

Comparación metodología en la obtención del modelo de suelo de 2 capas

Edwin Esneider Rodríguez Cano
José Alejandro Sánchez Hernández

Trabajo de Grado Presentado como Requisito Parcial para el Título de:
Ingeniero Electricista

Asesores:

Ing. Joseph Sosapanta Salas, MBA
Ing. Bayron Álvarez Arboleda, PhD

Institución Universitaria Pascual Bravo
Facultad de Ingeniería
Ingeniería Eléctrica
Mayo 2022

Resumen

El presente trabajo de grado es una investigación que trata sobre una comparación metodológica en la obtención del modelo de suelo de 2 capas, las mediciones de campo se realizaron dentro de la Institución Universitaria Pascual Bravo, tomando como referencia para dichas mediciones 2 zonas alejadas una de la otra dentro del complejo donde se evidencia la variación en las condiciones de resistividad del terreno medido. La recopilación de información en campo sirve para alimentar las plantillas y realizar los cálculos del modelo de suelo de 2 capas, el cual se obtiene por medio de los métodos de Sunde y del gradiente descendente. A lo largo de este trabajo se abordan los 2 métodos ya mencionados, comenzando con una breve teoría explicando en qué consisten, seguido del procedimiento para la correcta aplicación en cuanto a cálculos se refiere. Adicionalmente, se explica qué es un modelo de suelo de 2 capas, en donde también se plasma el procedimiento para una correcta medición en campo. Por último, se indica el caso estudio, con sus respectivos datos, tablas y análisis. Al conocer los resultados de los cálculos realizados se evidencia cuál de los métodos es el más exacto y por ende el más confiable para realizar el diagnóstico del sistema de puesta a tierra.

Palabras clave: conductividad, medidas eléctricas, método de Sunde, método del gradiente descendente, resistividad del suelo, sistemas de puesta a tierra.

Abstract

The present degree work is an investigation that deals with a methodological comparison in obtaining a two-layer soil model, the field measurements are carried out within the Institución Universitaria Pascual Bravo, taking as a reference for these measurements two remote areas one from the other within the complex where the variation in the resistivity conditions of the measured terrain is evident. The collection of information in the field serves to feed the templates and perform the calculations of the two-layer soil model, which is obtained by means of the Sunde and descending gradient methods. Throughout this work the two methods are addressed, beginning with a brief theory explaining what they consist of, followed by the procedure for the correct application in terms of calculations. Additionally, it is explained what is a two-layer soil model, where the procedure for a correct measurement in the field is also reflected. Finally, the case study is reflected, with its respective data, tables, and analysis. Knowing the results of the calculations made, it is evident which of the methods is the most accurate and therefore the most reliable to perform the diagnosis of the grounding system.

Keywords: conductivity, grounding systems, soil resistivity, Sunde's method, electrical measurements, descending gradient method.

Tabla de Contenido

Resumen.....	2
Abstract	3
Tabla de Contenido	4
Lista de figuras.....	6
Lista de Tablas	7
Glosario.....	8
Introducción	9
Planteamiento del problema.....	10
Justificación	11
Objetivos.....	12
Objetivo general:.....	12
Objetivos específicos:	12
Metodología	13
Marco teórico	14
Técnicas de medición de resistividad	17
Método de Wenner.....	17
Método de Schlumberger-Palmer	18
Modelos de Suelos	19
Suelo homogéneo.....	19
Suelo a 2 capas horizontales	19
Otros modelos de suelos	19
Método grafico de Sunde	19
Método del gradiente descendente.....	21
Caso de estudio	22
Análisis de resultados	24
Aplicación método grafico de Sunde para el terreno 1	24
Aplicación método grafico de Sunde para el terreno 2.....	26
Aplicación método del Gradiente descendente para el Terreno 1	28
Aplicación método del Gradiente descendente para el Terreno 2	29

Análisis de resultados	31
Cronograma.....	33
Conclusiones	34
Referencias bibliográficas.....	35
Anexo 1. Telurómetro MI 2088 Earth - Insulation Tester.....	36
Anexo 2. Registro fotográfico de los datos obtenidos con el telurómetro en el terreno 1	38
Anexo 3. Registro fotográfico de los datos obtenidos con el telurómetro en el terreno 2.....	40
Anexo 4. Ficha técnica telurómetro MI 2088 Earth - Insulation Tester	42
Anexo 5. Solver Excel	43
Anexo 6. Registro fotográfico en la obtención de datos.....	44
Anexo 7. Datos obtenidos	45

Lista de figuras

Figura 1. Esquema de medición método de Wenner.	18
Figura 2. Esquema de medición método de Schlumberger-Palmer.	18
Figura 3. Esquema del modelo de suelo de 2 capas.	20
Figura 4. Método grafico de Sunde.	20
Figura 5. Georreferenciación Institución Universitaria Pascual Bravo.	22
Figura 6. Georreferenciación Terreno 1.	22
Figura 7. Georreferenciación Terreno 2.	23
Figura 8. Método grafico de Sunde terreno 1.	25
Figura 9. Método grafico Sunde terreno 2.	27
Figura 10. Método del Gradiente descendente aplicado al terreno 1.	28
Figura 11. Método del Gradiente descendente aplicado al terreno 2.	30

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1. Datos Terreno 1, promedio de datos y resultados.....	24
Tabla 2. Datos Terreno 2, promedio de datos y resultados.....	26
Tabla 3. Resumen de resultados Método Sunde Vs. Gradiente descendente.	31
Tabla 4. Cronograma	33

Glosario

Electrodo: un objeto conductor a través del cual se establece una conexión directa a tierra.

Conductividad eléctrica: es la propiedad de todo elemento que tiene la facultad de conducir la electricidad. Esta propiedad física se basa en la capacidad de los elementos de conducir la corriente eléctrica a través de ellos mismos. Ésta depende de la forma en que esté compuesta una sustancia o material, así como de la estructura molecular del material o de su estructura atómica.

Gradiente: hacer referencia a la razón existente entre el cambio del valor de una magnitud en 2 puntos y la distancia que se registra entre ellos. el concepto se utiliza en múltiples ámbitos. El gradiente puede ser la diferencia de intensidad de una energía o de un efecto en 2 momentos o puntos distintos.

IEEE: el Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos es la sociedad técnico-profesional más grande y prestigiosa del mundo, dedicada a promover y divulgar los avances científicos en las áreas de Ingeniería Eléctrica, Electrónica, Energética, Informática y afines.

Impedancia eléctrica: representa la cantidad de ohm con la cual se opone a la circulación de corriente. Es la suma vectorial de la resistencia más la reactancia. La impedancia es un número complejo. La parte real es la resistencia del circuito y la parte imaginaria la reactancia. La unidad de la impedancia es el ohm Ω y la letra que la representa es la Z.

Modelo: es una construcción teórica (modelo matemático) de un sistema físico.

Resistividad eléctrica: es una propiedad fundamental del material que cuantifica la fuerza con la que un material dado se opone al flujo de corriente eléctrica. Una resistividad baja indica un material que permite fácilmente el flujo de corriente eléctrica. La unidad en el SI de resistividad eléctrica es el ohm por metro ($\Omega.m$).

Introducción

Esta investigación tiene como fin crear un documento en el que se puedan detallar los criterios de ingeniería para el correcto desempeño en el campo laboral de la medición, corrección, mantenimiento y mejoramiento de los sistemas de puesta a tierra sin infringir la norma. Se realizara el diagnóstico del sistema de puesta a tierra mediante la medición y el cálculo de la resistividad basada en los libros y para los cálculos se tomaran como referencia los descritos en este documento, con el fin de contribuir a la investigación sobre el estado físico y funcional de la malla de puesta a tierra en los sistemas eléctricos, el equipo adecuado para la medición de la resistividad del terreno en dichas mallas y la información necesaria para realizar las mediciones en los sistemas de puestas a tierra señalados en el alcance del proyecto. La actividad se realizará de acuerdo con el cronograma planteado en el presente documento.

Para lo anterior es fundamental que se realice el análisis de los parámetros del modelo de suelo de 2 capas obtenidos mediante el método gráfico de Sunde y el método del gradiente descendente, por lo que se deben obtener datos confiables y exactos.

Este trabajo consta de cinco capítulos, a saber:

Capítulo 1: Marco teórico, donde se explican algunos de los diferentes métodos que existen para la medición de la resistividad y se describe la importancia del desarrollo de dichos métodos para los sistemas de puesta a tierra. Por último, se aborda la teoría sobre los modelos de suelo.

