



Programa en Python para modelado de suelos no homogéneos mediante un algoritmo de optimización

Jorge Andrés Toro Córdoba

Informe de práctica para optar al título de Ingeniero Electricista

Asesores

Fernando Villada Duque, Doctor (PhD) en Ingeniería Eléctrica

Cesar Augusto Agudelo Osorio, Magíster (MSc) en Ingeniería Eléctrica

Universidad de Antioquia

Facultad de Ingeniería

Ingeniería Eléctrica

Medellín, Antioquia, Colombia

2022

Cita	Toro Córdoba [1]
Referencia	[1] J. A. Toro Córdoba, “Programa en Python para modelado de suelos no homogéneos mediante un algoritmo de optimización”, Trabajo de grado profesional, Ingeniería Eléctrica, Universidad de Antioquia, Medellín, Antioquia, Colombia, 2022.
Estilo IEEE (2020)	



Centro de Documentación de Ingeniería (CENDOI)

Repositorio Institucional: <http://bibliotecadigital.udea.edu.co>

Universidad de Antioquia - www.udea.edu.co

Rector: John Jairo Arboleda Céspedes.

Decano/Director: Jesús Francisco Vargas Bonilla.

Jefe departamento: Noé Alejandro Mesa Quintero.

El contenido de esta obra corresponde al derecho de expresión de los autores y no compromete el pensamiento institucional de la Universidad de Antioquia ni desata su responsabilidad frente a terceros. Los autores asumen la responsabilidad por los derechos de autor y conexos.

I. TABLA DE CONTENIDO

II.	RESUMEN	5
III.	ABSTRACT	6
IV.	INTRODUCCIÓN	7
V.	OBJETIVOS.....	8
	A. Objetivo general	8
	B. Objetivos específicos.....	8
VI.	MARCO TEÓRICO	9
	A. Resistividad del suelo.....	9
	B. Medida de la resistividad del suelo	10
	C. Modelamiento del terreno	11
	D. Modelo de suelo de dos capas	12
	E. Aplicación del método del gradiente descendente en el modelo de dos capas	14
VII.	METODOLOGÍA	20
VIII.	RESULTADOS	22
	A. Herramienta de Python e interfaz gráfica.....	22
	B. Consideraciones en la programación en Python del algoritmo	23
	C. Casos de estudio	25
	D. Resultados de modelos de referencia y simulados	27
IX.	ANÁLISIS.....	29
	A. Comparación entre modelos de dos capas.....	29
	B. Evaluación de la alternativa para el paso de los parámetros	30
X.	CONCLUSIONES	32
XI.	REFERENCIAS	33

LISTA DE TABLAS

TABLA I CASOS DE UN PERFIL. TOMADOS DE DOCUMENTOS DE REFERENCIA	26
TABLA II CASOS DE DOS PERFILES. TOMADOS DE PROYECTOS DE INGETESA SA	26
TABLA III RESULTADOS DE MODELOS DE REFERENCIA Y SIMULADOS	27

LISTA DE FIGURAS

Fig. 1. Arreglo de Wenner. Tomada de [2].	10
Fig. 2. Terreno de dos capas. Tomada de [3].	12
Fig. 3. Ejemplo del comportamiento del gradiente descendente. Tomada de [6].	14
Fig. 4. Diagrama de flujo del gradiente descendente aplicado al modelo de suelo de dos capas. Elaboración propia.	18
Fig. 5. Interfaz gráfica de la herramienta para modelo de dos capas	22
Fig. 6. Ejemplo de gráficas generadas por el programa. (a) Muestra el cambio de los parámetros con las iteraciones. (b) Muestra las resistividades medidas y calculadas.	23
Fig. 7. Ejemplos de tabla de datos de las medidas de resistividad.	23
Fig. 8. Fragmento del código con valores de paso planteados	25
Fig. 9. Casos de un perfil. Tomados de documentos de referencia.	26
Fig. 10. Casos de dos perfiles. Tomados de proyectos de Ingetesa SA	27
Fig. 11. Caso 1. Comparación entre las resistividades medidas y las calculadas	29
Fig. 12. Caso 3. Comparación entre las resistividades medidas y las calculadas	30
Fig. 13. Iteraciones de los parámetros con paso fijo para el Caso 2.	31
Fig. 14. Iteraciones de los parámetros con alternativa de paso para el Caso 2.	31

SIGLAS, ACRÓNIMOS Y ABREVIATURAS

IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
SPT	Sistemas de puesta a tierra
UdeA	Universidad de Antioquia

II. RESUMEN

En este documento se presenta el desarrollo paso a paso de una herramienta programada en Python, capaz de calcular los parámetros para modelado de suelo de dos capas, que consiste en una capa superior de profundidad (h), con diferente resistividad que una segunda capa inferior de espesor infinito.

Inicialmente el documento presenta la información teórica relacionada con la resistividad, el modelado de suelos aplicado a sistemas de puesta a tierra (SPT) y el proceso matemático del algoritmo de optimización conocido como el gradiente descendente aplicado al modelado de suelo de dos capas.

Posteriormente se comparan los resultados calculados de la herramienta con modelos provenientes de artículos de referencia, la IEEE Std 81 y un software libre llamado RE2CAP, con el objetivo de mostrar la efectividad del uso de la herramienta. También se presenta una variación en el método con el objetivo de acelerar la convergencia en las primeras iteraciones.

Entre los resultados obtenidos, se concluye que los parámetros calculados por la herramienta generada en este proyecto representan de manera adecuada la resistividad real del suelo en los casos analizados, por lo tanto, puede ser usada para modelar terrenos en futuros diseños de sistemas de puesta a tierra.

***Palabras clave* — Algoritmo de optimización, resistividad eléctrica, modelo de dos capas, sistemas de puesta a tierra, Python, gradiente descendente.**

III. ABSTRACT

This paper presents the step-by-step development of a tool programmed in Python that can calculate the parameters for two-layer soil modeling, consisting of an upper layer of depth (h), with different resistivity than a second lower layer of infinite thickness.

Initially, the paper presents the theoretical information related to resistivity, soil modeling applied to grounding systems (GPS) and the mathematical process of the optimization algorithm known as the steepest gradient applied to two-layer soil modeling.

Subsequently, the calculated results of the tool are compared with models coming from reference articles, IEEE Std 81 and a free software called RE2CAP, with the objective of showing the effectiveness of the use of the tool. A variation in the method is also presented with the objective of accelerating convergence in the first iterations.

The parameters calculated by the tool generated in this project adequately represent the real soil resistivity in the cases analyzed, therefore, it can be used to model soils in future grounding system designs.

***Keywords* — Optimization algorithm, electrical resistivity, two-layer model, grounding systems, Python, steepest gradient.**

IV. INTRODUCCIÓN

Los sistemas de puesta a tierra (SPT) son esenciales para la seguridad de las personas en los sistemas eléctricos. Para diseñar una malla de puesta a tierra se requiere de los parámetros geométricos de la subestación, la corriente de falla y la resistividad del suelo, donde ésta última es el parámetro que tiene más influencia en el adecuado diseño del SPT, por lo que su determinación debe realizarse de la manera más exacta posible [1]. El modelo de dos capas es una buena aproximación si el terreno posee varias capas de resistividad, y uno de los métodos más usados para calcularlo es el algoritmo de optimización del gradiente descendente, mencionado en la IEEE Std 81.

En la empresa INGETESA S.A. se realizan múltiples diseños de SPT, por lo cual, se modelan terrenos constantemente, pero el cálculo de los parámetros de dicho modelo sólo es realizado por una persona de la empresa. La propuesta de este proyecto de prácticas se plantea con el fin de solucionar lo mencionado anteriormente, y consiste en programar en Python una herramienta de escritorio capaz de calcular los parámetros del modelado de suelo de dos capas usados en el diseño de SPT, para que así cualquiera en la empresa pueda realizar el cálculo de los parámetros correspondientes.

En el desarrollo del proyecto se describirá el proceso matemático del algoritmo de optimización usado y una vez se encuentre programada la herramienta computacional, se realizarán pruebas con mediciones reales de resistividad, también se registrarán comparaciones con datos de las referencias consultadas y con resultados obtenidos de simulaciones en software libre para modelamiento de suelos.

V. OBJETIVOS

A. Objetivo general

Implementar una herramienta computacional en Python para la estimación de los parámetros del modelado de suelo de dos capas usados en el diseño de SPT.

