

**ESTUDIO GEOELÉCTRICO APLICADO AL DISEÑO DE SISTEMAS DE
PUESTA A TIERRA**

DANIEL ANDRÉS TORRADO RODRÍGUEZ

CARLOS ALBERTO MONTES CALA

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICO –MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERIAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y
TELECOMUNICACIONES
BUCARAMANGA
2015**

**ESTUDIO GEOELÉCTRICO APLICADO AL DISEÑO DE SISTEMAS DE
PUESTA A TIERRA**

DANIEL ANDRÉS TORRADO RODRÍGUEZ

CARLOS ALBERTO MONTES CALA

**Trabajo de grado para optar por el título de
Ingeniero electricista**

Director:

MIE. Ing. MANUEL JOSÉ ORTIZ RANGEL

Codirector:

MIE. Ing. JAIRO BLANCO SOLANO

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICO –MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERIAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y
TELECOMUNICACIONES
BUCARAMANGA
2015**

DEDICATORIAS

A ti por siempre mi corazón y mi agradecimiento, Mamá.

A tu paciencia y comprensión, porque me inspiraste a ser mejor para ti.
Esta tesis tiene mucho de ti. Gracias por estar siempre a mi lado, Gina.

Daniel Andrés

A dios, que me dio suficiente entendimiento para llegar a esta etapa de mi vida,
por darme salud y fortaleza para seguir adelante.

A mis padres Agustina Cala, Juan Antonio Montes por su paciencia y apoyo incondicional en todos estos años, por sus grandes enseñanzas y motivación muchas gracias.

Carlos Alberto

AGRADECIMIENTOS

La culminación exitosa de este trabajo de grado no habría sido posible sin las enseñanzas, el apoyo y la dedicación de muchas personas a las que quiero agradecer profundamente por haber sido parte de esta etapa de mi vida, la cual significa mucho para mi formación como persona y como profesional.

Principalmente agradezco a Dios por brindarme grandes oportunidades a lo largo de mi vida, por ser mi fortaleza en todo momento y porque siempre está conmigo.

A mi familia y mis seres más queridos por haberme inculcado muchos principios y valores, especialmente a mi mamá por haberme dado la vida y a mis abuelos por haberme formado como un hombre de bien.

A mi novia Gina Tatiana por compartir conmigo los mejores momentos que he vivido y por brindarme felicidad día a día con su hermosa compañía, su incondicional apoyo, su constante comprensión y todo su amor durante estos 5 años.

A los docentes Manuel José Ortiz Rangel y Jairo Blanco Solano por sus orientaciones para alcanzar los objetivos de este proyecto y el aporte de sus conocimientos a lo largo del semestre.

A mi compañero de tesis "Montes" por su espíritu amigable y de cooperación durante la ejecución del proyecto.

Al grupo de investigación Geomática de la UIS, por facilitarnos el equipo "Supersting" para desarrollar las tomografías geoeléctricas.

A la Universidad Industrial de Santander y a mi escuela E3T por haber constituido mi segundo hogar y por todas las lecciones académicas y personales que aprendí en ellas.

Daniel Andrés

TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	16
1. MOTIVACIÓN Y JUSTIFICACIÓN	18
1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	18
1.2. ALCANCE	19
1.3. OBJETIVOS	19
1.3.1. OBJETIVO GENERAL	19
1.3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	20
2. MARCO CONCEPTUAL	21
2.1. RESISTIVIDAD DE LOS MATERIALES	21
2.2. COMPOSICIÓN DE LA CORTEZA TERRESTRE	22
2.3. MÉTODOS GEOELÉCTRICOS	24
2.4. MÉTODO WENNER PARA LA MEDICIÓN DE RESISTIVIDAD	24
2.5. SONDEOS ELÉCTRICOS VERTICALES 1D	26
2.6. MODELOS PARA SUELOS HOMOGÉNEOS	27
2.6.1. MODELO DE RESISTIVIDAD UNIFORME	27
2.6.2. METODOLOGÍA TRANSFORMACIÓN BOX-COX	28
2.7. TOMOGRAFÍA ELÉCTRICA 2D	29
2.7.1. CÁLCULO DE LA RESISTIVIDAD DEL SUELO CON EL TOMÓGRAFO	30
2.7.2. PROCEDIMIENTO DE INVERSIÓN	31
2.7.3. MEDIDAS DE RESISTIVIDADES CON TOMÓGRAFO	32
2.7.4. PROGRAMA DE COMPUTADOR	33
2.7.5. PSEUDO-SECCIONES DE LAS RESISTIVIDADES APARENTES DEL SUELO	35
2.7.6. INVERSIÓN DE LAS PSEUDO-SECCIONES	35
3. ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DE LOS EQUIPOS UTILIZADOS	37
3.1. EQUIPO DE TOMOGRAFÍA SUPERSTING	37
3.1.1. TÉCNICA DE MEDICIÓN SUPERSTING	38
3.1.2. INSTALACIÓN DEL DISPOSITIVO Y TOMA DE DATOS	39
3.1.3. PSEUDO-SECCIONES Y RESULTADOS	39
3.1.4. PROCESADO, INVERSIÓN E INTERPRETACIÓN DE LAS TOMOGRAFÍAS	40
3.2. TELURÓMETRO MARCA METREL MI-2088	40
3.2.1. TÉCNICA DE MEDICIÓN TELURÓMETRO	42
4. GEOLOGÍA Y GEOMORFOLOGÍA	46
4.1. GEOLOGÍA REGIONAL	46
4.1.1. ESTRATIGRAFÍA REGIONAL	47
4.1.2. GEOLOGÍA ESTRUCTURAL REGIONAL	47
4.1.3. GEOMORFOLOGÍA REGIONAL	48
4.2. GEOLOGÍA LOCAL	48
4.2.1. ESTRATIGRAFÍA LOCAL	48
4.2.2. GEOLOGÍA ESTRUCTURAL LOCAL	49
4.2.3. GEOMORFOLOGÍA LOCAL	49
4.3. HIDROGEOLOGÍA	49
5. RESULTADOS	50
5.1. CANCHA DE SOFTBOL UIS	50
5.1.1. MEDICIONES DE RESISTIVIDAD DEL SUELO CON EL TELURÓMETRO	50
5.1.2. MODELO SUELO UNIFORME PARA EL CÁLCULO DE LA RESISTIVIDAD	54
5.1.3. TOMOGRAFÍA ELÉCTRICA	69

5.1.4. ANÁLISIS COMPARATIVO TELURÓMETRO Y SUPERSTING	76
5.1.5. VENTAJAS Y DESVENTAJAS QUE EXISTEN ENTRE LAS TOMOGRAFÍAS 2D Y 1D78	
6. INTERPRETACIÓN Y COMPARACIÓN DE LAS TOMOGRAFÍAS.....	81
6.1. CANCHA SOFTBOL UIS.....	83
6.2. EL BOSQUE UIS	83
6.3. CONDOMINIO RESIDENCIAL MENZULI	86
6.4. COMPARACIÓN.....	89
7. CRITERIOS DE DISEÑO DE SPT SEGÚN NORMA IEEE 80.....	90
7.1. PRINCIPALES CARACTERÍSTICAS DE LOS DISEÑOS DE MALLAS DE PUESTA A TIERRA	91
7.1.1. SELECCIÓN DEL TAMAÑO DEL CONDUCTOR DE LA MALLA Y LAS UNIONES..	92
7.1.2. MATERIALES PARA LOS CONDUCTORES Y PROBLEMAS POR LA CORROSIÓN92	
7.1.3. SELECCIÓN DE LAS UNIONES.....	93
7.1.4. RESISTENCIA DE PUESTA TIERRA	94
7.1.5. TRATAMIENTO DEL SUELO.....	95
7.2. DISEÑO DE MALLAS DE TIERRA EN SUBESTACIONES INCORPORANDO LAS TOMOGRAFÍAS 2D	98
7.2.1. COMPARACION ENTRE EL TELURÓMETRO Y SUPERSTING PARA EL DISEÑO.108	
8. CONCLUSIONES	110
9. RECOMENDACIONES.....	112
BIBLIOGRAFÍA	115

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Valores de resistividad aparente con el telurómetro.....	53
Tabla 2. Cálculo del valor de la resistividad.....	59
Tabla 3. Cálculo del valor de la resistividad del suelo.	76
Tabla 4. ventajas y desventajas de la tomografía geoelectrica en 2D.	79
Tabla 5. ventajas y desventajas del telurómetro.	80
Tabla 6. tamaño de grano de Wentworth.....	82
Tabla 7. Valores máximos de resistencia de puesta tierra.	95
Tabla 8. Diseños de mallas de tierra con las tomografías.	99
Tabla 9. Parámetros preliminares de diseño telurómetro.	100
Tabla 10. primera iteración en el diseño de malla telurómetro.	101
Tabla 11. Segunda iteración para el diseño de la malla telurómetro.	102
Tabla 12. Parámetros preliminares de diseño supersting.	104
Tabla 13. resultados segunda iteración para el diseño de mallas.	107

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Resistividad característica para cada tipo de suelo y roca.	22
figura 2. Capas terrestres.....	22
Figura 3. Componentes de la corteza terrestre.	23
Figura 4. medición de la resistividad del suelo.	25
Figura 5. factores determinantes en la resistividad del suelo.	25
Figura 6. Configuración de electrodos para un SEV Según el método de WENNER	26
Figura 7. Malla de elementos finitos.	31
Figura 8. Secuencia de medidas en tomografía eléctrica.....	32
Figura 9. algoritmo de inversión.....	34
Figura 10. Pseudo-secciones con arreglo Wenner.....	35
Figura 11. Mapa de contornos de las resistividades del suelo.	36
Figura 12. Equipo medidor de resistividad Supersting.	38
Figura 13. Telurómetro marca Metrel mi2088.....	41
Figura 14. Equipos utilizados para las medidas con el telurómetro.	42
Figura 15. Configuración manual del Metrel 2003.....	42
Figura 16. Influencia de la distancia “a” en la profundidad “d”.....	43
Figura 17. Menú inicial de resistividad de tierra.....	44
Figura 18. Medición práctica de la resistividad del suelo.	45
Figura 19. Diagrama de bloques tectónicos en el área de Bucaramanga.....	46
Figura 20. Selección de rutas.	51
Figura 21. Ubicación electrodos ruta 1.	52
Figura 22. Curvas de resistividades aparentes.....	54
Figura 23. Localización de la tomografía geoeléctrica.	69
Figura 24. Pseudo-secciones de la tomografía geoeléctrica en la cancha de softbol.	70
Figura 25. Superficies de resistividades en la cancha de softbol.	71
Figura 26. Gama de colores de las resistividades.	71
Figura 27. Línea seleccionada.	73
Figura 28. Línea de medida.	73
Figura 29. Cancha de softbol de la UIS.	83
Figura 30. Localización de la tomografía geoeléctrica en el bosque de la UIS.....	84
Figura 31. Tomografía en el Bosque de la UIS.....	84
Figura 32. Superficie de resistividades del bosque de la UIS.	85
Figura 33. Gama de colores de resistividades.....	85
Figura 34. Localización de las tomografías geoeléctricas en Menzulí.	86
Figura 35. Medición Menzulí 1.	87
Figura 36. Superficies de resistividades en Menzulí, medición 1.	87
Figura 37. Gama de colores de resistividades.....	87
Figura 38. Medición Menzulí 2.	88
Figura 39. Superficies de resistividades en Menzulí, medición 2.	88
Figura 40. Gama de colores de resistividades.....	88
figura 41. Soldadura exotérmica y uniones de compresión.	94
figura 42. resistencia de puesta tierra.	95
figura 43. Diagrama de bloques de SPT.....	97
figura 44. Perfil de resistividades del suelo.....	98
Figura 45. Sectorización de la tomografía.	103
Figura 46. Dos Capas de resistividades.	105

RESUMEN

TÍTULO: Estudio Geoeléctrico aplicado al diseño de Sistemas de Puesta a Tierra*.

AUTORES: Daniel Andrés Torrado Rodríguez y Carlos Alberto Montes Cala**.

PALABRAS CLAVE: Tomografía Eléctrica de Resistividad (TER), Sistemas de Puesta a Tierra (SPT), Resistividad del suelo (ρ), Sondeo Eléctrico Vertical (SEV), Telurómetro.

DESCRIPCIÓN:

La presente tesis de investigación realizada en la ciudad de Bucaramanga y su área metropolitana comprende la aplicabilidad de la tomografía geoeléctrica como método de prospección para el diseño de sistemas de puesta a tierra, basado en las variaciones de las propiedades eléctricas, en especial la resistividad de las distintas formaciones del subsuelo.

Las mediciones con tomografía geoeléctrica 2D fueron desarrolladas en el Condominio Residencial Menzulí (Municipio de Floridablanca), en la cancha de softbol de la UIS y en el sitio conocido como el Bosque en la misma universidad. En estos sitios se reconocieron diferentes tipos de suelos que fueron clasificados mediante el análisis de la geología en cada sector. Las diversas composiciones de los suelos se verificaron con los datos obtenidos mediante la tomografía geoeléctrica 2D, lo cual permitió comparar diversos rangos de valores de las resistividades eléctricas para cada uno de ellos. Con base en a estos resultados se seleccionó la cancha de softbol de la UIS para hacer la respectiva medición con el método tradicional Wenner utilizando el Telurómetro.

Con los datos adquiridos en la cancha de softbol, tanto los de la tomografía como los del Telurómetro, se hicieron las respectivas comparaciones 2D y 1D para conocer la fluctuación de las resistividades con cada uno de los métodos.

Apoyados en las semejanzas existentes entre las dos técnicas, se definen los parámetros necesarios para el diseño de un SPT teniendo en cuenta la importancia de cada uno de los elementos que lo conforman y las recomendaciones dadas por las Normas IEEE 80-2000 y RETIE para una óptima y eficiente transferencia de la corriente hacia la tierra. De esta manera se describen las ventajas de las TER para los diseños de SPT.

*Proyecto de Grado, Modalidad Investigación.

**Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones. Director: MIE. Ing. Manuel José Ortiz Rangel. Codirector: MIE. Ing. Jairo Blanco Solano.

ABSTRACT

TITLE: Geoelectrical Study applied to the Design of Earthing Systems*.

AUTHORS: Daniel Andrés Torrado Rodríguez and Carlos Alberto Montes Cala**.

KEY WORDS: Electrical Resistivity Tomography (ERT), Earthing Systems, Soil Resistivity (ρ), Vertical Electrical Sounding (VES), Tellurometer.

DESCRIPTION:

This research work was made in the city of Bucaramanga and its metropolitan area. It integrates the applicability of a Two-Dimensional Geoelectrical Tomography like a prospecting method to design earthing systems, based on the variations in electrical resistivity found in different kind of soils and rocks.

Geophysical measurements were conducted using the 2D Electrical Resistivity Tomography method in the residential condominium of Menzulí (Floridablanca), the pitch softball of the UIS and the place known as “El Bosque” in the same university. These places have different kind of soils that were characterized by the geologic analysis of each zone. The diverse composition of the soils was verified with the data obtained from 2D Geoelectrical Tomography. This information allowed to compare the resistivity ranges in each one of them. Based in the results, we selected the pitch softball of the UIS to do the measurements with the Tellurometer using the traditional 1D method (Wenner array).

The information obtained from the Tellurometer and the Geoelectrical Tomography in the pitch softball of the UIS was used to do the comparisons between both methods to know about the resistivity fluctuations in each one of them.

Based on the similarities between the two methods, we defined the necessary parameters to design an earthing system, keeping in mind the importance of each one of the parts that compounds it and the recommendations given by the norms IEEE 80-2000 and RETIE for an optimal and efficient electric power transfer into the soil. In this way we describe the electrical tomographies advantages in an earthing system design.

*Graduation Research Project.

**Industrial University of Santander. Department of Physical and Mechanical Engineering. School of Electrical, Electronic and Telecommunication Engineering's. Director: MIE. Ing. Manuel José Ortiz Rangel. Codirector: MIE. Ing. Jairo Blanco Solano.

INTRODUCCIÓN

La electricidad y sus aplicaciones son muy importantes hoy día, debido principalmente a la influencia que ha tenido en la vida diaria de las personas para satisfacción de sus necesidades. De la misma forma surge la importancia de proteger al hombre, animales y los mismos aparatos eléctricos, de sus efectos nocivos en caso de anomalías de funcionamiento en los sistemas eléctricos.

El sistema de puesta tierra es un conjunto de elementos de conductores equipotenciales que están interconectados entre sí, que distribuyen las corrientes en caso de presentarse una falla a tierra, están conformados por conductores, conexiones y electrodos. Surgieron a partir de la necesidad de proteger la vida de los seres vivos y equipos eléctricos de fallas que se presentan en el sistema eléctrico.

Dentro de los sistemas de puesta a tierra resulta necesario conocer la mayor cantidad de factores que hacen variar la resistencia del sistema. Algunos de estos factores pueden ser las condiciones climatológicas, la estratigrafía, la compactación del suelo, las características físicas del electrodo de conexión a tierra, etc.

Debido a lo antes mencionado, surge la necesidad de diseñar y construir eficientes sistemas de puesta a tierra y aprovechar los instrumentos de medida de las características del suelo en donde se pretende instalar un sistema de puesta a tierra.

Hoy día se hace cada vez más importante contar con instrumentos que estimen de forma más precisa el comportamiento de la resistividad de la tierra, en este trabajo se menciona los elementos principales y la importancia de un sistema de puesta a tierra.

La medida de la resistividad del suelo se realiza con métodos propuesto por la Normas ANSI/IEEE Standard 81 IEEE, "Guide for measuring Earth Resistivity, Ground Impedance, and Earth Surface Potentials of a Grounding System" 2012 [9]. En Colombia actualmente se diseñan sistemas de puesta a tierra teniendo en cuenta el reglamento técnico de instalaciones eléctricas RETIE [4], recomendando el método Wenner en el numeral "5.1. Medida de resistividad aparente del suelo".

Debido a que los suelos son homogéneos, isotrópicos, anisotrópicos, estratificados, etc., no se debería considerar un solo método para la medida de la resistividad del

suelo. Según las normas IEEE, un modelo de suelo uniforme debería ser usado sólo cuando hay una variación moderada en la resistividad aparente del suelo [3,9]. La tomografía eléctrica aplicada al estudio del suelo ha tenido un importante auge en los últimos años [1,2]. El método de Tomografía Eléctrica en dos Dimensiones (TER-2D) es una técnica de investigación de resistividad de áreas con anomalías complejas (resistivas o conductivas), donde el empleo de otras técnicas no permite obtener información de detalle en 2D [1].

Se realiza un análisis comparativo entre el método de tomografías en 2D y el telurómetro, verificando la eficiencia de utilizar nuevas técnicas para la medida de la resistividad del suelo. Esta investigación tiene como propósito realizar medidas con el instrumentos telurómetro confrontado con las medidas de la Tomografías 2D.

1. MOTIVACIÓN Y JUSTIFICACIÓN

Con la tomografía eléctrica en 2D existente actualmente en el mundo, su utilidad se evidencia en medidas geoelectricas de resistividad aparente del suelo y en el mismo diseño de sistemas de puesta a tierra. Además se busca aprovechar este nuevo método para medir la resistencia real para los diferentes medios que existen, comprobando las ventajas que tiene respecto a lecturas en 1D.

Dada la baja eficiencia que tienen los métodos tradicionales para las mediciones de la resistividad aparente del suelo como el método de WENNER [3], resulta necesario el estudio investigativo para comparar esta nueva técnica de media geoelectrica, verificando su eficiencia y destacar los beneficios de diseño que se obtienen con estos nuevos métodos para que proyectos futuros sean mejores y confiables para la vida de las personas y animales, tal como se estipula en el Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas RETIE [4].

1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Las tomografías geoelectricas en 2D aparecen actualmente como una solución eficiente para medidas de resistividad aparente, donde por la geotécnica del suelo, la resistividad aparente puede variar significativamente a diferentes profundidades y se pueden obtener resultados no deseados en las mediciones para los diseños de instalaciones de sistemas de puesta a tierra. Por tal motivo el Estudio Geoelectrico aplicado al diseño de sistemas de puesta a tierra es muy importante para la implementación de nuevas técnicas de mediciones de resistividad aparente del suelo.

Es así como se realiza un análisis comparativo entre dos formas de medida, las tomografías geoelectricas en 2D, con el telurómetro, esto se llevara a cabo mediante actividades de campo donde se analiza la resistividad aparente. Para esto se utilizan instrumentos de medida como el Telurómetro y supersting, con los resultados de estas medidas se determina la importancia de la tomografía 2D respecto a los métodos tradicionales empleados.

1.2. ALCANCE

El alcance del estudio geoelectrico corresponde a la realizaci3n de actividades que permitan conocer y dominar esta rama de la ingenieria el6ctrica, considerando la importancia que tiene el proceso de la propagaci3n de la corriente el6ctrica a trav6s del suelo en el dise1o de SPT y teniendo en cuenta las exigencias de seguridad as3 como los reglamentos y normas establecidos para ello. Se propone evaluar la correlaci3n existente entre el comportamiento de la resistividad del suelo evaluada de acuerdo al STD IEEE81 y las obtenidas mediante TER. Se esperan resultados que conlleven o mejoren la eficiente y segura transferencia de corriente el6ctrica hacia el suelo para determinar los par6metros el6ctricos primordiales que se requieren al dise1ar un sistema de puesta a tierra.

Dentro de los alcances espec3ficos se tienen los siguientes:

- ❖ Realizar actividades de campo con los dos instrumentos de medida, supersting y telur3metro para medir la resistividad aparente del suelo.
- ❖ Confrontar con los instrumentos las medidas que se puedan medir y determinar la naturaleza del suelo, para ubicar una buena puesta a tierra que sea m6s eficiente.
- ❖ Verificar con el instrumento de medida supersting qu6 tan homog6neo es el suelo estimando la resistividad del suelo con la que se obtiene con el Telur3metro.
- ❖ Establecer la fluctuaci3n de las medidas realizadas con el telur3metro y supersting.
- ❖ Determinar las ventajas y desventajas que tiene la t6cnica de medici3n 1D respecto a la 2D.

1.3. OBJETIVOS

1.3.1. Objetivo general

Realizar un estudio geoelectrico basado en tomograf3as en 2D para el estudio geomorfol3gico de diferentes tipos de terrenos.

1.3.2. Objetivos específicos

El cumplimiento del objetivo general del trabajo de grado comprende:

- ❖ Comparar el método tradicional Wenner de resistividad del terreno por medio de telurómetro que arroja datos en 1D, con tomografías tomadas en 2D para el estudio geoelectrico destinado al planteamiento de un SPT.
- ❖ Determinar los elementos principales que conforman un SPT (El terreno, el electrodo y la línea conductora) incorporando los alcances de una tomografía 2D en el diseño eficiente de un SPT.
- ❖ Confrontar las conductividades efectivas de los terrenos, conformadas por diversas condiciones geológicas y geoelectricas, lo cual es trascendente para el diseño eficiente de un SPT.

2. MARCO CONCEPTUAL

El Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas RETIE [4], recomienda basado en las normas IEEE 80 y 81, el uso del método Wenner para determinar la resistividad aparente del suelo, cuyas técnicas de medida son esencialmente las mismas para aplicaciones eléctricas [3]. Sin embargo, teniendo en cuenta que existen suelos donde la geología es muy variable, la aplicación de la metodología Wenner propuesta en las normas IEEE80/81 y el RETIE [3,4], no siempre permite una buena interpretación y un adecuado modelo de la estratigrafía del subsuelo, lo que lleva a diseños ineficaces de puestas a tierra. Para llevar a cabo un adecuado diseño de puesta a tierra es necesario determinar el tipo de material, el valor de la resistividad del suelo y la litología del suelo [4].

2.1. RESISTIVIDAD DE LOS MATERIALES

La resistividad eléctrica es una característica propia de cada material que compone el suelo, se describe como la dificultad que encuentra la corriente eléctrica a su paso por ellos. También se puede definir que la conductividad es la facilidad que tiene la corriente a su paso por el suelo. [10] La resistencia eléctrica de un conductor homogéneo está determinada por la resistividad del material que lo compone y la geometría del conductor.

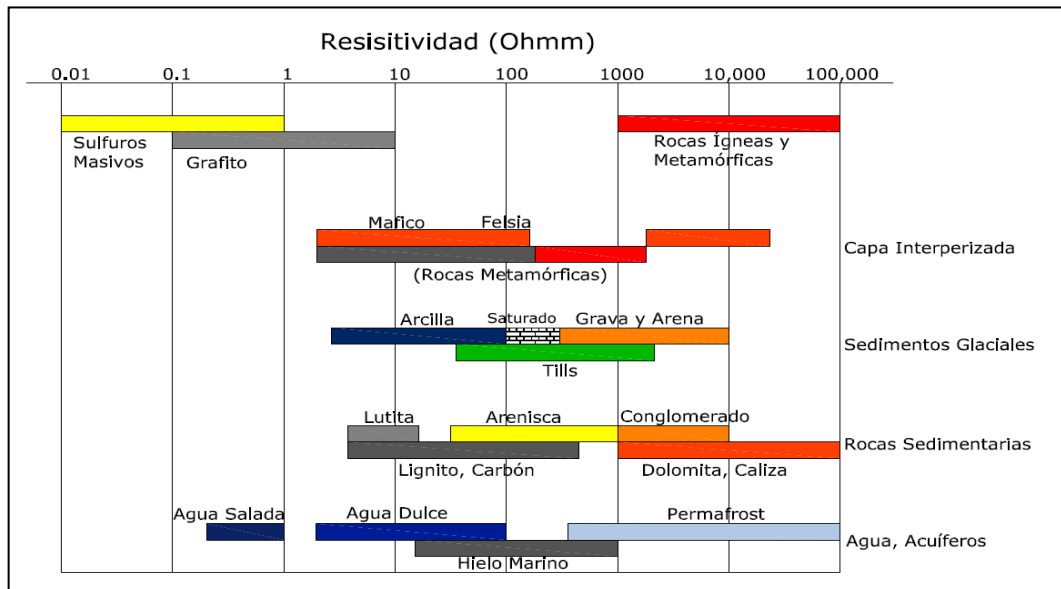
Para un conductor rectilíneo y un área de sección transversal S y longitud L , la resistencia se describe como:

$$R = \rho * \left(\frac{L}{S}\right) \quad (1)$$

Donde ρ corresponde a la resistividad para cada tipo de material donde la unidad en el sistema internacional es el $\Omega * m$.

En la Figura 1 se muestran los valores de resistividades del suelo en $\Omega * m$, separados por rangos para cada tipo de material.

Figura 1. Resistividad característica para cada tipo de suelo y roca.