Capítulo 2: Caso estudio, el cual detalla la ubicación donde se tomaron las muestras, también evidencia los datos tomados en terreno y la aplicación de los métodos propuestos con sus respectivas gráficas.

Capítulo 3: Cronograma, donde se tiene la planeación de las actividades a realizar para el desarrollo del presente trabajo.

Capítulo 4: Resultados, se presenta los resultados obtenidos de los cálculos realizados, y sus respectivos análisis comparando ambas metodologías.

Capítulo 5: Conclusiones, donde se realiza una revisión reflexiva general de los resultados obtenidos.

Planteamiento del problema

En el campo de la ingeniería eléctrica se presentan múltiples modelos de estudio, diseños, comparativos y modelos para las instalaciones de puestas a tierra. Lo cual ha llevado a realizar un estudio comparativo con el que se pretende mostrar la metodología más eficiente y eficaz para el diseño de puestas a tierras. La comparativa toma como referencia las normas IEEE Std 81 e IEEE Std 80, las cuales muestran 2 metodologías diferentes para obtener un modelo de suelo de 2 capas, el cual comprende 3 parámetros importantes para obtener: resistividad de la capa superior (ρ_1), resistividad de la capa inferior (ρ_2), y altura de la capa superior (h). La primera referencia se toma de la norma IEEE Std 81, la cual es el método gráfico de Sunde, del cual se obtienen los parámetros del modelo mediante las gráficas propuestas por el mismo, luego con la obtención de los datos recopilados en 2 diferentes lotes de tierra ubicados en la Institución Universitaria Pascual Bravo con un equipo especializado llamada telurómetro y sus componentes (Anexo 1). Con los datos ya obtenidos y siguiendo los parámetros del método de Sunde se procede a generar las gráficas las cuales son comparadas con las gráficas de las curvas típicas de resistividades del método. La segunda metodología es tomada de la norma IEEE Std 80, la cual corresponde al método del gradiente descendente que se fundamenta en una técnica de optimización y se resuelve mediante algoritmos iterativos para calcular el mínimo de una función $f(x)$ con los mismos datos obtenidos con el telurómetro. Luego con los resultados obtenidos en las mediciones de resistividad se realiza el comparativo de los métodos mostrando cual es el método más eficaz y eficiente para el diseño de un sistema puesta a tierra, y así obtener un panorama más amplio de aplicabilidad y generalización de los resultados y conclusiones de este trabajo.

¿Cómo obtener el modelo de 2 capas por medio de 2 metodologías diferentes, el método gráfico de Sunde y el método del gradiente descendente?

Justificación

Según el Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas (RETIE), toda instalación eléctrica a la que aplique el reglamento debe disponer de un Sistema de Puesta a Tierra (SPT), para evitar que personas en contacto con la instalación queden sometidas a tensiones de paso, contacto o transferidas.

En el diseño de SPT se debe comprobar mediante cálculos que los valores máximos de las tensiones de paso y de contacto a las que puedan estar sometidos los seres humanos, no superen los valores límites de soportabilidad. Dichos cálculos deben tomar como base una resistencia del cuerpo de 1000Ω . Para el procedimiento básico del diseño de un SPT según el RETIE se requiere investigar las características del suelo, especialmente la resistividad.

Cuando se presentan valores de resistividad altos en el terreno se deben tomar medidas para no exponer a personas a tensiones por encima de los umbrales de soportabilidad del ser humano. (Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas, 2022).

Si la resistividad varía notablemente con la profundidad es apropiada aumentar las mediciones, con el fin de obtener los valores de resistividad de las capas más profundas. Debido a que la fuente de corriente del equipo penetra más capas de suelo tanto vertical como horizontal. (Casas Ospina, 2010)

Objetivos

Objetivo general:

- Analizar los parámetros del modelo de suelo de 2 capas obtenidos mediante el método gráfico de Sunde y el método del gradiente descendente.

Objetivos específicos:

- Establecer el procedimiento para la realización y aplicación de las metodologías propuestas.
- Obtención de datos para el análisis matemático en la comparación metodológica del método de las 2 capas.
- Realizar un análisis objetivo a modo comparativo, sobre los resultados arrojados por ambas metodologías.

Metodología

Este proyecto de grado apuntara a la investigación aplicada, los datos obtenidos y las variables utilizadas se emplearán en una comparación metodológica entre 2 diferentes técnicas para la obtención del modelo de suelo de 2 capas propuestas en las normas IEEE.

Se utilizarán 2 métodos de mediciones: el método gráfico de Sunde y el método del gradiente descendente para obtener los datos requeridos y necesarios y realizar los comparativos y dar respuesta a lo planteado.

Marco teórico

En las décadas pasadas, diferentes estudios y cálculos se han implementado en el sistema de puesta a tierras para las grandes instalaciones eléctricas. Estas técnicas y cálculos están basados en trabajos semiempíricos o fundamentos intuitivos, como la superposición de fuentes de corriente o un promedio del error [1].

El desarrollo de estos métodos ha significado un importante avance en el análisis y cálculo de sistemas de puesta a tierra, estos también plantearon una serie de problemas y fallas importantes que supusieron aplicaciones limitadas con disposiciones muy simples de los electrodos de tierra en modelos de suelo uniforme, dando resultados pocos realistas cuando se aumenta la segmentación de los conductores y la incertidumbre en el margen de error de los cálculos [2].

Los sistemas de puesta a tierra cada vez son más importantes en los sistemas de potencia eléctrica y de comunicaciones, ya que representan una alta seguridad a las personas y a los equipos. Un mal diseño de puesta a tierra puede poner en peligro la óptima operación de los equipos ya que se puede presentar un aumento de tensión en la red a la cual están conectados ocasionándoles fallas en su operación, igualmente puede traer consecuencias graves a personal técnico que opere dichos sistemas eléctricos como heridas graves o incluso la muerte [3].

Teniendo en cuenta lo anterior es importante contar con personal capacitado y calificado en sistemas de puesta a tierra en empresas que cuenten con un gran sistema eléctrico. Los sistemas de puesta a tierra van de la mano con el diseño, construcción y operación de cualquier sistema eléctrico [4].

Hoy en día el diseño y modelamiento de un sistema de puesta a tierra es más confiable gracias al gran desarrollo tecnológico que atraviesa la humanidad [5].

Al construir puestas a tierras es necesario tener conocimiento del material a utilizar, tratamiento del terreno, soldaduras y conectores, todo debidamente certificado. Al diseñar un sistema de puesta a tierra (SPT) es necesario tener muy claro cuál será la finalidad del STP, tipo

de conexión, tipo de instalación (residencial, comercial, industrial, hospitalaria o de telecomunicaciones) [6].

Según el tipo de instalación eléctrica que se requiera, existen diferentes modalidades de conexión a tierra, también llamados regímenes de neutro, según sea la prioridad del usuario. Por ejemplo, mantener la disponibilidad de energía eléctrica sin importar el costo, como sucede en los hospitales o industrias [7].

Los principales parámetros del comportamiento eléctrico del suelo son: la resistividad o su opuesto la conductividad, la permitividad o constante dieléctrica, la permeabilidad magnética. Estos parámetros no son constantes ni en el espacio ni en el tiempo. Sus variaciones dependen de: frecuencia, humedad del suelo, las sustancias disueltas y la temperatura [8].

La modelación del suelo para el análisis de su comportamiento como parte del sistema eléctrico es fundamental dentro de un estudio. Una práctica muy usual es la de suponer terreno homogéneo, para facilitar el uso de expresiones analíticas conocidas. Por ejemplo, para la evaluación de la resistencia a tierra de electrodos, e ignorar la variación con la frecuencia. Para bajas frecuencias, el suelo estratificado en capas horizontales homogéneas es una buena alternativa (dos, tres o más capas) [9].

Para efectos de los sistemas de puesta a tierra, interesan profundidades desde unos pocos hasta algunas centenas de metros, dependiendo de la longitud de los conductores que la figura. Esto es determinante en la aplicación de los métodos de medición de la resistividad y en los modelos de suelo utilizados para el estudio del comportamiento de las puestas a tierra, modelos que deben ser capaces de considerar la resistividad encontrada hasta la profundidad de interés para el sistema en específico [10].

Realizar un diagnóstico de la capacidad conductiva del terreno, para lo cual se llevan a cabo las mediciones de resistividad, es el primer paso para el diseño de los SPT, este valor encontrado es uno de los principales factores a tener en cuenta en definir la facilidad y la forma como se distribuirá la corriente en el suelo y la diferencia de potencial en este [11].

