

Optimización de diseño de mallas a tierra a través del análisis de la resistividad del suelo: Una investigación integral para el sector de Sangolquí

Optimization of the design for ground grid systems through the analysis of soil resistivity: A comprehensive investigation for the sector of Sangolquí

Flavio Barbosa^{1,*}, Santiago Pérez¹ y Kevin Avilés¹

¹ Carrera Gestión de mantenimiento y eficiencia Energética, ISTER, Loja, Ecuador, flavio.barbosa@ister.edu.ec, santiago.perez@ister.edu.ec, kevin.aviles@ister.edu.ec

* Autor para correspondencia: flavio.barbosa@ister.edu.ec

Fecha de recepción del manuscrito: 11/02/2025 Fecha de aceptación del manuscrito: 21/04/2025 Fecha de publicación: 30/06/2025

Resumen—El diseño adecuado de las mallas a tierra es fundamental para garantizar la seguridad y eficiencia de las instalaciones eléctricas, especialmente en zonas con alta variabilidad geológica. Este estudio se centra en el análisis y optimización de las mallas a tierra en el sector de Sangolquí, Ecuador, considerando los estándares de las normas IEEE 81 y NEC. Se utilizó el método Wenner (*Alpha*) para medir la resistividad del suelo y se aplicaron técnicas avanzadas para el modelado del terreno y la optimización de diseño. Las mediciones realizadas en sesenta ubicaciones estratégicas reflejan una resistividad del suelo variable entre 45,76 $\Omega\cdot m$ y 109,32 $\Omega\cdot m$. A partir de estos datos se calcularon configuraciones óptimas de mallas a tierra, logrando reducir la resistencia por debajo de los 25 Ω requeridos por las normativas internacionales. Además, se evaluaron distintos materiales y configuraciones para optimizar costos y eficiencia. Este trabajo contribuye significativamente a la mejora de la seguridad eléctrica en instalaciones residenciales, proporcionando un enfoque práctico y normativo para el diseño de sistemas de puesta a tierra en regiones con características geológicas diversas.

Palabras clave—Mallas de tierra, Resistividad del suelo, Wenner, Optimización, Sangolquí.

Abstract—The proper design of grounding systems is essential to ensure the safety and efficiency of electrical installations, especially in areas with high geological variability. This study focuses on the analysis and optimization of grounding systems in the Sangolquí area, Ecuador, considering the standards of IEEE 81 and NEC regulations. The Wenner (*Alpha*) method was used to measure soil resistivity, and advanced techniques were applied for terrain modeling and design optimization. Measurements taken at sixty strategic locations reflect soil resistivity ranging from 45.76 $\Omega\cdot m$ to 109.32 $\Omega\cdot m$. Based on this data, optimal grounding system configurations were calculated, achieving a resistance below the 25 Ω required by international standards. Additionally, various materials and configurations were evaluated to optimize costs and efficiency. This work significantly contributes to enhancing electrical safety in residential installations, providing a practical and regulatory approach for the design of grounding systems in regions with diverse geological characteristics.

Keywords—Grounding systems, Soil resistivity, Wenner, Optimization, Sangolquí.

INTRODUCCIÓN

En el diseño de mallas a tierra es un aspecto crucial en la seguridad de instalaciones eléctricas, ya que permite la disipación segura de corrientes de falla y protege tanto a personas como a equipos. La eficiencia de una malla a tierra depende en gran medida de la resistividad del suelo, que varía según factores geológicos, climáticos y estacionales (Salam y cols., 2017; Sazali y cols., 2020). En muchos países en desarrollo, los sistemas de puesta a tierra suelen ser deficientes, lo que representa un riesgo significativo para la seguridad de las instalaciones eléctricas (Oyeyemi y cols., 2022).

La resistividad del suelo desempeña un papel crucial en el diseño de las mallas a tierra, ya que influye directamente

en el dimensionamiento, configuración y eficacia del sistema (Zhou y collaborators, 2017). Una resistividad elevada puede limitar la capacidad de disipación de corrientes de falla al terreno, mientras que suelos de baja resistividad pueden facilitar un diseño más eficiente y económico (Trifunovic y Kostic, 2015).