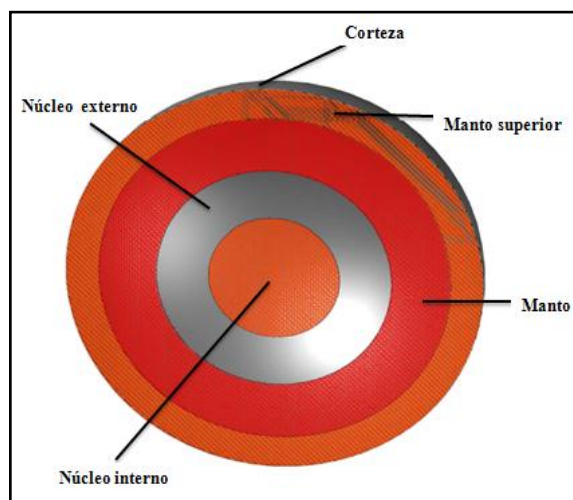


Fuente: Resistivity basic-LS, Abem.

2.2. COMPOSICIÓN DE LA CORTEZA TERRESTRE

La corteza terrestre o litosfera es la capa de roca externa de la tierra; se considera comparativamente fina y tiene un espesor aproximado que varía entre 5 [km] en el fondo del océano y hasta 70 [km] en zonas montañosas de los continentes. En la Figura 2 se muestra las diferentes capas que existen en la tierra a diferentes profundidades.

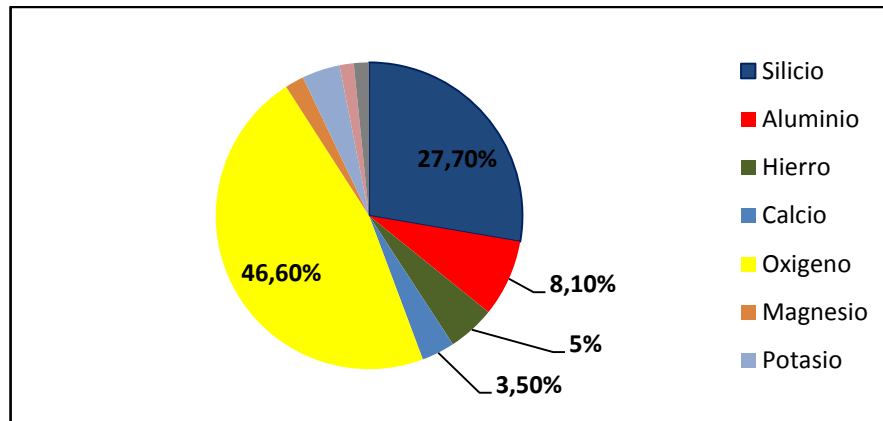
Figura 2. Capas terrestres.



Fuente: Favio Casas, "Tierras, soporte de la seguridad eléctrica".

Casi el 98% del peso de la corteza terrestre está compuesta por ocho elementos químicos (O, Si, Al, Fe, Ca, Na, K, Mg), de los cuales el 75% corresponden a oxígeno y silicio (Figura 3).

Figura 3. Componentes de la corteza terrestre¹.



Fuente: Favio Casas, "Tierras, soporte de la seguridad eléctrica".

Las rocas que constituyen la corteza terrestre se clasifican en tres grupos: ígneas, metamórficas y sedimentarias (las dos primeras son el 95% de la corteza).

❖ **Ígneas:** Llamadas también endógenas, magmáticas o eruptivas se forman por enfriamiento y salificación de una masa silícea, fluida y caliente llamada magma.

❖ **Metamórficas:** son rocas ígneas o sedimentarias alteradas por condiciones de presión y temperatura que causan su cristalización y forman nuevos minerales con estructuras diferentes.

❖ **Sedimentarias:** son rocas que se producen por alteración meteórica, química o biológica de las rocas preexistentes. Tienen mucha importancia porque el 75% de la superficie de la tierra se encuentra cubierta por sedimentos, que corresponden al 5% del volumen de la corteza (16 km de profundidad). Es decir, que forman un delgado revestimiento sobre una corteza de rocas ígneas y metamórficas. Todas las rocas sedimentarias se caracterizan en general por la disposición paralela de las partículas que las conforman, en capas o lechos, que se distinguen entre sí por diferencias en espesor, tamaño de grano o color. En las de grano grueso, existen algún material que

¹ Fuente: Favio casas Ospina, "Tierras, Soporte de la seguridad eléctrica", Quinta Edición.

sirve de cemento para mantener juntas las partículas y generalmente es sílice o carbonato cálcico u óxido de hierro. Las principales son: arcillas, areniscas, calizas, conglomerados y limos.²

2.3. MÉTODOS GEOELÉCTRICOS

Los métodos geoeléctricos son métodos geofísicos de prospección para el estudio de estructuras geológicas en la parte superficial del suelo que permiten obtener características como resistividad, permeabilidad magnética y constante dieléctrica [3,11].

Estos métodos se fundamentan en el comportamiento de los campos eléctricos y electromagnéticos en función de la distribución espacial de los materiales, la composición mineralógica, el contenido de agua, la porosidad, etc.

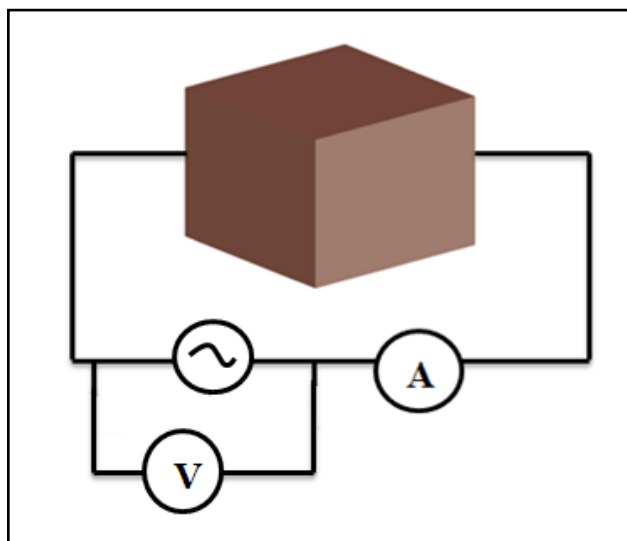
Se clasifican como: los de potencial espontáneo (SP), los de polarización inducida (IP) y los de resistividad (R), que estudian los potenciales naturales en el suelo, las variaciones de tensión en función del tiempo y la resistencia eléctrica del suelo, respectivamente [3].

2.4. MÉTODO WENNER PARA LA MEDICIÓN DE RESISTIVIDAD

El método Wenner, denominado método eléctrico cuadripolar, es el método de medición de resistividad más habitual en los sondeos eléctricos verticales (SEV) en la ingeniería eléctrica y consiste en inducir una corriente eléctrica en el suelo a través de dos electrodos de corriente. La tensión se mide mediante un par de electrodos, también en superficie y a partir del valor de la corriente inyectada y la tensión medida se obtiene la resistividad aparente del subsuelo [10]. Numéricamente se dice que es la resistencia que hay cuando se inyecta una corriente en un cubo de 1 m^3 de caras opuestas (Figura 4).

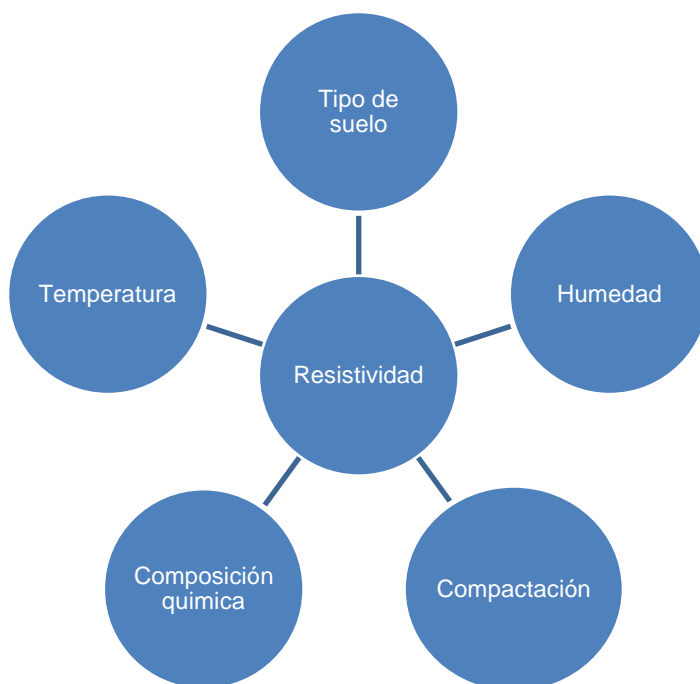
² Fuente: Favio casas Ospina, "Tierras, Soporte de la seguridad eléctrica", Quinta Edición.

Figura 4. Medición de la resistividad del suelo³.



La resistividad depende de los factores mostrados en la Figura 5.

Figura 5. Factores determinantes en la resistividad del suelo.

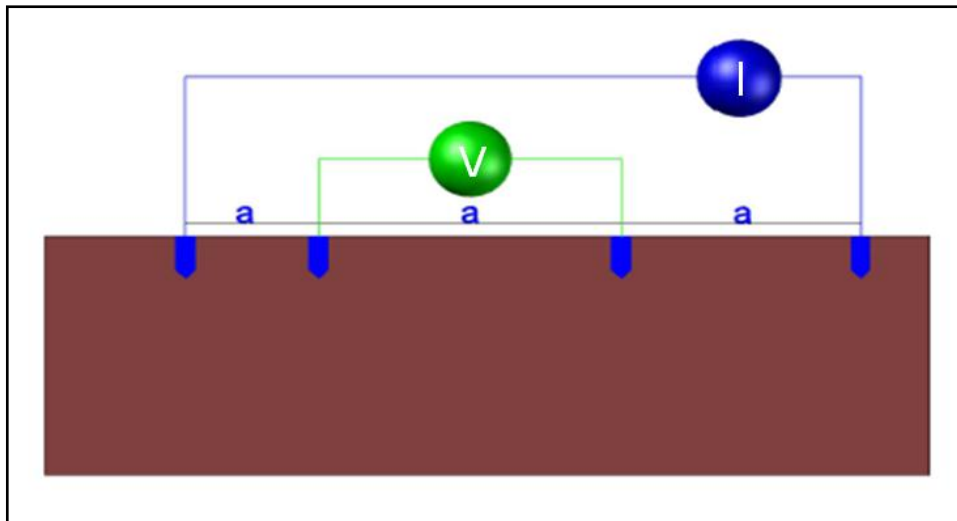


Fuente: Favio Casas, "Tierras, soporte de la seguridad eléctrica".

Estos métodos son comúnmente llamados sondeos eléctricos verticales (SEV). En los SEV generalmente se utilizan los arreglos de Schlumberger y Wenner, Figura 6, configuraciones con arreglo central Wenner. [8, 9,10].

³ Fuente: energytel.info,"Medición de resistencia de puesta tierra para protección de Sites de Telecom", artículos técnicos.

Figura 6. Configuración de electrodos para un SEV Según el método de WENNER



Fuente: Norma ANSI/IEEE Standard 81 IEEE, "Guide for measuring Earth Resistivity, Ground Impedance, and Earth Surface Potentials of a Grounding System", 2012.

2.5. SONDEOS ELÉCTRICOS VERTICALES 1D

La configuración más usada en prospección para uso en ingeniería eléctrica es el método Wenner, con separaciones iguales, el cual es recomendado en las normas internacionales. El modelo de suelo 1D es muy utilizado para la interpretación de datos de sondeos realizados en zonas de ambientes sedimentarios. En los años 80 se presentó una teoría que permite determinar el comportamiento del potencial eléctrico en un medio que se asume constituido por capas limitadas por superficies planas y paralelas a la superficie.

Como resultado del procesamiento e interpretación de la información de campo, se obtiene un modelo de capas aún si la geología al que se aplica el método es heterogénea. Aunque el modelo de capas es bastante simple, tiene la ventaja de ser en la práctica sencillo y rápido, pero requiere del conocimiento geológico para conseguir una interpretación acertada.

En el sector eléctrico se emplean muchos métodos, técnica y arreglos que muchas veces son utilizados inadecuadamente debido a que son aplicados a sectores con una geología compleja, obteniendo como resultado un modelo de capas inapropiado, entonces sería mejor emplear una tomografía 2D [1,3].

2.6. MODELOS PARA SUELOS HOMOGÉNEOS

Al realizar las mediciones de resistividad del suelo con ambos equipos de medición el telurómetro y SuperSting, se encuentran valores de resistividades, que en el caso de las tomografías en 2D se refieren como pseudo-secciones y para el telurómetro se refiere a resistividad aparente. La interpretación de las medidas obtenidas para el caso del telurómetro se fundamenta en modelos de resistividad uniforme propuestos por la Norma ANSI/IEEE Standard 81[9]. Las tomografías geoelectricas en 2D se basa en métodos iterativos donde se realiza la inversión con el programa Earth Imager 2D. Con base en el perfil de resistividad aparente del suelo encontrado con la inversión se realiza un informe donde se interpreta la tomografía geoelectrica y se determinan los materiales de los cuales está compuesto el suelo, está información es necesaria para los ingenieros diseñadores de sistemas puesta a tierra. Hay dos métodos clásicos propuestos por las normas ANSI/IEEE Standard 81 [9], utilizadas para encontrar el valor aproximado de la resistividad aparente del suelo, se describirán el modelo de resistividad uniforme y la metodología transformación Box-Cox.

2.6.1. Modelo de resistividad uniforme

También llamado modelo homogéneo, en este caso el suelo es considerado como homogéneo con un valor de resistividad constante con la variación de la profundidad [16]. La resistividad aproximada del suelo homogéneo se puede obtener tomando un promedio aritmético de las resistividades aparentes medidas como se muestra en la ecuación (2).

$$\rho_a(\text{prom1}) = \frac{\rho_a(1) + \rho_a(2) + \rho_a(3) + \dots + \rho_a(n)}{n} \quad (2)$$

En donde

$$\rho_a(1) + \rho_a(2) + \rho_a(3) + \dots + \rho_a(n)$$

son las medidas de resistividad aparente obtenidas a diferentes espaciamientos en el método de los cuatro electrodos. En $\Omega * m$, n es el número total de medidas.

La mayoría de los suelos no se encuentran de acuerdo con el criterio de la ecuación anterior por otro lado. Las ecuaciones de tensiones de paso y contacto de la norma se basan en modelos de suelos homogéneos, siendo posible aproximar un suelo no homogéneo a un suelo homogéneo, con la ecuación (3).

$$\rho_a(\text{prom2}) = \frac{\rho_a(\text{máx}) + \rho_a(\text{min})}{2} \quad (3)$$

En donde:

$\rho_a(\text{máx})$: Valor máximo de resistividad aparente en $\Omega * m$

$\rho_a(\text{min})$: Valor mínimo de resistividad aparente en $\Omega * m$

2.6.2. Metodología transformación Box-Cox

Para calcular el valor de la resistividad del suelo necesario para el diseño de un SPT existen métodos donde se asume que el suelo es de una sola capa o de n capas. Se considera que el modelamiento del suelo es homogéneo cuando los diversos valores medidos no difieren en más de un 30% del valor máximo. Cuando se aplica el método unicapa, se asume que el suelo es homogéneo y por tanto que se requiere un único valor de resistividad. En este caso la metodología Box-Cox es aplicable porque permite calcular un solo valor de resistividad con una probabilidad del 70%. Este modelo estadístico se propone en la Norma ANSI/IEEE 80 [17,18].

Para el cálculo de este parámetro se emplea el método probabilístico transformación de Box-Cox, para lo cual se tomará una probabilidad del 70% como aceptable para la asignación de la resistividad a partir del ajuste de distribución normal.

A continuación se siguen los pasos para calcular el valor de la resistividad aparente del suelo para un diseño de SPT.

- ❖ Se halla el promedio de la resistividad aparente X_p .
- ❖ Se tabulan los datos de resistividad aparente medida ρ_i .
- ❖ Una columna indica los logaritmos naturales de cada una de las medidas.

$$X_i = \text{Ln}\rho_i \quad (4)$$

❖ Se calcula la resistividad promedio \bar{X} como:

$$\bar{X} = \sum_{i=1}^{i=n} \frac{(X_i - \bar{X})^2}{n} \quad (5)$$

❖ En otra columna se coloca el resultado de $(X_i - \bar{X})^2$.

❖ Se calcula la desviación estándar S como:

$$S = \sqrt{\sum_{i=1}^{i=n} \frac{(X_i - \bar{X})^2}{n}} \quad (6)$$

❖ Se halla la distribución normal Z para 70% de 0.524400513.

❖ Se determina la resistividad con probabilidad del 70% de no ser superada.

$$\rho = \text{AntiLn}(S * Z + \bar{X}) \quad (7)$$

2.7. TOMOGRAFÍA ELÉCTRICA 2D

Actualmente las tomografías eléctricas en 2D son muy poco implementadas en estudios geoelectricos de la resistividad del suelo [1,3]. Sin embargo debido a la complejidad de algunos suelos se requiere un análisis más detallado y preciso sobre la estructura del suelo.

Estas nuevas técnicas se emplean para estudios geoelectricos y también se tiene una gran variedad de aplicaciones como son:

- ❖ Exploración de minerales metálicos y no metálicos.
- ❖ Localización de acuíferos.
- ❖ Mapeo en áreas de moderada complejidad geológica.

En las tomografías geoelectricas, ya obtenidos los datos se describe el procedimiento para la obtención de un modelo de distribución probable de resistividades, que represente la forma geométrica en que se encuentran los valores de resistividades en el suelo [21].

2.7.1. Cálculo de la resistividad del suelo con el tomógrafo

Se inicia con un modelo homogéneo para la inversión de la pseudo-sección. El procedimiento empieza tomando el promedio de los logaritmos de las resistividades medidas en campo, luego se calcula el vector discrepancia entre los datos tomados en campo y la respuesta del modelo [21].

- ❖ Se calcula la matriz jacobiana y se determina la solución de la ecuación (8).

- ❖ El factor de amortiguamiento se selecciona según el nivel de perturbación de los datos tomados. Generalmente se toma un máximo valor para la primera iteración ($\lambda = 0,2$) y se disminuye en las siguientes, hasta un valor mínimo de ($\lambda = 0,04$).

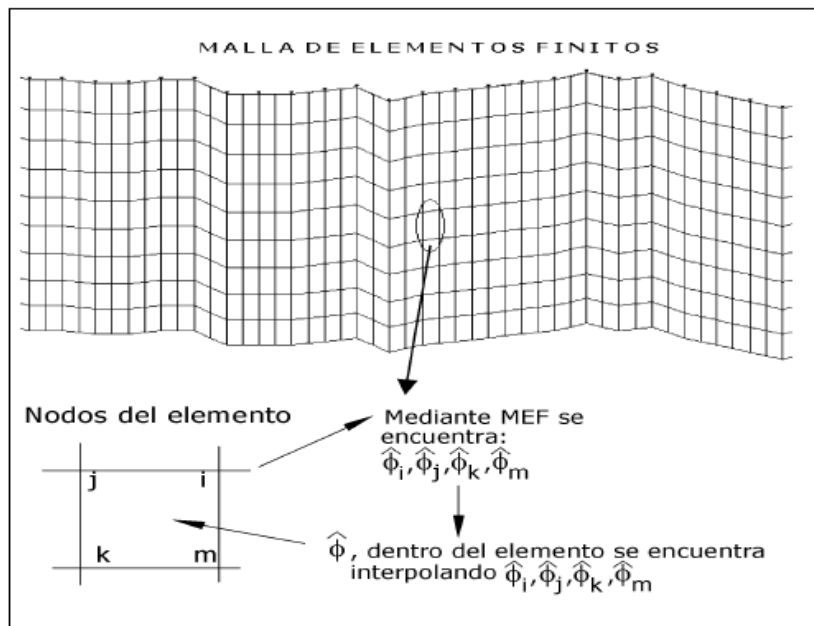
- ❖ El nuevo juego de parámetros resulta de sumar el vector ΔP al modelo inicial.

- ❖ El procedimiento se repite cinco veces. Para controlar la convergencia del proceso se toma como índice el error mínimo cuadrático (EMC). Se aceptan resultados con $EMC < 10\%$.

La malla de elementos finitos de la Figura 7 está compuesta por cuadrículas y sus límites se aproximan al valor del potencial cero, se considera cuatro columnas de elementos adicionales a lado y lado de la pseudo-sección de resistividades y cuatro filas adicionales para los límites inferiores, luego el programa une la red de elementos con la red de parámetros que se utiliza en el proceso de inversión [21].

La respuesta se observa con la pseudo-sección de resistividades resultante del procedimiento de inversión [21].

Figura 7. Malla de elementos finitos.



Fuente: Modelación del problema inverso en geoelectrica 2D mediante elementos finitos.

2.7.2. Procedimiento de inversión

Se calcula la respuesta eléctrica del modelo y se realiza un proceso de inversión de datos, en el cual la respuesta eléctrica calculada se relacione con la respuesta eléctrica obtenida en campo, para obtener una matriz correctora del modelo inicial (parámetros iniciales). La ecuación (8) se utiliza como ecuación de recurrencia en el proceso de inversión [3,21].

$$(\mathbf{J}^T \mathbf{J} + \lambda \mathbf{C}^T \mathbf{C}) \Delta \mathbf{P} = \mathbf{J}^T \Delta \mathbf{g} \quad (8)$$

$\Delta \mathbf{g}$: Es el vector discrepancia que contiene las diferencias logarítmicas entre los valores de resistividad aparente medidos y los calculados.

\mathbf{J} : Matriz jacobiana que contiene las derivadas parciales de la resistividad del bloque respecto a los demás.

$\Delta \mathbf{P}$: Vector corrección de los parámetros del modelo.

\mathbf{C} : Crea un efecto de aplanamiento 2D para restringir la suavidad de los parámetros del modelo a un valor constante.

λ : Factor de amortiguamiento.

Cada vez que sea utilizada la ecuación (8), se obtiene una matriz columna ΔP correctora de los parámetros iniciales que servirá para la obtención de un nuevo modelo.

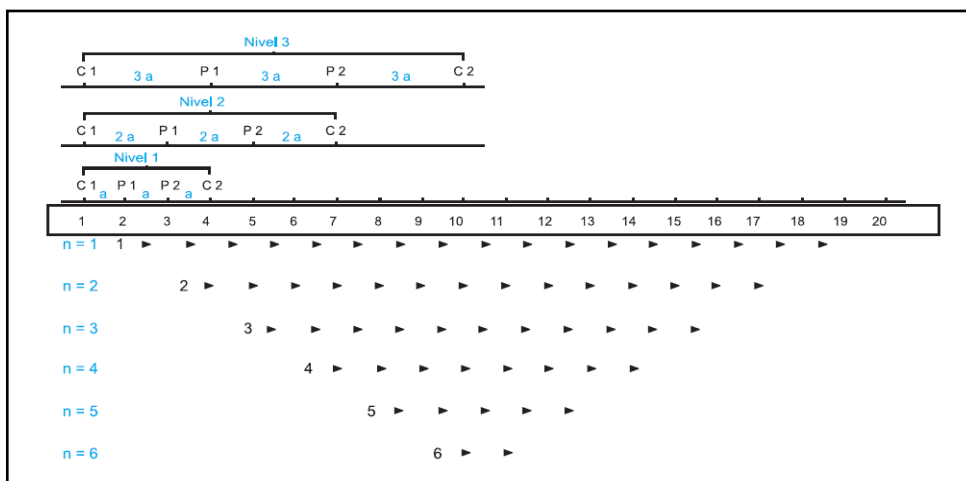
$$P_{i+1} = P_i + \Delta p \quad (9)$$

Los valores de resistividad del nuevo modelo de bloques se encuentran utilizando la ecuación (9).

2.7.3. Medidas de resistividades con tomógrafo

Para las mediciones realizadas en campo con el tomógrafo generalmente se sitúan al mismo tiempo un gran número de electrodos en el suelo con una alineación horizontal como se muestra en la Figura 8, conectado a un multicable el cual a su vez está unido a un resistímetro y un selector de electrodos. En la práctica se extiende una línea de más de 24 electrodos que son seleccionados de cuatro en cuatro por el equipo de campo (resistímetro). De esta manera se obtiene un gran número de puntos de resistividades aparentes [1, 2,14].

Figura 8. Secuencia de medidas en tomografía eléctrica.



Fuente: Félix Humberto Montaña Mejía, "Aplicación de métodos eléctricos de prospección geofísica", Revista CIER N° 53 - 2009.

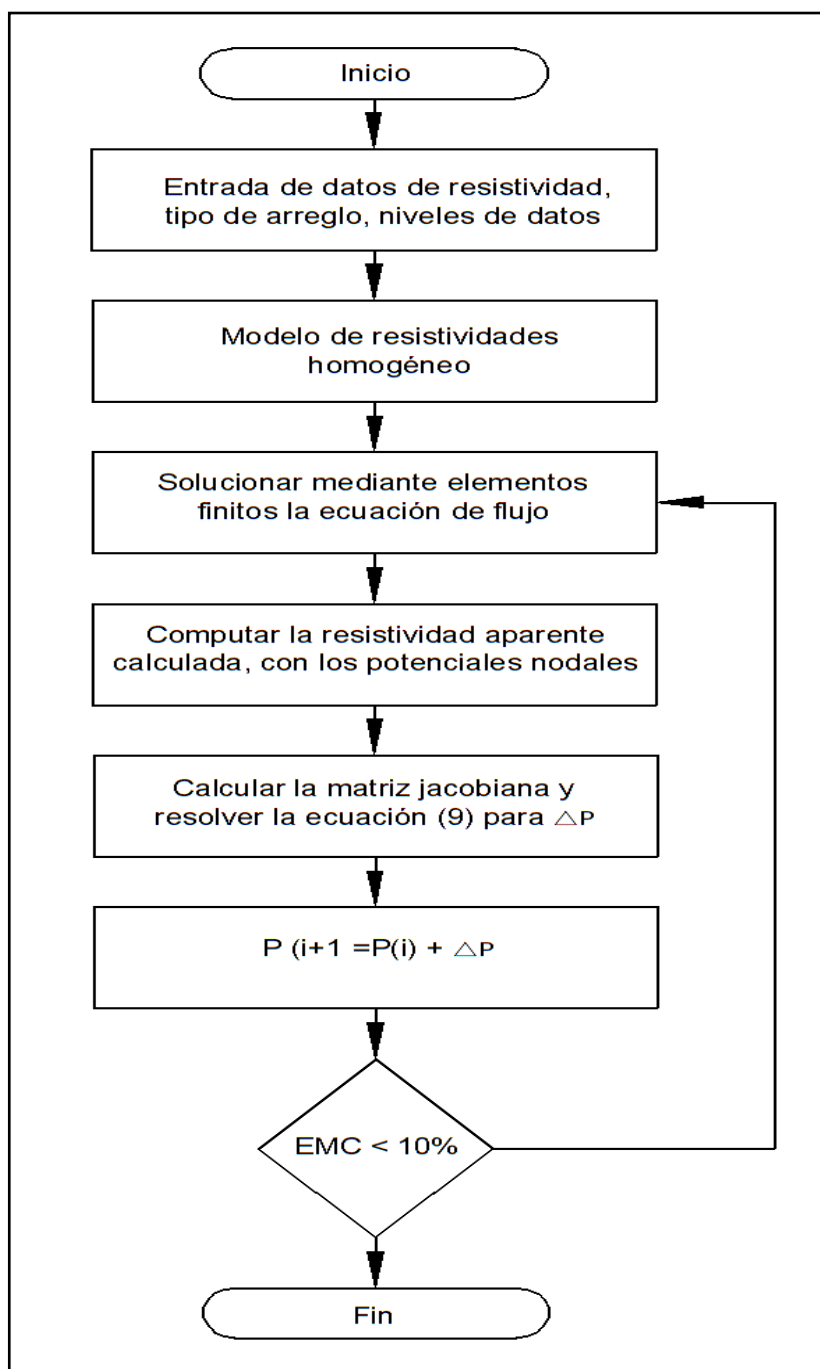
2.7.4. Programa de computador

Earth Imager 2D es un programa que permite el análisis de datos geoelectricas tomados en dos dimensiones o tomografía de resistividades eléctricas siguiendo el algoritmo de inversión mostrado en la Figura 9, cuando se emplean en campo los arreglos Wenner-Schlumberger, Wenner o Dipolo-dipolo [21].