B. Objetivos específicos

Describir paso a paso el modelo matemático de un algoritmo de optimización de machine learning aplicado a diseños de SPT.

Validar los resultados obtenidos mediante comparaciones con datos de las referencias consultadas y con resultados de software libre para el modelado de suelos.

Desarrollar un ejecutable de escritorio capaz de calcular los parámetros del modelo suelos de dos capas, dadas las medidas de resistividad.

VI. MARCO TEÓRICO

A. Resistividad del suelo

Representa la resistencia de un volumen de suelo con propiedades variables ante una corriente eléctrica y se obtiene indirectamente al procesar un grupo de medidas de campo. Su magnitud se expresa en (Ωm) o (Ωcm) [2].

1) Aplicaciones y usos de la resistividad del suelo

La resistividad de la tierra tiene múltiples aplicaciones, como estimar la impedancia de tierra de un sistema de puesta a tierra, estimar los gradientes de potencial incluidas las tensiones de paso y de contacto, calcular el acoplamiento inductivo entre los circuitos de energía y comunicación vecinos, diseñar sistemas de protección catódica, estudios geológicos, entre otras [3].

2) Importancia de la resistividad en sistemas eléctricos

En sistemas eléctricos se pueden presentar flujos de corriente a tierra que producen gradientes de potencial dentro y alrededor de la instalación, por ejemplo, el flujo generado por una falla a tierra en una subestación o la descarga de sobretensiones en un sistema de apantallamiento. Estos gradientes a lo largo de la superficie de la tierra pueden ser de suficiente magnitud como para poner en peligro a una persona en el área. Además, pueden desarrollarse tensiones peligrosas entre las estructuras de los equipos conectados a tierra y la tierra cercana [4].

Por lo mencionado anteriormente se deben tener precauciones en el diseño del sistema de puesta a tierra (SPT), con el fin de garantizar la seguridad de las instalaciones y de las personas que hacen uso de ellas.

Para diseñar la malla de puesta a tierra se requiere de los parámetros geométricos de la instalación, la corriente de falla y la resistividad del suelo, donde ésta última es el parámetro que tiene más influencia en el adecuado diseño del SPT, por lo que su determinación debe realizarse de la manera más exacta posible [1].

3) Factores que afectan la resistividad del suelo

El suelo es de naturaleza heterogénea, por lo tanto, su resistividad presenta variaciones con respecto a la profundidad. Los cambios laterales suelen ser más graduales con respecto a los

verticales. Estas variaciones ocurren debido a diferentes factores, entre ellos, humedad, temperatura, concentración de sales disueltas, compactación, presión, el tipo de suelo y su composición [2].

B. Medida de la resistividad del suelo

La resistividad debe ser obtenida con una medida directa en el suelo natural del sitio de interés, es decir, donde se va a instalar el SPT. No se usan muestras del suelo para obtener la resistividad porque es difícil, y en muchos casos imposible, obtener muestras que representen de manera adecuada el terreno. Además, se requeriría duplicar la compactación y el contenido de humedad originales [4].

1) Métodos de medición de resistividad del suelo

En la IEEE Std 81 se mencionan en dos métodos para medir la resistividad, el método de los tres puntos (variación del método de la profundidad) y el método de los cuatro puntos. Este último puede hacerse con los electrodos igualmente espaciados (método de Wenner) y con los electrodos desigualmente espaciados (método de Schlumberger–Palmer) [5]. Para el propósito de este documento se hará énfasis en el método de Wenner, ya que es el requerido para aplicar el método del gradiente descendente, con el cual se calcularán los parámetros del modelo de dos capas.

2) Método de Wenner para medir la resistividad

Consiste en enterrar pequeños electrodos tipo varilla, en cuatro huecos en el suelo, a una profundidad (b) y espaciados, en línea recta, una distancia (a) como se ilustra en la figura 1.

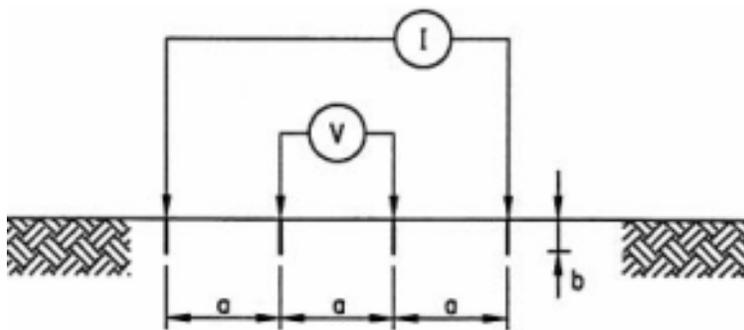


Fig. 1. Arreglo de Wenner. Tomada de [2].

Una corriente (I) se inyecta entre los dos electrodos externos y el potencial (V) entre los dos electrodos internos es medido por el instrumento. Mediante la ley de ohm, el instrumento mide la resistencia (R) del volumen de suelo cilíndrico de radio (a) encerrado entre los electrodos [2]. La i-ésima medida de la resistividad aparente del suelo (ρ_m), a la profundidad (a_i) es aproximada por la siguiente ecuación.

$$\rho_m(a_i) = 2\pi * R_i * a_i \quad (1)$$

A medida que se incrementa el espaciamiento entre los electrodos, la corriente de la fuente de prueba penetra en zonas cada vez más distantes, tanto en la dirección vertical como en la horizontal [4], lo cual permite obtener información de las capas más profundas del terreno.

3) *Consideraciones en la ejecución de la medida*

Se deben realizar varios grupos de medidas en distintos sectores del área de interés, en diferentes direcciones (perfiles), y con varios espaciamientos alineados para cada perfil. Cuando las medidas de resistividad son graficadas contra el espaciamiento, indican si hay capas diferentes de suelo y dan una idea de su respectiva profundidad y resistividad [2].

El número de medidas debe ser mayor cuando las variaciones son grandes, especialmente si algunas lecturas son tan altas como para sugerir un posible problema de seguridad.

Si la resistividad varía apreciablemente con la profundidad, a menudo es conveniente utilizar un rango mayor de espaciamiento entre los electrodos, para obtener una estimación de la resistividad de las capas más profundas.

C. *Modelamiento del terreno*

El objetivo del modelo del terreno es que sea una buena aproximación del suelo real, pero debe reconocerse que es sólo una aproximación a las condiciones reales del suelo y que es poco probable que se produzca una coincidencia perfecta. El suelo puede modelarse como homogéneo o heterogéneo dependiendo de la variación entre las medidas.

1) *Modelo de suelo homogéneo*

Puede ser utilizado cuando la variación de las mediciones de resistividad aparente es moderada, no más del 30% del valor máximo, lo que raramente ocurre en la práctica. Algunos métodos para modelar suelo homogéneo son los siguientes:

- Valor promedio de las resistividades medidas
- Promedio de la medición mínima y la medición máxima de resistividades aparentes
- Método estadístico BOX-COX

2) *Modelo de suelo no homogéneo*

Es el modelo más utilizado porque representa con más precisión al terreno en estudio. El motivo es que en la mayoría de los casos existe una gran variación entre las mediciones de resistividad aparente y no es adecuado aplicar el modelo de suelo homogéneo.

El modelo de suelo no homogéneo se puede dividir en dos submodelos: multicapas y de dos capas. Los modelos de suelo de dos capas son a menudo una buena aproximación de muchas estructuras de suelo. Mientras que los modelos de suelo multicapa pueden ser utilizados para condiciones de suelo más complejas, pero requieren de mayor capacidad computacional.

D. Modelo de suelo de dos capas

El modelo de dos capas consiste en una capa superior de profundidad finita y con diferente resistividad que una capa inferior de espesor infinito. La capa superficial tiene una resistividad ρ_1 y se encuentra a una profundidad h , mientras que la capa inferior tiene una resistividad ρ_2 , como se muestra en la siguiente figura.

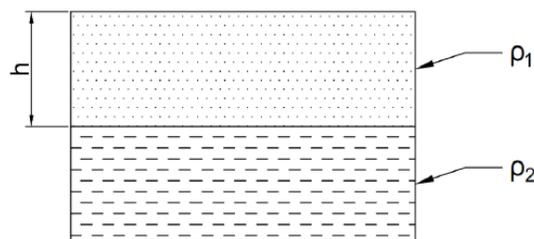


Fig. 2. Terreno de dos capas. Tomada de [3].