Los métodos para obtener la resistividad se diferencian entre sí, por el número de electrodos utilizados y su disposición relativa. Cada uno de esos métodos busca la solución de determinados problemas geológicos o físicos para la medición de la resistividad, que se presentan en el sitio en que requiere obtener el valor de ese parámetro, con el fin de diseñar el sistema de puesta a tierra [12].

Según la norma IEEE-80, un diseño de SPT tiene los siguientes objetivos:

1. Proporcionar medios para llevar corrientes eléctricas a la tierra en condiciones normales y de falla.
2. Minimizar el riesgo de que personas que se encuentren cerca de instalaciones eléctricas con descarga a tierra queden expuestas a la descarga eléctrica.

Las consecuencias de una descarga de corriente eléctrica que pasa por órganos vitales dependen de la duración, magnitud y frecuencia de esta corriente. La consecuencia más peligrosa es una fibrilación ventricular que resulta en un paro inmediato.

Técnicas de medición de resistividad

No se conoce un procedimiento estandarizado para realizar mediciones de resistividad. A continuación, se presenta la enumeración de pasos sugeridos en manuales de algunas empresas de energía para medición por método de Wenner:

1. Realizar una inspección visual del área para identificar obstáculos inmediatos o previsibles. tomar datos como, fecha de la medición, fecha de la última lluvia.
2. Comenzar la toma de datos con separaciones entre electrodos de 1 m, después 2 m e ir incrementado en lo posible en múltiplos de 2.
3. Debe procurarse realizar mediciones hasta con separaciones comparables a las mayores longitudes del electrodo previsible en el diseño de la malla.
4. Cuando se obtengan datos muy salidos de las curvas de ρ_a de cada perfil, deben repetirse o eliminarse del conjunto, si no hay una explicación para los mismos.

Las mediciones de resistividad de la tierra se utilizan para realizar lo siguiente:

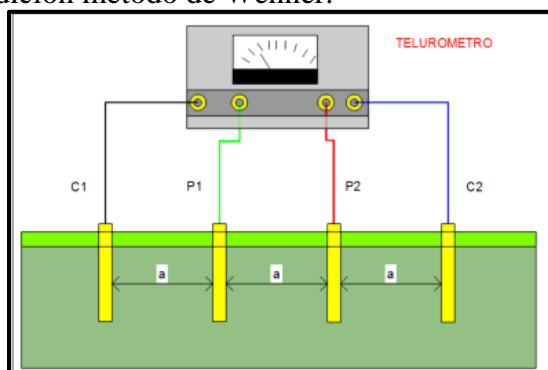
1. Estimar la impedancia de tierra de un SPT.
2. Evaluar los gradientes potenciales, voltajes de paso y de contacto.
3. Diseño de sistemas de protección catódica.
4. Diseño de amortiguaciones de corriente alterna para acoplamiento entre líneas de transmisión y de oleoducto.
5. Llevar a cabo estudios geológicos. (Moreno, Valencia, Villa, & Villa, 2007)

Método de Wenner

La metodología planteada por Frank Wenner en 1915 consiste en ubicar los electrodos en línea recta e igualmente espaciados, con respecto a un punto fijo central como se muestra en la Figura 1, llamado, punto de máxima exploración. La resistividad aparente del suelo se da por medio de la ecuación 1.

Donde: R: valor obtenido en el telurómetro; a: distancia de separación entre electrodos; b: profundidad de enterramiento de los electrodos, ρ : resistividad del terreno; π : número pi.

Figura 1. Esquema de medición método de Wenner.

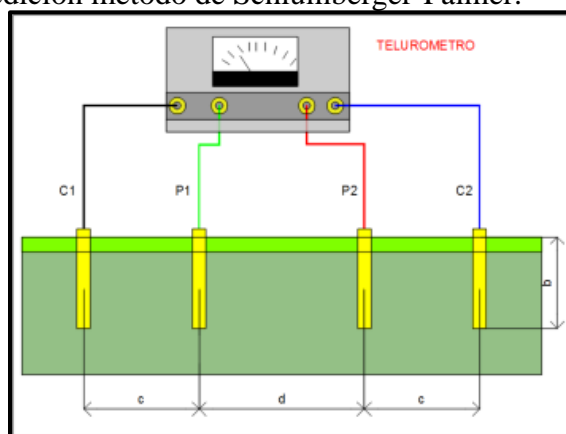


Fuente: adoptado de (RA6-014, 2019)

Método de Schlumberger-Palmer

Al igual que en el método de Wenner, el método planteado por Schlumberger-Palmer los electrodos de emisión (corriente) y de medición (tensión) están situados en línea recta. La variable es que en el método de Wenner la distancia entre los electrodos es simétrica, mientras que en este método la configuración cambia con respecto a las distancias, ahora las distancias entre los electrodos de emisión y medición son más cortas, ubicándose más cerca de los electrodos de emisión a partir de un punto central llamado punto de exploración como se observa en la Figura 2. La resistividad aparente del suelo se da por medio de la ecuación 2.

Figura 2. Esquema de medición método de Schlumberger-Palmer.



Fuente: adoptado de (RA6-014, 2019)

Donde: R: valor obtenido en el telurómetro; c: separación entre el electrodo de corriente y su correspondiente de tensión, d: separación entre los electrodos de tensión; ρ : resistividad del terreno; π : número pi.

Modelos de Suelos

2 modelos de suelo han sido los más utilizados para los fines anotados: suelo homogéneo y suelo constituido por 2 capas horizontales homogéneas.

Suelo homogéneo

Para este tipo de suelo lo ideal es que los valores de en medio no difieran en más de un 30% del valor máximo del mismo. Se debe asumir este valor medio para la resistividad en un medio homogéneo semi-infinito, donde su límite superior es la superficie del suelo, y con este modelo de suelo procedemos a realizar todos los cálculos necesarios para el diseño SPT.

Suelo a 2 capas horizontales

Este modelo considera que la parte más externa del suelo siente la acción de las condiciones atmosféricas, incluyendo las variaciones del clima por efecto de las estaciones. y en general las del ambiente que está en contacto con la superficie del suelo.

Otros modelos de suelos

No siempre es de considerar adoptar alguno de los métodos mencionados anteriormente. A la hora de tomar las mediciones, estas pueden sugerir el considerar más de 2 capas o capas no horizontales. Algunas opciones como la aplicación del método de los elementos finitos, aún se encuentran en desarrollo y los programas disponibles tienen muchas limitaciones.

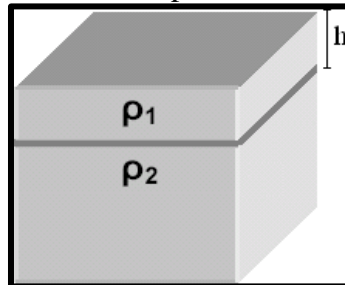
Método gráfico de Sunde

Un modelo de suelo de 2 capas Figura 3 puede ser aproximado por el método de Sunde. Este método toma valores de resistividad medidos utilizando la configuración de los cuatro puntos del método de Wenner. Los valores de los parámetros ρ_1 y ρ_2 son obtenidos de la interpretación de la curva de resistividad medida, y la profundidad h de la capa superior es determinada por el método gráfico de Sunde Figura 4. Procedimiento del método gráfico de Sunde:

- 1- Trazar la gráfica ρ_a vs. a , con los datos obtenidos en la medición.
- 2- Estimar, por inspección de la gráfica ρ_a vs. a , los valores de los parámetros ρ_1 y ρ_2 .

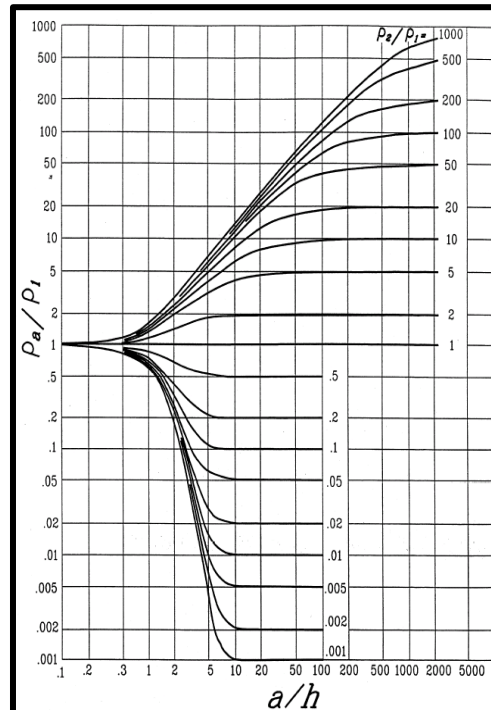
- 3- Determinar la relación ρ_1/ρ_2 y seleccionar la correspondiente curva de la gráfica de Sunde o interpolar y dibujar curva en la gráfica.
- 4- Seleccionar el valor k en el eje $\rho a/\rho_1$, correspondiente al cambio de concavidad de la curva seleccionada en C.
- 5- Obtener el valor correspondiente de a/h .
- 6- Obtener ρa del valor k seleccionada en D ($\rho a = k * \rho_1$) y determinar el valor de a de la curva ρa vs. a .
- 7- Determinar el valor de h de la relación a/h .