El programa lee de un archivo de texto el valor de resistividad aparente tomado en cada lectura horizontal para cada nivel de datos, luego aproxima la profundidad de interés y efectúa una interpolación de los valores de resistividad. La malla de elementos finitos mostrada en la Figura 7 se genera automáticamente; también se establecen unas dimensiones a la red y los elementos se construyen de forma tal que puedan ser contenidos por el modelo de bloques [21].

La malla está conformada por una red de elementos cuadrilaterales, y se consideran sus límites hasta donde aproximadamente el valor del potencial sea cero. Para efectos de modelado, el programa vincula la red de elementos con la red de parámetros o “bloques” que se utiliza en el proceso de inversión Figura 9. Iterativamente se puede observar la respuesta eléctrica del modelo, y la pseudo-sección de resistividades resultante del proceso de inversión. Se aprecia la convergencia del modelo cuando la pseudo-sección de resistividades calculadas se acerca a la tomada en campo, y el error medio cuadrático es menor al 10%.

Figura 9. Algoritmo de inversión.

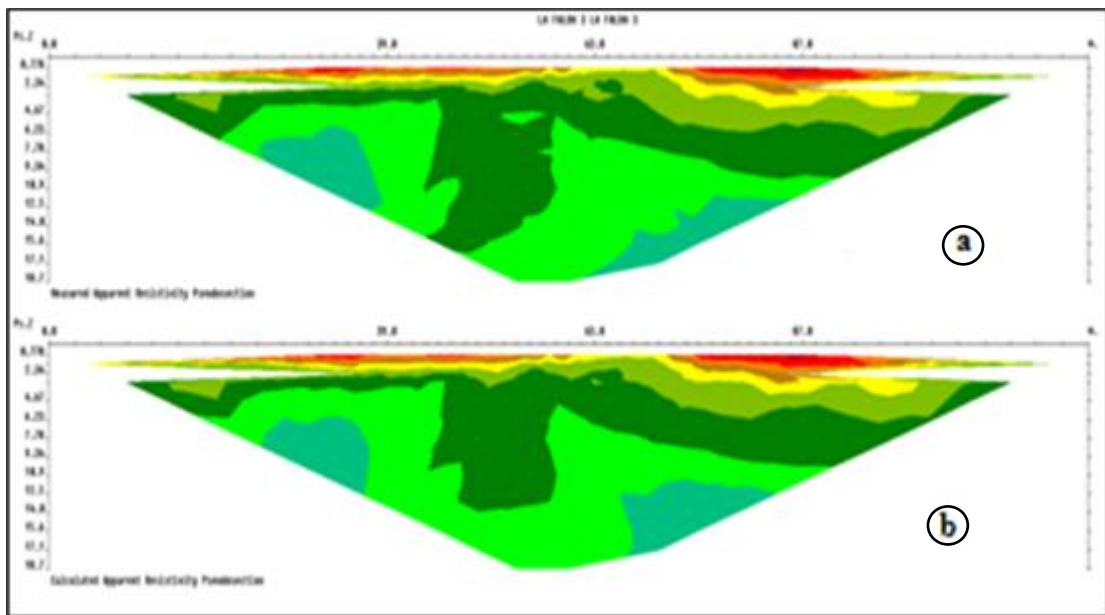


Fuente: Luis Alberto & Pedro Mauricio, "Modelación del problema inverso geoelectrica 2D mediante elementos finitos".

2.7.5. Pseudo-secciones de las resistividades aparentes del suelo

La pseudo-sección da una idea aproximada de la distribución de resistividad del subsuelo. Sin embargo, se obtiene una visión deformada del subsuelo, porque la forma de los contornos depende del tipo de arreglo o configuración electrónica utilizada, así como también de la resistividad del subsuelo [1]. En la Figura 10a y Figura 10b, se muestran las pseudo secciones con arreglo WENNER.

Figura 10. Pseudo-secciones con arreglo Wenner.



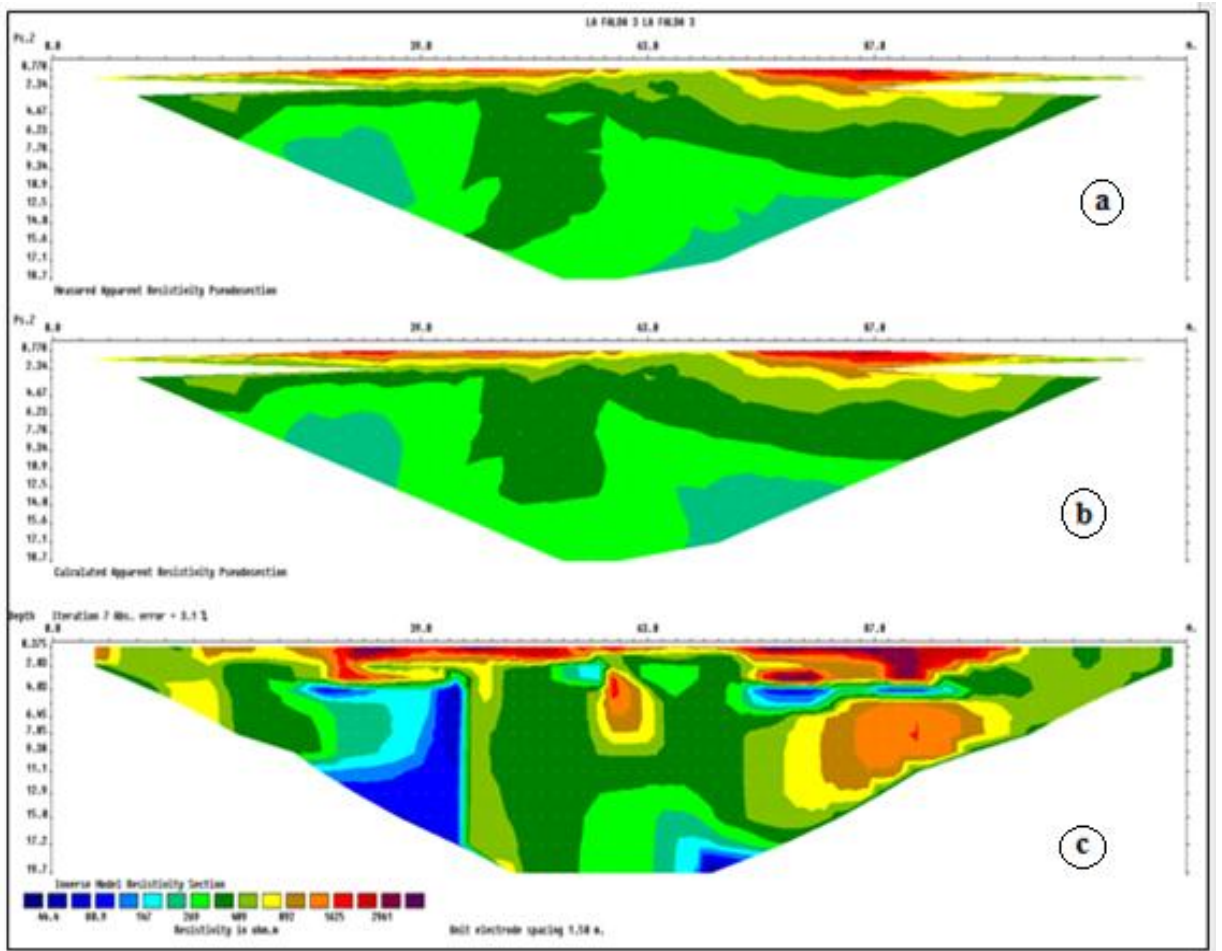
Fuente: Geotecnología S.A.S.

2.7.6. Inversión de las pseudo-secciones

Con los datos obtenidos de las mediciones el resultado es una pseudo-sección. Por ejemplo como la que se muestra en la Figura 11.a y Figura 11.b con las resistividades aparentes del subsuelo, sin embargo, esta misma no representa las resistividades reales de la sección del suelo como se citó anteriormente.

El equipo de medida emplea un software como herramienta para realizar la inversión de la pseudo-sección de resistividades aparentes y obtener el mapa de contornos como se observa en la Figura 11.c.

Figura 11. Mapa de contornos de las resistividades del suelo.



Fuente: Geotecnología S.A.S.

3. ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DE LOS EQUIPOS UTILIZADOS

A continuación se presentan las especificaciones técnicas de los equipos utilizados para la obtención de los datos, así como el procedimiento de instalación y el procesamiento de la información obtenida en cada uno de ellos.

3.1. EQUIPO DE TOMOGRAFÍA SUPERSTING

Es un dispositivo medidor de resistividad, de finas especificaciones y una sensibilidad de medición alta para los estándares del mercado. Funciona como dispositivo multielectrónico, de ocho canales, es decir, un gran número de electrodos van unidos al sistema, y por cada inyección de corriente la diferencia de potencial se medirá en 8 electrodos a la vez, acelerando el proceso de medición [28].

Permite hacer mediciones usando cualquiera de los arreglos de electrodos antes descritos y genera imágenes en dos dimensiones de la resistividad del subsuelo y con ello interpola su estructura.

El equipo cuenta con el software Earth Imager 2D que permite programar el arreglo de electrodos a usar, y posibilita la inversión de los resultados de campo para la obtención de imágenes de resistividad verdadera.

Cuenta con un sistema de conmutación automático que facilita la ejecución de levantamientos, pues simplemente se programa en Earth Imager 2D el tipo de ensayo que se planea ejecutar, y mediante un dispositivo Android vía Wi-Fi se envía el archivo al SuperSting que lo ejecuta y recoge los datos [29].

El equipo puede observarse en la Figura 12 y consta de:

- ❖ Electrodo: 56 electrodos a los que se sujetarán el cable de electrodos.
- ❖ Cable: 8 cables numerados de 90 metros cada uno, con electrodos cada 10 metros y conectores en las puntas.
- ❖ Switch box: Es la caja de conmutación que selecciona automáticamente cuáles electrodos serán usados como emisores y cuáles como receptores. A ella se conectan los cables.
- ❖ SuperSting: El medidor de resistividad en el cual va conectada la batería y la Switch box.

- ❖ Batería de 12 [V]: Es la fuente de alimentación de todo el sistema.
- ❖ Dispositivo Android: Permite manejar de manera remota el Supersting y enviar y recoger archivos de éste.

Figura 12. Equipo medidor de resistividad Supersting.



Fuente: Manual de instrucción Supersting.

3.1.1. Técnica de medición supersting

Es fundamental definir:

- ❖ La delimitación de los objetivos perseguidos, y a partir de ellos, la ubicación y cantidad de mediciones a ejecutar.
- ❖ La profundidad de interés requerida: la profundidad alcanzada será en promedio una quinta parte de la longitud del arreglo de electrodos, debido a que la resolución de la imagen de resistividad disminuye con la profundidad. Depende también del arreglo usado.

❖ El arreglo electródico a usar: Será escogido en función de las necesidades del proyecto y es recomendable para problemas ingenieriles que la separación entre electrodos no pase de 10 m [30].

3.1.2. Instalación del dispositivo y toma de datos

En campo se traza el alineamiento y se clavan los electrodos con el espaciamiento predefinido, se extienden los cables según su numeración y se aseguran a los electrodos. Los electrodos deben estar lo suficientemente enterradas para garantizar buen contacto con el suelo [29].

Se conectan los cables al conmutador Swicht box, éste al SuperSting y éste a la batería. Se ubica la señalización de advertencia de alta tensión y se revisa que la línea de medición esté despejada.

Con el dispositivo Android, se transfiere por vía Wi-Fi al SuperSting el archivo de comando que indica al conmutador qué tipo de arreglo que usará y el orden en que se intercambiarán los electrodos [29]. Se hace la verificación de que todas las conexiones estén funcionando correctamente y se inicia la medición.

Una vez finalizado el proceso de medición se transfieren los resultados al dispositivo Android, de donde se pueden enviar a un ordenador y realizar la inversión de los datos.

3.1.3. Pseudo-secciones y resultados

El resultado de la medición es una pseudo-sección que representa resistividades aparentes del subsuelo; sin embargo, esta misma no representa las resistividades reales de la sección y se entiende como una vista distorsionada del subsuelo, pues los contornos se verán altamente influenciados por el tipo de arreglo usado. La aplicación del dispositivo Android para el SuperSting permite ver inmediatamente la pseudo-sección de una medición. Es una equivocación común asumir la pseudo-sección como una imagen final de la resistividad del subsuelo [1].

3.1.4. Procesado, inversión e interpretación de las tomografías

El SuperSting presenta el software Earth Imager 2D como herramienta para realizar la inversión de la pseudo-sección de resistividades aparentes y obtener el mapa de resistividades reales o tomograma.

Las técnicas de inversión consisten en procesos iterativos para encontrar el modelo de resistividades reales que generaría una pseudo-sección de resistividades aparentes como la medida en campo.

Existen varios métodos de inversión, Earth Imager 2D ofrece la oportunidad de elegir entre cuatro:

- ❖ Forward Modeling Only, produce una sección de resistividad aparente a partir del modelo de resistividad inicial [29].
- ❖ Damped Least Squares, es un método rápido, pero ofrece una sección irregular y aproximada, debido a su falta de restricciones de rugosidad [29].
- ❖ Smooth Model Inversion, es un método estable y seguro, es recomendado para todo tipo de datos [29].
- ❖ Robust Inversión, tiene buen desempeño en datos con ruido, y determina con efectividad los límites de resistividad [29].

Tras obtener la imagen de resistividades reales, sigue el proceso de interpretación, que consiste en analizar las variaciones de resistividad y asociarlas con los materiales correspondientes a esos valores de resistividad. Sin embargo, debido a que la presencia de agua puede afectar considerablemente la resistividad de un elemento y a la amplia variación de resistividades en un mismo material es necesario conocer previamente la geología del lugar o cotejar con sondeos u otro tipo de ensayos para corroborar la información de la distribución de resistividad.

3.2. TELURÓMETRO MARCA METREL MI-2088

El Telurómetro mostrado en la Figura 13 es un equipo específico altamente profesional, multifuncional y portátil diseñado para realizar mediciones en SPT, tales como el valor de la resistencia de puesta a tierra, la resistividad del suelo, tensión y corriente de tierra.

Figura 13. Telurómetro marca Metrel mi2088.



Fuente: Manual del usuario Metrel mi2088.

Está equipado con los accesorios necesarios para facilitar las mediciones como se puede observar en la Figura 14. Está protegido en una valija liviana, con separadores de los accesorios.

Las partes electrónicas del instrumento están producidas con Tecnología SMD, las que prácticamente no demandan intervención de servicio [20]. El diseño del display de LCD con iluminación posterior ofrece una lectura fácil, así como una amplia variedad de resultados parciales, parámetros y mensajes.

El equipo consta de:

- ❖ Telurómetro marca Metrel MI-2088
- ❖ Conexión de cable de prueba universal 2 x 1,5 m.
- ❖ Funda de transporte.
- ❖ Cable RS232.
- ❖ Puntas de prueba, 2 unidades (rojo, negro).
- ❖ Cocodrilo.
- ❖ Manual de instrucciones.
- ❖ Manual técnico en CD.
- ❖ Kit de tierras, 50 m (kit de cables de tierra, picas de tierra, 4 unidades, funda de transporte).
- ❖ Tamaño: 265 x 110 x 185 mm, Peso (sin accesorios): 1,7 kg.

Figura 14. Equipos utilizados para las medidas con el telurómetro.

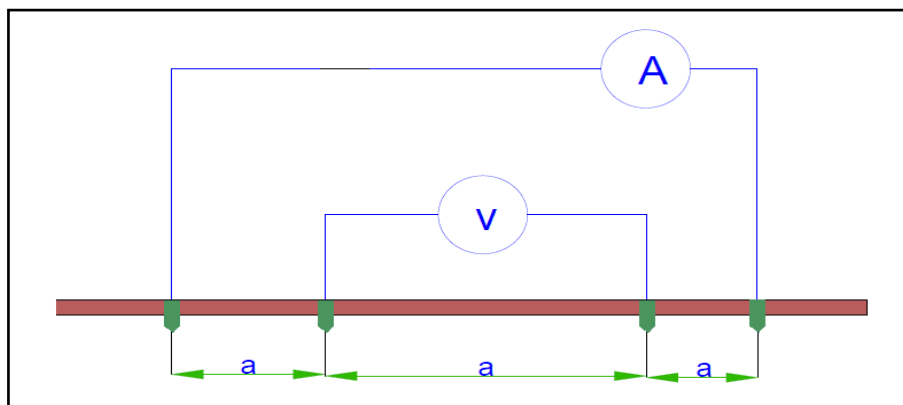


Fuente: <http://www.metrel.es/productos>

3.2.1. Técnica de medición telurómetro

La medición se lleva a cabo de forma previa para asegurar el cálculo correcto y preciso de la puesta a tierra de todo tipo de instalación. La resistividad de tierra se expresa en $[\Omega m]$ y su valor absoluto depende de la estructura del material del suelo. El principio de medida se presenta en la Figura 15.

Figura 15. Configuración manual del Metrel 2003.



Fuente: Manual de usuario Metrel mi2088.

Donde:

a: Distancia entre electrodos.

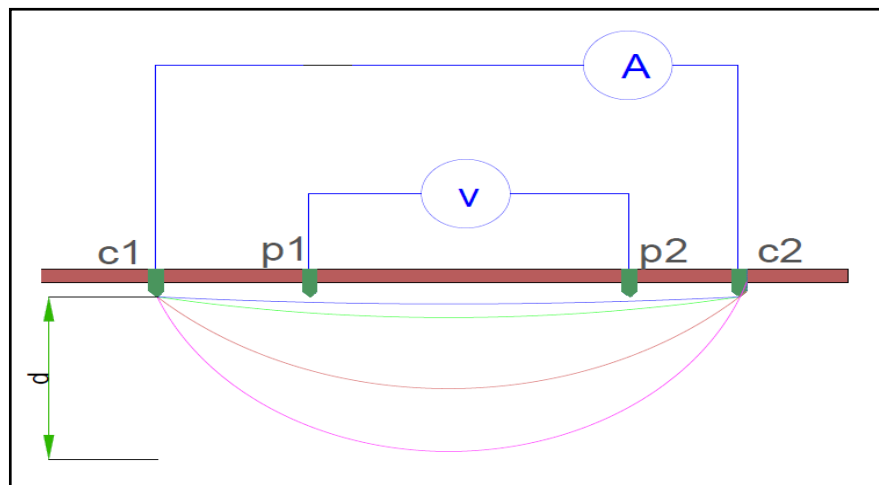
V: Tensión entre los electrodos medida en el voltímetro.

A: Corriente de prueba entregada por el generador y medida en el amperímetro.

El arreglo de la figura 15 es llamado método WENNER se utiliza para la obtención de la resistividad aparente de la sección del subsuelo. Es un arreglo de electrodos, que incluye dos emisores C1, C2 y dos receptores P1, P2, indicados en la Figura 16. Los emisores inyectan la corriente I y los receptores miden la diferencia de tensión ΔV . La ecuación resultante de estas medidas para obtener la resistividad es la siguiente: Ecuación de Resistividad $\rho_a = 2\pi a * (\Delta V/I)$. La medición se inicia con una separación constante entre electrodos, y se va variando la distancia entre los pares de electrodos emisor-receptor.

La ecuación de resistividad es válida si los electrodos de prueba se clavan en el suelo a una profundidad de 10 cm máximo. La prueba se realiza en distintas direcciones (90° y 180° con respecto a la primera medición) y el resultado final es el valor medio entre ellos. Se utiliza distintas distancias entre los electrodos de prueba como 2m, 4m, 6m, 8m, etc, para medir el material a distintas profundidades o capas. (Siempre mide la resistividad en el centro de la medida ubicado entre los dos electrodos interiores) de forma que entre mayor sea la distancia entre los electrodos mayor es la distancia alcanzada en profundidad.

Figura 16. Influencia de la distancia “a” en la profundidad “d”.



Fuente: Manual de usuario Metrel mi2088.

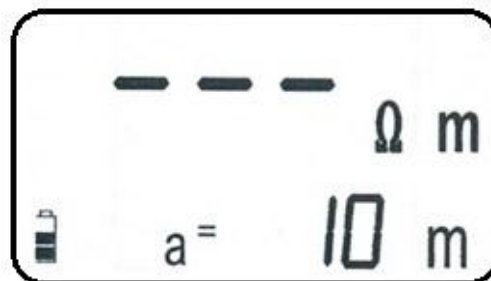
La distancia que alcanza en profundidad es aproximada en $0.75 * a$ la distancia entre los electrodos. La medición de la resistividad da una visión global de la estructura del suelo. En la Figura 1 se da una indicación orientativa de los valores de resistividad de algunos materiales comunes del suelo.

El telurómetro se conecta con los electrodos introducidos en la tierra por medio de los cables de comprobación. Los electrodos deberán repartirse en línea recta, con una distancia "a" entre ellos (primero se coloca el cable negro, a continuación deberán conectarse el cable verde, después el rojo y por último el azul). Ahora podrá poner a funcionar el telurómetro. Para este caso se medirá la resistividad de tierra para determinar los parámetros del sistema de puesta a tierra.

Paso 1

- ❖ Encender (ON / OFF)
- ❖ Llevar el selector de función a la posición ρ earth
- ❖ Oprimir "select".

Figura 17. Menú inicial de resistividad de tierra.



Fuente: Manual del usuario Metrel.

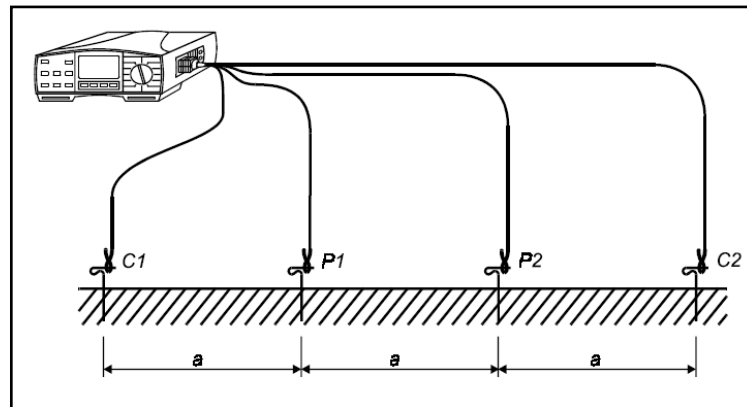
Paso 2

- ❖ Introducir el valor de "a" como muestra la Figura 17.
a: indica la distancia entre los electrodos de medición (La distancia debe ser igual a la usada en la medición práctica, de lo contrario el resultado no será correcto).
- ❖ Después de introducir la distancia "a" entre los electrodos de medición se oprime "select" para ir al Menú inicial de Resistividad de Tierra.

Paso 3

- ❖ Conectar los cables de prueba al instrumento y a los electrodos de medición como en la Figura 18.

Figura 18. Medición práctica de la resistividad del suelo.



Fuente: manual del usuario Metrel.

- ❖ Oprimir "start".
- ❖ Registrar el valor arrojado por el instrumento en una tabla previamente elaborada.
- ❖ Oprimir nuevamente start, esta vez para introducir una distancia "a" mayor a la anterior. Repetir los pasos anteriores hasta la distancias requeridas.
- ❖ Por ultimo oprimir off.

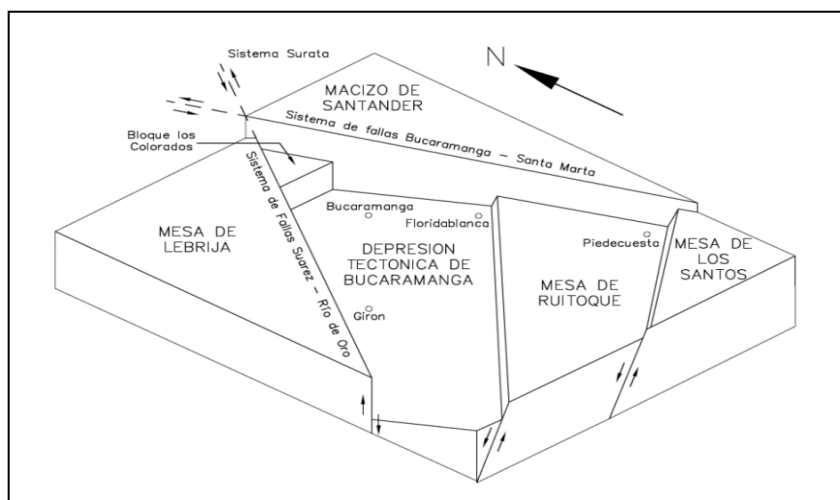
4. GEOLOGÍA Y GEOMORFOLOGÍA

Para obtener una mejor interpretación de los métodos geofísicos empleados para este estudio y a su vez conseguir un adecuado modelo de la estratigrafía del subsuelo, es necesario conocer la geología y la geomorfología del área de estudio tanto a escala regional como a escala local.

4.1. GEOLOGÍA REGIONAL

La zona donde se encuentra localizada el Área Metropolitana de Bucaramanga corresponde a una región geológicamente compleja enmarcada en una morfología triangular como se observa en la Figura 19, entre el Macizo de Santander, la Mesa de Lebrija y la Mesa de Los Santos.

Figura 19. Diagrama de bloques tectónicos en el área de Bucaramanga.



Fuente: Aura Niño y Guillermo Vargas, "Modelo de evolución para el abanico de Bucaramanga".

El Macizo de Santander está compuesto principalmente por rocas ígneas y metamórficas, mientras que las Mesas de Lebrija, Ruitoque y Los Santos están conformadas por rocas sedimentarias. La terraza de Bucaramanga es un depósito aluvial de edad Cuaternario que se encuentra en una depresión tectónica limitada por los Sistemas de Fallas de Bucaramanga y del Suárez.

Los materiales que constituyen esta terraza corresponden a la denominada Formación Bucaramanga. Los procesos de degradación y acumulación de estos materiales han generado morfologías en el paisaje de origen aluvial, denudacional y antropogénico.

4.1.1. Estratigrafía regional

La litología predominante a nivel regional en la zona de estudio corresponde principalmente a la Formación Bucaramanga que es un depósito aluvial con un área aproximada de 130 [km²] sobre el cual se encuentra la mayor parte del sector urbano del Área Metropolitana de la ciudad. Esta unidad va desde el contacto con el Macizo ígneo-metamórfico de Santander al Este, hasta las laderas de la zona urbana de Girón al Oeste. Hacia el Sur se extiende hasta el pie de la Mesa de Ruitoque y al Norte hasta el barrio Los Colorados. El espesor del depósito alcanza profundidades superiores a 300 metros.