Las variaciones en la resistividad del suelo tienen una influencia considerable en el rendimiento de la mayoría de los sistemas de puesta a tierra, afectando tanto al valor de la resistencia de tierra como al aumento del potencial de tierra, y a las tensiones de paso y tensiones de la superficie de contacto.

Si bien la representación más exacta de un SPT debería basarse en las variaciones reales de la resistividad del suelo, rara vez será económicamente justificable o técnicamente factible modelar todas estas variaciones. Sin embargo, en la mayoría de los casos, la malla de un SPT basada en un modelo de tierra equivalente de dos capas es suficiente para diseñar un sistema de puesta a tierra seguro [4].

1) *Factor de reflectividad (K)*

El cambio brusco de resistividad en el límite entre la capa superior e inferior del suelo puede describirse mediante el factor de reflexión K, que se define mediante la siguiente ecuación.

$$K = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_1 + \rho_2} \quad (2)$$

Cuando el factor de reflexión es positivo (ρ_1 menor que ρ_2) la densidad de corriente es mayor en los conductores de los bordes exteriores de la malla de tierra. Pero cuando el factor de reflexión es negativo (ρ_1 mayor que ρ_2) la densidad de corriente es más uniforme en todos los conductores del sistema de puesta a tierra. Esto se debe a la tendencia de la corriente de la red a buscar la capa de menor resistividad [4].

2) *Técnicas para determinar los parámetros del modelo*

Existen varias técnicas para determinar un modelo bicapa equivalente del suelo real, a partir de la resistividad aparente obtenida en las pruebas de campo por el método de Wenner.

En algunos casos es posible utilizar el método gráfico de Sunde descrito en la IEEE 80, que consiste en aproximar un modelo de dos capas mediante la inspección visual de un gráfico de la resistividad aparente, el cual debe estar en función de la separación de los electrodos [4].

El otro método es el del gradiente descendente descrito en la IEEE Std 81, el cual se explicará a detalle en la siguiente sección y se utilizará para la elaboración de una herramienta en Python capaz de realizar el cálculo de los parámetros del modelo de suelo de dos capas.

3) Método del gradiente descendente

Es un algoritmo de optimización iterativo de primer orden que sirve para encontrar un mínimo local de una función diferenciable. Consiste en dar pasos repetidos en la dirección opuesta del gradiente de la función en el punto actual, ya que esta es la dirección del descenso más pronunciado [6]. Es uno de los algoritmos de optimización más populares en machine learning, particularmente por su uso extensivo en el campo de las redes neuronales.

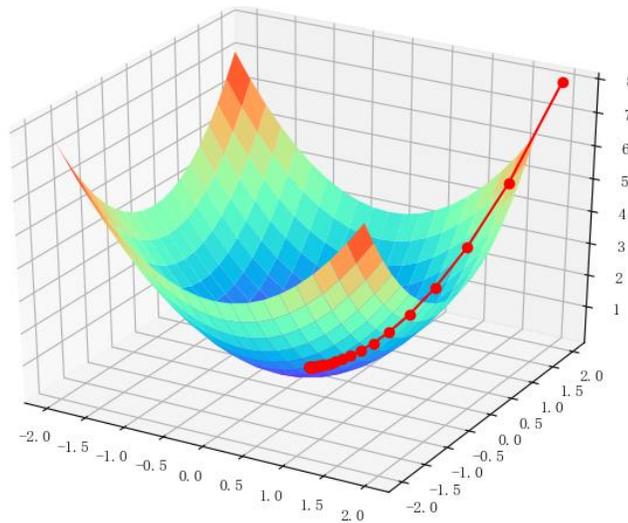


Fig. 3. Ejemplo del comportamiento del gradiente descendente. Tomada de [6].

E. Aplicación del método del gradiente descendente en el modelo de dos capas

Este modelo consiste en encontrar los parámetros (ρ_1 , ρ_2 , h), tales que, al ser reemplazados en la ecuación (3), se obtenga como resultado un valor aproximado a la resistividad medida con el método de Wenner a una distancia (a_i) entre los electrodos de prueba. Para lograr lo mencionado anteriormente se requiere de ajustar continuamente los parámetros del modelo hasta que el error total entre las resistividades medidas y las calculadas con la ecuación (3) alcancen un valor mínimo definido por el diseñador.

1) Resistividad calculada

$$\rho_c(a_i) = \rho_1 * \left[1 + 4 \sum_{n=1}^N \left(\frac{K^n}{\sqrt{A}} - \frac{K^n}{\sqrt{B}} \right) \right] \quad (3)$$

$$A = 1 + \left(\frac{2 * n * h}{a_i} \right)^2 \quad (4)$$

$$B = A + 3 \quad (5)$$

Donde K es el factor de reflexión. N es el número de términos significativos de la serie. A y B son factores que permiten visualizar de manera corta las ecuaciones.

2) Función objetivo (función del error cuadrático)

La función objetivo planteada corresponde al error cuadrático relativo entre los valores de resistividad aparente teóricos y medidos. El problema de optimización consiste calcular los parámetros de tal manera que minimicen la función objetivo.

$$\psi(\rho_1, \rho_2, h) = \sum_{i=1}^M \left(\frac{\rho_m(a_i) - \rho_c(a_i)}{\rho_m(a_i)} \right)^2 \quad (6)$$

Donde (ρ_{mi}) es la resistividad medida por el método de Wenner, mientras que (ρ_{ci}) es resistividad calculada teóricamente usando la ecuación (3). Ambas resistividades corresponden al iésimo espaciamiento entre electrodos (a_i). M es el número total de mediciones.

3) Gradiente de la función del error $\Delta\Psi$

Cerca del mínimo de la función Ψ el gradiente de la función $\Delta\Psi$ tiende a cero. En consecuencia, este se define como el criterio de parada de las iteraciones, y se efectúa cuando el gradiente calculado sea menor que una precisión escogida por el diseñador.

$$\Delta\psi = \frac{\partial\psi}{\partial\rho_1} * \Delta\rho_1 + \frac{\partial\psi}{\partial\rho_2} * \Delta\rho_2 + \frac{\partial\psi}{\partial h} * \Delta h \quad (7)$$

4) Derivadas parciales del error Ψ

$$\frac{\partial\psi}{\partial\rho_1} = -2 * \sum_{i=1}^M \left[\left(\frac{\rho_m(a_i) - \rho_c(a_i)}{\rho_m(a_i)^2} \right) * \frac{\partial\rho_c(a_i)}{\partial\rho_1} \right] \quad (8)$$

$$\frac{\partial\psi}{\partial\rho_2} = -2 * \sum_{i=1}^M \left[\left(\frac{\rho_m(a_i) - \rho_c(a_i)}{\rho_m(a_i)^2} \right) * \frac{\partial\rho_c(a_i)}{\partial\rho_2} \right] \quad (9)$$

$$\frac{\partial \psi}{\partial h} = -2 * \sum_{i=1}^M \left[\left(\frac{\rho_m(a_i) - \rho_c(a_i)}{\rho_m(a_i)^2} \right) * \frac{\partial \rho_c(a_i)}{\partial h} \right] \quad (10)$$

Las ecuaciones dependen de la resistividad la medida (ρ_m) y de la calculada de dos capas (ρ_c) con la ecuación (3). Siendo M el número total de mediciones. Estas derivadas también dependen de las derivadas parciales de la ecuación (3), las cuales aparecen al aplicar la regla de la cadena y se definen en las ecuaciones (11), (12) y (13).

5) Derivadas parciales de la resistividad calculada

Son necesarias para el cálculo de las derivadas parciales de la función error descritas en la sección anterior.

$$\frac{\partial \rho_c(a_i)}{\partial \rho_1} = 1 + 4 * \sum_{n=1}^N \left[\left(1 - \frac{n * (1 - K^2)}{2 * K} \right) * \left(\frac{K^n}{\sqrt{A}} - \frac{K^n}{\sqrt{B}} \right) \right] \quad (11)$$

$$\frac{\partial \rho_c(a_i)}{\partial \rho_2} = \sum_{n=1}^N \left[\left(\frac{2 * n * (1 - K^2)}{K} \right) * \left(\frac{K^n}{\sqrt{A}} - \frac{K^n}{\sqrt{B}} \right) \right] \quad (12)$$

$$\frac{\partial \rho_c(a_i)}{\partial h} = \frac{16 * \rho_1 * h}{a_i^2} * \sum_{n=1}^N \left[n^2 * \left(\frac{K^n}{\sqrt{B^3}} - \frac{K^n}{\sqrt{A^3}} \right) \right] \quad (13)$$

Al igual que la ecuación (3), sus derivadas parciales también dependen del factor de reflexión K definido en la ecuación (2), A y B definidos en las ecuaciones (4) y (5) respectivamente, y N que es el número de términos significativos de la serie.