Figura 3. Esquema del modelo de suelo de 2 capas.



Fuente: Propia

Figura 4. Método grafico de Sunde.



Fuente: adaptado de (IEEE, Std 80, 2013).

Método del gradiente descendente

Principalmente, se tiene la ecuación 3 que se utiliza para obtener la resistividad aparente. A partir de esta ecuación se implementa un algoritmo denominado método del gradiente descendente, que utiliza las ecuaciones 6-7-8 para minimizar una función error dada por la ecuación 5. Para minimizar el error se reajustan los valores ρ_1, ρ_2 , y h sumando un valor dependiente del error que se tiene en la iteración actual. El error viene dado por la ecuación 9. Un valor de error común para este método es de 0.0001. (IEEE, Std 81 , 2012)

$$\rho = \frac{4\pi Ra}{\left(1 + \frac{2a}{\sqrt{a^2 + 4b^2}} - \frac{2a}{\sqrt{4a^2 + 4b^2}}\right)} \quad (1)$$

$$\rho = \frac{\pi c(c+d)R}{d} \quad (2)$$

$$\rho(a) = \rho_1 \left[1 + 4 \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{K^n}{\sqrt{1 + (2nh/a)^2}} - \frac{K^n}{\sqrt{4 + (2nh/a)^2}} \right) \right] \quad (3)$$

$$K = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2 + \rho_1} \quad (4)$$

$$\Psi(\rho_1, \rho_2, h) = \sum_{m=1}^N \left[\frac{\rho_m^0 - \rho_m}{\rho_m^0} \right]^2 \quad (5)$$

$$\frac{\partial \Psi}{\partial \rho_1} = -2 \sum_{i=1}^n \left\{ \left[\frac{\rho^0 ai - \rho(ai)}{[\rho^0(ai)]^2} \right] \left[1 + 4 \sum_{n=1}^{\infty} \left(1 - \frac{n(1-k^2)}{2k} \right) \left(\frac{k^n}{\sqrt{1 + \left(\frac{2nh}{a_i}\right)^2}} - \frac{k^n}{\sqrt{4 + \left(\frac{2nh}{a_i}\right)^2}} \right) \right] \right\} \quad (6)$$

$$\frac{\partial \Psi}{\partial \rho_1} = -2 \sum_{i=1}^n \left\{ \left[\frac{\rho^0 ai - \rho(ai)}{[\rho^0(ai)]^2} \right] \left[\sum_{n=1}^{\infty} \left[\frac{2n}{k} (1-k^2) \frac{n(1-k^2)}{2k} \left(\frac{k^n}{\sqrt{1 + \left(\frac{2nh}{a_i}\right)^2}} - \frac{k^n}{\sqrt{4 + \left(\frac{2nh}{a_i}\right)^2}} \right) \right] \right] \right\} \quad (7)$$

$$\frac{\partial \Psi}{\partial h} = -2 \sum_{i=1}^n \left\{ \left[\frac{\rho^0 ai - \rho(ai)}{[\rho^0(ai)]^2} \right] \left[\frac{16\rho_1 h}{a^2} \sum_{n=1}^{\infty} \left[n^2 \left(\frac{k^n}{\left(\sqrt{1 + \left(\frac{2nh}{a_i}\right)^2}\right)^3} - \frac{k^n}{\left(\sqrt{4 + \left(\frac{2nh}{a_i}\right)^2}\right)^3} \right) \right] \right] \right\} \quad (8)$$

$$|\Delta \Psi| > E \quad (9)$$

Caso de estudio

La obtención de los datos para la realización de la comparación del método de suelo de 2 capas se realizó en la Institución Universitaria Pascual Bravo Figura 5 con dirección Cl 73 CR 73 A – 226 Medellín, Antioquia.

Figura 5. Georreferenciación Institución Universitaria Pascual Bravo.



Fuente: adoptado de (Mapas Medellín, 2105)

Los datos obtenidos se realizaron en 2 terrenos diferentes de la institución Figura 6 y Figura 7, obteniendo por terreno un total de 16 medidas (Anexo 2 y 3).

Figura 6. Georreferenciación Terreno 1.



Fuente: adaptado de (Mapas Medellín, 2105)

Figura 7. Georreferenciación Terreno 2.



Fuente: adaptado de (Mapas Medellin, 2105)

Por cada terreno se tomaron medidas cada 1, 2, 3 y 4 metros tanto horizontal, vertical y diagonalmente. Siguiendo los parámetros de uso del telurómetro (Anexo 4).

Análisis de resultados

Aplicación método gráfico de Sunde para el terreno 1

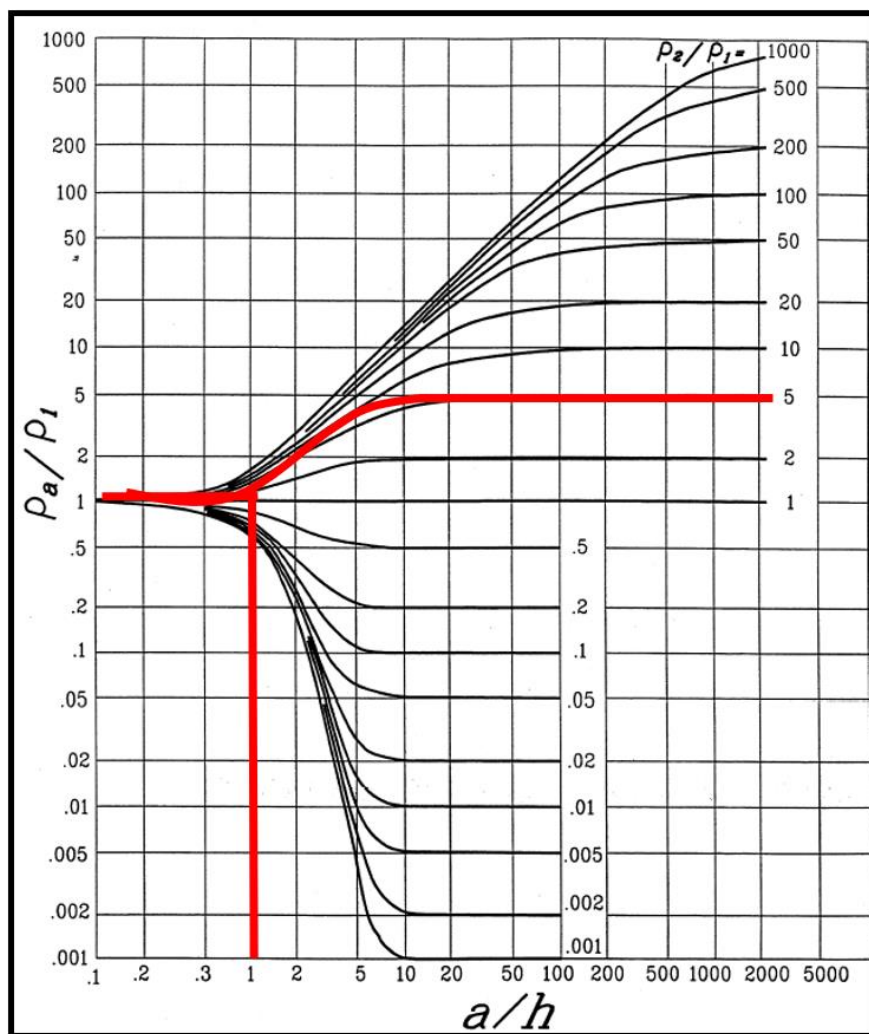
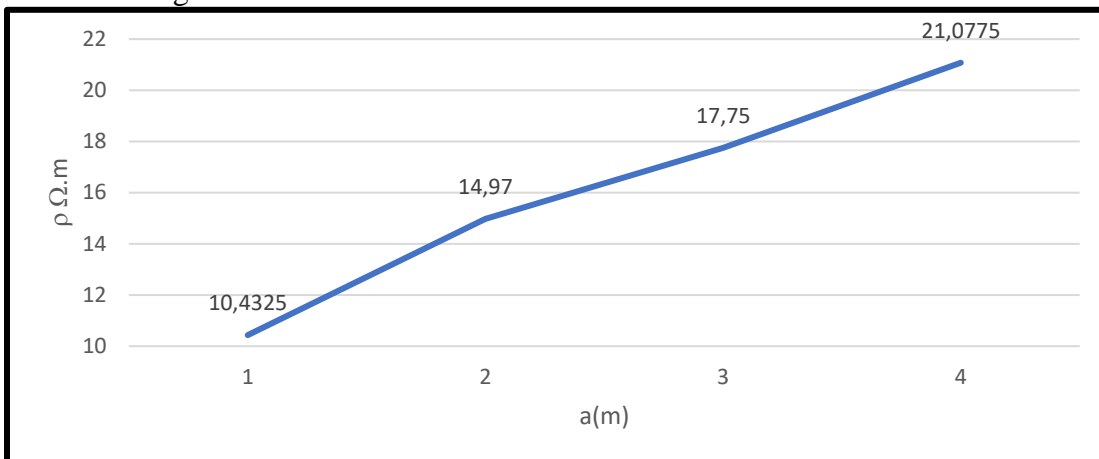
Los datos que se obtuvieron para el terreno 1 aplicados al método de Sunde y los resultados para este se muestran en la Tabla 1. En la Figura 8 se realizó la interpolación para hallar h por medio del método.