La Formación Bucaramanga está dividida en los siguientes segmentos desde el más superior al más inferior: segmento limos rojos, segmento gravoso, segmento finos y segmento órganos.

La zona donde se encuentra el sitio de estudio se localiza estratigráficamente sobre el segmento limos rojos que está constituido por arenas, arcillas gravosas y limos de color amarillo rojizo con esporádicos bloques grandes angulares de areniscas asociados superficialmente a este nivel. El segmento gravoso se encuentra por debajo del segmento limos rojos y está conformado por un nivel superior de cantos de areniscas conglomeráticas silíceas, amarillas y blancas, muy compactas y redondeadas dentro de una matriz clara arenosa amarillenta, y un nivel inferior de cantos de areniscas de grano fino a grueso y guijos de cuarzo lechoso embebidos en una matriz abigarrada rojiza.

4.1.2. Geología estructural regional

El área de influencia del sitio en estudio se encuentra enmarcada tectónicamente entre dos grandes estructuras regionales que son el Sistema de Fallas de Bucaramanga al Este y el Sistema de Fallas del Suárez al Oeste, los cuales conforman una cuña donde se depositó la Formación Bucaramanga en el Cuaternario.

Geográficamente el sector estudiado se localiza aproximadamente a 1,5 km al Oeste del trazado principal del Sistema de Fallas de Bucaramanga, al noreste de la ciudad de Bucaramanga.

4.1.3. Geomorfología regional

En gran extensión la geoforma sobresaliente corresponde a laderas denudacionales de baja pendiente conformadas por materiales del segmento limos rojos de la Formación Bucaramanga, las cuales se encuentran intervenidas antropogénicamente casi en su totalidad. En contraste a estas pendientes bajas se reconocen laderas denudacionales con pendientes moderadas a altas constituidas por rocas sedimentarias, ígneas y metamórficas al este y oeste de la región de la meseta.

4.2. GEOLOGÍA LOCAL

La mayor parte de Bucaramanga y su zona central se han levantado sobre materiales del segmento limos rojos, haciendo parte actualmente de una geoforma antropogénica que constituye el sector urbano de la ciudad. Los eventos tectónicos asociados a los Sistemas de Fallas que enmarcan la meseta no han mostrado evidencias de afectación sobre estos depósitos recientes en el sector. Además, el sitio de interés se encuentra hacia el norte de la ciudad en donde la secuencia de depositación presenta su mayor espesor debido a que hacia el sur se va adelgazando.

4.2.1. Estratigrafía local

En el área de estudio se presentan suelos que constituyen materiales aluviales del segmento limos rojos de la Formación Bucaramanga, sobre los cuales se reconocen sectores conformados por algunos materiales de relleno.

Algunos estudios exploratorios llevados a cabo en este sector sugieren que los rellenos antropogénicos están compuestos por limos arenosos de color marrón oscuro y amarillo rojizo, con presencia de fragmentos de ladrillo, raíces y cemento. A su vez, el segmento limos rojos de la Formación Bucaramanga en esta zona está conformado por limos arenosos de color marrón y amarillo rojizo con presencia de gravas y niveles de guijarros dentro de una matriz areno limosa de color marrón amarillento; arcillas arenosas de color marrón amarillento claro, arenas limosas de color marrón claro,

amarillo rojizo y blanco rosáceo, y arenas arcillosas de color marrón amarillento pálido [24].

4.2.2. Geología estructural local

En la zona de interés no se muestran evidencias por incidencia de alguna falla geológica debido a que es un sector intervenido por el hombre y no hay presencia de afloramientos de rocas o características del suelo que permitan reconocer cierta afectación. Adicionalmente, la secuencia de depositación en la zona presenta el Segmento superior de la Formación Bucaramanga de manera uniforme.

4.2.3. Geomorfología local

Las formas del suelo en el sitio de estudio se caracterizan por modelar un paisaje de origen fluvial que es el abanico de Bucaramanga. Esta zona muestra una superficie plana a levemente inclinada que ha sido el resultado de los procesos de depositación de los materiales aluviales del limos rojos sobre los cuales se encuentran construcciones que hacen parte de las instalaciones de la Universidad Industrial de Santander (UIS), incluida dentro de una geoforma antropogénica que constituye la ciudadela universitaria antes mencionada dentro de la zona intervenida.

4.3. HIDROGEOLOGÍA

El abanico aluvial de Bucaramanga constituye un depósito del cuaternario que presenta una ligera inclinación de noreste a suroeste. Dentro de este se presentan acumulaciones de agua freática sobre lentes aislados de materiales con permeabilidad baja; sin embargo, los mantos superficiales de la Formación Bucaramanga son relativamente permeables y adicionalmente están afectados por cavernas de antiguos hormigueros; por esta razón, la infiltración de agua se desarrolla a nivel local, especialmente en áreas expuestas donde es aún mayor. Pero esta infiltración tiende a disminuir cuando el suelo es intervenido por el proceso de urbanización que provoca el endurecimiento de la superficie del suelo.

5. RESULTADOS

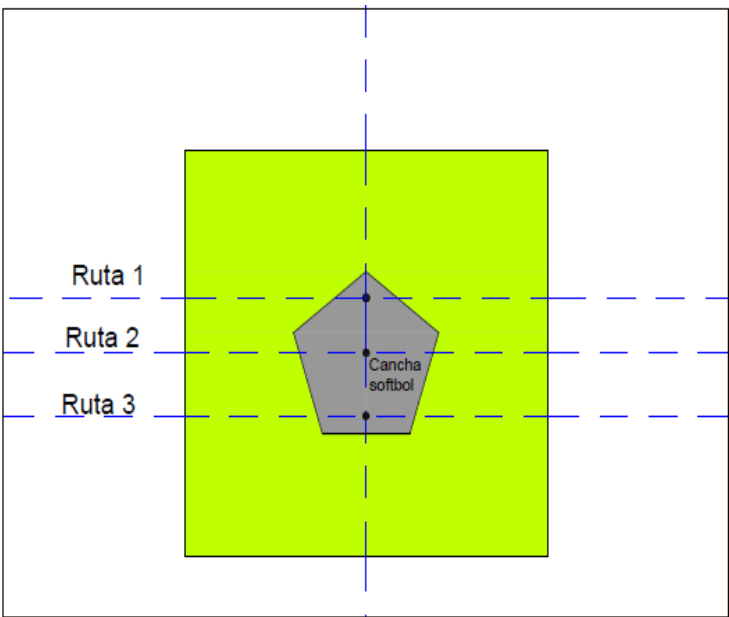
Para la realización de este estudio se midieron resistividades del suelo en dos sectores diferentes seleccionados por los autores de este informe, localizados en el área metropolitana de Bucaramanga, Carrera 27 con Calle 9 (UIS) y el conjunto residencial Menzuli Kilometro 10 autopista, como puede observarse en las Figuras 23, 30, 34. En cada sector se sacaron dos tomografías con el equipo supersting para un total de cuatro tomografías. Solo en la cancha de softbol se midió con el telurómetro trazando tres rutas sobre la línea tomográfica para comparar las medidas de resistividad que arroja el tomógrafo con respecto de las del telurómetro en este sitio.

5.1. CANCHA DE SOFTBOL UIS

5.1.1. Mediciones de resistividad del suelo con el telurómetro

Para las medidas de resistividad para este caso de estudio en el sitio conocido como la cancha de softbol se empleó el método WENNER con los cuatro electrodos para la medición de la resistividad del suelo con el telurómetro, a continuación se dan los precedentes del proceso a seguir.

Medida de campo con el telurómetro.

PROCEDIMIENTO PARA LA MEDIDA DE LA RESISTIVIDAD DE CAMPO TELURÓMETRO	
ITEM	PROCEDIMIENTO
LUGAR DE MEDIDA	En el formato de medida de resistividad del suelo diligenciar los datos correspondientes a las tres rutas propuestas, responsable de medida en campo, método empleado como se observa en la Tabla 1.
OBSERVACIONES DEL SUELO	<p>Observar el suelo. Hacer una apreciación de su tipo y su estado de acuerdo a las siguientes indicaciones.</p> <p>Tipo de suelo: suelo arcilloso, suelo arenoso, Limos rojos, grado de compactación, rocas. Este dato es resultado de la apreciación del encargado de la medida y no es un estudio formal geológico.</p> <p>Estado del suelo: seco o húmedo.</p>
UBICACIÓN DEL SITIO	<p>Ubicarse en el sitio de medida y trazar tres rutas las cuales se realizaran a diferentes profundidades. Se recomienda que estas sean perpendiculares entre sí, en caso que haya algún obstáculo y no se puede hacer las líneas perpendiculares se tiene que procurar un mayor ángulo posible entre estas. En la figura 20 se presenta las rutas seleccionadas.</p> <p align="center">Figura 20. Selección de rutas.</p>  <p>El diagrama muestra un rectángulo que representa el sitio de medición. En el centro hay un pentágono gris que representa la 'Cancha softbol'. Una línea vertical azul punteada atraviesa el centro del sitio y la cancha. Tres líneas horizontales azul punteadas, etiquetadas como 'Ruta 1', 'Ruta 2' y 'Ruta 3' desde arriba hacia abajo, cruzan el sitio y la cancha. Cada ruta tiene un punto negro en su intersección con la cancha.</p>

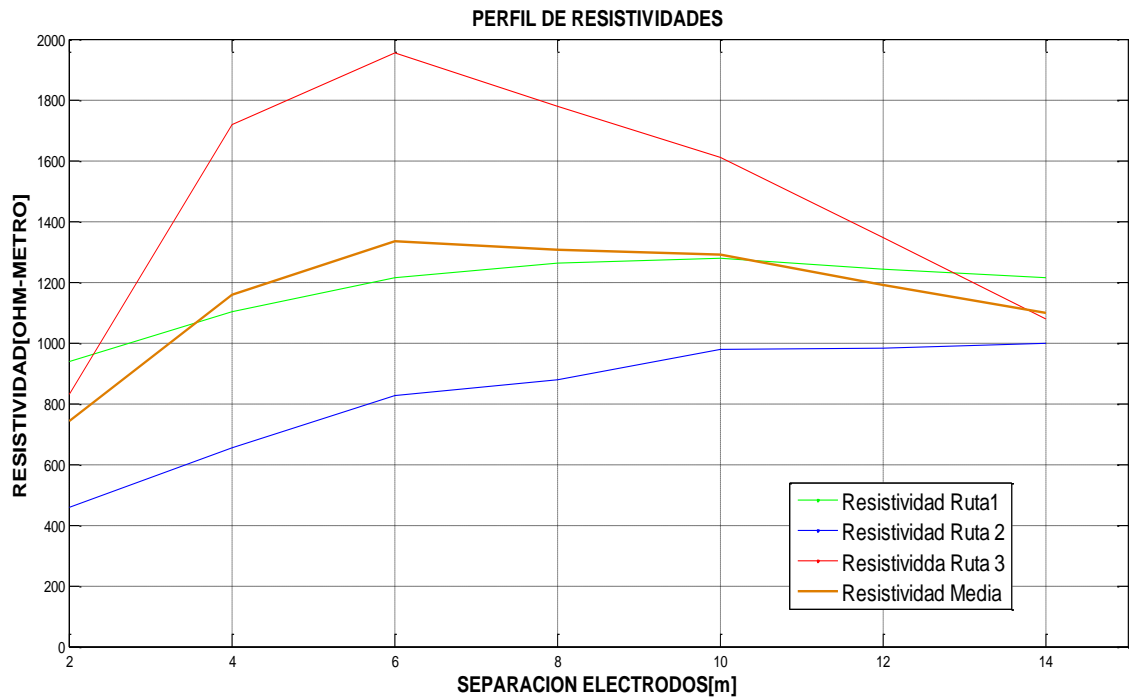
PROCEDIMIENTO PARA LA MEDIDA DE LA RESISTIVIDAD DE CAMPO TELUROMETRO	
ITEM	PROCEDIMIENTO
MEDIDA RUTA 1	<p>Se enterraron 4 electrodos a lo largo de la ruta 1 con una separación inicial de 2 metros (Figura 21), Luego 4 metros hasta alcanzar una separación de 14 metros entre electrodos.</p> <p>Este mismo procedimiento se empleó para hallar los valores de resistividades en la ruta 2 y ruta 3.</p> <p style="text-align: center;">Figura 21. Ubicación electrodos ruta 1.</p>  <p>El diagrama muestra una línea horizontal azul discontinua etiquetada como 'RUTA 1'. A lo largo de esta línea se encuentran cuatro electrodos, representados por cruces rojas. Entre los electrodos se muestran tres intervalos de distancia, cada uno etiquetado como '2 m' con líneas rojas y flechas azules. Esto indica una separación constante de 2 metros entre los electrodos.</p>
VALORES DE RESISTIVIDAD	<p>Con las mediciones realizadas para cada separación entre electrodos se halló el valor de resistividad a diferentes profundidad del suelo que corresponde a $0,75 \cdot a$, donde a es la separación entre electrodos. El mismo procedimiento se tuvo en cuenta para la ruta 2 y la ruta 3.</p> <p>En la tabla 1 a continuación se resumen las tres rutas propuestas en campo y los valores de resistividad hallados a distintas profundidad del suelo.</p>

Tabla 1. Valores de resistividad aparente con el telurómetro.

ESTUDIO DE RESISTIVIDADES DEL SUELO			
SITIO	Canchas SOFTBOL UIS	ESTADO DEL SUELO	Seco
CIUDAD	Bucaramanga, Santander	COLOR DEL SUELO	Rojizo
RESPONSABLES MEDIDAS	Daniel Torrado	MÉTODO DE MEDICIÓN	WENNER
	Carlos Montes		
Profundidad de exploración [m]	Separación entre electrodos[m]	Resistencia [Ω]	Resistividad[Ω .m]
Ruta1			
1,5	2	74,5	937
3	4	43,9	1102
4,5	6	32,2	1213
6	8	25,1	1262
7,5	10	20,3	1278
9	12	16,48	1242
10,5	14	13,8	1215
Ruta 2			
1,5	2	36,4	457
3	4	26,1	656
4,5	6	22	828
6	8	17,46	878
7,5	10	15,59	979
9	12	13,03	982
10,5	14	11,3	997
Ruta 3			
1,5	2	66,1	831
3	4	68,4	1720
4,5	6	51,9	1956
6	8	35,4	1780
7,5	10	25,6	1612
9	12	17,87	1348
10,5	14	12,25	1077

En la Figura 22 se observan las curvas de resistividades aparentes de las medidas en campo, para las tres rutas donde la de color rojo muestra resistividades altas, color verde resistividades medias y color azul resistividades bajas. Enseguida se realiza el promedio de las tres para obtener la curva de color marrón.

Figura 22. Curvas de resistividades aparentes.



5.1.2. Modelo suelo uniforme para el cálculo de la resistividad

Con la información obtenida de resistividades aparentes se analiza el suelo como una única estratigrafía a diferentes profundidades lo cual nos lleva a emplear el modelo de suelo uniforme para encontrar el valor aproximado de resistividad aparente del suelo. De acuerdo al modelo Box-Cox presentado en este trabajo basado en la norma ANSI/IEEE Standard 81 [9], se encuentra el valor de resistividad al 70% de probabilidad, se describirá el cálculo tipo de los datos hallados en campo. En la Tabla 2 se resumen los cálculos realizados.

**MODELO DE RESISTIVIDAD UNIFORME
MÉTODO ESTADISTICO BOX-COX
TELURÓMETRO**

ITEM	PROCEDIMIENTO																																
ANÁLISIS DATOS DE CAMPO	<p>Para tener la aproximación de la resistividad aparente del suelo se emplea el valor de resistividad promedio para cada profundidad de exploración de las tres rutas propuestas.</p> <table border="1" style="margin-left: auto; margin-right: auto; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th style="text-align: center;">Separación entre electrodos [m]</th> <th style="text-align: center;">Ruta 1. Resistividad [Ω.m]</th> <th style="text-align: center;">Ruta 2 Resistividad [Ω.m]</th> <th style="text-align: center;">Ruta 3 Resistividad [Ω.m]</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td style="text-align: center;">2</td><td style="text-align: center;">937</td><td style="text-align: center;">457</td><td style="text-align: center;">831</td></tr> <tr><td style="text-align: center;">4</td><td style="text-align: center;">1102</td><td style="text-align: center;">656</td><td style="text-align: center;">720</td></tr> <tr><td style="text-align: center;">6</td><td style="text-align: center;">1213</td><td style="text-align: center;">828</td><td style="text-align: center;">1956</td></tr> <tr><td style="text-align: center;">8</td><td style="text-align: center;">1262</td><td style="text-align: center;">878</td><td style="text-align: center;">1780</td></tr> <tr><td style="text-align: center;">10</td><td style="text-align: center;">1278</td><td style="text-align: center;">979</td><td style="text-align: center;">1612</td></tr> <tr><td style="text-align: center;">12</td><td style="text-align: center;">1242</td><td style="text-align: center;">982</td><td style="text-align: center;">1348</td></tr> <tr><td style="text-align: center;">14</td><td style="text-align: center;">1215</td><td style="text-align: center;">997</td><td style="text-align: center;">1077</td></tr> </tbody> </table>	Separación entre electrodos [m]	Ruta 1. Resistividad [Ω.m]	Ruta 2 Resistividad [Ω.m]	Ruta 3 Resistividad [Ω.m]	2	937	457	831	4	1102	656	720	6	1213	828	1956	8	1262	878	1780	10	1278	979	1612	12	1242	982	1348	14	1215	997	1077
Separación entre electrodos [m]	Ruta 1. Resistividad [Ω.m]	Ruta 2 Resistividad [Ω.m]	Ruta 3 Resistividad [Ω.m]																														
2	937	457	831																														
4	1102	656	720																														
6	1213	828	1956																														
8	1262	878	1780																														
10	1278	979	1612																														
12	1242	982	1348																														
14	1215	997	1077																														
VALORES PROMEDIO	<p>Calcular el promedio para cada separación entre electrodos se tiene la siguiente ecuación.</p> <p>Separación entre electrodos: 2 metros</p> <p>Ruta 1 : 937 [Ω.m]</p> <p>Ruta 2 : 457 [Ω.m]</p> <p>Ruta 3 : 831 [Ω.m]</p> $\bar{x} = \frac{937 + 457 + 831}{3} = 741,66$ <table border="1" style="margin-left: auto; margin-right: auto; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th style="text-align: center;">Separación entre electrodos[m]</th> <th style="text-align: center;">PROMEDIO[Ω.m]</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td style="text-align: center;">2</td><td style="text-align: center;">741,66</td></tr> <tr><td style="text-align: center;">4</td><td style="text-align: center;">1159,33</td></tr> <tr><td style="text-align: center;">6</td><td style="text-align: center;">1332,33</td></tr> <tr><td style="text-align: center;">8</td><td style="text-align: center;">1306,66</td></tr> <tr><td style="text-align: center;">10</td><td style="text-align: center;">1289,66</td></tr> <tr><td style="text-align: center;">12</td><td style="text-align: center;">1190,66</td></tr> <tr><td style="text-align: center;">14</td><td style="text-align: center;">1096,33</td></tr> </tbody> </table>	Separación entre electrodos[m]	PROMEDIO[Ω.m]	2	741,66	4	1159,33	6	1332,33	8	1306,66	10	1289,66	12	1190,66	14	1096,33																
Separación entre electrodos[m]	PROMEDIO[Ω.m]																																
2	741,66																																
4	1159,33																																
6	1332,33																																
8	1306,66																																
10	1289,66																																
12	1190,66																																
14	1096,33																																
	<p>Calcular la variable xi como el logaritmo natural de cada valor de resistividad promedio para cada separación entre electrodos. La ecuación es la siguiente:</p> $X_i = \text{Ln} (\bar{x}_i)$																																

VARIABLE Xi	Separación entre electrodos[m]	PROMEDIO [Ω.m]	ln(\bar{x}_i)																																																									
	2	741,66	6,60																																																									
	4	1159,33	7,05																																																									
	6	1332 33	7,19																																																									
	8	1306,66	7,17																																																									
	10	1289,66	7,16																																																									
	12	1190,66	7,08																																																									
	14	1096,33	6,99																																																									
VALOR PROMEDIO Xi	<p>Hallar el promedio X de los datos Xi mediante la ecuación siguiente.</p> $X = \frac{\sum_{i=1}^n X_i}{n}$ $X = \frac{6,66 + 7,05 + 7,19 + 7,17 + 7,16 + 7,08 + 6,99}{7}$ $X = 7,039$																																																											
DESVIACIÓN ESTANDAR S	<p>Se calcula la desviación estándar por la siguiente ecuación:</p> $s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - X)^2}{n}}$ <table border="1"> <thead> <tr> <th>Separación entre electrodos [m]</th> <th>Ruta 1. Resistividad [Ω.m]</th> <th>Ruta 2 Resistividad [Ω.m]</th> <th>Ruta 3 Resistivida d [Ω.m]</th> <th>PROME DIO</th> <th>ln(\bar{x}_i)</th> <th>(Xi-X) ²</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>2</td> <td>937</td> <td>457</td> <td>831</td> <td>741,66</td> <td>6,60</td> <td>0,192</td> </tr> <tr> <td>4</td> <td>1102</td> <td>656</td> <td>1720</td> <td>1159,33</td> <td>7,05</td> <td>0,00012</td> </tr> <tr> <td>6</td> <td>1213</td> <td>28</td> <td>1956</td> <td>1332,33</td> <td>7,19</td> <td>0,0228</td> </tr> <tr> <td>8</td> <td>1262</td> <td>878</td> <td>1780</td> <td>1306,66</td> <td>7,17</td> <td>0,0171</td> </tr> <tr> <td>10</td> <td>1278</td> <td>979</td> <td>1612</td> <td>1289,66</td> <td>7,16</td> <td>0,0146</td> </tr> <tr> <td>12</td> <td>1242</td> <td>982</td> <td>1348</td> <td>1190,66</td> <td>7,08</td> <td>0,00168</td> </tr> <tr> <td>14</td> <td>12 5</td> <td>997</td> <td>1077</td> <td>1096,33</td> <td>6,99</td> <td>0,00240</td> </tr> </tbody> </table> $s^2 = \frac{0,185 + 0,000249 + 0,023 + 0,018 + 0,014 + 0,001 + 0,0016}{7} = 0,035$ $s = \sqrt{0,035} = 0,1892$				Separación entre electrodos [m]	Ruta 1. Resistividad [Ω.m]	Ruta 2 Resistividad [Ω.m]	Ruta 3 Resistivida d [Ω.m]	PROME DIO	ln(\bar{x}_i)	(Xi-X) ²	2	937	457	831	741,66	6,60	0,192	4	1102	656	1720	1159,33	7,05	0,00012	6	1213	28	1956	1332,33	7,19	0,0228	8	1262	878	1780	1306,66	7,17	0,0171	10	1278	979	1612	1289,66	7,16	0,0146	12	1242	982	1348	1190,66	7,08	0,00168	14	12 5	997	1077	1096,33	6,99	0,00240
Separación entre electrodos [m]	Ruta 1. Resistividad [Ω.m]	Ruta 2 Resistividad [Ω.m]	Ruta 3 Resistivida d [Ω.m]	PROME DIO	ln(\bar{x}_i)	(Xi-X) ²																																																						
2	937	457	831	741,66	6,60	0,192																																																						
4	1102	656	1720	1159,33	7,05	0,00012																																																						
6	1213	28	1956	1332,33	7,19	0,0228																																																						
8	1262	878	1780	1306,66	7,17	0,0171																																																						
10	1278	979	1612	1289,66	7,16	0,0146																																																						
12	1242	982	1348	1190,66	7,08	0,00168																																																						
14	12 5	997	1077	1096,33	6,99	0,00240																																																						
RESISTIVIDAD DEL MODELO	<p>La resistividad del modelo se halla para una probabilidad del 70 % de no ser superada la ecuación es la siguiente:</p> $\rho = e^{(0,5244 * S + X)}$ <p>La distribución Normal Z para un 70% de probabilidad es 0.5244</p>																																																											

$$\rho = e^{(0,5244*0,1892+7,039)}$$

$$\rho = 1259,180[\Omega \cdot m]$$

En la Tabla 2 se presenta los resultados propuesto para el modelo de resistividad uniforme a continuación.

Tabla 2. Cálculo del valor de la resistividad.

CÁLCULO DEL VALOR DE LA RESISTIVIDAD DEL SUELO						
UBICACIÓN: Cancha de Softbol Universidad Industrial de Santander						
Método de Medida				WENNER		
MODELO DE SUELO UNIFORME BOX-COX						
Separación entre electrodos[m]	Ruta 1. Resistividad[Ω.m]	Ruta 2 Resistividad[Ω.m]	Ruta 3 Resistividad[Ω.m]	PROMEDIO	$\ln(\bar{x}_i)$	$(X_i - \bar{X})^2$
2	937	457	831	741,667	6,609	0,186
4	1102	656	1720	1159,333	7,056	0,00025
6	1213	828	1956	1332,333	7,195	0,024
8	1262	878	1780	1306,667	7,175	0,018
10	1278	979	1612	1289,667	7,162	0,015
12	1242	982	1348	1190,667	7,082	0,002
14	1215	997	1077	1096,333	7,000	0,002
Valor Promedio					7,040	0,035
Desviación Estándar					0,188	
Distribución Normal estándar invertida 70%				0,524		
Valor de Resistividad al 70% de no ser superada				1259,193	[Ω.m]	

5.1.3. Tomografía eléctrica

El ensayo de tomografía geoelectrica se lleva a cabo para determinar la distribución de la resistividad eléctrica a distintas profundidades a lo largo y ancho de la superficie del suelo como resultado de las características del suelo como composición mineralógica, contenido de agua, porcentaje de saturación, porosidad, entre otras.