6) Valores de paso $\Delta \rho_1$, $\Delta \rho_2$ y Δh

Para garantizar la convergencia es necesario hacer cambios en los parámetros (ρ_1 , ρ_2 , h) de tal manera que cada paso ($\Delta \rho_1$, $\Delta \rho_2$, Δh) sea en dirección contraria al gradiente, ya que esta es la dirección del descenso más pronunciado.

Se requiere un paso lo suficientemente pequeño como para garantizar una solución con la precisión deseada y velocidad de convergencia adecuada. En la IEEE Std 81 se recomienda un

factor de 0.005, sin embargo, en la sección de resultados se plantea una alternativa para el factor con el fin de acelerar la velocidad de convergencia en las primeras iteraciones.

La función “sing” toma el signo de la derivada, lo que indica si la pendiente es positiva o negativa en ese punto, y al multiplicarla por negativo (-) se asegura que el paso siempre va a realizar en la dirección deseada.

$$\Delta\rho_1 = -0.005 * |\rho_1| * \text{sign}\left(\frac{\partial\psi}{\partial\rho_1}\right) \quad (14)$$

$$\Delta\rho_2 = -0.005 * |\rho_2| * \text{sign}\left(\frac{\partial\psi}{\partial\rho_2}\right) \quad (15)$$

$$\Delta h = -0.005 * |h| * \text{sign}\left(\frac{\partial\psi}{\partial h}\right) \quad (16)$$

7) *Reajuste de los parámetros de ρ_1 , ρ_2 , h*

Teniendo ya calculados los pasos con el criterio mencionado anteriormente, se reajustan los valores de los parámetros del modelo.

$$\rho_1^{(k)} = \rho_1^{(k-1)} + \Delta\rho_1 \quad (17)$$

$$\rho_2^{(k)} = \rho_2^{(k-1)} + \Delta\rho_2 \quad (18)$$

$$h^{(k)} = h^{(k-1)} + \Delta h \quad (19)$$

8) *Criterio de parada*

Se establece el criterio de parada cuando gradiente calculado sea menor que la precisión deseada. Para esta aplicación, un valor común para el valor mínimo del error es que 0.0001

$$|\Delta\psi| < \varepsilon \quad (20)$$

Se define también otro criterio de parada que consiste en establecer una cantidad máxima de iteraciones, y tomaría efecto cuando el método no converge, es decir, cuando el error no disminuye hasta el valor establecido.

9) Diagrama de flujo del método

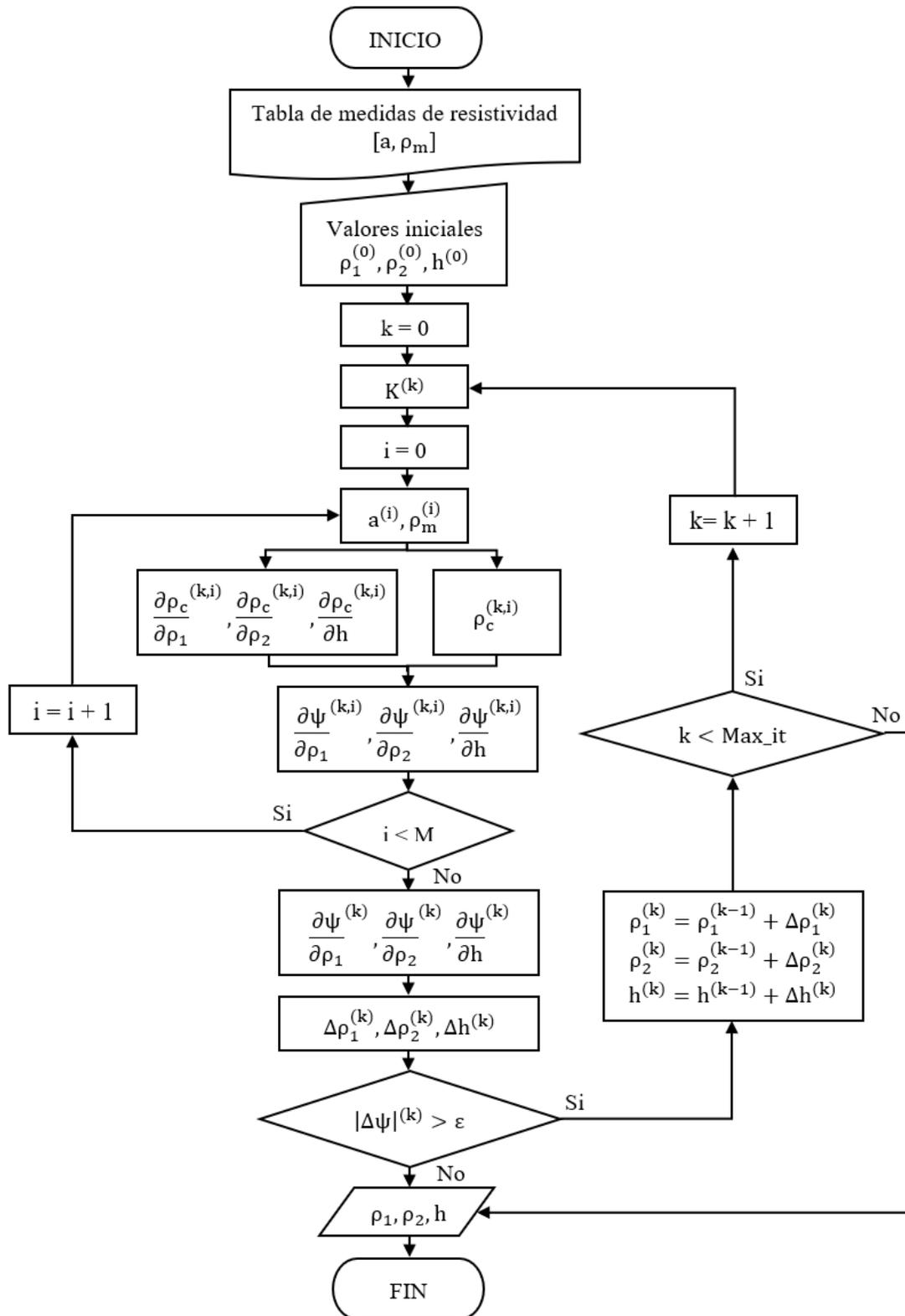


Fig. 4. Diagrama de flujo del gradiente descendente aplicado al modelo de suelo de dos capas. Elaboración propia.

El diagrama unifilar anterior presenta el procedimiento a seguir para desarrollar una herramienta computacional del método del gradiente descendente aplicado al modelo de suelo de dos capas. Donde (i) corresponde a la i-ésima medida del total de medidas de resistividad realizadas (M). (k) corresponde a la k-ésima iteración del total máximo de iteraciones asignado (Max_it)

VII. METODOLOGÍA

Etapas 1. Conceptualización del modelado de suelos

Documentación de contenido relacionado con el modelado de terrenos, que incluye algunos de los temas presentados en el marco teórico del presente documento, es decir, definiciones de conceptos, tipos de modelos, procedimiento para medidas de resistividad y descripción general del algoritmo.

Etapas 2. Revisión de artículos científicos, normas y antecedentes

Búsqueda y análisis de fuentes de información sobre modelos de terreno homogéneos y no homogéneos, procedimientos de optimización y aplicación del algoritmo del gradiente descendente en el modelado de suelos. También se espera encontrar ejemplos de referencia los cuales contengan parámetros calculados para modelos de suelos de dos capas, con el fin de realizar comparaciones.

Etapas 3. Medida de resistividad de terreno en campo

Determinar la ubicación del terreno de estudio para programar la salida a campo con el objetivo de realizar la medida de resistividad. Dicha medida se tomará empleando el método de Wenner, utilizando el telurómetro de la empresa el cual es un METREL MI 2088. Tomadas las medidas se debe garantizar que el terreno no sea homogéneo para obtener resultados de acuerdo con la utilidad de la herramienta.

Etapas 4. Descripción detallada del algoritmo

Realización del flujograma del proceso que describe el algoritmo con la finalidad de realizar la descripción paso a paso del desarrollo matemático del gradiente descendente, indicando la función objetivo a minimizar, valores iniciales, valores de paso, restricciones, convergencia y excepciones (si las hay).