Tabla 1. Datos Terreno 1, promedio de datos y resultados

TERRENO 1			PROMEDIO DE MEDIDAS POR EJE	
MEDIDA	a (m)	ρ (Ω .m)	a (m)	ρ (Ω .m)
1	1	14,14	a (m)	ρ (Ω .m)
5	1	8,98	1	10,4325
9	1	9,05	2	14,97
13	1	9,56	3	17,75
2	2	19,93	4	21,0775
6	2	14,41	RESULTADOS	
10	2	12,93		
14	2	12,61		
3	3	20	ρ_1	10,4325
7	3	19,01	ρ_2	21,0775
11	3	15,79	ρ_2/ρ_1	2
15	3	16,2	$\rho\alpha/\rho_1$	1
4	4	22,7	a/h	1
8	4	21,2	$\rho\alpha$	10,4325
12	4	21,4	a	1,1
16	4	19,01	h	1,1

Fuente: Diseño propio.

Figura 8. Método gráfico de Sunde terreno 1.



Fuente: adaptado de (IEEE, Std 80, 2013).

Aplicación método gráfico de Sunde para el terreno 2

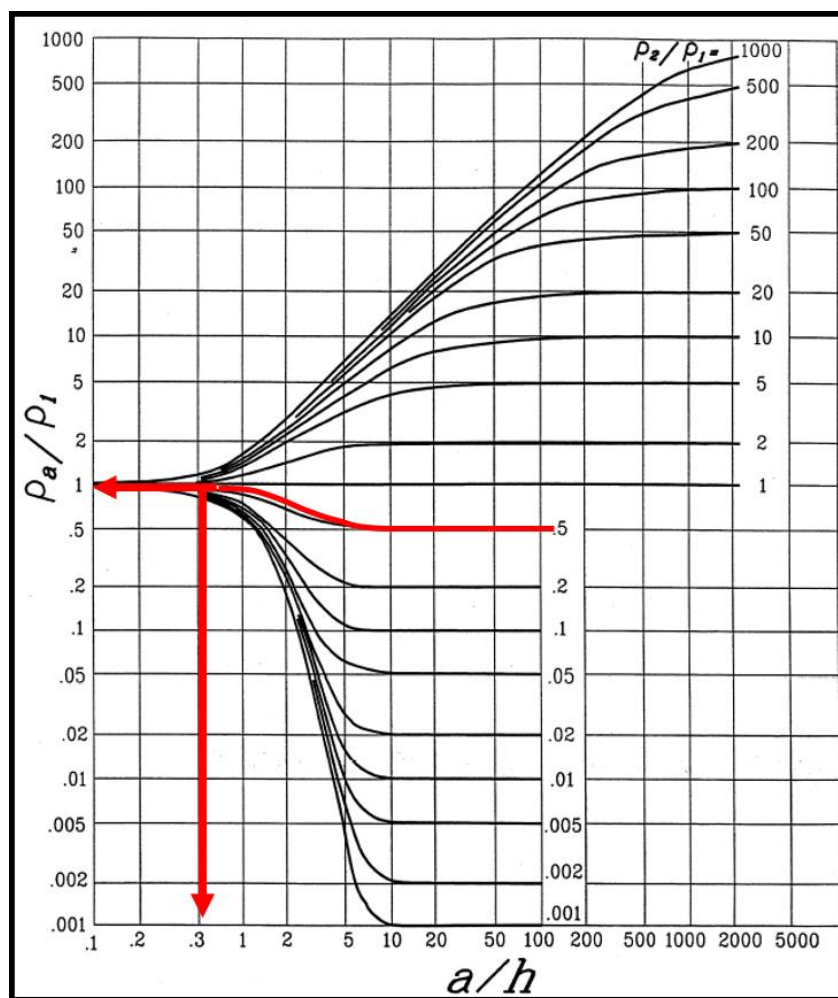
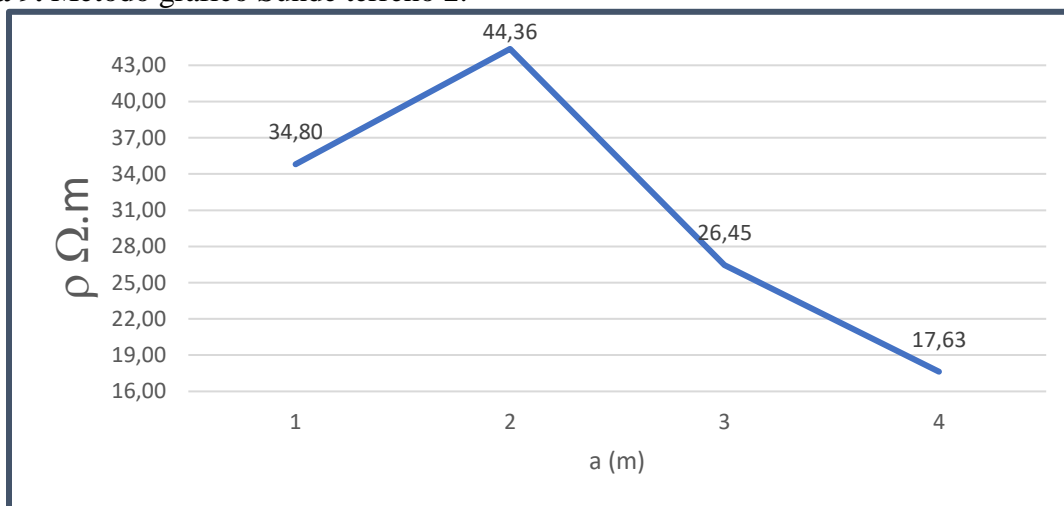
Los datos que se obtuvieron para el terreno 2 aplicados al método de Sunde y los resultados para este se muestran en la Tabla 2. En la Figura 9 se realizó la interpolación para hallar h por medio del método.

Tabla 2. Datos Terreno 2, promedio de datos y resultados

TERRENO 2			PROMEDIO DE	
MEDIDA	a (m)	ρ (Ω .m)	MEDIDAS POR EJE	
1	1	41,4	a (m)	ρ (Ω .m)
5	1	37,6	1	34,8
9	1	37,2	2	44,36
13	1	23	3	26,45
2	2	54,4	4	17,63
6	2	79,5	RESULTADOS	
10	2	25,5		
14	2	18,03		
3	3	25,4	ρ_1	34,8
7	3	28,6	ρ_2	17,63
11	3	19,88	ρ_2/ρ_1	0,507
15	3	31,9	$\rho\alpha/\rho_1$	1
4	4	20	a/h	0,35
8	4	16,85	$\rho\alpha$	34,8
12	4	18,7	a	1
16	4	14,97	h	2,86

Fuente: Diseño propio

Figura 9. Método grafico Sunde terreno 2.



Fuente: adoptado de (IEEE, Std 80, 2013).

La aplicación del método del gradiente descendente puede ser utilizado cuando las mediciones han sido obtenidas mediante el método de Wenner (IEEE, Std 81 , 2012) primero se tiene la ecuación 3 que se utiliza para obtener la resistividad aparente.

Partiendo de la ecuación 3 se implementa un algoritmo denominado método del gradiente descendente, que utiliza las ecuaciones 6-9 para reducir una función error dada por la ecuación 5.