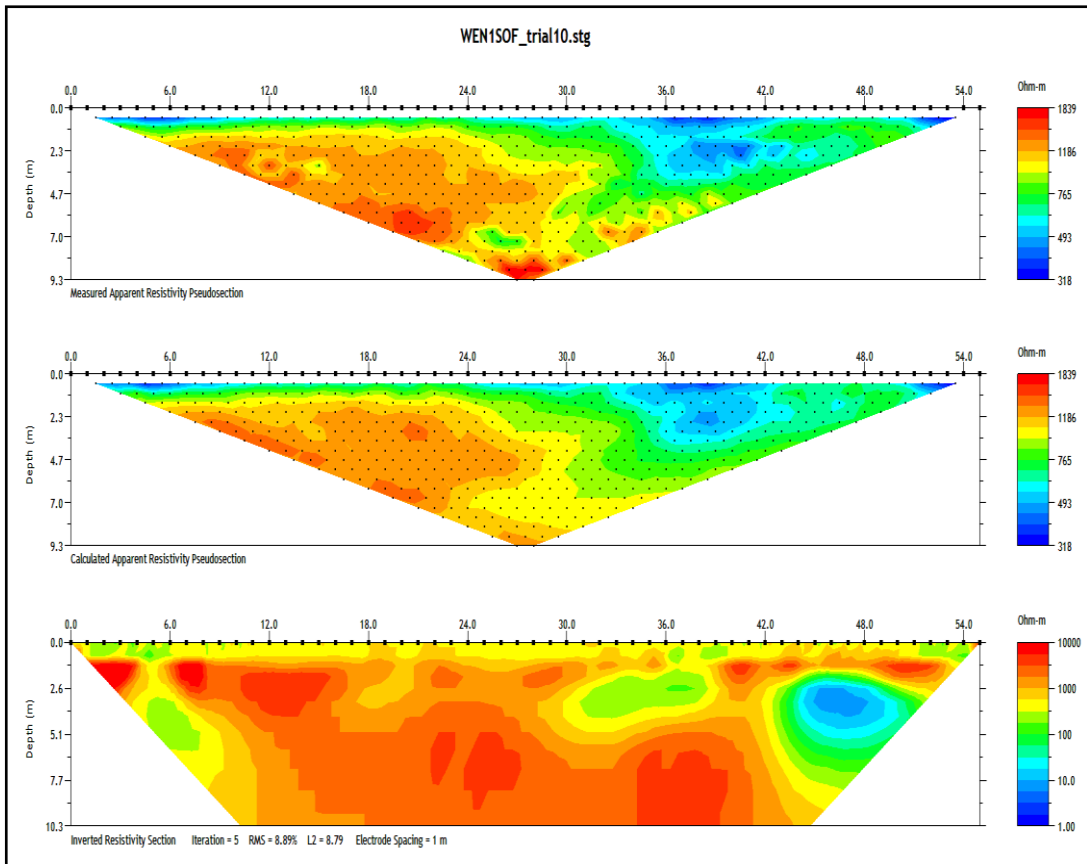
Figura 23. Localización de la tomografía geoelectrica.



Fuente: Google earth

El procesamiento de los datos da como resultado 3 pseudo-secciones de la tomografía geoelectrica como se observa en la tomografía a continuación Figura 24. La primera muestra los datos de resistividad aparente medida en el suelo; la segunda muestra la resistividad calculada y ajustada a los datos de campo; y la tercera muestra la resistividad del suelo obtenida a partir de las dos secciones anteriores calculada con el algoritmo del modelo inverso por mínimos cuadrados mostrado en la Figura 9 anteriormente [1].

Figura 24. Pseudo-secciones de la tomografía geoelectrica en la cancha de softbol.



Fuente: Grupo geomática ingeniería civil UIS

La Figura 25 representa una vista en 3D, de los valores de resistividad del suelo donde el eje x es la distancia horizontal desde la posición 0 hasta la posición 56 medidos en separaciones de a un metro entre electrodos. Los electrodos están enterrados en la línea donde se realizó la tomografía, eje y representa los valores de resistividad del suelo se aprecian hay variación de resistividades bajas, medias y altas el eje z es la profundidad de exploración.

La Figura 26 muestra los colores representan los valores de resistividad del suelo. Los de color rojo son resistividades altas, las de color verde resistividades medias y las de color azul resistividades bajas.

Figura 25. Superficies de resistividades en la cancha de softbol.

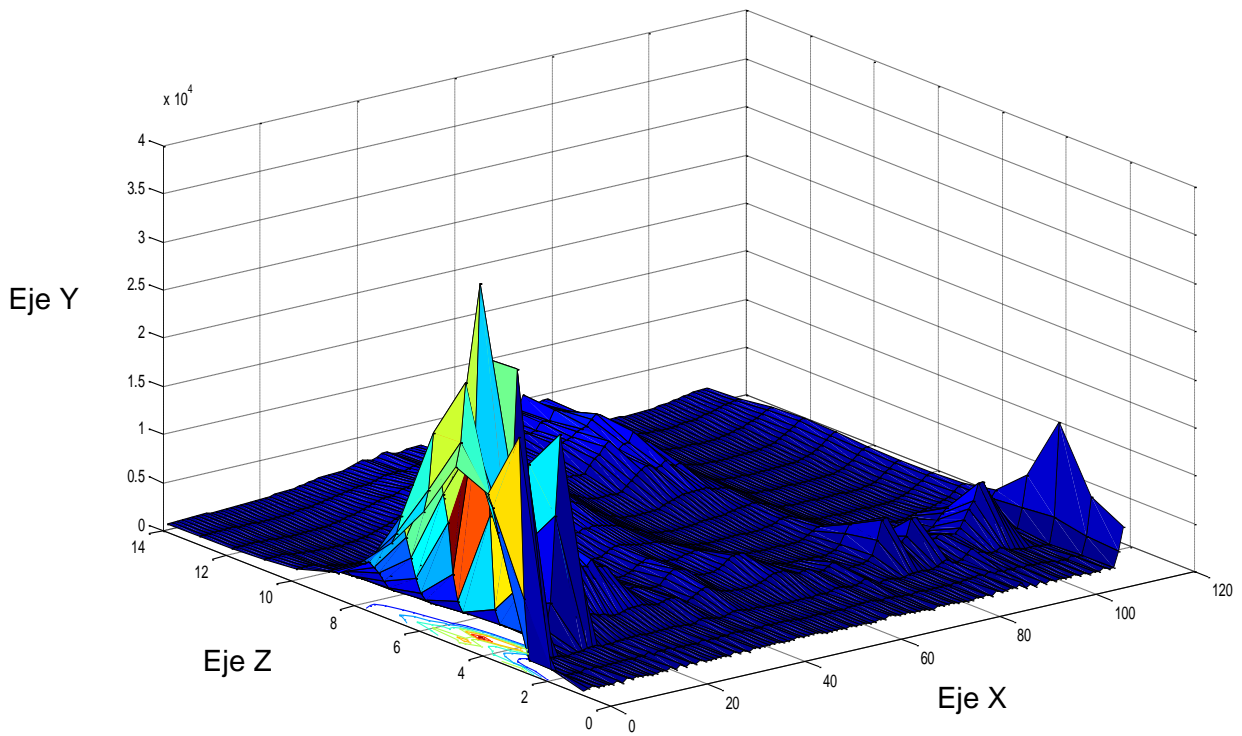
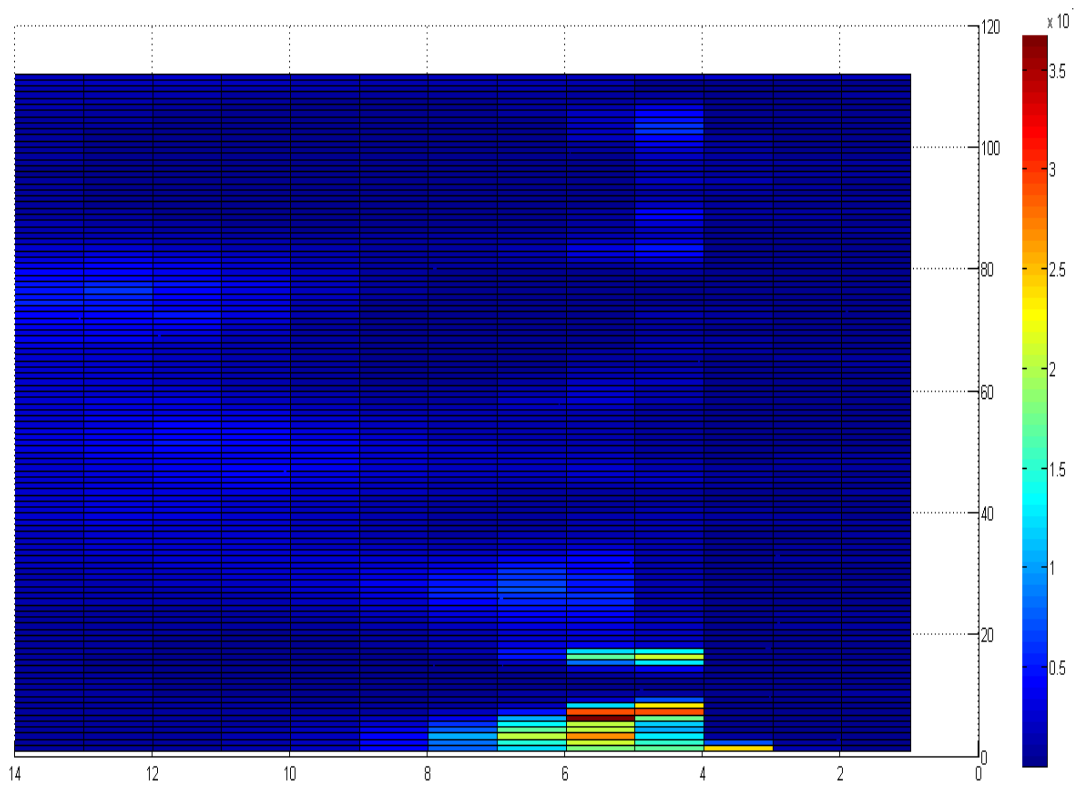


Figura 26. Gama de colores de las resistividades.

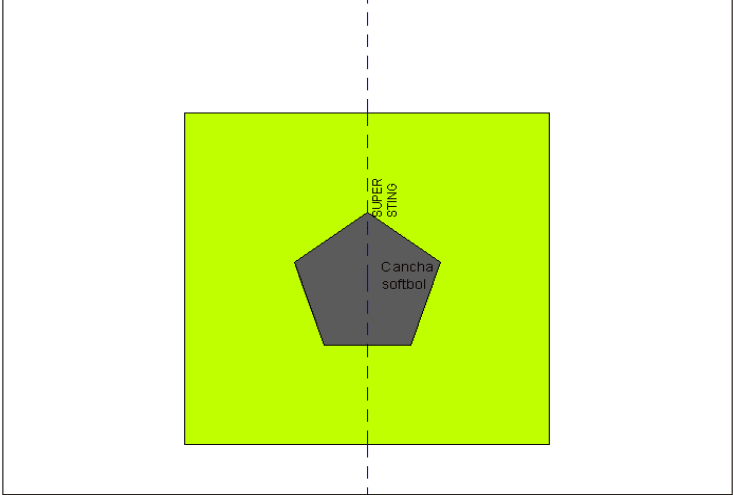



La línea de tomografía geoelectrica muestra valores de resistividad variables entre 1 y 10000 ohm-m, lo cual indica la presencia de materiales con características diferentes que corresponden al segmento limos rojos. Con base en estos análisis se observan los siguientes elementos geológicos e hidrogeológicos:

- ❖ La cancha de softbol de la UIS se encuentra sobre suelos relativamente permeables que presentan algunas acumulaciones de agua a nivel local dentro de lentes aislados compuestos por materiales con menor permeabilidad.
- ❖ El sector que presenta mayor concentración de humedad corresponde a la parte de la línea que se encuentra más cubierta por pastizales.
- ❖ Se presenta un nivel superficial de relleno sobre suelos aluviales del Segmento limos rojos de la Formación Bucaramanga.
- ❖ Las zonas conductivas pueden asociarse a suelos aluviales compuestos por arcillas arenosas y arenas arcillosas del segmento limos rojos de la Formación Bucaramanga.

Medida de Campo con el Supersting.

PROCEDIMIENTO PARA LA MEDIDA DE LA RESISTIVIDAD DE CAMPO SUPER STING.	
ITEM	PROCEDIMIENTO
LUGAR DE MEDIDA	Los datos no se tienen que escribir para cada medida por lo que el equipo trae una memoria que almacena la información medida y se entrega en un documento Excel (ver Anexo 2). Lo que representa mayor velocidad en el proceso. Responsable de medida en campo y método empleado.
OBSERVACIONES DEL SUELO	Se observaciones previas no es necesario tenerlas en cuenta por lo que el equipo de medida arroja un perfil de resistividades lo que da una idea a los diferentes materiales que hay en el suelo para un estudio más geológico detallado.

<p>UBICACIÓN DEL SITIO</p>	<p>Ubicarse en el sitio de medida y trazar la línea para realizar las mediciones a diferentes profundidades. Solo se tiene un trazado. En la Figura 27 se presenta la línea seleccionada en campo.</p> <p style="text-align: center;">Figura 27. Línea seleccionada.</p>  <p>El diagrama muestra un campo rectangular de color verde brillante. En el centro hay un pentágono gris etiquetado como 'Cancha fútbol'. Una línea vertical punteada azul atraviesa el campo, etiquetada como 'SUPER STING'.</p>
<p>LÍNEA DE MEDIDA SUPERSTING</p>	<p>Se enterraron 56 electrodos a lo largo de la línea con una separación de 1 metros entre los electrodos como puede observarse en la Figura 28.</p> <p style="text-align: center;">Figura 28. Línea de medida.</p>  <p>La fotografía muestra un campo de fútbol con una línea amarilla de medición trazada en diagonal. Una etiqueta amarilla indica 'Línea de tomografía'. Hay cables amarillos enrollados en el suelo a lo largo de la línea.</p>
<p>VALORES DE RESISTIVIDAD</p>	<p>Los valores de resistividad se procesan en oficina con el programa Earth Imager 2D.</p> <p>En el Anexo 2 se muestran los valores de resistividad hallados luego del proceso de inversión de la pseudo-sección hecho con el programa en cada profundidad de exploración.</p>

**MODELO DE RESISTIVIDAD UNIFORME
MÉTODO ESTADÍSTICO BOX-COX
SUPER STING**

ITEM	PROCEDIMIENTO																														
ANÁLISIS DATOS DE CAMPO	<p>Para tener una aproximación de la resistividad aparente del suelo se emplea el valor de resistividad promedio para cada profundidad de exploración de la línea de medida.</p> <table border="1" style="margin-left: auto; margin-right: auto;"> <thead> <tr> <th style="text-align: center;">Profundidad [m]</th> <th style="text-align: center;">Promedio[Ω*m]</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td style="text-align: center;">0,000</td><td style="text-align: center;">486,348</td></tr> <tr><td style="text-align: center;">0,240</td><td style="text-align: center;">526,401</td></tr> <tr><td style="text-align: center;">0,745</td><td style="text-align: center;">900,474</td></tr> <tr><td style="text-align: center;">1,300</td><td style="text-align: center;">3268,225</td></tr> <tr><td style="text-align: center;">1,910</td><td style="text-align: center;">3540,470</td></tr> <tr><td style="text-align: center;">2,582</td><td style="text-align: center;">2225,438</td></tr> <tr><td style="text-align: center;">3,321</td><td style="text-align: center;">1456,146</td></tr> <tr><td style="text-align: center;">4,133</td><td style="text-align: center;">1199,748</td></tr> <tr><td style="text-align: center;">5,027</td><td style="text-align: center;">1335,481</td></tr> <tr><td style="text-align: center;">6,011</td><td style="text-align: center;">1683,442</td></tr> <tr><td style="text-align: center;">7,092</td><td style="text-align: center;">1953,494</td></tr> <tr><td style="text-align: center;">8,282</td><td style="text-align: center;">2040,852</td></tr> <tr><td style="text-align: center;">9,591</td><td style="text-align: center;">1923,097</td></tr> <tr><td style="text-align: center;">10,276</td><td style="text-align: center;">1888,363</td></tr> </tbody> </table>	Profundidad [m]	Promedio[Ω*m]	0,000	486,348	0,240	526,401	0,745	900,474	1,300	3268,225	1,910	3540,470	2,582	2225,438	3,321	1456,146	4,133	1199,748	5,027	1335,481	6,011	1683,442	7,092	1953,494	8,282	2040,852	9,591	1923,097	10,276	1888,363
Profundidad [m]	Promedio[Ω*m]																														
0,000	486,348																														
0,240	526,401																														
0,745	900,474																														
1,300	3268,225																														
1,910	3540,470																														
2,582	2225,438																														
3,321	1456,146																														
4,133	1199,748																														
5,027	1335,481																														
6,011	1683,442																														
7,092	1953,494																														
8,282	2040,852																														
9,591	1923,097																														
10,276	1888,363																														
VALORES PROMEDIO	<p>Calcular el promedio para cada una de las profundidades de exploración de la línea de medida se tiene la siguiente ecuación:</p> <p>Profundidad: 0,24 metros</p> <p>Punto inicial Línea de medida: 1165 [Ω.m]</p> <p>Punto Final Línea de medida: 6146 [Ω.m]</p> $\bar{x} = \frac{1165+883.582+\dots+6146}{112} = 526,401$																														
VARIABLE Xi	<p>Calcular la variable xi como el logaritmo natural de cada valor de resistividad promedio para cada profundidad de exploración. La ecuación es la siguiente:</p> $X_i = \text{Ln}(\rho_i)$ <table border="1" style="margin-left: auto; margin-right: auto;"> <thead> <tr> <th style="text-align: center;">Profundidad [m]</th> <th style="text-align: center;">Promedio</th> <th style="text-align: center;">LN(Xi)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td style="text-align: center;">0,000</td><td style="text-align: center;">486,348</td><td style="text-align: center;">6,187</td></tr> <tr><td style="text-align: center;">0,240</td><td style="text-align: center;">526,401</td><td style="text-align: center;">6,266</td></tr> <tr><td style="text-align: center;">0,745</td><td style="text-align: center;">900,474</td><td style="text-align: center;">6,803</td></tr> <tr><td style="text-align: center;">1,300</td><td style="text-align: center;">3268,225</td><td style="text-align: center;">8,092</td></tr> <tr><td style="text-align: center;">1,910</td><td style="text-align: center;">3540,470</td><td style="text-align: center;">8,172</td></tr> <tr><td style="text-align: center;">2,582</td><td style="text-align: center;">2225,438</td><td style="text-align: center;">7,708</td></tr> </tbody> </table>	Profundidad [m]	Promedio	LN(Xi)	0,000	486,348	6,187	0,240	526,401	6,266	0,745	900,474	6,803	1,300	3268,225	8,092	1,910	3540,470	8,172	2,582	2225,438	7,708									
Profundidad [m]	Promedio	LN(Xi)																													
0,000	486,348	6,187																													
0,240	526,401	6,266																													
0,745	900,474	6,803																													
1,300	3268,225	8,092																													
1,910	3540,470	8,172																													
2,582	2225,438	7,708																													

		3,321	1456,146	7,284																																																													
		4,133	1199,748	7,090																																																													
		5,027	1335,481	7,197																																																													
		6,011	1683,442	7,429																																																													
		7,092	1953,494	7,577																																																													
		8,282	2040,852	7,621																																																													
		9,591	1923,097	7,562																																																													
		10,276	1888,363	7,543																																																													
<p>VALOR PROMEDIO</p> <p>X_i</p>	<p>Hallar el promedio X de los datos X_i mediante la ecuación siguiente.</p> $X = \frac{\sum_{i=1}^n X_i}{n}$ $X = \frac{6,187+6,266+6,803+8,092+\dots+.543}{14}$ $X = 7,3236$																																																																
<p>DESVIACIÓN ESTANDAR</p> <p>S</p>	<p>Se calcula la desviación estándar por la siguiente ecuación:</p> $S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - X)^2}{n}}$ <table border="1" style="margin-left: auto; margin-right: auto;"> <thead> <tr> <th>Profundidad [m]</th> <th>Promedio</th> <th>LN(X_i)</th> <th>$(X_i - X)^2$</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>0,000</td><td>486,348</td><td>6,187</td><td>1,292</td></tr> <tr><td>0,240</td><td>526,401</td><td>6,266</td><td>1,118</td></tr> <tr><td>0,745</td><td>900,474</td><td>6,803</td><td>0,271</td></tr> <tr><td>1,300</td><td>3268,225</td><td>8,092</td><td>0,590</td></tr> <tr><td>1,910</td><td>3540,470</td><td>8,172</td><td>0,720</td></tr> <tr><td>2,582</td><td>2225,438</td><td>7,708</td><td>0,148</td></tr> <tr><td>3,321</td><td>1456,146</td><td>7,284</td><td>0,002</td></tr> <tr><td>4,133</td><td>1199,748</td><td>7,090</td><td>0,055</td></tr> <tr><td>5,027</td><td>1335,481</td><td>7,197</td><td>0,016</td></tr> <tr><td>6,011</td><td>1683,442</td><td>7,429</td><td>0,011</td></tr> <tr><td>7,092</td><td>1953,494</td><td>7,577</td><td>0,064</td></tr> <tr><td>8,282</td><td>2040,852</td><td>7,621</td><td>0,089</td></tr> <tr><td>9,591</td><td>1923,097</td><td>7,562</td><td>0,057</td></tr> <tr><td>10,276</td><td>1888,363</td><td>7,543</td><td>0,048</td></tr> </tbody> </table> $S^2 = \frac{1,292 + 1,118 + 0,271 + 0,590 + \dots + 0,048}{14} = 0,320$ $S = \sqrt{0,320} = 0,565$					Profundidad [m]	Promedio	LN(X_i)	$(X_i - X)^2$	0,000	486,348	6,187	1,292	0,240	526,401	6,266	1,118	0,745	900,474	6,803	0,271	1,300	3268,225	8,092	0,590	1,910	3540,470	8,172	0,720	2,582	2225,438	7,708	0,148	3,321	1456,146	7,284	0,002	4,133	1199,748	7,090	0,055	5,027	1335,481	7,197	0,016	6,011	1683,442	7,429	0,011	7,092	1953,494	7,577	0,064	8,282	2040,852	7,621	0,089	9,591	1923,097	7,562	0,057	10,276	1888,363	7,543	0,048
Profundidad [m]	Promedio	LN(X_i)	$(X_i - X)^2$																																																														
0,000	486,348	6,187	1,292																																																														
0,240	526,401	6,266	1,118																																																														
0,745	900,474	6,803	0,271																																																														
1,300	3268,225	8,092	0,590																																																														
1,910	3540,470	8,172	0,720																																																														
2,582	2225,438	7,708	0,148																																																														
3,321	1456,146	7,284	0,002																																																														
4,133	1199,748	7,090	0,055																																																														
5,027	1335,481	7,197	0,016																																																														
6,011	1683,442	7,429	0,011																																																														
7,092	1953,494	7,577	0,064																																																														
8,282	2040,852	7,621	0,089																																																														
9,591	1923,097	7,562	0,057																																																														
10,276	1888,363	7,543	0,048																																																														
	<p>La resistividad del modelo se halla para una probabilidad del 70 % de no ser superada, la ecuación es la siguiente:</p> $\rho = e^{(0,5244 \cdot S + X)}$																																																																

RESISTIVIDAD DEL MODELO	<p>La distribución Normal Z para un 70% de probabilidad es 0,5244</p> $\rho = e^{(0,5244 \cdot 0,5657 + 7,3239)}$ $\rho = 2039,078[\Omega. m]$ <p>La tabla 4 se resume los cálculos realizados anteriormente.</p>
-------------------------	---

Tabla 3. Cálculo del valor de la resistividad del suelo.

CÁLCULO DEL VALOR DE LA RESISTIVIDAD DEL SUELO HOMOGENEO			
Responsables medidas	Carlos Alberto Montes Daniel Andrés Torrado		MÉTODO DE MEDICIÓN WENNER
Profundidad [m]	Promedio	LN(\bar{x}_i)	($X_i - X$) ²
0,000	486,348	6,187	1,292
0,240	526,401	6,266	1,118
0,745	900,474	6,803	0,271
1,300	3268,225	8,092	0,590
1,910	3540,470	8,172	0,720
2,582	2225,438	7,708	0,148
3,321	1456,146	7,284	0,002
4,133	1199,748	7,090	0,055
5,027	1335,481	7,197	0,016
6,011	1683,442	7,429	0,011
7,092	1953,494	7,577	0,064
8,282	2040,852	7,621	0,089
9,591	1923,097	7,562	0,057
10,276	1888,363	7,543	0,048
Valor Promedio LN(\bar{x}_i)		7,3236	
Valor Promedio ($X_i - X$) ²		0,320	
Desviación estándar ($X_i - X$) ²		0,5657	
Distribución Normal 70%		0,5244	
Valor de resistividad al 70 %		2039,091	

5.1.4. Análisis comparativo Telurómetro y SuperSting

El resultado de las resistividades es el producto de un análisis estadístico de medidas tomadas sobre un suelo. Se observa una diferencia de 38,24% aproximadamente entre los resultados de resistividades, calculadas a partir del método estadístico de Box-Cox, halladas con el telurómetro y las obtenidas con el tomógrafo.

Wenner (Análisis mediante Método Box Cox) (ohm-m)	1259,193
Tomógrafo (Análisis mediante Método Box Cox) (ohm-m)	2039,091
Diferencia (%)	38,24

Se atribuye esta diferencia a dos (2) hechos fundamentales a saber:

A. Irregularidades del suelo

El perfil de resistividades de la tomografía para las medidas realizadas en la cancha de softball de la UIS, en el punto $x=30$ [m] aproximadamente, el suelo tiene una distribución de “capas” de diferentes resistividades más homogéneas que el resto de puntos medidos para el estudio. Lo anterior no hubiese sido posible de visualizar si solo se hubiesen realizado mediciones con el telurómetro.

B. Cantidad de medidas realizadas con cada uno de los equipos

Una mayor cantidad de medidas realizadas con el tomógrafo permite tener una medida más fina de las condiciones reales del suelo en comparación de las realizadas con el telurómetro. Esto se debe a que estadísticamente se dispone de una mayor muestra de datos para realizar los cálculos mediante el uso del método de cálculo estadístico de Box-Cox.

C. Una de las rutas donde se midió con el telurómetro tiene resistividades bajas.

De las tres rutas de medida con el telurómetro a lo largo de la línea tomográfica, una de las rutas tiene resistividades bajas esto hace que la resistividad calculada final con el telurómetro sea menor.

Lo anterior indica que óptimo realizar mediciones con el tomógrafo que con el telurómetro y luego teniendo en cuenta los gráficos de los perfiles obtenidos, tomar la decisión de si se divide o sectoriza el suelo en función de estas mediciones o si basta solo con tratar el suelo como homogéneo para calcular la resistividad obtenida mediante el método de Box-Cox.

Con base en las resistividades obtenidas y al análisis que se les dio anteriormente, para obtener resultados más exactos de las condiciones del suelo se plantea, en su

orden de mayor a menor eficiencia, las siguientes metodologías teniendo en cuenta los recursos técnicos y económicos disponibles:

- ❖ Hacer una medida a lo largo del suelo utilizando el tomógrafo. Una vez se obtiene el gráfico realizar tres rutas perpendiculares en la zona de menor resistividades utilizando nuevamente tomógrafo.
- ❖ Hacer una medida a lo largo del suelo utilizando el tomógrafo. Una vez se obtiene el gráfico realizar tres rutas perpendiculares en la zona de menor resistividades utilizando el telurómetro.
- ❖ Hacer tres rutas en serie con el telurómetro a lo largo del suelo. Una vez se obtienen los datos realizar tres rutas perpendiculares en la zona de menor resistividades utilizando el telurómetro.

5.1.5. Ventajas y desventajas que existen entre las tomografías 2D y 1D

Basado en las observaciones del suelo, resistividades obtenidas y estudio realizado en este libro se hacen las siguientes Tablas comparativas 4, 5, donde se muestran las ventajas y desventajas encontradas entre las tomografías 2D y el telurómetro para el estudio geoelectrico destinado al planteamiento de un SPT.