Etapas 5. Programación en Python del algoritmo

Búsqueda e instalación de librerías necesarias para realizar la programación en Python de cada uno de los pasos descritos en la etapa anterior, incluyendo gráficas de comportamiento de los

parámetros, importación de datos de medida de resistividad y presentación de los parámetros resultantes.

Etapas 6. Comparar y validar resultados del modelo

Tabulación de resultados obtenidos con el programa desarrollado y datos obtenidos de otras fuentes de información, tales como: ejemplos de las referencias consultadas y datos extraídos de simulaciones con software libre para el modelamiento de suelos. Esto con el fin de validar la información calculada.

Etapas 7. Interfaz gráfica y aplicación de escritorio

Programación de la interfaz gráfica que tenga la opción para el ingreso de medidas de resistividad, visualización de gráficas y extracción de resultados. Posteriormente se realiza la conversión del programa a un ejecutable de escritorio.

VIII. RESULTADOS

A. Herramienta de Python e interfaz gráfica

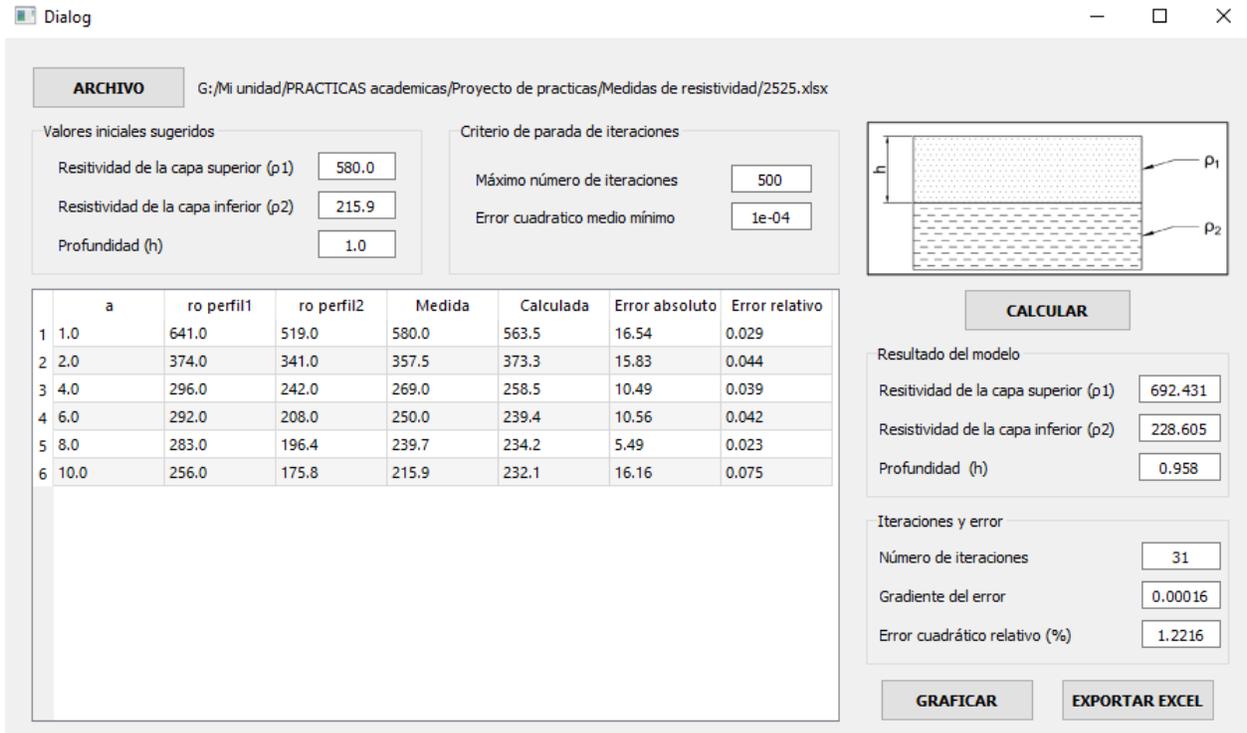


Fig. 5. Interfaz gráfica de la herramienta para modelo de dos capas

Como se muestra en la Fig. 5, la interfaz gráfica cuenta con 4 botones.

El botón ARCHIVO abre una ventana para escoger el archivo de Excel con las medidas tomadas en campo, y su contenido es mostrado en la tabla de la interfaz. Se le permite al usuario cambiar los valores iniciales de los parámetros y el criterio de parada de las iteraciones.

El botón CALCULAR, computa los parámetros del modelo ρ_1 , ρ_2 , h , y se muestran a la derecha, al igual que la información sobre las iteraciones y los errores. Además, añade 3 columnas adicionales a la tabla de la interfaz. La columna “Calculada”, muestra los valores de resistividad calculados con la ecuación (3). Las otras dos columnas corresponden a los errores absolutos y relativos entre las medidas de campo y las calculadas con el modelo.

El botón EXPORTAR EXCEL, guarda un archivo de Excel con la misma tabla mostrada en la interfaz.

El botón GRAFICAR genera dos gráficas, como se muestra en la Fig. 6. Una muestra el cambio de los parámetros con las iteraciones y la otra muestra las resistividades medidas y calculadas.

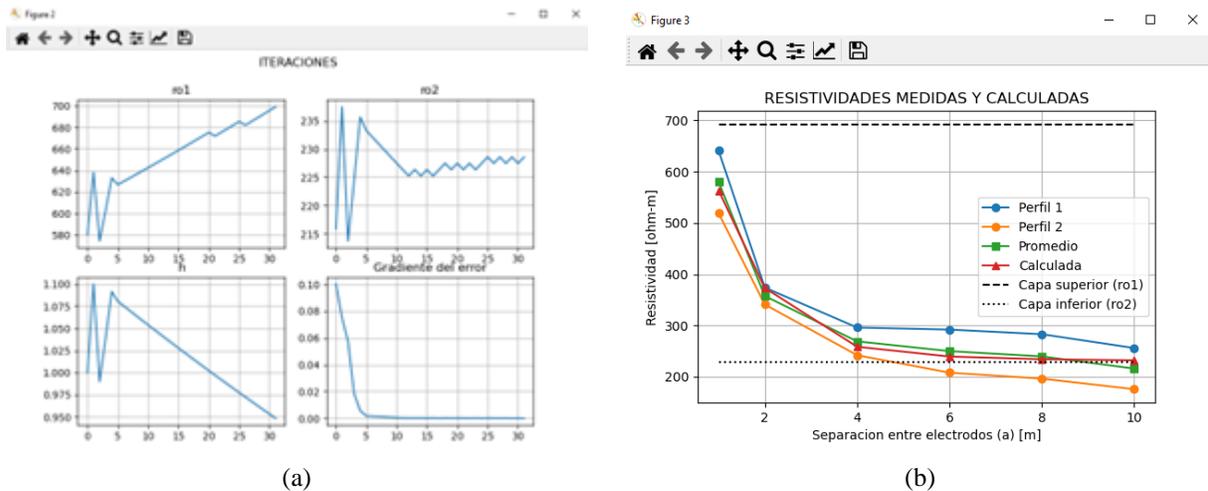


Fig. 6. Ejemplo de gráficas generadas por el programa.
 (a) Muestra el cambio de los parámetros con las iteraciones. (b) Muestra las resistividades medidas y calculadas.

B. Consideraciones en la programación en Python del algoritmo

1) Resistividad aparente medida (a_i, ρ_i) por método de Wenner

Para este programa se requiere que las medidas sean ingresadas como una tabla de Excel en columnas o en filas. En la primera columna (o fila) debe estar el espaciamiento entre los electrodos (a) ordenados de menor a mayor. En el resto de las columnas (o filas) deben estar las medidas tomadas por el método de Wenner correspondientes a cada espaciamiento.

En el caso de tener medidas de varios perfiles, solo es necesario añadir una columna (o fila) con las medidas correspondientes. Los datos pueden tener, o no, encabezados.

	A	B	C
1	a (m)	Perfil 1	Perfil 2
2	1	641	519
3	2	374	341
4	4	296	242
5	6	292	208
6	8	283	196.4
7	10	256	175.8

(a)

	A	B	C	D	E	F
1	1	2	4	6	8	10
2	641	374	296	292	283	256
3	519	341	242	208	196.4	175.8

(b)

Fig. 7. Ejemplos de tabla de datos de las medidas de resistividad.

