
Área de ronda: 30 metros a cada lado del eje.
- 5 **RIO TUNJUELO**
Área de ronda: varía a lo largo del río, se encuentran sectores con una ronda de 30 metros, como otros que pueden llegar hasta las 400 metros en la parte norte del área.
- 6 **CORREDORES ECOLÓGICOS VIALES**

El plan parcial se encuentra en una zona con características rurales debido a su adyacencia con la localidad de Sumapaz y por encontrarse en el extremo sur de la expansión urbanística del distrito. Dentro de la estructura ecológica principal del plan parcial se pueden apreciar 2 cuerpos de agua que representan ejes de estructuración para el ordenamiento del sector, la primera es el río Tunjuelo y la segunda es la quebrada el Chuscal.

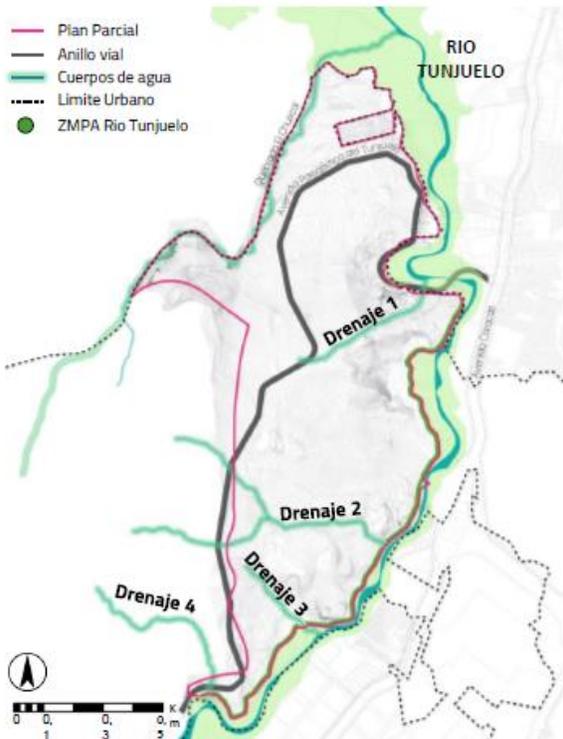
CUERPOS HÍDRICOS

De acuerdo con el oficio E-2018-071840 en respuesta a la solicitud de información acerca de la delimitación de las rondas Hidráulicas y Zonas de Manejo y Preservación ambiental de los cuerpos de agua se determinó que el polígono se encuentra dentro de la jurisdicción de la Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca, ya que se encuentra por fuera del perímetro urbano de la ciudad de Bogotá, sin embargo la EEAB se encarga de definir las rondas de los cuerpos hídricos.

El trazado del plan parcial se encuentra dentro de la zona de manejo del Río Tunjuelo en donde drenan diferentes quebradas y se encuentra el embalse Cantarrana. Los cuerpos de agua que se encuentran dentro del polígono o tienen afluencia sobre él son: Río Tunjuelo, Quebrada El Chuscal y Cuatro drenajes del Río Tunjuelo.

El Río Tunjuelo, la ronda y la Zona de Manejo y Preservación Ambiental se define bajo el artículo 79 del decreto distrital 190 de 2004, mientras que la Quebrada El Chuscal y los cuatro drenajes del río Tunjuelo al no tener alindamiento están sujetos a protección bajo la disposición según Artículo 83 del Decreto 2811 de 1974 el cual establece una franja paralela a lado y lado de 30 metros.

Una de las características más importantes de estas corrientes de agua es que tanto el Río Tunjuelo y la Quebrada El Chuscal tienen un cauce con caudal permanente, mientras que los drenajes del Río Tunjuelo son intermitentes, es decir que por su cauce no concurre agua todo el tiempo.



FUENTE: Elaboración propia.

4,8 ha
La porción de ronda abarcan el **3,18 %**
Del 100% del área total del plan parcial

QUEBRADA EL CHUSCAL Y DRENAJES 1 - 4

3,4 ha
La porción de la ZMPA abarcan el **2,22 %**
Del 100% del área total del plan parcial

ZMPA DEL RIO TUNJUELO