Tabla 4. Ventajas y desventajas de la tomografía geoelectrica en 2D.

Tomografías Geoelectricas en 2D	
Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none"> ❖ Se puede realizar un perfil de resistividades tridimensional de todo el suelo realizando diferentes rutas de medida con el tomógrafo lo cual es esencial para diseñar SPT. ❖ Se cuenta con un elevado grado de información de la distribución de resistividades del subsuelo. ❖ Genera un modelo más acorde con la realidad para la estratificación del suelo y permite determinar con mayor exactitud la resistividad. ❖ Se emplea para localizaciones de acuíferos o zonas húmedas del suelo. ❖ Por sondeos invasivos se determinan los materiales que está compuesto el suelo lo cuales es transcendental para los diseños de SPT. ❖ Se puede visualizar el grado de compactación de todo el suelo con el perfil de resistividades. ❖ La Tomografía 2D con configuración WENNER es óptima resolviendo cambios verticales de resistividades y áreas con mucho ruido. ❖ Disminución de electrodos de tierra debida a la facilidad de localizar zonas de más baja resistividad. ❖ Disminuir la resistencia total de la malla, enterrando electrodos en capas conocidas de más baja resistividad. ❖ Amplia variedad de equipos y programas (Software) que realizan eficientemente el proceso de toma de datos como de interpretación. 	<ul style="list-style-type: none"> ❖ Equipos bastantes robustos. ❖ Software más especializado y costoso. ❖ Mayor tiempo de adquisición y procesamiento de datos. ❖ El valor de resistividad mostrado en el equipo depende del error humano y otras varias fuentes de error, ya que las distancias a las cuales se insertan los electrodos en el suelo no son exactas.

Tabla 5. Ventajas y desventajas del telurómetro.

TELURÓMETRO CON MÉTODO WENNER	
VENTAJAS	DESVENTAJAS
<ul style="list-style-type: none"> ❖ No requiere de programas de computador para su desarrollo. ❖ Simplifica los cálculos de diseño. ❖ Es económico y conocido en el sector eléctrico. ❖ El telurómetro es un equipo sencillo portátil fácil de transportar. ❖ Con los datos arrojados de resistividad del suelo se puede obtener un análisis teórico valido para hacer finalmente el diseño de puesta a tierra, de esta forma habrá una relación lineal entre la resistencia de puesta a tierra y la resistividad del suelo. ❖ El método Wenner es el más recomendado para medir la resistividad del suelo por ser el más exacto y de fácil aplicación, su implementación es económica, requiere de un equipo (telurómetro) que puede adquirirse fácilmente en el mercado a precios bajos. 	<ul style="list-style-type: none"> ❖ Una desventaja del método de Wenner es el decremento rápido en la magnitud de la tensión entre los 2 electrodos interiores cuando su distancia 'a' entre los electrodos se incrementa a valores muy grandes. ❖ Al medir con el telurómetro con el método Wenner los electrodos pueden ser colocados en todas direcciones por esta razón las lecturas no siempre son idénticas y en suelo industriales es más grande la diferencia debido a la presencia de objetos metálicos enterrados como tuberías, varillas de construcción, armazón de las estructuras adyacentes así como canalizaciones eléctricas (lo que conlleva a la producción de ruido) etc. ❖ El valor de resistividad mostrado en el equipo depende del error humano y otras varias fuentes de error, ya que las distancias a las cuales se insertan los electrodos en el suelo no son exactas. ❖ El modelo geológico solo identifica la geología del punto central del arreglo

6. INTERPRETACIÓN Y COMPARACIÓN DE LAS TOMOGRAFIAS

En este capítulo se emplea el término resistividad (ρ), el cual es comúnmente utilizado en la literatura y básicamente expresa el mismo concepto de su inversa, la conductividad ($\sigma = 1/\rho$).

Existen notables diferencias en la granulometría y la composición de los materiales que conforman el suelo de los sitios estudiados, por esto se presentan varios rangos de resistividades en cada uno de ellos. Otros factores como la humedad y la compactación del suelo también inciden durante la obtención de estos datos.

El tamaño de las partículas (granulometría) que constituyen los suelos es una propiedad muy importante durante la medición de las resistividades y puede dividirse en 3 tipos principales según el rango de tamaño (en diámetro) que son: gravas (diámetro mayor a 2 mm), arenas (diámetro entre 0.0624 y 2 mm) y lodos (diámetros menores de 0.0624 mm). Cada uno de estos tres grupos tiene a su vez subclases de tamaño de grano (Tabla 6).

Generalmente la resistividad del suelo es directamente proporcional al tamaño del grano de los suelos que lo componen. Pero la humedad y el grado de compactación de los materiales son factores que predominan durante en las mediciones, generando resistividades bajas donde hay mayor humedad y mayor compactación, y viceversa.

Estas últimas propiedades dependen primordialmente del tipo de roca que constituye los fragmentos, y el grado de alteración y porosidad de los mismos.

Tabla 6. Tamaño de grano de Wentworth.

MILÍMETROS (mm)	SUBCLASE	CLASE DE TAMAÑO DE GRANO
4096	Cantos	GRAVA
1024		
64		
4,0		
2,0		
1,0	Arena muy gruesa	ARENA
0,5	Arena gruesa	
0,25	Arena media	
0,125	Arena fina	
0,0625	Arena muy fina	
0,0039	Limos	LODO
0,00006	Arcillas	

Fuente: Rober L. Folk, "Petrografia rocas sedimentarias"

Basado en estas apreciaciones y en los datos obtenidos en campo durante las mediciones de tomografía 2D en los sitios de estudio, se delimitaron zonas con resistividades bajas (A), medias (B) y altas (C) en cada sector, teniendo en cuenta que cada uno muestra diferentes rangos de resistividades debido a que son diferentes tipos de suelo.

A continuación se presenta una descripción de los resultados obtenidos durante las medidas realizadas en los sitios de interés que se localizan en la UIS y en el Condominio Residencial Menzulí.

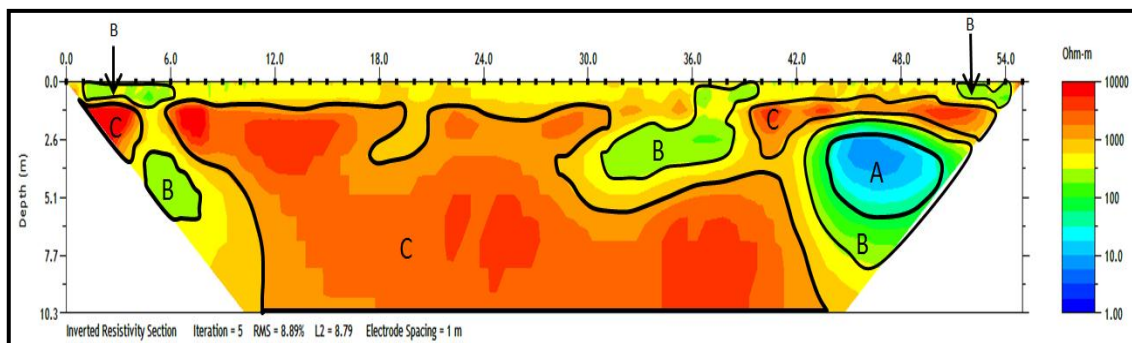
6.1. CANCHA SOFTBOL UIS

❖ Este sector está compuesto por limos de color rojizo con presencia de arenas, gravas y esporádicos bloques grandes de areniscas que constituyen el Segmento Limos Rojos de la Formación Bucaramanga.

❖ La tomografía Figura 29 muestra resistividades medias (B) superficialmente y resistividades altas (C) a profundidad; esto se debe a que la parte superficial está compuesta por el material de relleno utilizado para construir la cancha, y este fue dispuesto sobre el Segmento Limos Rojos que está caracterizado por presentar resistividades altas.

❖ La zona donde el rango de resistividades varía entre 1000 a 10000 ohm-m es desfavorable para hacer una malla de puesta a tierra, pues los conductores serían más robustos y las dimensiones de la malla serían más grandes. Por el contrario se podría situar una malla de puesta a tierra en la zona donde la resistividad es baja (A).

Figura 29. Cancha de softbol de la UIS.



6.2. EL BOSQUE UIS

❖ La tomografía realizada en el sector conocido como El Bosque Figura 31 muestra resistividades medias (B) y bajas (A) predominantemente, pero algunos sectores específicos presentan resistividades altas (C) que varían entre 10000 a 1000000 ohm-m. Estas características hacen más favorable el suelo para hacer una malla de puesta a tierra, en comparación del anterior, teniendo en cuenta que esta se diseñaría lo más lejano posible a estos puntos críticos, en la Figura 30 se indica la localización de la

tomografía donde se observan gran cantidad de árboles y zonas verde, lo cual indica un suelo más compacto y húmedo por la vegetación, en la Figura 32 y 33 podemos corroborar esto con la superficie de resistividades y la gama de colores de resistividades, observando que la mayoría de resistividades son bajas debido a la compactación del suelo y humedad.

Figura 30. Localización de la tomografía geoelectrica en el bosque de la UIS.



Fuente: Google earth

Figura 31. Tomografía en el Bosque de la UIS.

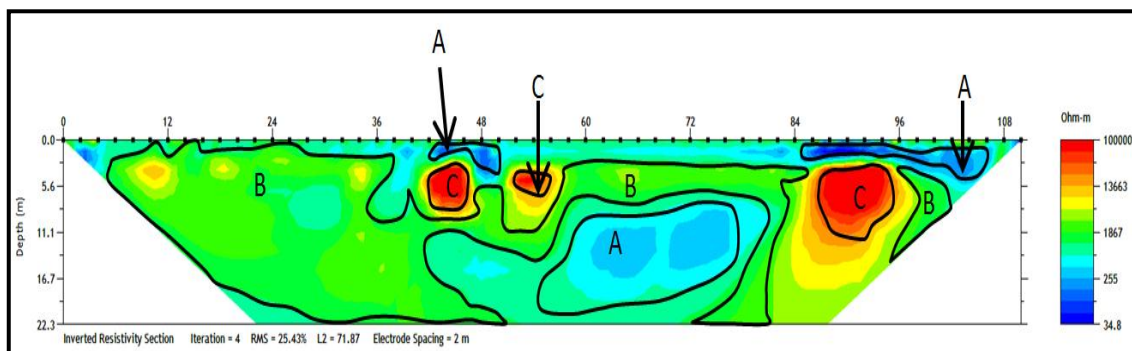


Figura 32. Superficie de resistividades del bosque de la UIS.

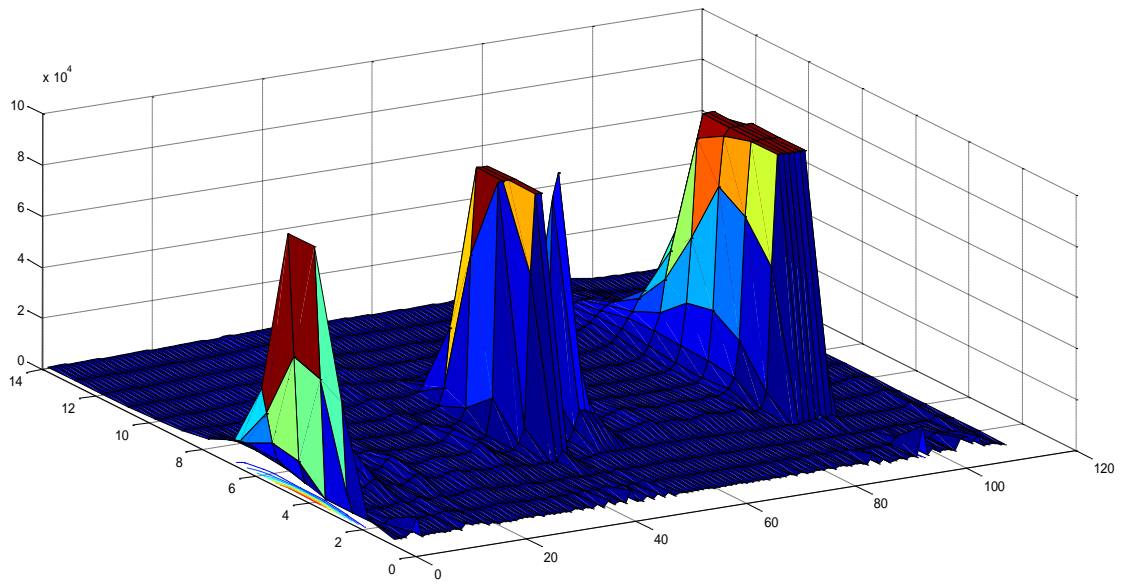
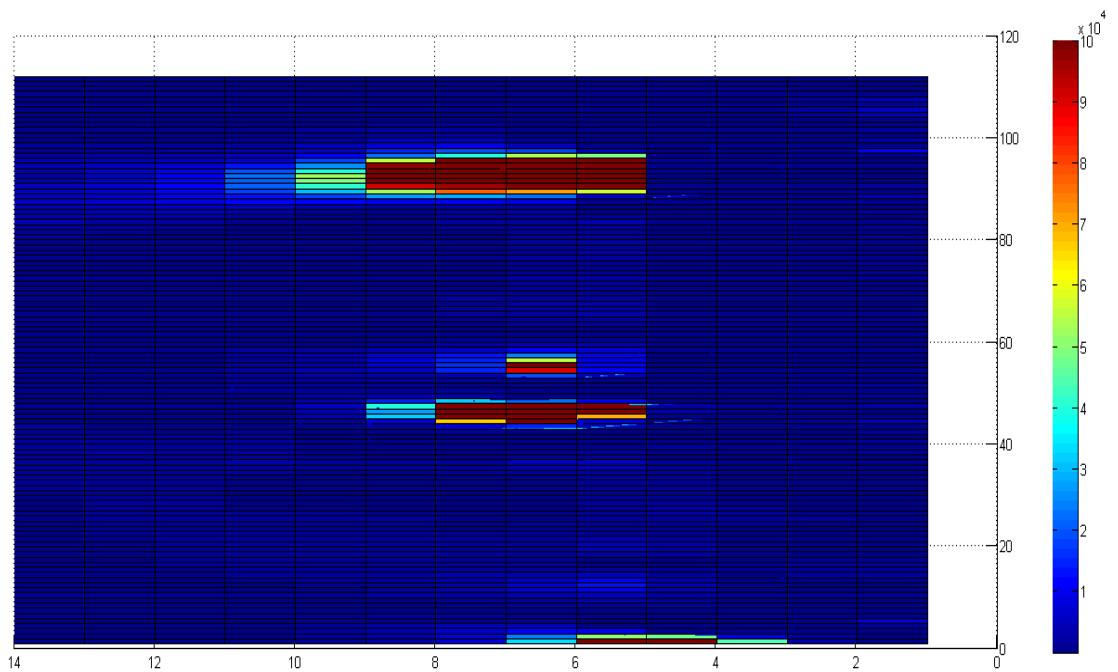


Figura 33. Gama de colores de resistividades.

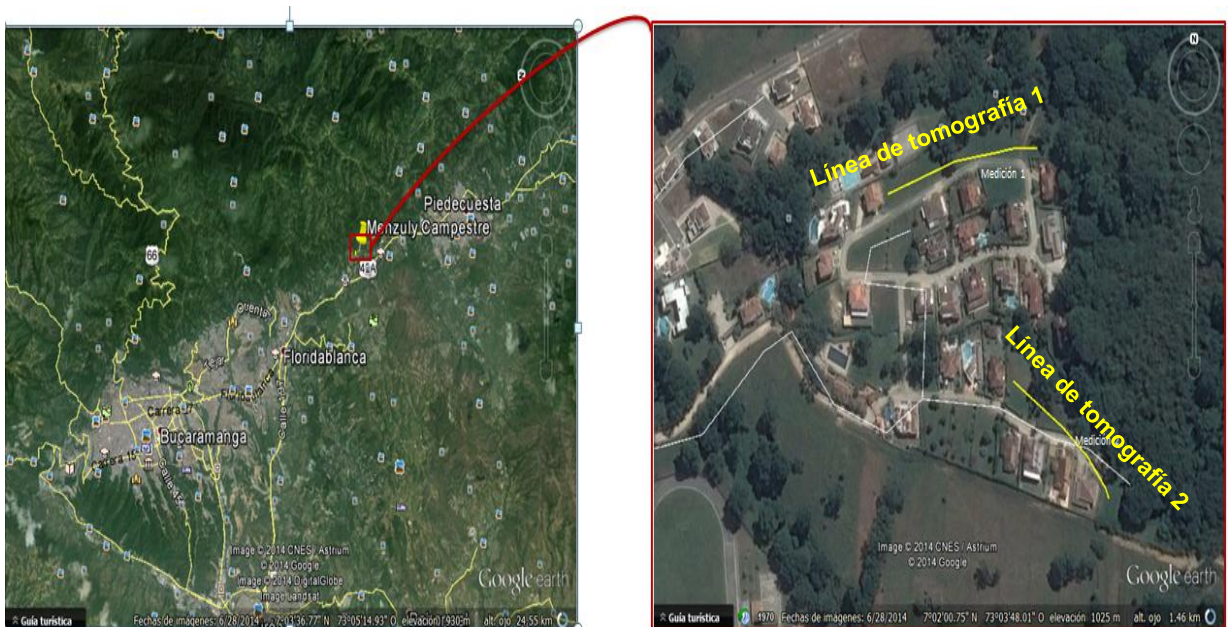


6.3. CONDOMINIO RESIDENCIAL MENZULI

❖ En las Figura 34 puede apreciarse la localización de las tomografías tomadas en el sector Menzuli. Las dos tomografías tomadas en el condominio Residencial Menzuli, Figuras 35 y 38, por tener resistividades similares en gran parte de la tomografía se tratarían como suelo homogéneos.

❖ Las mediciones realizadas en el Condominio residencial Menzulí muestran resistividades bajas en la mayoría del suelo, lo cual es favorable para disponer una malla de puesta a tierra en este sector. Sin embargo, existen sectores muy locales a profundidad con rangos de resistividades altas, lo cual indican puntos críticos que deben estar lejanos al lugar donde se decida instalar el sistema de puesta a tierra (SPT), en las Figuras 36 y 39 se observa el perfil de resistividades tomados de las tomografías y en las Figura 37 y 40 se muestran las gamas de colores de las resistividades de la medición 1 y 2.

Figura 34. Localización de las tomografías geoelectricas en Menzulí.



Fuente: Google earth

Figura 35. Medición Menzulí 1.

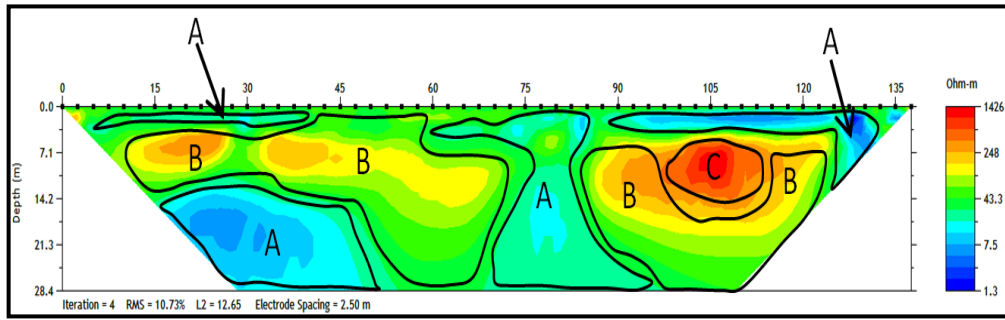


Figura 36. Superficies de resistividades en Menzulí, medición 1.

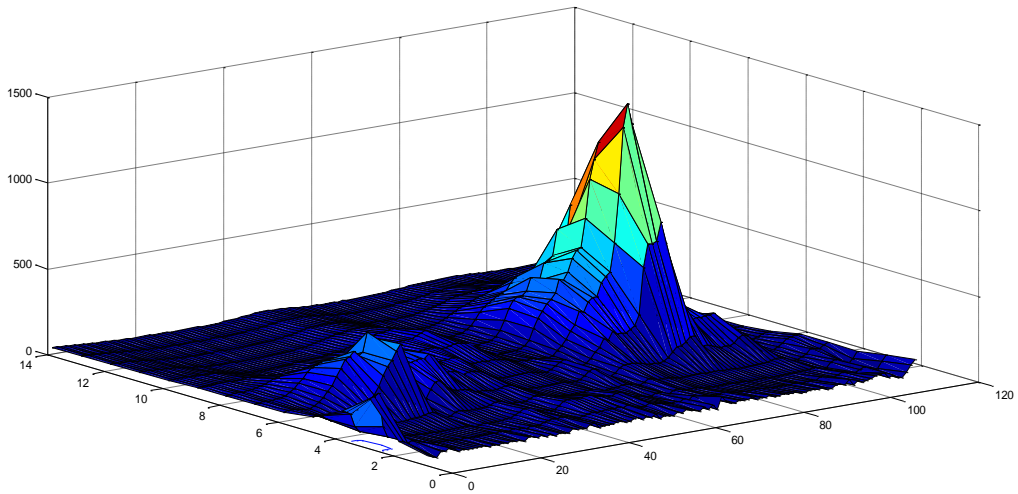


Figura 37. Gama de colores de resistividades.

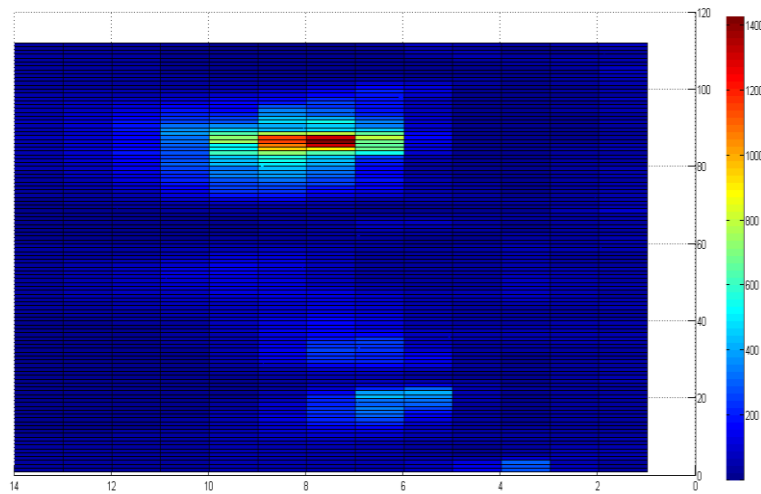


Figura 38. Medición Menzulí 2.

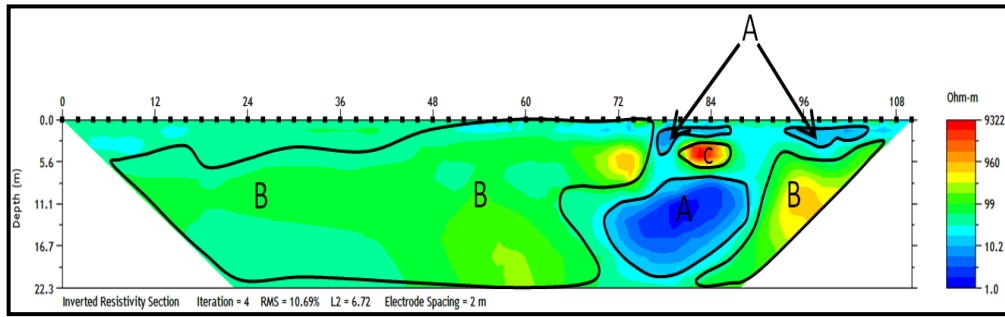


Figura 39. Superficies de resistividades en Menzulí, medición 2.

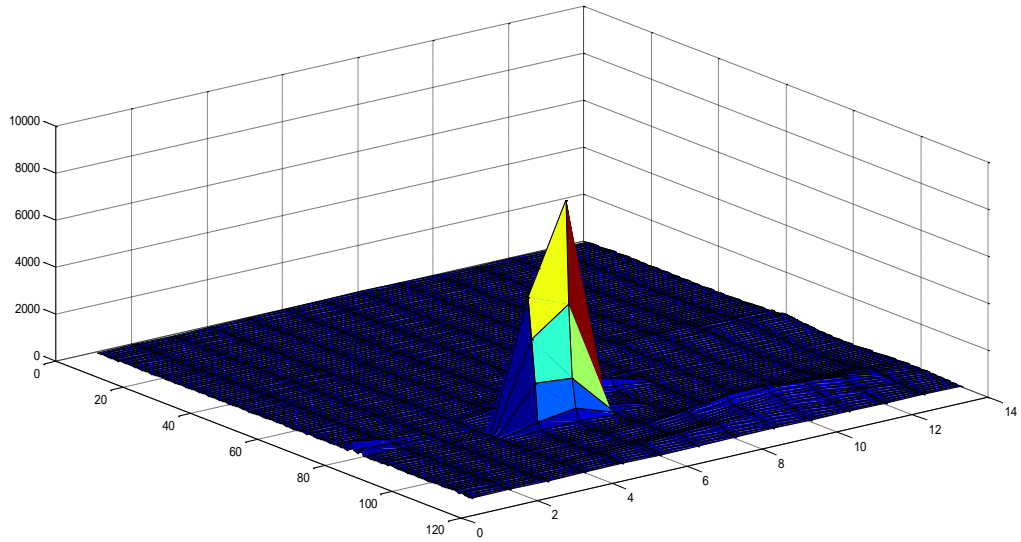
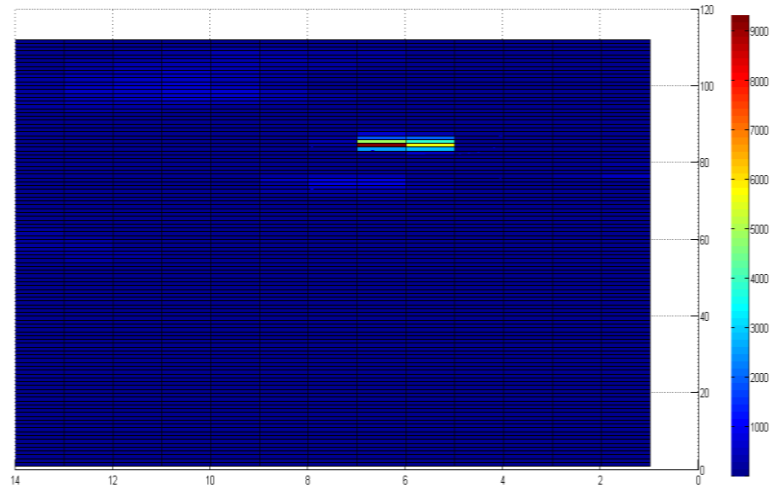


Figura 40. Gama de colores de resistividades.