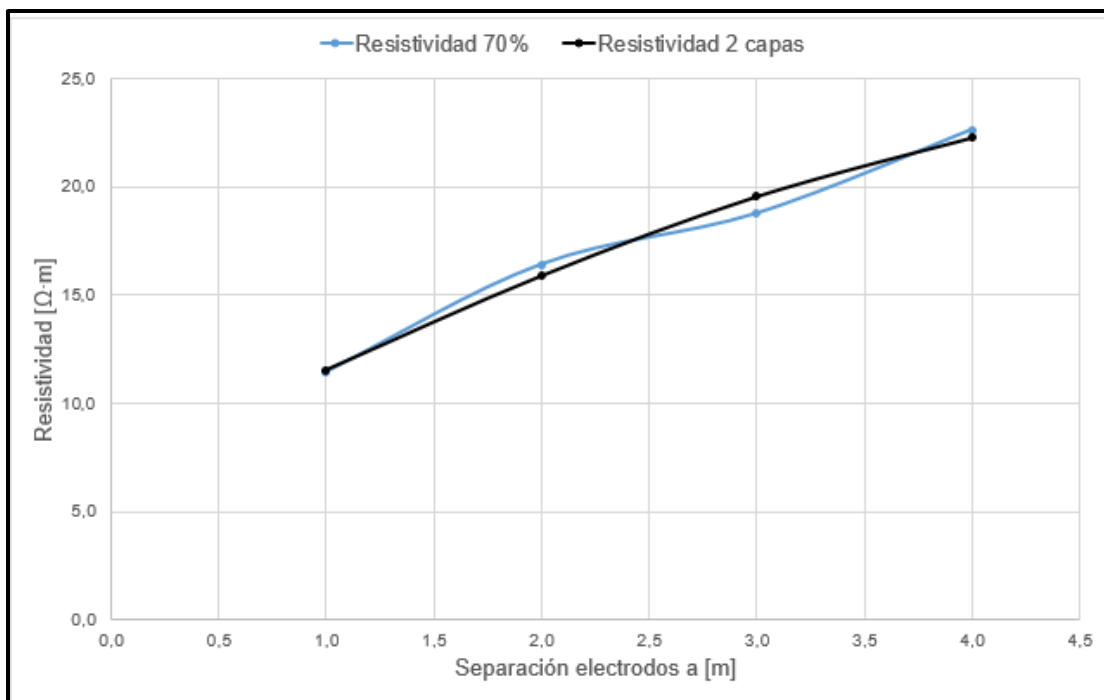
Donde: N: número total de valores de resistividad medidos con un espaciamiento entre los electrodos a como parámetro.

Aplicación método del Gradiente descendente para el Terreno 1

En la aplicación del método del Gradiente descendente para el terreno 1, en la Figura 10 se observan los resultados obtenidos, el análisis realizado por el Solver de Excel (Anexo 5) para realizar los cálculos necesarios y obtener los resultados.

Figura 10. Método del Gradiente descendente aplicado al terreno 1.

Ejes	Método de Wenner - Electrodo igualmente espaciados									
	a [m]									
	1	2	3	4						
Eje 1 [$\Omega \cdot m$]	14,14	19,93	20	22,07						
Eje 2 [$\Omega \cdot m$]	8,98	14,41	19,01	21,2						
Eje 3 [$\Omega \cdot m$]	9,05	12,93	15,79	24,04						
Eje 4 [$\Omega \cdot m$]	9,56	12,61	16,2	19,01						
Eje 5 [$\Omega \cdot m$]										
Eje 6 [$\Omega \cdot m$]										
Eje 7 [$\Omega \cdot m$]										
Eje 8 [$\Omega \cdot m$]										
Eje 9 [$\Omega \cdot m$]										
Eje 10 [$\Omega \cdot m$]										
Promedio	10,433	14,970	17,750	21,580						
Desviación estándar	2,485	3,398	2,073	2,085						
Resistividad 70%	11,472	16,428	18,774	22,631						
Resistividad 2 capas	11,564	15,902	19,556	22,272						



Modelo 2 capas	
ρ_1 [Ω·m]	9,72
ρ_2 [Ω·m]	34,07
H [m]	1,11
k	0,56
Error RMS	0,51

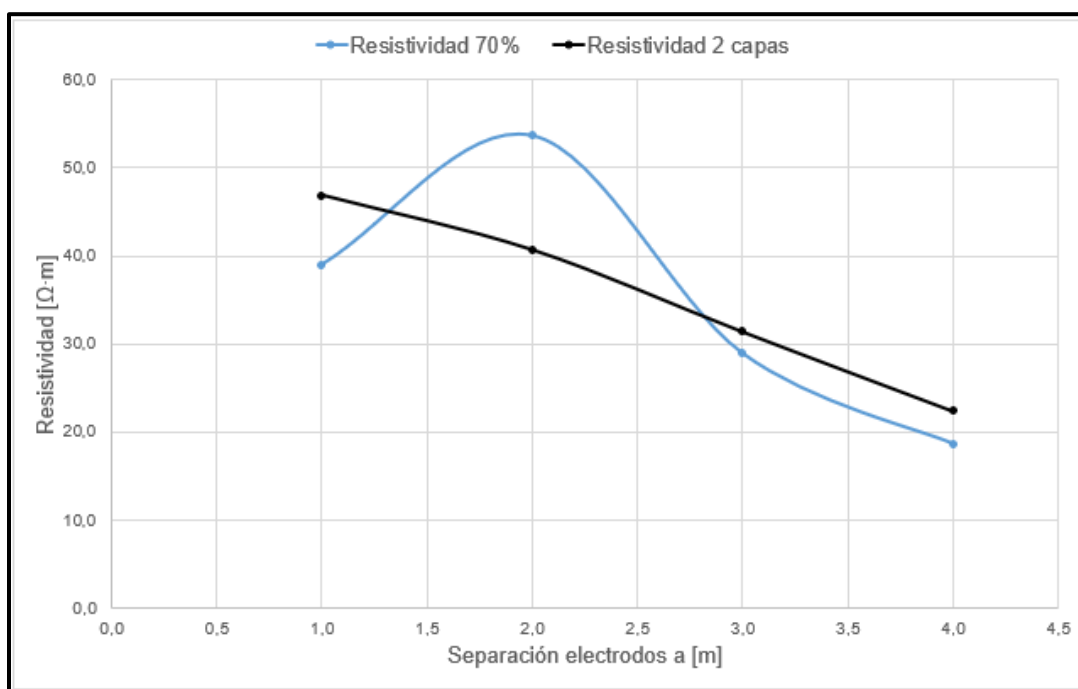
Fuente: Propia

Aplicación método del Gradiente descendente para el Terreno 2

En la aplicación del método del Gradiente descendente para el terreno 2, en la Figura 11 se observan los resultados obtenidos, el análisis realizado por el Solver de Excel (Anexo 5) para realizar los cálculos necesarios y obtener los resultados.

Figura 11. Método del Gradiente descendente aplicado al terreno 2.

Ejes	Método de Wenner - Electrodo igualmente espaciados			
	a [m]			
	1	2	3	4
Eje 1 [$\Omega \cdot m$]	41,4	54,4	25,4	20
Eje 2 [$\Omega \cdot m$]	37,6	79,5	28,6	16,85
Eje 3 [$\Omega \cdot m$]	37,2	25,5	19,88	18,7
Eje 4 [$\Omega \cdot m$]	23	18,03	31,9	14,97
Eje 5 [$\Omega \cdot m$]				
Eje 6 [$\Omega \cdot m$]				
Eje 7 [$\Omega \cdot m$]				
Eje 8 [$\Omega \cdot m$]				
Eje 9 [$\Omega \cdot m$]				
Eje 10 [$\Omega \cdot m$]				
Promedio	34,800	44,358	26,445	17,630
Desviación estándar	8,091	28,193	5,118	2,194
Resistividad 70%	39,025	53,646	28,977	18,728
Resistividad 2 capas	46,910	40,709	31,401	22,395



Modelo 2 capas	
ρ_1 [$\Omega \cdot m$]	48,19
ρ_2 [$\Omega \cdot m$]	1,00
H [m]	2,79
k	-0,96
Error RMS	7,89

Fuente: Propia

Análisis de resultados

Los resultados que se presentan a continuación han sido la consecuencia de los análisis realizados con los datos obtenidos anteriormente según la dirección y configuración descrita en el capítulo 2. Se realizaron un total de 4 grupos de mediciones por terreno, cada grupo con un espaciamiento de 1, 2, 3 y 4 metros, para un total de 32 valores de resistividad obtenidos en dichas mediciones. A continuación, en la table 3, se muestra el análisis de los resultados en forma comparativa entre los 2 métodos: el método grafico de Sunde y el método del gradiente descendente.