Es importante aclarar que el método del gradiente descendente propuesto en la IEEE Std 81 sólo aplica para un solo grupo de medidas de la resistividad, es decir, un solo perfil.

Si se tomaron medidas desde distintos perfiles o lugares del sitio de interés, es necesario realizar un paso adicional en el método para modelar el suelo de dos capas, que consiste en promediar las resistividades de todos los perfiles, de tal manera que se genere un nuevo valor para cada espaciamiento entre los electrodos (a_i), y así, obtener un nuevo grupo de medidas de resistividad, que serán usadas para calcular los parámetros del modelo ρ_1 , ρ_2 , h . Esto es posible porque los cambios laterales de resistividad suelen ser más graduales con respecto a los verticales.

2) *Valores iniciales para ρ_1 , ρ_2 , h*

Los valores iniciales influyen en la convergencia del problema y la velocidad con la que se encuentra la solución. Entonces, se puede presentar el caso en el que el número máximo de iteraciones no permita la convergencia del problema, afectando el resultado de los parámetros.

Así que se hace una estimación basada en las medidas tomadas, y se mostrarán en la interfaz gráfica de la herramienta. Para el caso de la profundidad (h) se asigna el valor del espaciamiento mínimo desde el que se tomaron las medidas. Mientras que, para las resistividades, se asigna la primera medida al valor inicial de ρ_1 y la última medida al valor inicial de ρ_2 . Esto se escoge de esta manera debido a que las medidas tomadas con mayor espaciamiento entre electrodos brindan información sobre las capas más profundas.

3) *Límites de los parámetros*

En el proceso de buscar la respuesta, el método puede asignar un gran rango de valores para alguno de los parámetros, pero hay valores que no tienen sentido teórico, por ejemplo, una resistividad negativa. Entonces, acotar los parámetros puede permitirle al método buscar en rangos teóricamente correctos.

El límite inferior para todos los parámetros es cero y para el superior, se plantea un factor del doble del valor máximo registrado.

4) *Alternativa para los valores de paso $\Delta\rho_1$, $\Delta\rho_2$ y Δh*

Actualmente la IEEE Std 81 propone un valor fijo de 0.005 para el paso de cambio de los parámetros en cada iteración. Pero si los valores iniciales no están suficientemente cerca del

resultado final, se puede presentar que el método no alcance a converger en el número de iteraciones definido.

Para que el método converja más rápido se plantea modificar el paso, por uno que dependa del valor del gradiente del error ($\Delta\Psi$), como se muestra en la Fig. 8.

```
if delta_fi > 0.1:
    paso = 0.1
elif delta_fi > 0.05:
    paso = 0.05
elif delta_fi > 0.01:
    paso = 0.01
else:
    paso = 0.005

delta_ro1 = -paso*abs(self.ro1)*np.sign(der_fi_ro1)
delta_ro2 = -paso*abs(self.ro2)*np.sign(der_fi_ro2)
delta_h = -paso*abs(self.h)*np.sign(der_fi_h)
```

Fig. 8. Fragmento del código con valores de paso planteados

Así, en las primeras iteraciones donde el gradiente del error es grande, el paso va a ser mucho mayor en la dirección de mayor descenso del gradiente, por lo que el algoritmo buscará la solución mucho más rápido. Ya cuando el error sea menor a 0.01, el paso será de 0.005 como lo propone la IEEE.

C. Casos de estudio

Para poner a prueba los resultados de la herramienta, se compararán con resultados de modelos de dos capas ρ_1 , ρ_2 , h , tomados de los documentos de referencia.

Los casos 1 y 2 son presentados en la IEEE Std 81 [5]. Los casos 3, 4, 5 son tomados del artículo [7], donde se presenta una recopilación de diferentes casos de estudio, de los cuales se seleccionaron 3. Los casos 6 y 7 corresponden a medidas tomadas en campo por la empresa Ingetesa SA.

Los casos de referencia fueron seleccionados lo más diferentes entre sí, en cuestión a cantidad de medidas, separación entre electrodos, tendencia de crecimiento o decrecimiento de la resistividad medida y sus valores máximos. Esto con el fin de probar la herramienta en distintos escenarios.

TABLA I
CASOS DE UN PERFIL. TOMADOS DE DOCUMENTOS DE REFERENCIA

CASO	Caso 1		Caso 2		Caso 3		Caso 4		Caso 5	
Medición	a [m]	ρ [Ω m]								
1	0.3	100	0.3	300.0	2.5	451.6	1	136	1	693.7
2	0.9	100.1	0.9	299.7	5	366.7	2	140	2	251.6
3	1.5	100.6	1.5	298.5	7.5	250.2	4	214	3	84.56
4	3	103.9	3.0	289.9	10	180	10	446	4	37.64
5	4.5	110.9	4.5	272.6	12.5	144.2	20	685	5	25.32
6	6.1	121	6.1	248.7	15	120	40	800		
7	9.1	142.8	9.1	203.6	20	116				
8	15.2	181.4	15.2	144.2	25	96.5				
9	21.3	208.6	21.3	120.4						
10	27.4	227.8	27.4	110.2						
11	33.5	241.4	33.5	107.3						
12	39.6	251.7	39.6	104.5						
13	45.7	259.6	45.7	103.4						

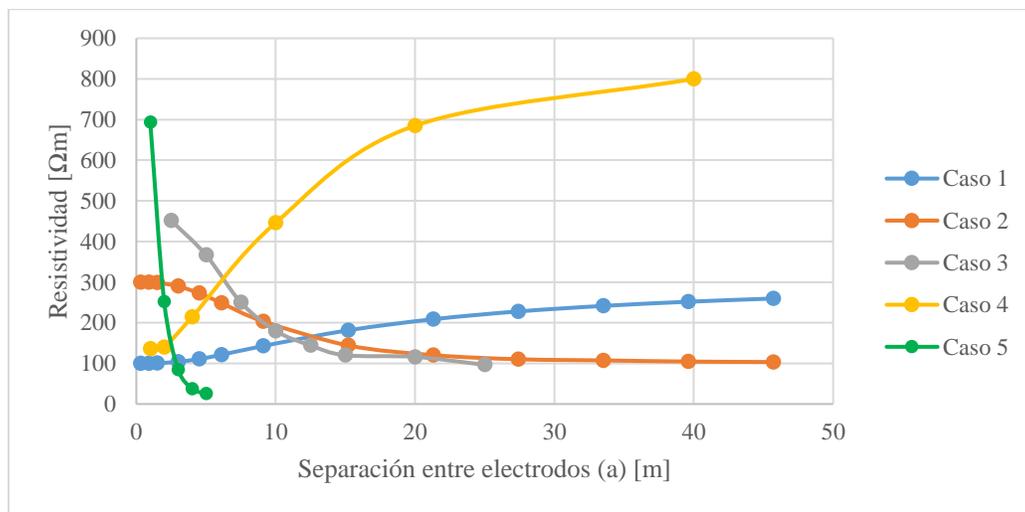


Fig. 9. Casos de un perfil. Tomados de documentos de referencia.

TABLA II
CASOS DE DOS PERFILES. TOMADOS DE PROYECTOS DE INGETESA SA

CASO	Caso 6			Caso 7		
Medición	a [m]	Perfil 1 [Ω m]	Perfil 2 [Ω m]	a [m]	Perfil 1 [Ω m]	Perfil 2 [Ω m]
1	1	641	519	1	1204	1532
2	2	374	341	2	1170	1293
3	4	296	242	4	1072	1024
4	6	292	208	6	1024	827
5	8	283	196.4	8	910	857
6	10	256	175.8	10	823	771