6.4. COMPARACIÓN

- ❖ Al hacer estas tomografías 2D en estos sitios se hallaron resistividades diferentes, de esta manera se compararon las resistividades propias de cada tipo de suelo como bajas, medias y altas.
- ❖ De las cuatro tomografías 2D realizadas en este estudio, las que fueron tomadas en el Condominio Residencial Menzulí son las más favorables para hacer una malla de puesta a tierra debido a que presenta las resistividades más bajas que son del orden de 10 a 100 ohm-m.
- ❖ Las gráficas presentadas en 2D por estos tipos de instrumentos permiten mejorar el estudio para implementar la malla de puesta a tierra y así obtener un buen funcionamiento de subestaciones, edificaciones, plantas de servicio e industrias en general.
- ❖ De las tomografías obtenidas por el equipo SuperSting (ver Anexo 7) puede apreciarse que las tomografías manejan diferentes resistividades, ya que los suelos son diferentes debido a la granulometría que van desde granos finos, medios, gruesos y la compactación del suelo que disminuye la resistividad del suelo.
- ❖ La comparación de las 4 tomografías a nivel de diseño de una malla de puesta a tierra, refleja las dimensiones de la malla que requiera cada uno de los suelos; los de más resistividad van a exigir mayores dimensiones de malla, las cuales van a significar unas cantidades de conductores de determinados calibres y más electrodos.
- ❖ Cuando se tiene el equipo de tomografías y se deben medir suelos amplios, es posible decidir fácilmente hacer la malla de puesta a tierra donde se tenga menor resistividad y más homogeneidad del suelo.
- ❖ El mejor suelo desde el punto de vista de la construcción de mallas de puesta a tierra, es el que tiene menor resistividad, desde el punto de vista de la corrosión a la que puedan estar sometidos los elementos metálicos que están en ese suelo el mejor es el de mayor resistividad.
- ❖ Para diseñar un SPT de gran tamaño, es aconsejable encontrar el área de más baja resistividad para lograr la instalación más económica, en las tomografías realizadas en los diferentes suelos la más óptima será el suelo en el condominio Menzulí.

7. CRITERIOS DE DISEÑO DE SPT SEGÚN NORMA IEEE 80

Teniendo en cuenta las recomendaciones propuestas por la Norma ANSI/IEEE Standard 80-2000 IEEE, "Guide for Safety in AC Substation Grounding" [8], se definirán los parámetros principales en los diseños de SPT. El suelo, la línea conductora, las uniones, la resistencia del SPT, se mostrará mediante un ejemplo los alcances de una tomografía 2D en los diseños de mallas para una subestación eléctrica.

Las mallas de conexión a tierra proporcionan una adecuada protección a las personas y equipos que se encuentran dentro y fuera de una subestación eléctrica expuestas a peligrosas tensiones y corrientes que se puedan presentar bajo condiciones normales y de falla en la instalación.

El propósito de los diseños de tierra es:

- ❖ Proporcionar la conducción de las corrientes eléctricas hacia la tierra bajo condiciones normales y de falla. Sin exceder los límites de operación del sistema y de los equipos.
- ❖ Garantizar condiciones de seguridad a los seres vivos.

La norma IEEE 80 considera que en la práctica el diseño más utilizado en los sistemas de tierra son las mallas horizontales con conductores enterrados, complementados por un número de electrodos verticales conectadas a la malla.

Las razones para utilizar este tipo de configuración en las subestaciones son:

- ❖ En las subestaciones se requiere mallas con varios electrodos interconectados entre ellos. Si el suelo presenta buena conductividad, esta red se considera un buen SPT.
- ❖ Si las corrientes son muy altas cuando se presenta una falla, se genera GPR (Ground Potential Rise). que pondría en riesgo la seguridad de las personas y los equipos, la malla estaría limitada a contrarrestar este efecto de tensiones y corrientes debido a que no se pueden instalar mallas con resistividades suficientemente bajas. Estas amenazas se pueden eliminar realizando una combinación entre una malla horizontal y electrodos distribuidos verticalmente.

7.1. PRINCIPALES CARACTERÍSTICAS DE LOS DISEÑOS DE MALLAS DE PUESTA A TIERRA

Calibre del conductor de la malla	Se considera la corriente de falla como $3I_0$. La cual tiene que ser conducida por cualquier conductor en el SPT. Esta corriente tiene que ser la máxima y considerar los posibles crecimientos de la subestación.
Conductor continuo alrededor de la subestación	La implementación de un conductor alrededor de la subestación es útil para ayudar a prevenir altas concentraciones de corriente y gradientes de potencial en el área de la malla y cerca de los bordes de la malla.
Electrodos de puesta a tierra	Los electrodos se pueden instalar en los bordes de la malla o en su periferia. También se pueden instalar adyacentes a los equipos de protección como los DPS. Cuando los suelos no son homogéneos se pueden instalar electrodos de diferentes longitudes con el propósito de que lleguen a capas de menores resistividades.
Resistividad Superficial	El peligro que presentan los gradientes de potencial se prevé por aumentar la resistividad de la capa superficial con un material como el cascajo o la grava que presenta un valor alto en su resistividad. Esta capa puede estar con un espesor de 0.1 y 0.15 m sobre la superficie más arriba de la malla.

Tratamiento del suelo	Debido a las propiedades del suelo muchas veces no es posible obtener la resistencia de tierra. Se recurre al tratamiento del suelo con el uso de materiales artificiales, bentonita y sales, electrodos revestidos en concreto etc. para obtener el valor necesario de resistividad propuestos por la Norma IEEE 80 para diferentes instalaciones.
-----------------------	---

7.1.1. Selección del tamaño del conductor de la malla y las uniones.

Los elementos del SPT, incluyendo los conductores, uniones, cables de conexión, electrodos [21,8], deben ser diseñados para la vida útil de la instalación teniendo en cuenta lo siguiente:

- ❖ Tener suficiente conductividad de modo que no contribuya a las diferencias de tensiones locales.
- ❖ Resistir la fusión y el deterioro mecánico bajo las condiciones más desfavorables de corriente de falla en cuando a su magnitud y duración.
- ❖ Ser mecánicamente seguro y con un alto grado de rigidez.
- ❖ Ser capaz de seguir operando adecuadamente incluso si es sometido a la corrosión o el abuso físico.

7.1.2. Materiales para los conductores y problemas por la corrosión

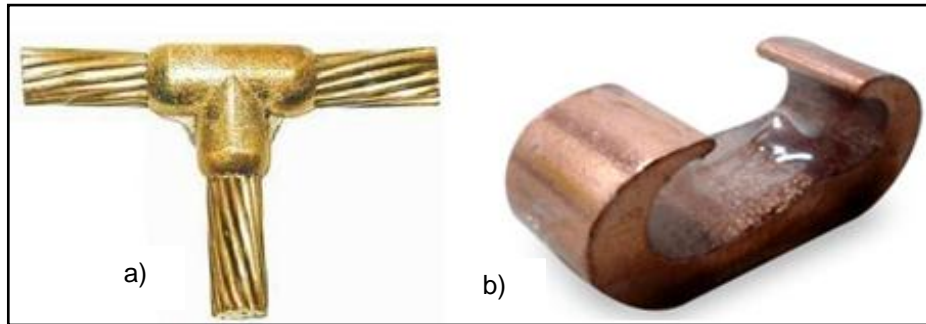
Cobre	El cobre es un material común en las conexiones y electrodos de tierra por tener una alta conductividad, además tiene la ventaja de ser resistentes a la corrosión. Aunque puede presentar problemas de corrosión galvánica en materiales con algún compuesto de plomo.
-------	---

Acero revestido de cobre	Es un compuesto bimetálico con características de una alta resistencia mecánica aportada por el acero con la conductividad y resistencia a la corrosión del cobre.
Aluminio	El aluminio se utiliza con menor frecuencia en las redes de tierra ya que presenta una alta resistencia por lo que hace que la conductividad hacia tierra sea menor que el cobre además presenta el inconveniente de corroerse en algunos suelos. La capa del material que se corroe no es conductora por lo que representaría problemas en la instalación.
Acero	El acero se puede utilizar en los conductores y electrodos de la malla de tierra aunque diseñando con este material se tiene que tener especial cuidado a la corrosión del acero. Por lo que se utiliza acero galvanizado que sea resistente la corrosión y en conjunto con una protección catódica en los diseños de puesta a tierra es también muy típica su utilización.

7.1.3. Selección de las uniones

La función que tienen las uniones para SPT es conectar el conductor de puesta tierra con los electrodos u otros conductores. Las características que presentan las uniones son una buena conductancia eléctrica y resistencia mecánica. El método más utilizado para realizar las uniones son la soldadura exotérmica, abrazaderas y uniones a presión. En la Figura 41a se muestra las uniones con soldadura exotérmica y en la Figura 41b las uniones de compresión.

Figura 41. Soldadura exotérmica y uniones de compresión.



7.1.4. Resistencia de Puesta Tierra

En las subestaciones donde se manejan grandes potencias se pueden presentar una falla a tierra que genera GPR. La Norma IEEE 1100 recomienda para subestaciones de alta y extra alta tensión que la resistencia de puesta tierra (R_g) no sea mayor a 1Ω . En la Tabla 7 se presentan los valores de resistencia máximos para SPT. La resistencia de puesta tierra se define como la relación entre la elevación de potencial de la puesta tierra respecto a una tierra remota y la corriente inyectada, en la Figura 42 se muestra esta definición.

$$R_g = \frac{GPR}{I_g} \quad (10)$$

Donde:

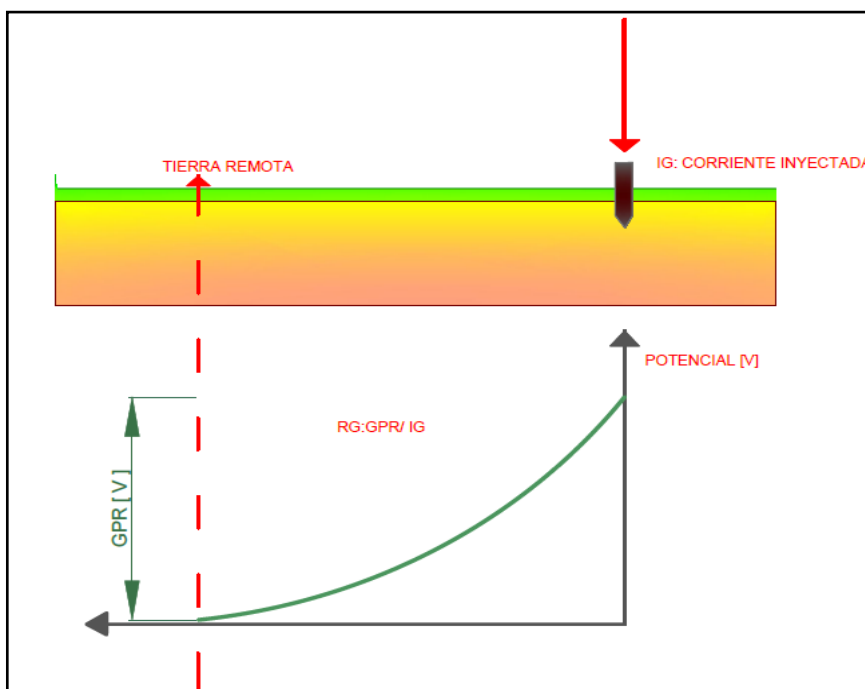
R_g : Es la resistencia de puesta tierra en Ω .

GPR : Es el gradiente de potencial en V.

I_g : Corriente rms simétrica de malla en A.

La resistencia de puesta tierra es el principal paso para determinar el tamaño y la configuración básica del sistema de tierra.

Figura 42. Resistencia de puesta tierra.



En la Tabla 7 se presenta los valores máximos de resistencias para cada tipo de aplicación donde estos valores dependen de las tensiones a las cuales se están operando.

Tabla 7. Valores máximos de resistencia de puesta tierra.

Aplicación	Valores Máximos de Resistencia de puesta a tierra [Ω]
Estructuras de Líneas de transmisión	20
Subestaciones de alta y extra alta tensión	1
Subestaciones de media tensión	10
Protección contra rayos	4
Neutro de acometida de baja tensión	25

7.1.5. Tratamiento del suelo

El propósito de la utilización de suelos artificiales es disminuir la resistividad del suelo, debido a que en muchas ocasiones no es posible disminuir la resistencia de la malla al valor deseado, al agregar más electrodos, o agregando más conductores o

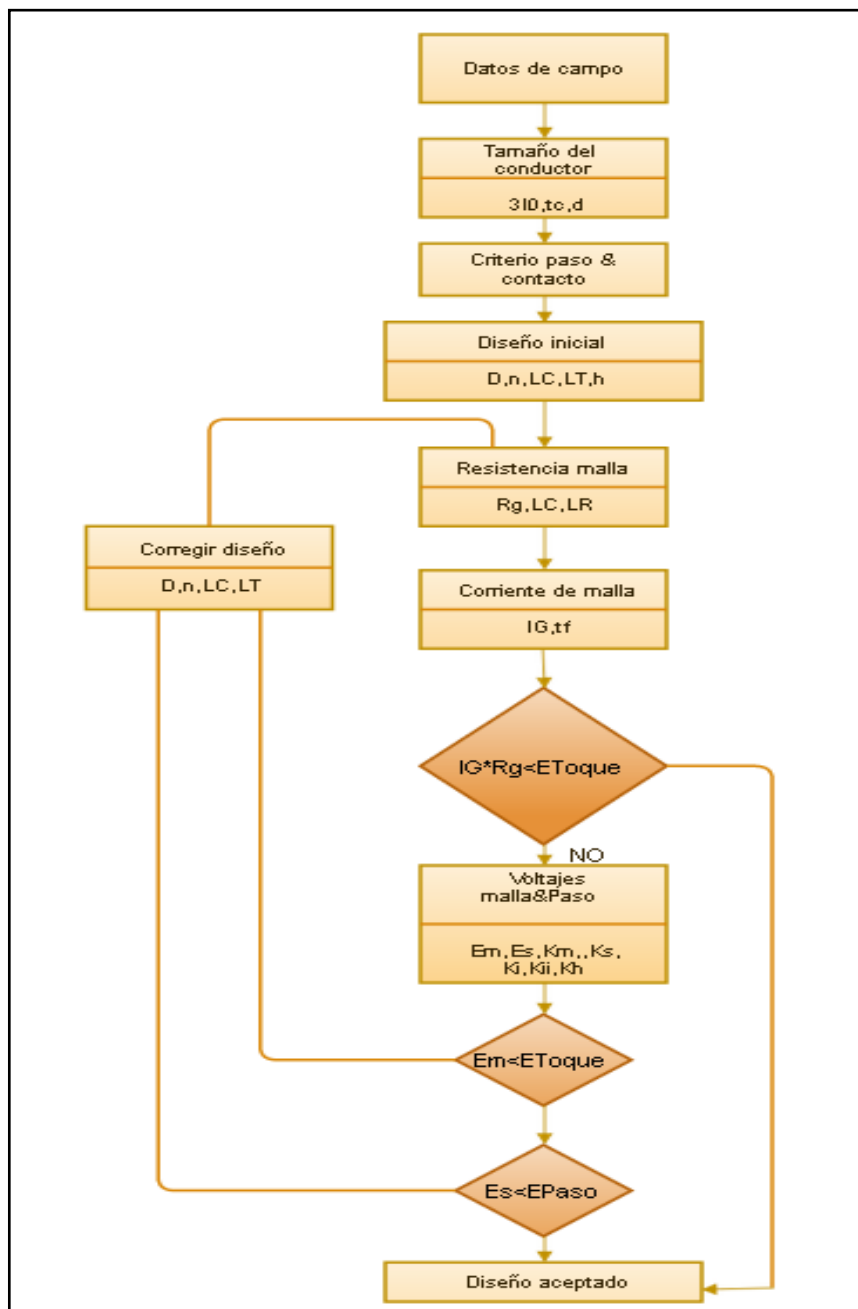
aumentando área de la malla por lo que se emplean tratamiento artificial del suelo para disminuir este valor [5,8]. Los métodos más conocidos son los siguientes:

Sales	El uso de sales de cloruro de sodio, magnesio y sulfatos de cobre, o cloruro de calcio para incrementar la conductividad del suelo que rodea al electrodo. Esta aplicación puede ser poco práctica debido a que las sales pueden desplazarse a zonas cercanas donde puede contaminar además el tratamiento con sales debe ser renovada periódicamente.
Bentonita	El uso de bentonita, es una arcilla natural que contiene la montmorillonita mineral. Este material es no corrosivo, estable y presenta una resistividad de 2,5 Ωm a 300% de humedad.
Electrodos tipo químico	Los electrodos tipo químico constan de un tubo de cobre relleno de una sal. Los agujeros en el tubo permiten la entrada de humedad. Estas sales se disuelven y permiten que la solución de sal se filtre en la tierra.
Electrodos revestidos en concreto	Por ser un material hidrocópico el concreto atrae la humedad. Al ser enterrado en el suelo tiene un comportamiento semiconductor con resistividades de 30-90 Ωm . esta particularidad hace que la resistencia sea menor en suelos de altos y medios valores. Ya que un electrodo en concreto tiene una resistencia menor que un electrodo conectado directamente a tierra. Una de las desventajas de esta es fácil corrosión.
Materiales artificiales	Los materiales artificiales proporcionan una baja resistividad donde se colocan alrededor de los electrodos y los conductores. Algunos de estos materiales son de mejora permanente

y no se filtran ningún producto químico en el suelo hacia otras zonas.

En la figura 43 a continuación se presenta el diagrama de bloque para diseños de sistemas de puesta a tierra (SPT) basado en la Norma IEEE STD 80 del 2000, aquí se presenta el algoritmo a seguir hasta tener un diseño aceptable.

Figura 43. Diagrama de bloques de SPT⁴



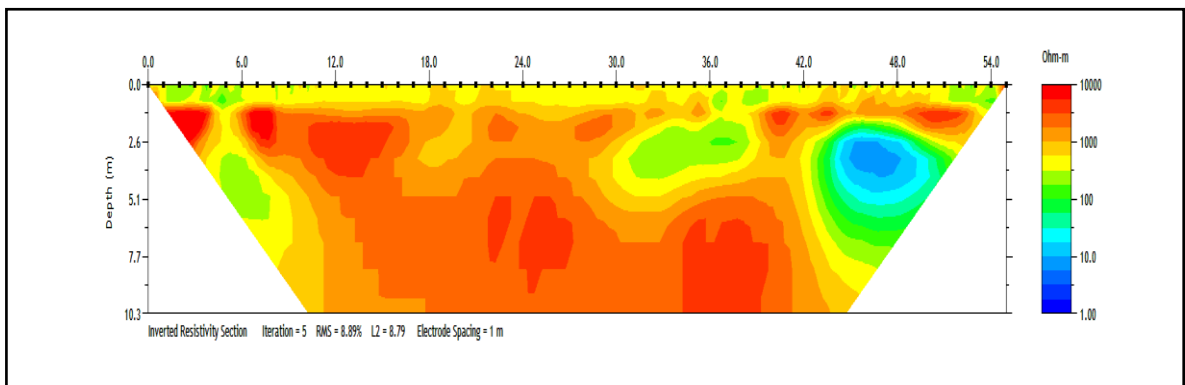
⁴ Fuente: Norma IEEE STD 80 del 2000.

7.2. DISEÑO DE MALLAS DE TIERRA EN SUBESTACIONES INCORPORANDO LAS TOMOGRAFÍAS 2D

Cuando se diseñan SPT para subestaciones de alta tensión se tiene que ser lo más óptimo posible, tanto en lo técnico como en lo económico, de manera tal que la utilización de las tomografías para el cálculo y su diseño de mallas de puesta tierra muestra ventajas en comparación a los sondeos eléctricos verticales, ya que muestra una vista en 2D del perfil del suelo con los valores de resistividades y las propiedades de los materiales que están compuestos.

Se realiza un ejemplo de aplicación comparando el telurómetro y las tomografías 2D, para el diseño de mallas de puesta tierra para una subestación AT con el propósito de comprender como utilizar las tomografías. Se asume que el perfil que se muestra en la Figura 44 corresponde a un solo corte geológico de una subestación en donde se mantiene las condiciones mostradas en toda el área, los diferentes colores representan las resistividades del suelo a diferentes profundidades.

Figura 44. Perfil de resistividades del suelo.



Para realizar los cálculos se tendrá en cuenta las recomendaciones propuestas por la normas IEEE 80-2000 y IEEE 1100, con el telurómetro se tomó el valor de resistividad, hallado en el capítulo 6 de las medidas en campo, asumiendo el modelo de suelo homogéneo. Con el supersting se analiza la tomografía hallada en campo para determinar en qué zonas será más óptimo hacer la malla de tierra.

En la Tabla 8 se presenta la interpretación de la tomografía en el diseño de la malla de tierra.

Tabla 8. Diseños de mallas de tierra con las tomografías.

DISEÑOS DE MALLAS DE TIERRA INCORPORANDO LAS TOMOGRAFÍAS 2D	
ITEM	DESCRIPCIÓN
SECTORES	La tomografía se clasifica en tres zonas de distintas resistividades, resistividades altas están en el rango de 1000 $\Omega \cdot m$ hasta 10000 $\Omega \cdot m$, medias rango 100 $\Omega \cdot m$ hasta 1000 $\Omega \cdot m$ y resistividades bajas rango 1 $\Omega \cdot m$ hasta 10 $\Omega \cdot m$.
PROFUNDIDAD DE EXPLORACIÓN	Se visualiza en el perfil de la tomografía que las resistividades más altas se encuentran localizadas a mayor profundidad del suelo, y las resistividades más bajas están a menor profundidad. En los diseños de mallas esta información es muy esencial, ya que se puede llegar a capas de menor resistividad y disminuir el número de electrodos y conductores.
MODELAMIENTO DEL SUELO	Debido a la complejidad geológica que presenta el suelo no se puede considerar como homogéneo. Un modelo de dos capas será el más apropiado para simular las condiciones reales en que está constituido el suelo. La norma IEEE 80-2000, describe el modelo de dos capas para realizar las iteraciones.

De acuerdo a los valores de resistividades, se tiene una idea de los materiales que está compuesto este suelo. La Figura 1 mostrada en el capítulo 1, presenta rangos de resistividades de acuerdo a cada tipo de material del suelo y rocas.

En la Tabla 9 se especifican los parámetros preliminares para el diseño del SPT, en el Anexo 8 se realizan los cálculos donde se obtuvieron los resultados para el diseño, con el telurómetro.

Tabla 9. Parámetros preliminares de diseño telurómetro.

PARAMETROS	VALORES PRELIMINALES DE DISEÑO
Resistividad del suelo	$\rho = 1259,193 \Omega * m$
Resistividad capa superficial de grava.	$\rho_s = 2500 \Omega * m$
Profundidad Capa superficial grava	$h_s = 0,12 m$
Longitud horizontal del conductor	$L_x = 70 m$
Longitud vertical del conductor	$L_y = 70 m$
Profundidad enterramiento de la malla	$h = 0,5 m$
Resistencia de la malla recomendada	$R_g = 1 \Omega$
Tiempo de despeje de falla monofásica	$0,5 S$
Corriente de falla barra 115 kV	$I_f = 5174,5 A$
Corriente de falla barra 13,2 kV	$I_f = 10740,2 A$

Con los datos presentados en la Tabla 9, se realiza la primera iteración (Anexo 8), con el valor de resistividad hallado en la cancha de softbol con el telurómetro, para un modelo de suelo homogéneo, se encuentra el siguiente resultado.

Tabla 10. Primera iteración en el diseño de malla telurómetro.

CÁLCULO DE MALLA DE PUESTA TIERRA IEEE 80 -2000			
GEOMETRÍA DE LA MALLA			
Largo(X)	[m]	70	
Ancho(Y)	[m]	70	
Área de la malla	[m ²]	4900	
Espacio vertical	[m]	7	
Espacio horizontal	[m]	7	
Longitud Total perímetro de la malla	[m]	280	
Número de conductores horizontales	11	número. electrodos	20
Número de conductores Verticales	11	largo [m]	2,5
Longitud Total de la malla	[m]	LR [m]	50
Profundidad de la malla h	[cm]		
PARÁMETROS ELÉCTRICOS			
Tiempo de duración de la falla t_f [s]	0,5	corriente de falla I_f	11021,411
Falla Línea-Tierra [A]	10740,2		
CONDUCTOR DE LA MALLA			
Tipo de Material	cobre comercial		
Conductividad respecto al cobre Puro %	97		
Temperatura ambiente °C	40		
TENSIONES DE PASO Y CONTACTO			
Peso corporal en [kg]	50		
Límite de Tensión de paso E_s [v]	2284,53537		
Límite de Tensión de contacto E_t [v]	694,170423		
RESISTENCIA DE LA MALLA PUESTA TIERRA			
Subestaciones de alta y extra alta tensión	1	[Ohm]	
Resistencia en la Malla R_g [ohm]	8,71385207	[Ohm]	
GRADIENTE DE POTENCIAL			
Elevación de potencial a tierra GPR [V]	13832741,9		
VOLTAJE DE MALLA			
Tensión de la malla [V]	2154971,54		
VOLTAJE DE PASO			
Tensión de paso real [V]	3314106,9		

El diseño de la malla implementado es una malla horizontal con electrodos en la esquinas y su periferia, con separaciones entre conductores paralelos de 7 m, se realiza el cálculo con 20 electrodos y 1540 metros de conductores. De los resultados calculados se concluye lo siguiente:

El valor de resistencia de la malla para este diseño es $R_g=8,7138 \Omega$ lo cual no cumple con el recomendado por la norma $R_g=1 \Omega$.

La tensión de malla calculada es $E_m=2154971,54 [V]$, no es menor en caso de ocurrir una falla, que la tensión de contacto tolerable $E_t=694,1704 V$.

La tensión de paso real es $E_t=3314106,9 [V]$, no es menor que la tensión de paso tolerable $E_p=2284,53537 [V]$. El diseño preliminar propuesto se requiere modificarlo, ya que no cumple con la norma. En la Tabla 11 se muestra nuevamente los valores del cálculo los cuales se hacen en el Anexo 8 nuevamente modificando los parámetros de la malla.

Tabla 11. Segunda iteración para el diseño de la malla telurómetro.

CÁLCULO DE MALLA DE PUESTA TIERRA IEEE 80 -2000		
GEOMETRÍA DE LA MALLA		
Largo(X)	[m]	70
Ancho(Y)	[m]	70
Área de la malla	[m ²]	4900
Longitud Total de la malla	[m]	9940
Profundidad de la malla h	[cm]	150
CONDUCTOR DE LA MALLA		
Tipo de Material		cobre puro
Conductividad respecto al cobre Puro %		100
Capacidad Térmica TCAP[J/cm ³ °C]		3,42
Temperatura ambiente °C		40
TENSIONES DE PASO Y CONTACTO		
Límite de Tensión de paso $E_s [v]$		4081,31684
Límite de Tensión de contacto $E_t [v]$		1143,36579
RESISTENCIA DE LA MALLA PUESTA TIERRA		
Resistencia en la Malla $R_g [ohm]$		7,81961059 [Ohm]
VOLTAJE DE MALLA		
Tensión de la malla [V]		850336,76
VOLTAJE DE PASO		
Tensión de paso real [V]		5124528,3

Aumentando el número de conductores de 1540 [m] a 9940 [m] y la cantidad de electrodos 20 a 40. La separación entre conductores paralelos se tomó a 1 metro horizontalmente y vertical. Se concluye lo siguiente:

La resistencia de la malla no cumple todavía con la norma $R_g=7,8196 \Omega$

La tensión de malla en caso de ocurrir una falla es $E_m=850336,76 [V]$, no es menor que la tensión de contacto tolerable.