Tabla 3. Resumen de resultados Método Sunde Vs. Gradiente descendente.

	TERRENO 1		TERRENO 2	
	METODO SUNDE	METODO GRADIENTE DESCENDENTE	METODO SUNDE	METODO GRADIENTE DESCENDENTE
$\rho_1 \Omega. m$	10,4325	9,72	34,8	48,19
$\rho_2 \Omega. m$	21,0775	34,07	17.63	1
H	1,1	1,1	2,86	2,79
K	1	0,56	1	-0,96

Fuente: Diseño propio

Este tipo de análisis permite determinar cuál de los dos métodos es más efectivo en cuanto a precisión y rapidez en su aplicación. Este comparativo consta de dos variables a interpretar, las cuales son: la profundidad y la resistividad del terreno analizado. Las cuales son vitales a la hora de obtener un diagnóstico confiable sobre qué tan adecuadas son las condiciones del suelo donde será instalado el sistema de puesta a tierra.

De acuerdo con lo anterior se puede deducir lo siguiente:

La mejor ubicación para la instalación del SPT es el terreno 1, debido a que presenta las mejores condiciones medidas en cuanto a resistividad y profundidad. Esto debido a que entre menor sea la resistividad del terreno medido, este es más apropiado.

Según la comparación de los datos obtenidos entre ambos métodos, se evidencia resultados muy similares para los 2 terrenos medidos, con variaciones muy mínimas en cuanto a la profundidad h .

En cuanto a la exactitud, se ha determinado que el método del gradiente descendente es el más adecuado, debido a que el método de Sunde al ser un método gráfico depende en gran parte de la experiencia del analista, para realizar una buena selección e interpretación de los datos obtenidos. Sin embargo, evaluando la rapidez en su aplicación, el método de Sunde es superior, esto debido a que al ser un método gráfico permite obtener un resultado más rápido a la hora de determinar la profundidad h .

Cronograma

En la Tabla 4 se observa el cronograma de actividades para el desarrollo del trabajo de grado.

Tabla 4. Cronograma

ACTIVIDADES	SEMANAS																												Total actividad		
	MES 1				MES 2				MES 3				MES 4				MES 5				MES 6				MES 7				Total Semanas	%	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28			
Lectura de la plantilla anteproyecto.	■	■																											2	7,1	
Lectura Norma IEEE 80-81																													2	7,1	
Lectura de fuentes bibliográficas.			■	■	■																								3	10,7	
Planteamiento del problema.	■	■	■																										3	10,7	
Elaboración del anteproyecto.	■	■	■	■																									4	14,3	
Revisión bibliográfica.					■	■	■	■																					4	14,3	
Revisión metodología.																													25	89,3	
Entrega del anteproyecto para revisión.					■																								1	3,6	
Planteamiento del caso de estudio.	■	■	■	■	■	■	■																						5	17,9	
Entrega de correcciones del anteproyecto.									■																				1	3,6	
Estudio de las normas APA.	■	■	■	■																									4	14,3	
Elaboración y entrega del anteproyecto con las correcciones.										■	■	■																	2	7,1	
Programa de capacitación para el proceso de trabajo de campo.										■	■	■			■														2	7,1	
Obtención y análisis de resultado del trabajo de campo.															■	■	■												3	10,7	
Análisis de resultados del trabajo de campo.																	■	■	■	■									3	10,7	
Elaboración del informe final.													■	■	■	■	■	■	■	■									7	25	
Correcciones y mejoras al informe final.																					■	■	■	■	■				3	10,7	
Elaboración del informe final con las correcciones.																									■	■			2	7,1	
Sustentación del informe final																												■	■	2	7,1
TOTAL:																													28	100	

Fuente: Diseño propio

Conclusiones

- Es importante contar con un buen protocolo de medición de resistividad de terreno, debido a que esto se reflejara en la confiabilidad de las medidas obtenidas. Adicional permite no sólo ahorrar tiempo y hacer una correcta interpretación de los resultados, sino también realizar los trabajos de manera segura.
- Los métodos para medir la resistividad son muy variados, elegir el método más adecuado y entender sus alcances y limitaciones es de gran importancia, debido a que de ello depende una buena interpretación del terreno y por ende la eficiencia del sistema de puesta a tierra a instalar. Durante el desarrollo de este caso estudio enfrentamos 2 métodos, uno más exacto que el otro, pero que para efectos de aplicabilidad ambos son muy confiables, esto debido a que las variaciones en cuanto a resultados son mínimas.
- La resistividad eléctrica del terreno es un parámetro que varía con una gran cantidad de factores como la concentración de sales, humedad, temperatura, compactación, tipo de sustancias presentes y en general de la composición del terreno. Esta amplia gama de factores que la alteran hace posible que sus valores se puedan usar para identificar la estructura presente en el suelo y así determinar el tipo de mineral del que está compuesto. Esta información es primordial en el desarrollo y montaje de proyectos de sistemas de puesta a tierra.

Referencias bibliográficas

- Casas Ospina, F. (2010). *Tierras Soporte de la Seguridad Electrica*. Bogota D.C.
- IEEE, Std 80. (2013). *Guide for Safety in AC Substation*. New York.
- IEEE, Std 81 . (2012). *Guide for Measuring Earth Resistivity, Ground Impedance, and Earth Surface Potentials of a Grounding System*. New York.
- Mapas Medellin. (2105). Obtenido de MapGIS5:
https://www.medellin.gov.co/MAPGISV5_WEB/mapa.jsp?aplicacion=0
- MEDELLÍN, E. P. (2019). *Norma Técnica: Mediciones para el SPT*. Medellin.
- Metrel. (2022). Obtenido de <https://www.metrel.es/es/>
- Microsoft. (2022). Obtenido de <https://support.microsoft.com/es-es/office/definir-y-resolver-un-problema-con-solver-5d1a388f-079d-43ac-a7eb-f63e45925040#:~:text=Solver%20ajusta%20los%20valores%20de,una%20celda%20cambiando%20otras%20celdas>.
- Moreno, G., Valencia, J. A., Villa, w., & Villa, W. M. (2007). *Fundamentos e Ingenieria de las Puestas a Tierra*. Medellin: Universidad de Antioquia .
- RA6-014, E. (2019). *Medisiones para el sistema de puesta a tierra RA6-014*. MEDELLIN.
- Reglamento Tecnico de Instalaciones Electricas. (2022). *RETIE*. Bogota D.C.

Anexo 1. Telurómetro MI 2088 Earth - Insulation Tester.





Anexo 1 Telurómetro utilizado para la toma de datos.
Fuente: Propia

Anexo 2. Registro fotográfico de los datos obtenidos con el telurómetro en el terreno 1



Fuente: Propia

Anexo 3. Registro fotográfico de los datos obtenidos con el telurómetro en el terreno 2