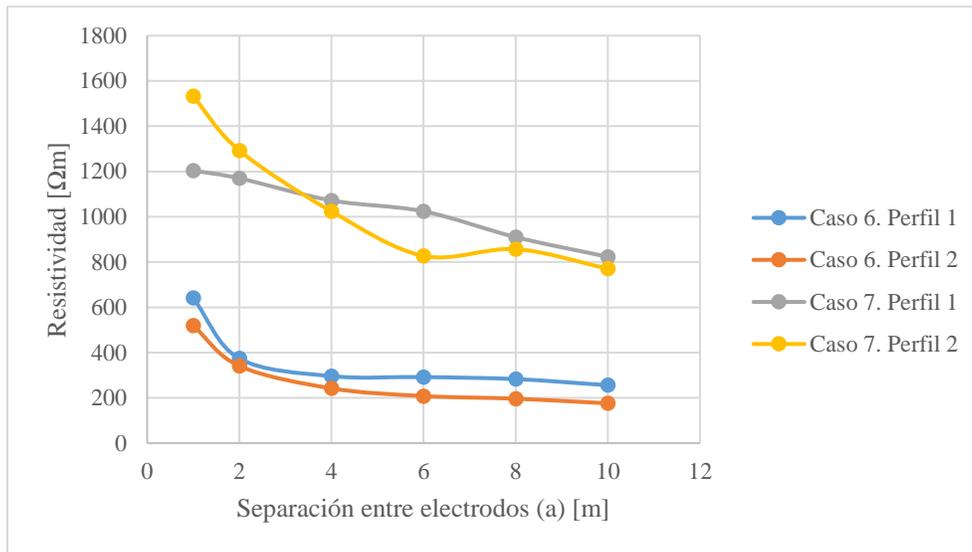


Fig. 10. Casos de dos perfiles. Tomados de proyectos de Ingetesa SA

D. Resultados de modelos de referencia y simulados

Para validar los resultados obtenidos por la herramienta de Python generada en este proyecto, se realizan comparaciones con datos de las referencias consultadas y con resultados de un software libre llamado RE2CAP para el modelado de suelos.

La exactitud entre los distintos modelos se compara mediante el error cuadrático relativo (ECR), el cual es calculado mediante la ecuación (6).

TABLA III
RESULTADOS DE MODELOS DE REFERENCIA Y SIMULADOS

	Modelo	ρ_1 [Ωm]	ρ_2 [Ωm]	h [m]	ECR [%]
Caso 1	Referencia	100	300	6.1	0.00013
	RE2CAP	99.377	296.751	5.861	0.04306
	Simulado	99.274	293.667	5.783	0.0689
Caso 2	Referencia	300	100	6.1	0.00997
	RE2CAP	300.071	100.368	6.019	0.0182
	Simulado	300.025	100.319	6.087	0.0105
Caso 3	Referencia	491.026	92.92	4.431	1.12
	RE2CAP	493.518	93.532	4.385	1.1812
	Simulado	493.78	93.566	4.333	1.2265
Caso 4	Referencia	122.379	1035.78	2.465	2.06
	RE2CAP	124.34	1080.281	2.647	1.7111
	Simulado	124.217	1080.753	2.644	1.7083

	Modelo	ρ_1 [Ωm]	ρ_2 [Ωm]	h [m]	ECR [%]
Caso 5	Referencia	1003.35	21.14	0.99	2
	RE2CAP	945.539	18.941	1.023	1.6759
	Simulado	985.617	21.995	1.0	0.0909
Caso 6	Referencia	716.42	253.86	0.94	6.2721
	RE2CAP	715.382	229.202	0.917	1.1643
	Simulado	692.431	228.605	0.958	1.2216
Caso 7	Referencia	1405.84	740.09	2.74	1.411
	RE2CAP	1381.611	781.14	2.081	0.3402
	Simulado	1408.948	804.065	1.877	0.4707

IX. ANÁLISIS

A. Comparación entre modelos de dos capas

Como se muestra en la TABLA III, los valores calculados con la herramienta generada por este proyecto son considerablemente aproximados a los resultados de las referencias consultadas. Se pueden observar que en los casos 4, 5, 6 y 7, la herramienta muestra resultados más exactos que los presentados en los documentos de referencia, es decir, el error es menor. Y para los casos 2, 4 y 5 la herramienta presenta un error menor que el del software RE2CAP.

Sólo en los casos 1 y 3 los resultados de la herramienta son superados por la referencia y RE2CAP simultáneamente. Aun así, los parámetros calculados son considerablemente similares a los otros dos modelos y pueden considerarse resultados adecuados para un buen diseño de SPT.

Para comprobarlo, se muestran las siguientes dos gráficas donde se comparan las resistividades medidas con las calculadas con la ecuación (6). En ambas gráficas se evidencia que el modelo representa de manera adecuada el terreno.

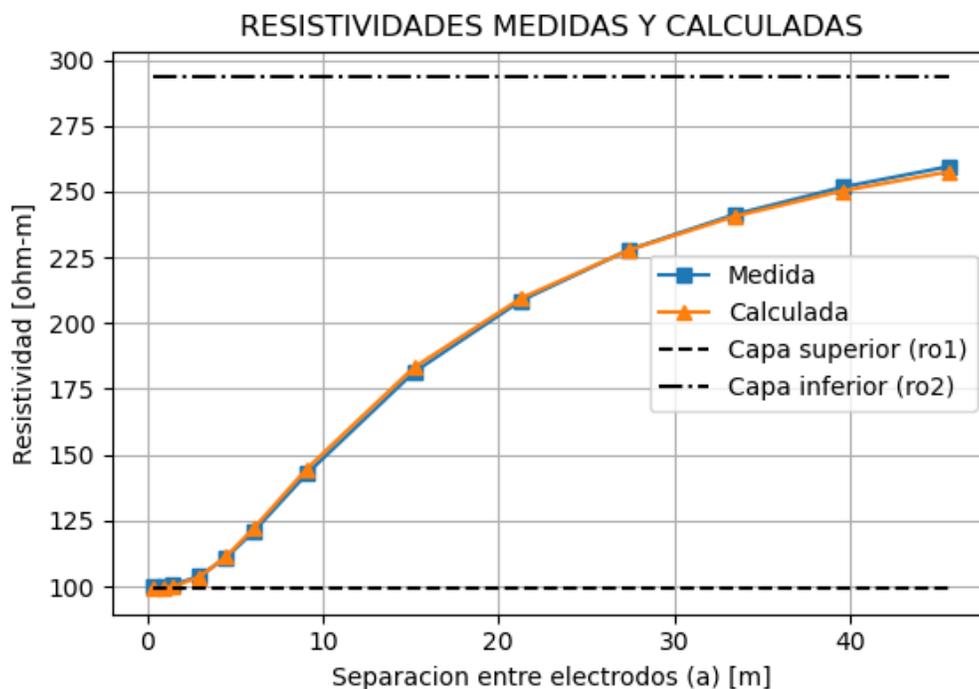


Fig. 11. Caso 1. Comparación entre las resistividades medidas y las calculadas

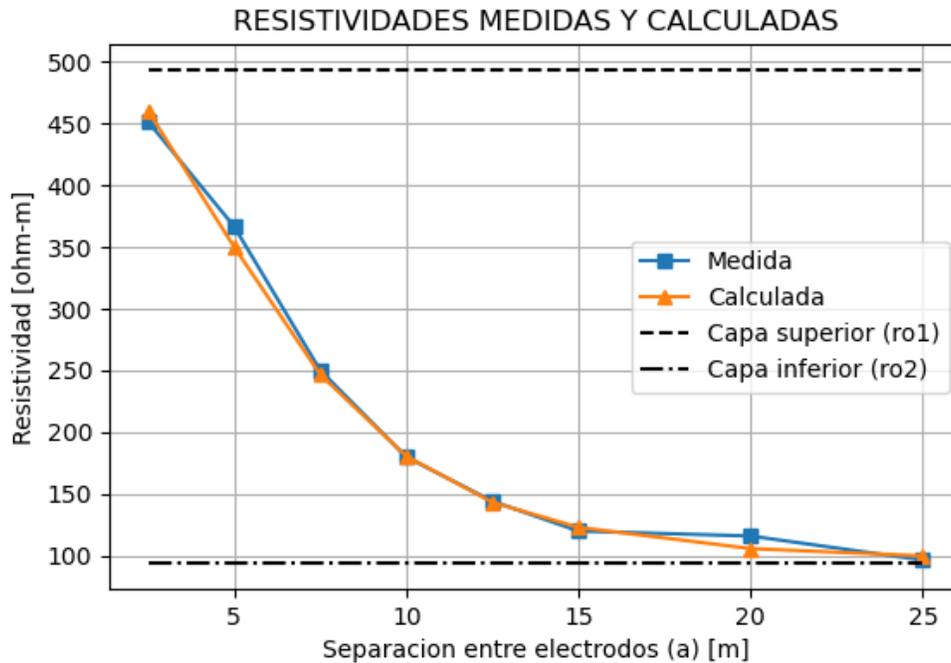


Fig. 12. Caso 3. Comparación entre las resistividades medidas y las calculadas

B. Evaluación de la alternativa para el paso de los parámetros

A continuación, se analiza la alternativa para los valores de paso $\Delta\rho_1$, $\Delta\rho_2$ y Δh planteada en la sección VIII.B.4) y se compara con el comportamiento del programa con un paso fijo. Para ilustrar la diferencia entre las velocidades de convergencia se simula el Caso 2, que también es tomado de la IEEE Std 81. La resistividad de la capa superior (ρ_1) para este caso es de $300 \Omega\text{m}$ y tiene una profundidad de 6.1 m, la capa inferior tiene una resistividad de $100 \Omega\text{m}$.