La tensión de paso real en caso de presentarse una falla no es menor que la tensión de paso tolerable.

Al modificar el diseño y no obtener resultados que cumplan con la norma debido a la alta resistividad que presenta la cancha de softbol, se requiere tratamiento artificial del suelo ya que no se cuenta con información suficiente de la geología del suelo.

Se presentan las tomografías como una alternativa para el diseño de las mallas de tierra, debido a que se conoce la composición geológica del suelo en estudio, se determinará que áreas son más óptimas para su instalación. En la Tabla 12 se muestran los parámetros preliminares de diseño y en el Anexo 9 se realizan los cálculos donde se obtuvieron los resultados para este diseño, teniendo en cuenta la información proporcionada por la tomografía de la Figura 44. La tomografía se sectoriza en tres zonas clasificándola en resistividades altas(C), medias(B) y bajas(A).

Se decide realizar el diseño con un modelo de dos capas para simular de manera más eficaz las condiciones reales del suelo, con la línea tomográfica se realiza la instalación de la malla a partir de los 31 metros en adelante con el fin de aprovechar las resistividades más bajas (Figura 45).

Figura 45. Sectorización de la tomografía.

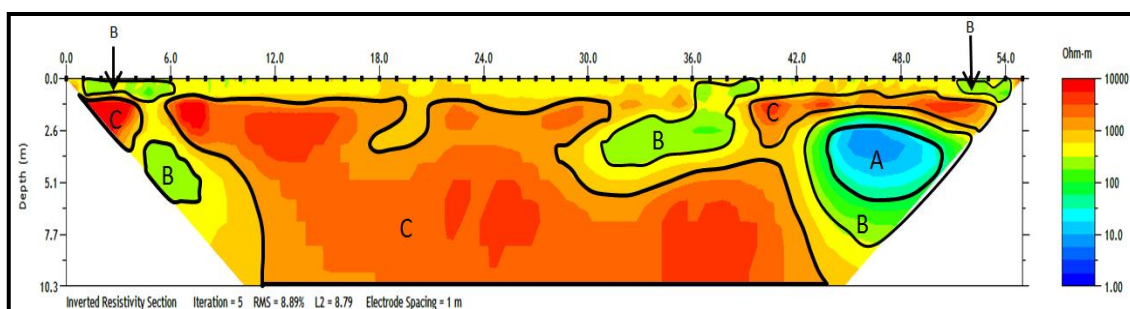


Tabla 12. Parámetros preliminares de diseño supersting.

PARÁMETROS	VALORES PRELIMINALES DE DISEÑO
Resistividad de la capa superior del suelo(Modelo dos capas)	$\rho_1 = 569,5545 \Omega * m$
Resistividad de la capa inferior del suelo(Modelo dos capas)	$\rho_2 = 466,533 \Omega * m$
Espesor de la capa superficial	$H = 2,6 m$
Resistividad capa superficial de grava.	$\rho_s = 2500 \Omega * m$
Profundidad Capa superficial grava	$h_s = 0,12 m$
Longitud horizontal del conductor	$L_x = 70 m$
Longitud vertical del conductor	$L_y = 70 m$
Profundidad enterramiento de la malla	$h = 0,2403 m$
Resistencia de la malla recomendada	$R_g = 1 \Omega$
Tiempo de despeje de falla monofásica	$0,5 S$
Corriente de falla barra 115 kV	$I_f = 5174,5 A$
Corriente de falla barra 13,2 kV	$I_f = 10740,2 A$

Para hallar los valores de resistividades reales para las dos capas, superior e inferior se toma el promedio de resistividades entre el rango $0 \leq h \leq 0,2403$ [m] de profundidad a partir de los 31,7505 [m] de la línea tomográfica para la capa superior. De esta manera se encuentra el valor de resistividad en la cama del conductor. Se observa en la tomografía sectores de resistividades bajas (A) y medias (B), que se encuentran a 2,582 [m] de profundidad a partir de los 31,7505 [m] de la línea tomográfica, se hace el promedio de las resistividades a 31,7505 [m] de la línea de la tomografía para la segunda capa, con el propósito de enterrar electrodos a esta profundidad, el procedimiento se muestra enseguida:

Capa Superior (cama del conductor)

Profundidad enterramiento: $0 \leq h \leq 0,2403$ m

$$\bar{X}_1 = \frac{665,042 + 652,865 + \dots + 4300,05}{49} = 540,311 \text{ } [\Omega * \text{m}]$$

$$\bar{X}_2 = \frac{575,631 + 589,093 + \dots + 6146}{49} = 598,798 \text{ } [\Omega * \text{m}]$$

$$\bar{X} = \frac{\bar{X}_1 + \bar{X}_2}{2} = \frac{540,311 + 598,798}{2} = 569,5545 \text{ } [\Omega * \text{m}]$$

Resistividad capa superior: $\rho_1 = 569,5545 \text{ } [\Omega * \text{m}]$

Capa inferior

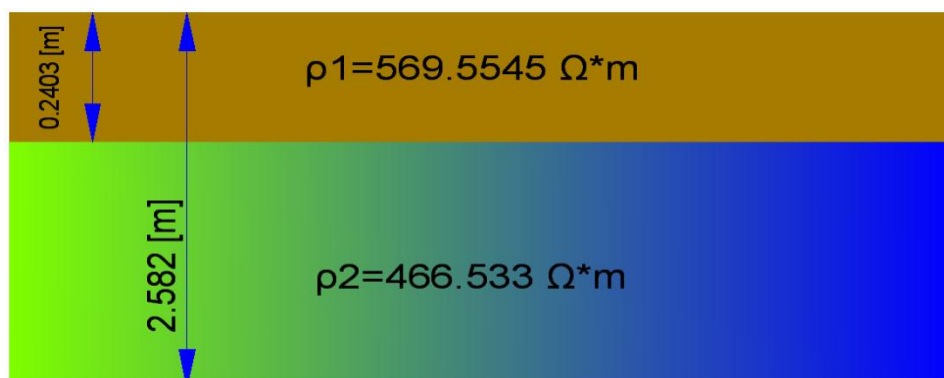
Profundidad enterramiento: 2,582 m

$$\bar{X} = \frac{387,264 + 289,486 + \dots + 2306,42}{49} = 466,533 \text{ } [\Omega * \text{m}]$$

Resistividad capa inferior: $\rho_2 = 466,533 \text{ } [\Omega * \text{m}]$

La Figura 46, representa un suelo de dos capas de las tomografías 2D, donde se modela una capa de resistividad $\rho_1 = 569,554 \text{ } \Omega * \text{m}$ superior y una capa de resistividad inferior $\rho_2 = 466,533 \text{ } \Omega * \text{m}$.

Figura 46. Dos Capas de resistividades.



Los resultados de la primera iteración son los siguientes, mientras en el Anexo 9 se realizan los cálculos donde se obtuvieron los resultados para este diseño.

RESULTADOS DISEÑO DE LA MALLA	
Tensión de paso Tolerable [V]	2045,358601
Tensión de contacto Tolerable [V]	634,3762302
Elevación de potencial [V]	13798,04328
Tensión de malla [V]	1623,649193
Tensión de paso real [V]	1897,847881
Resistencia de malla de puesta tierra[Ω]	3,650693539

En esta primera iteración se encuentra que la resistencia de la malla es $R_g=3,650 \Omega$, lo cual no cumple con la norma.

La tensión de malla es $E_m=1623,649 [V]$, en caso de ocurrir una falla, no es menor que la tensión de contacto tolerable.

La tensión de paso real es $E_s=1897,847 [V]$, no es menor que la tensión de paso tolerable.

Para el diseño preliminar se utilizó 1540 [m] de conductores, una separación entre conductores paralelos de 7 [m] y 3 electrodos de 2,6 [m] de longitud, para un area de 4900 [m²], se modifica el diseño nuevamente variando los parametros preliminares de la malla. En la Tabla 13, se presenta los calculos realizados para la segunda iteración, donde se analizan los resultados hallados, en el Anexo 9 se realizan los calculos para este diseño.

Teniendo en la malla un area de 4900 [m²], empleando 3406,666 [m] de conductores y 20 electrodos con una longitud de 2,6 metros se obtienen los resultados siguientes:

RESULTADOS DISEÑO DE LA MALLA	
Tensión de paso Tolerable [V]	2636,059068
Tensión de contacto Tolerable [V]	782,0513469
Elevación de potencial [V]	13957,8122
Tensión de malla [V]	764,8029611
Tensión de paso real [V]	1819,906481
Resistencia de malla de puesta tierra [Ω]	3,692965284

De estos resultados se observa que la tensión de la malla $E_m=764,802$ [V] es menor que la tensión de contacto tolerable $E_t=782,051$ [V], lo cual cumple con la norma.

La tensión de paso real $E_s=1819,9$ [V], es menor que la tensión de paso tolerable $E_p=2636,059$ [V] con lo que cumple también con la norma.

La resistencia de malla es $R_g=3,692$ Ω lo cual no cumple con la norma, una opción para disminuir la resistencia sería aumentar el área preliminar de la malla o hacer tratamiento artificial a la capa superior que es la de mayor resistividad y volver a iterar.

Tabla 13. Resultados segunda iteración para el diseño de mallas.

Cálculo de malla de puesta tierra IEEE 80-2000 "Guide for Safety in AC Substation Grounding"	
DATOS DEL SUELO	
Resistividad del suelo [$\Omega \cdot m$]	
Resistividad de la capa superior ρ_1 [$\Omega \cdot m$](modelo de dos capas)	569,5545
Resistividad de la capa inferior ρ_2 [$\Omega \cdot m$](modelo de dos capas)	466,533
Espesor de la 1° Capa H(modelo de dos capas) [m]	2,6
Resistividad Capa superficial (Grava) ρ_s [$\Omega \cdot m$]	3000
Espesor Capa Superficial h_s [m]	0,2
GEOMETRÍA DE LA MALLA	
Largo (X) [m]	70
Ancho(Y) [m]	70
Longitud Total perímetro de la malla [m]	280
Longitud Total de la malla [m]	3406,666
Profundidad de la malla h [m]	0,2403
ELECTRODOS EN LA MALLA	
Electrodos en las esquinas	
N. de electrodos	20
Largo[m]	2,6
LR[m]	52
Longitud efectiva[m]	3488,9328
Longitud total[m]	3458,666

DATOS DE CONEXIÓN	
Tiempo de duración de la falla	0,5
Falla Línea Tierra Lado de AT IO[A]	5174,5
Falla Línea Tierra Lado de BT [A]	10740,2
Corriente de Falla IF [A]	11210,52589
Temperatura ambiente °C	40

7.2.1. Comparacion entre el telurómetro y supersting para el diseño.

Para el diseño de la malla con el telurómetro se utilizó 9940 [m] de conductores para segunda iteración y para el supersting 3406,666 [m] de conductores para la segunda iteración, observandose una disminución en la cantidad de material de conductor empleando las tomografías.

La tensión de malla hallada con el telurómetro es $E_m=850336,76$ [V], la calculada con la tomografía es $E_m=764,802$ [V], donde la hallada con el telurómetro no cumple con la norma a pesar que se empleó una mayor cantidad de conductores. Asimismo con la tomografía se requirió menos conductores para encontrar un valor de tensión de malla (E_m), que cumple con la norma.

La resistencia de la malla con el telurómetro resultó de $R_g=7,8196$ Ω para 40 electrodos enterrados para la misma área preliminar de diseño 4900 [m²] en la segunda iteración. En la tomografía es $R_g=3,692$ Ω para la misma área en la segunda iteración, el total de electrodos fue 20, enterrados a 2,6 [m] de profundidad, observando un valor de resistencia menor para menos cantidad de electrodos, lo cual es mas ventajoso porque disminuye la cantidad de materiales.

Con el Telurómetro no es posible determinar la geología del suelo ya que no se cuenta con información suficiente, un suelo con una geología compleja cambia la resistividad vertical y horizontalmente, es mejor la metodología WENNER con Tomografías debido a que la información arrojado por ella es mayor para el diseño de un SPT.

Las Tomografías emplean programas computacionales para la interpretación real de las resistividades del suelo, lo cual arroja el perfil necesario para realizar diseños donde se determinan donde es más eficiente la instalación del SPT.

Para diseñar una malla de puesta a tierra es importante hacer tomografías 2D con el suelo seco debido a que el sistema de puesta a tierra debe ser confiable en cualquier condición siendo la más crítica cuando se encuentra el suelo seco.

Al tener tomografías 2D de las resistividades del suelo se contará con mayor información, la cual permitirá poder observar capas del suelo no superficiales que indique características de resistividades del suelo para hacer la malla de puesta a tierra.

8. CONCLUSIONES

- ❖ Las comparaciones permitieron establecer que existen suelo con resistividades variables y la aplicación del método Wenner propuesta en las normas IEEE80/81 y el RETIE, se podría complementar para una mejor interpretación y un adecuado modelo de la estratigrafía del subsuelo por medio de tomografías 2D para obtener mejores diseños de puestas a tierra.
- ❖ Mediante la aplicación y el uso de tomografías 2D es posible generar un modelo del suelo, en el cual se contemple un modelo geodinámico más exacto, considerando tanto la variación de la resistividad desde la superficie del suelo así como la profundidad. Lo anterior permite determinar de manera más exacta el valor de resistividad del suelo, el cual es un parámetro importante para la elaboración el diseño de la malla de puesta a tierra.
- ❖ La presencia de agua puede afectar considerablemente la resistividad del suelo y dar una amplia variación de resistividades en un mismo material, es necesario conocer previamente la geología, o cotejar con sondeos u otro tipo de ensayos para corroborar la información de la distribución de la resistividad.
- ❖ La estratigrafía del subsuelo obtenida mediante tomografías 2D, permite generar un conjunto de perfiles geoelectricos, en el cual se identifican las áreas o segmentos que cuenten con resistividades elevadas, elementos metálicos (tuberías, armazones, etc.) o con una mayor desviación de los valores de resistividad y por lo tanto requieran de un tratamiento químico de los componentes del suelo. Adicionalmente, el mapeo de la distribución de resistividad debe ser considerado como un factor a tener en cuenta en el momento de determinar las dimensiones adecuadas y la profundidad de enterramiento de la malla de puesta a tierra durante las fases del diseño.
- ❖ Siguiendo la metodología de la norma IEEE 80/81, a partir de un conjunto amplio de datos, se obtuvo una medida más fina con el tomógrafo, en comparación del telurómetro.

- ❖ En el cálculo de sistemas de puesta a tierra (SPT), las tomografías 2D presenta grandes ventajas en comparación a los sondeos eléctricos verticales, dado que permite tener una visión continua en un plano bidimensional.

- ❖ El desarrollo informático ha impulsado los métodos geoeléctricos, evolucionando hasta el método conocido como tomografías 2D, esto ha generado metodologías más efectivas y rápidas para medir la resistividad que aportan más información del sitio de estudio, no incluidas en las normas IEEE 80 y 81, el cual para el sector eléctrico contribuye a la optimización de las investigaciones y valorización de estudios de resistividades de suelos.

9. RECOMENDACIONES

- ❖ Se recomienda llevar a cabo delimitaciones de la tomografía por medio de zonas con resistividades altas, medias y bajas para una mejor comprensión de esta a la hora de interpretar y escoger la resistividad más acertada para SPT.
- ❖ Es recomendable analizar el sitio de objeto de estudio por medio de la geología del sector, en aras de ser más explícitos y corroborar las resistividades del sector con las medidas de los equipos.
- ❖ Se recomienda tener en cuenta las diferentes resistividades de cada tipo de material de cual está compuesta el suelo y el intervalo donde fluctúan los valores de resistividades lo cual es importante tener en cuenta en los diseños de SPT.
- ❖ El proceso de interpretación, consiste en analizar las variaciones de resistividad, se recomienda cotejar con sondeos mecánicos, para corroborar la información de la distribución de resistividad. ya que la presencia de agua, composición del suelo, estratigrafía, granulometría, temperatura y compactación, puede afectar considerablemente la resistividad.
- ❖ En el diseño de un SPT de gran tamaño debido a las resistividades altas, es aconsejable encontrar el área de más bajas resistividades de este sector para lograr la instalación más económica y que cumpla con la norma.
- ❖ Se recomienda hacer tomografías para hacer un mejor SPT y tener más información de la resistividad del suelo que ayude a tomar decisiones más acertadas para el diseño de un SPT.
- ❖ Se recomienda usar el método Wenner con separaciones iguales (a) con el tomógrafo, ya que es la configuración más usada para el uso de ingeniería eléctrica y es el recomendado por las normas internacionales.
- ❖ Dado que la resistividad del suelo es uno de los parámetros más importante a la hora de diseñar la malla de tierra, el tener una distribución más exacta del comportamiento de la resistividad permitirá un diseño óptimo.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- [1]. Andrés Antonio López Hidalgo, Gerardo Oscar Fanton, "Técnicas prácticas para investigación de resistividad en dos y tres dimensiones (tomografía eléctrica 2d y 3d)", Instituto Geofísico Sismológico Ing. F. S. Volponi, Facultad de Cs. Exactas, Físicas y Naturales. Universidad Nacional de San Juan, Av. Ignacio de La Roza y Meglioli S/N- Rivadavia- CP (5400) - San Juan - Argentina.
- [2]. Pablo A. Weinzettel, Sebastián Dietrich y Marcelo Varni, "utilización de tomografía eléctrica con distintas configuraciones y espaciamientos electródicos para la caracterización de la zona no saturada", Instituto de Hidrología de Llanuras (UNCPBA-CIC -Mun. de Azul) Rep. de Italia 780 – CC 44 – 7300 Azul – Bs. As.-Argentina.
- [3]. Félix Humberto Montaña Mejía, Pedro Alfonso Vega, " Aplicación de métodos eléctricos de prospección geofísica", Revista CIER N° 53 - 2009.
- [4]. Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas RETIE, Ministerio de Minas y Energía, República de Colombia. 2013.
- [5]. José Samuel Ramírez Castaño, Eduardo Antonio Cano Plata, " Sistemas de puesta a tierra: Diseñado con IEEE-80 y evaluado con MEF", Facultad de ingeniería y arquitectura Universidad Nacional de Colombia Sede Manizales 2010.
- [6]. Andrés López Hidalgo, Juan Bustinza, Oreste Cittadini, " Aplicación de la tomografía eléctrica al estudio del lecho de roca en las futuras presas sobre el río santa cruz: cóndor cliff y la barrancosa", Consultor Geofísico de ALH Geofísica. Investigador Instituto Geofísico Sismológico Ing. F. S. Volponi, Facultad de Cs. Exactas, Físicas y Naturales. Universidad Nacional de San Juan. Argentina.
- [7]. Asanka S. Rodrigo, " Safety in AC Substation Grounding Systems under Transient Conditions: Development of Design Software," 2013 IEEE 8th International Conference on Industrial and Information Systems, ICIIS 2013, Aug. 18-20, 2013, Sri Lanka.
- [8]. Normas ANSI/IEEE Standard 80 IEEE, "Guide for safety in AC Substation Grounding", 2000.
- [9]. Normas ANSI/IEEE Standard 81 IEEE, "Guide for measuring Earth Resistivity, Ground Impedance, and Earth Surface Potentials of a Grounding System", 2012.
- [10]. Jaime Suárez Díaz, "Tomografía geoléctrica", Geotecnología SAS.2013
- [11]. Arturo Jesús Lorenzo Ferrás, "Geoelectricidad", Programa de formación iberoamericano en material de aguas, Área temática 4.1. Hidrogeología IV, Ciudad de la Habana, cuba.
- [12]. <http://www.portalciencia.net/geoloroc4.html>
- [13]. <http://www.portalciencia.net/geoloroc2.html>

- [14]. De la Torre González Brenda Viridiana, "Definición de zonas de fracturamiento empleando tomografía de resistividad eléctrica 3d, universidad nacional autónoma de méxico facultad de ingeniería división de ingeniería en ciencias de la tierra.
- [15]. Favio Casas Ospina, "Tierras, Soporte de la Seguridad Eléctrica", Quinta Edición
- [16]. Judith Amparo Ramírez Roa, "Propuesta de procedimiento para la medición de la resistividad del suelo y la Resistencia de puesta a tierra en Líneas de Transmisión", Trabajo de grado UIS.
- [17]. Karen Lorena Orrego, "Análisis de la metodología Box-Cox para medir la resistividad del terreno, Proyecto de grado Universidad Tecnológica de Pereira.
- [18]. Normas Técnicas, "Medida de resistividad eléctrica del suelo", EPM.
- [19]. José Samuel Ramírez & Eduardo Antonio Cano, "Sistemas de puesta tierra diseño con IEEE 80 y evaluado con EMF", Universidad Nacional de Colombia.
- [20]. "Manual del usuario MI 2088 Probador de aislamiento de Tierra" Versión 1.0 código n°20750325 METREL 2003.
- [21]. Luis Alberto & Pedro Mauricio, "Modelación del problema inverso geoelectrónica 2D mediante elementos finitos", Departamento de Geociencias, Universidad Nacional de Colombia.
- [22]. "Cálculo de la incertidumbre y forma de expresar los resultados de las practicas".
- [23]. Mejía Villegas S.A, "Subestación de Alta y Extra alta Tensión", Segunda edición.
- [24]. Rosa Carolina & Gabriel Eduardo "Paleomagnetismo y Mineralogía Magnética en las unidades del Mesozoico de Bucaramanga y el Macizo de Floresta" INGEOMINAS, Bogotá, Colombia.
- [25]. Douglas C. Montgomery, "Probabilidad y Estadística aplicadas a la Ingeniería" Segunda Edición.
- [26]. Humberto Gutiérrez Pulido, "Análisis y diseño de experimentos," Segunda Edición.
- [27]. Marescocot, L. (2008) "Imagerie Electrique pour Geologues acquisition, traitement interpretation".
- [28]. Lagmanson, M. (2005). Electrical Resistivity Imaging. Geophysical Electrical Resistivity Surveying.
- [29]. AGI, I. (2013). Instruction Manual for EarthImager 2D.
- [30]. Serrano, J (2003). Caracterización geofísica de filtraciones de agua en el subsuelo.

BIBLIOGRAFÍA

Andrés Antonio López Hidalgo, Gerardo Oscar Fanton, "Técnicas prácticas para investigación de resistividad en dos y tres dimensiones (tomografía eléctrica 2d y 3d)", Instituto Geofísico Sismológico Ing. F. S. Volponi, Facultad de Cs. Exactas, Físicas y Naturales. Universidad Nacional de San Juan, Av. Ignacio de La Roza y Meglioli S/N- Rivadavia- CP (5400) - San Juan - Argentina.

Andrés López Hidalgo, Juan Bustinza, Oreste Cittadini, "Aplicación de la tomografía eléctrica al estudio del lecho de roca en las futuras presas sobre el río Santa Cruz: Cóndor Cliff y la Barrancosa", Consultor Geofísico de ALH Geofísica. Investigador Instituto Geofísico Sismológico Ing. F. S. Volponi, Facultad de Cs. Exactas, Físicas y Naturales. Universidad Nacional de San Juan. Argentina.

Asanka S. Rodrigo, "Safety in AC Substation Grounding Systems under Transient Conditions: Development of Design Software," 2013 IEEE 8th International Conference on Industrial and Information Systems, ICIIS 2013, Aug. 18-20, 2013, Sri Lanka.

Arturo Jesús Lorenzo Ferrás, "Geoelectricidad", Programa de formación iberoamericano en material de aguas, Área temática 4.1. Hidrogeología IV, Ciudad de la Habana, Cuba.

AGI, I. (2013). Instruction Manual for EarthImager 2D.

"Cálculo de la incertidumbre y forma de expresar los resultados de las prácticas".

De la Torre González Brenda Viridiana, "Definición de zonas de fractura mediante el uso de tomografía de resistividad eléctrica 3D", Universidad Nacional Autónoma de México facultad de ingeniería división de ingeniería en ciencias de la tierra.

Douglas C. Montgomery "Probabilidad y Estadística aplicadas a la Ingeniería" Segunda Edición.

Félix Humberto Montaña Mejía, Pedro Alfonso Vega, "Aplicación de métodos eléctricos de prospección geofísica", Revista CIER N° 53 - 2009.

Favio Casas Ospina, "Tierras, Soporte de la Seguridad Eléctrica", Quinta Edición

Humberto Gutiérrez Pulido, "Análisis y diseño de experimentos" Segunda Edición.

José Samuel Ramírez Castaño, Eduardo Antonio Cano Plata, "Sistemas de puesta a tierra: Diseñado con IEEE-80 y evaluado con MEF", Facultad de ingeniería y arquitectura Universidad Nacional de Colombia Sede Manizales 2010.

Judith Amparo Ramírez Roa, "Propuesta de procedimiento para la medición de la resistividad del suelo y la Resistencia de puesta a tierra en Líneas de Transmisión", Trabajo de grado UIS.

José Samuel Ramírez & Eduardo Antonio Cano "Sistemas de puesta tierra diseño con IEEE 80 y evaluado con EMF", Universidad Nacional de Colombia.

Jaime Suárez Díaz "Tomografía geoelectrica", Geotecnología SAS.2013

Karen Lorena Orrego, "Análisis de la metodología Box-Cox para medir la resistividad del terreno, Proyecto de grado Universidad Tecnológica de Pereira.

Lagmanson, M. (2005). Electrical Resistivity Imaging. Geophysical Electrical Resistivity Surveying.

[21]. Luis Alberto & Pedro Mauricio "Modelación del problema inverso geoelectrica 2D mediante elementos finitos", Departamento de Geo ciencias, Universidad Nacional de Colombia.

Mejía Villegas S.A "Subestación de Alta y Extra alta Tensión", Segunda edición.

Marescocot, L. (2008) "Imagerie Electrique pour Geologues acquisition, traitement interpretation".

"Manual del usuario MI 2088 Probador de aislamiento de Tierra" Versión 1.0 código n°20750325 METREL 2003.

Normas ANSI/IEEE Standard 80 IEEE, "Guide for safety in AC Substation Grounding", 2000.

Normas ANSI/IEEE Standard 81 IEEE, "Guide for measuring Earth Resistivity, Ground Impedance, and Earth Surface Potentials of a Grounding System", 2012.

Normas Técnicas, "Medida de resistividad eléctrica del suelo", EPM.

Pablo A. Weinzettel, Sebastián Dietrich y Marcelo Varni, "utilización de tomografía eléctrica con distintas configuraciones y espaciamientos electródicos para la caracterización de la zona no saturada", Instituto de Hidrología de Llanuras (UNCPBA-CIC -Mun. de Azul) Rep. de Italia 780 – CC 44 – 7300 Azul – Bs. As.-Argentina.

Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas RETIE, Ministerio de Minas y Energía, República de Colombia. 2013.

Rosa Carolina & Gabriel Eduardo "Paleomagnetismo y Mineralogía Magnética en las unidades del Mesozoico de Bucaramanga y el Macizo de Floresta" INGEOMINAS, Bogotá, Colombia.

Serrano, J (2003). Caracterización geofísica de filtraciones de agua en el subsuelo