Fuente: Propia

Anexo 4. Ficha técnica telurómetro MI 2088 Earth - Insulation Tester

TECHNICAL DATA			
FUNCTION	Measuring range	Resolution	Accuracy
Insulation resistance (EN 61557-2)	U > 250 VDC:		
	R: 0.000 MΩ ... 1.999 MΩ	0.001 MΩ	±(2 % of reading + 2 digits)
	2.00 MΩ ... 19.99 MΩ	0.01 MΩ	±(2 % of reading + 2 digits)
	20.0 MΩ ... 199.9 MΩ	0.1 MΩ	±(2 % of reading + 2 digits)
	200 MΩ ... 1999 MΩ	1 MΩ	±(1 % of r / 1 GΩ + 2% of r + 2 digits)
	2.00 GΩ ... 19.99 GΩ	10 MΩ	±(1 % of r / 1 GΩ + 2% of r + 2 digits)
	20.0 GΩ ... 29.9 GΩ	100 MΩ	±(1 % of r / 1 GΩ + 2% of r + 2 digits)
	U < 250 VDC:		
	R: 0.000 MΩ ... 1.999 MΩ	0.001 MΩ	±(5 % of reading + 3 digits)
	2.00 MΩ ... 19.99 MΩ	0.01 MΩ	±(5 % of reading + 3 digits)
20.0 MΩ ... 199.9 MΩ	0.1 MΩ	±(5 % of reading + 3 digits)	
Continuity 200 mA of PE conductor with polarity change (EN 61557-4)	0.00 Ω ... 19.99 Ω	0.01 Ω	±(2 % of reading + 2 digits)
	20.0 Ω ... 199.9 Ω	0.1 Ω	±3 % of reading
	200 Ω ... 1999 Ω	1 Ω	±3 % of reading
Low resistance continuity measurement, test current 7 mA (continuous measurement)	0.0 Ω ... 199.9 Ω	0.1 Ω	±(3 % of reading + 3 digits)
	200 Ω ... 1999 Ω	1 Ω	±(3 % of reading + 3 digits)
Earth resistance 4-wire method	0.00 Ω ... 19.99 Ω	0.01 Ω	±(2 % of reading + 3 digits)
	20.0 Ω ... 199.9 Ω	0.1 Ω	±(2 % of reading + 3 digits)
	200 Ω ... 1999 Ω	1 Ω	±(2 % of reading + 3 digits)
	2.00 kΩ ... 19.99 kΩ	10 Ω	±5 % of reading
Earth resistance 4-wire method with one current clamp	0.00 Ω ... 19.99 Ω	0.01 Ω	±(2 % of reading + 3 digits)
	20.0 Ω ... 199.9 Ω	0.1 Ω	±(2 % of reading + 3 digits)
	200 Ω ... 1999 Ω	1 Ω	±(2 % of reading + 3 digits)
	1.00 kΩ ... 1.99 kΩ	10 Ω	±(2 % of reading + 3 digits)
2-clamp earth resistance measurement	0.00 Ω ... 19.99 Ω	0.01 Ω	±(10 % of reading + 2 digits)
	20.0 Ω ... 100.0 Ω	0.1 Ω	±20 % of reading
Specific earth resistance (EN 61557-5)	0.00 Ω ... 19.99 Ω	0.01 Ω	±(2 % of reading + 3 digits)
	20.0 Ω ... 199.9 Ω	0.1 Ω	±(2 % of reading + 3 digits)
	200 Ω ... 1999 Ω	1 Ω	±(2 % of reading + 3 digits)
	2.00 kΩ ... 19.99 kΩ	10 Ω	±5 % of reading
	20.0 kΩ ... 199.9 kΩ	0.1 kΩ	±5 % of reading
	200 kΩ ... 999 kΩ (a < 8 m)	1 kΩ	±5 % of reading
TRMS Current	0.0 mA ... 99.9 mA	0.1 mA	±(5 % of reading + 3 digits)
	100 mA ... 999 mA	1 mA	±5 % of reading
	1.00 A ... 9.99 A	0.01 A	±5 % of reading
	10.0 A ... 99.9 A	0.1 A	±5 % of reading
	100 A ... 200 A	1 A	±5 % of reading
Varistor Test	0 V ... 1000 V	1 V	±(5 % of reading + 10 V)
Power supply	4 x 1.2 V rechargeable batteries or 4 x 1.5 V alkaline batteries, type C		
Over voltage category	CAT III / 300 V; CAT II / 600 V		
Protection class	Double insulation		
COM port	RS232		
Dimensions	265 x 110 x 185 mm		
Weight	1.7 kg		

ORDERING INFORMATION



Picture of MI 2088 - 20 m set.

MI 2088 ST

- Instrument Earth-Insulation Tester
- Test lead, 2 x 1.5 m
- Soft carrying bag
- RS232 cable
- Test probe, 2 pcs (red, black)
- Crocodile clip
- PC Software EarthLink
- Instruction manual
- Handbook on storage media
- Calibration certificate

MI 2088 - 20 m

- MI 2088 ST
- Earth test set, 20 m (test lead, 4 x 1 m; 2 x test lead, 20 m; 2 x test lead, 4.5 m; 4 x earth test rod; small soft carrying bag)

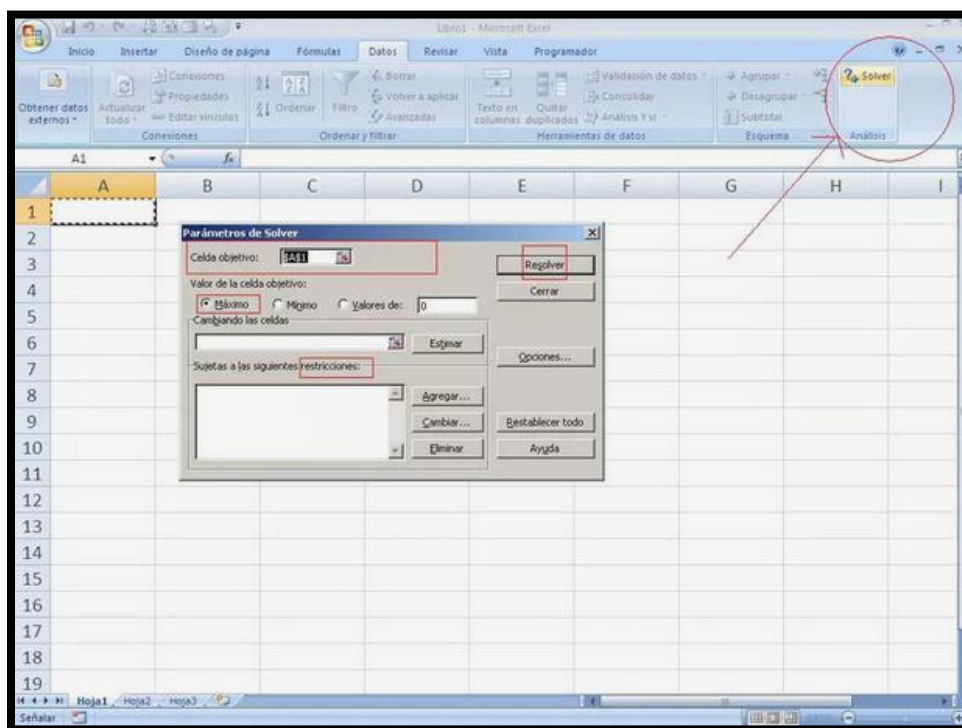
MI 2088 - 50 m

- MI 2088 ST
- Earth test set, 50 m (test lead, 4 x 1 m; 2 x test lead, 50 m; 2 x test lead, 1 m; 2 x test lead, 4.5 m; 4 x earth test rod; soft carrying bag)

Fuente: (METREL, 2022)

Anexo 5. Solver Excel

Para los cálculos que se realizaron en Excel, se utilizó la herramienta solver, el cual es un complemento de Microsoft Excel, el cual permite calcular el valor de una celda que depende de diversos factores o variables donde a la vez existen una serie de restricciones que han de cumplirse. Solver de Excel realiza los cálculos para la resolución de problemas de programación lineal, en donde a partir de una función lineal a optimizar (encontrar el máximo o mínimo) y cuyas variables están sujetas a unas restricciones expresadas como inecuaciones lineales, el fin es obtener valores óptimos bien sean máximos o mínimos.



Fuente: (Microsoft, 2022)

Anexo 6. Registro fotográfico en la obtención de datos



Fuente: Propia

Anexo 7. Datos obtenidos

FORMATO PARA REGISTRO MEDICIONES DE RESISTIVIDAD

Fecha: 04 - Abril - 2022 Caso: Terreno 1
 Proyecto: Helado de dos Capas Equipo de medida: Telurómetro MI 2088
 Subestación/línea: _____ Ingeniero responsable: Edwin Rodríguez
Jhon Echeverri
José Sánchez

Ejes	Método de Wenner - Electrodo igualmente espaciados a[m]									
	1	2	3	4						
Eje 1	14,14	19,93	20,00	22,7						
Eje 2	8,98	14,41	19,01	21,2						
Eje 3	9,05	12,93	15,79	21,4						
Eje 4	9,56	12,61	16,20	19,01						
Eje 5										
Eje 6										
Eje 7										
Eje 8										
Eje 9										
Eje 10										

FORMATO PARA REGISTRO MEDICIONES DE RESISTIVIDAD

Fecha: 04 - Abr. 1 - 2022 Caso: Terreno 2
 Proyecto: Helado de dos Capas Equipo de medida: Telurómetro MI 2088
 Subestación/línea: _____ Ingeniero responsable: Edwin Rodríguez
Jhon Echeverri
José Sánchez

Ejes	Método de Wenner - Electrodo igualmente espaciados a[m]									
	1	2	3	4						
Eje 1	41,4	54,4	25,4	20,0						
Eje 2	37,6	79,5	29,6	16,85						
Eje 3	37,2	25,5	19,88	18,70						
Eje 4	23,0	18,03	31,9	14,97						
Eje 5										
Eje 6										
Eje 7										
Eje 8										
Eje 9										
Eje 10										

Fuente: Propia