La gráfica de la Fig. 13 muestra las iteraciones de la simulación con un paso fijo de 0.005, como lo plantea la IEEE Std 81 y una cantidad máxima de 500 iteraciones. Como se puede observar, al pasar las 500 iteraciones los parámetros aún no han alcanzado la respuesta final, sin embargo, se nota una tendencia hacia los resultados correctos. Esto implica que la cantidad de iteraciones máxima no fue suficiente o que la búsqueda es muy lenta.

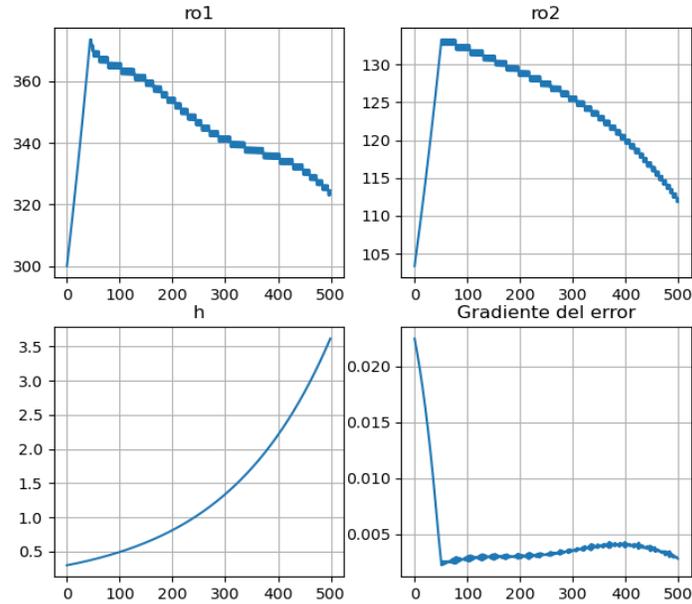


Fig. 13. Iteraciones de los parámetros con paso fijo para el Caso 2.

En la siguiente gráfica se muestra cómo se comportan los parámetros aplicando la alternativa propuesta en la sección VIII.B.4). A diferencia de la Fig. 13, los parámetros logran alcanzar el resultado correcto en menos iteraciones. Esto es porque la alternativa plantea modificar el paso para las primeras iteraciones, es decir, cuando el error es grande. Así, se logra acelerar la convergencia del problema.

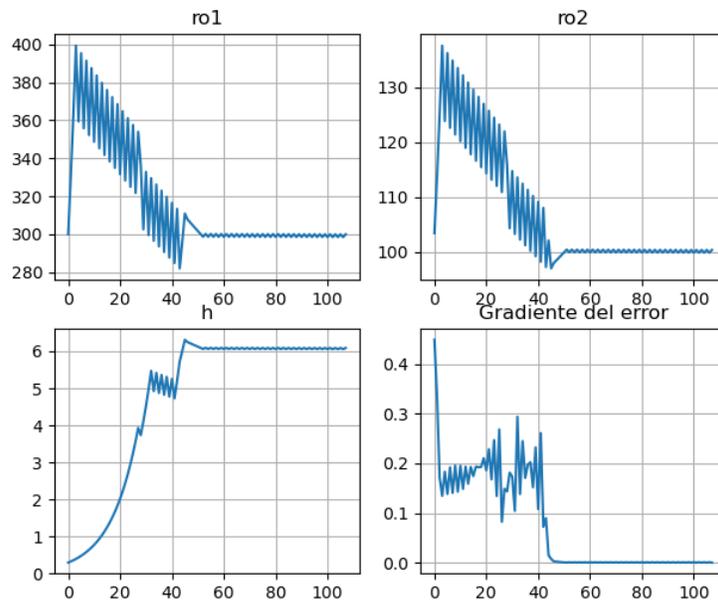


Fig. 14. Iteraciones de los parámetros con alternativa de paso para el Caso 2.

X. CONCLUSIONES

La resistividad del suelo es el parámetro que tiene más influencia en el adecuado diseño del SPT, por lo que su determinación debe realizarse de la manera más exacta posible, para poder asegurar la seguridad de las personas y de las instalaciones. Entonces si se desea hacer un código que modele el terreno, se deben realizar múltiples ensayos para verificar que el programa opere apropiadamente.

Se comprueba que los parámetros calculados por la herramienta generada en este proyecto representan de manera adecuada la resistividad real del suelo en todos los casos analizados. Por ende, puede ser usada para modelar terrenos en posteriores diseños de sistemas de puesta a tierra.

Durante el desarrollo de la práctica se desarrollaron conocimientos y habilidades en áreas como diseño, seguridad, programación, medidas de campo, relaciones con los clientes, redacción de informes, simulaciones, interpretación de datos y resolución de problemas. Estableciendo como prioridad la ética y la seguridad de las personas.

La herramienta presentada en este proyecto de prácticas permitirá que cualquier integrante de la empresa pueda realizar el cálculo de los parámetros del modelado de suelos, lo que optimizará el diseño de SPT.

Los algoritmos de inteligencia artificial y Machine Learning tienen múltiples aplicaciones en la ingeniería eléctrica. Este proyecto abre un panorama de soluciones tecnológicas, que podrían ser aplicadas en otro tipo de proyectos desarrollados por la empresa.

XI. REFERENCIAS

- [1] J. Rodríguez, W. Villa, J. Valencia, y Á. Jaramillo, “Cálculo de los parámetros del modelo del suelo de dos capas para sistemas de puesta a tierra utilizando Python”, vol. 41, pp. 345–355, 2020, [En línea]. Disponible en: <https://www.revistaespacios.com>
- [2] EPM, “RA6--014. Medidas de Resistividad del Suelo”, *Normas técnicas*, pp. 1–20, 2008, [En línea]. Disponible en: https://www.epm.com.co/site/Portals/0/centro_de_documentos/proveedores_y_contratistas/normas_y_especificaciones/normas_aereas/grupo_6_Normas_de_montajes_complementarios/RA6-014MEDIDADERESISTIVIDAD_V3.pdf
- [3] W. E. Pérez Loarca, C. J. Serrano Barrios, y O. O. Surio Guevara, “Manual de aplicación de la norma IEEE Std 81 para líneas y subestaciones eléctricas de transmisión.”, Universidad De El Salvador, San Salvador, 2015. [En línea]. Disponible en: [https://ri.ues.edu.sv/id/eprint/9008/1/Manual de aplicación de la norma IEEE Std 81.pdf](https://ri.ues.edu.sv/id/eprint/9008/1/Manual_de_aplicación_de_la_norma_IEEE_Std_81.pdf)
- [4] IEEE Power and Energy Society, “IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding”, *IEEE Std 80-2013 (Revision IEEE Std 80-2000/ Inc. IEEE Std 80-2013/Cor 1-2015)*, núm. February, pp. 1–226, 2013, doi: 10.1109/IEEESTD.2015.7109078.
- [5] S. Committee, “IEEE Guide for Measuring Earth Resistivity, Ground Impedance, and Earth Surface Potentials of a Grounding System - Redline”, *IEEE Std 81-2012 (Revision IEEE Std 81-1983) - Redline*, vol. 2012, núm. December, pp. 1–192, 2012, doi: 10.1109/IEEESTD.2012.6392181.
- [6] H. E. S. Community, “Machine Learning Training Method: Gradient Descent Method”, 2021. <https://forum.huawei.com/enterprise/en/machine-learning-training-method-gradient-descent-method/thread/708303-895>
- [7] W. M. Villa-Acevedo, J. M. Rodríguez-Serna, y J. D. Saldarriaga-Loaiza, “Estimación de Parámetros del Suelo de dos Capas usando el Algoritmo de Optimización de Mapeo Media-Varianza”, *Inf. Tecnol.*, vol. 30, núm. 1, pp. 299–309, feb. 2019, doi: 10.4067/S0718-07642019000100299.