Este estudio se enfoca en la optimización del diseño de mallas a tierra en Sangolquí, Ecuador, considerando la variabilidad del terreno y la aplicación de las normas IEEE 81 y NEC. Se propone un enfoque basado en el análisis detallado de la resistividad del suelo y en la implementación de estrategias de optimización para mejorar el desempeño de las mallas a tierra. A través de la aplicación del método Wenner (*Alpha*), reconocido por su precisión en la medición de resis-

tividad, se realizaron mediciones en diferentes puntos estratégicos del sector. Este enfoque permitió generar un modelo geoelectricista detallado, considerando variables como la profundidad de las mediciones, el contenido de humedad del suelo y las condiciones climáticas (Abdullah y cols., 2011; Pazha y cols., 2019). Además, se siguieron los lineamientos de la norma IEEE 81, que establece procedimientos estándar para garantizar resultados fiables y replicables.

Sangolquí representa un caso de estudio interesante debido a su ubicación geográfica y la variabilidad en los tipos de suelo que se encuentran en la región. Estas características hacen necesario un análisis detallado para garantizar que las mallas a tierra cumplan con los requerimientos de seguridad eléctrica establecidos por normativas internacionales, como la NEC (Li y cols., 2008). Además, se busca aportar una guía práctica para la mejora de las instalaciones eléctricas residenciales en el país, donde la mayoría de los sistemas actuales no cumplen con los estándares mínimos de seguridad (Senthil-kumar, 2017).

Este trabajo no solo busca optimizar el diseño de las mallas a tierra, sino también contribuir a una mejor comprensión de las interacciones entre las propiedades del suelo y el desempeño de los sistemas de puesta a tierra. Los resultados de esta investigación tienen el potencial de ser aplicados a nivel nacional y en otras regiones con características geológicas y climáticas similares, promoviendo así la adopción de prácticas seguras y eficientes en el diseño de instalaciones eléctricas (Yang y collaborators, 2001).

MATERIALES Y MÉTODOS

Las pruebas se llevaron a cabo en el sector de Sangolquí, Ecuador. Las mediciones fueron definidas considerando la altitud sobre el nivel del mar (msnm) y la geografía del área de estudio. Se utilizó los siguientes materiales detallados en la tabla 1 (Sazali y cols., 2020).

Tabla 1: Detalles de materiales utilizados

Material	Descripción
Telurómetro	Se utilizó el comprobador de puesta a tierra 1625-2 GEO de Fluke.
Electrodos picas de pruebas	Se utilizaron cuatro varillas metálicas de acero galvanizado de 30 cm de longitud.
Cables de conexión	Cables eléctricos con los debidos terminales tanto para conexión con el telurómetro como para los electrodos de prueba. El equipo cuenta con cuatro carretes de 60 m, 40 m, 30 m y 20 m.

Entre los métodos más empleados para el análisis de la resistividad del suelo se encuentran los siguientes métodos detallados con sus ventajas y desventajas en la tabla 2 (Oye-yemi y cols., 2022).

Para el estudio se utilizó el método Wenner (Alpha), también conocido como Wenner de cuatro polos, debido a la simplicidad de la configuración, facilidad de interpretación de los resultados, la resolución para variaciones de resistividad y poseer una mayor sensibilidad a los cambios del terreno. El procedimiento empleado sigue los lineamientos de la norma IEEE 81, que establece los criterios para la medición de la resistividad del suelo y el diseño de sistemas de puesta a

tierra. Se detallan los pasos seguidos para la medición de resistividad y el cálculo de la configuración óptima de la malla a tierra en la tabla 3.

La disposición de los electrodos con el método designado emplea un esquema de conexión utilizando cuatro electrodos en una configuración sencilla de realizar y modificar, junto con el equipo utilizado para las mediciones (Salam y cols., 2017). Esta configuración se ilustra en la figura 1.

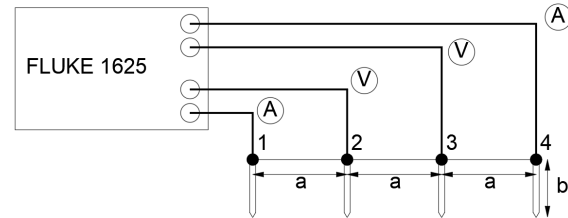


Fig. 1: Método de conexión para la medición de la resistividad del suelo.

Para las mediciones se utilizaron cuatro electrodos de prueba de 0.3 m de longitud, insertados verticalmente a una distancia equidistante entre ellos. Se definió como b la longitud de cada varilla y como a la separación entre las varillas de prueba (Abdullah y cols., 2011). La metodología incluyó mediciones en direcciones norte-sur, este-oeste y diagonal. Las distancias de prueba (a) fueron de 4, 6 y 10 m. Se empleó el telurómetro Fluke 1625-2 para inyectar corriente entre las varillas de prueba 1 y 4. La diferencia de potencial se midió entre las dos varillas internas (2 y 3), como se indica en la figura 1, dado que el telurómetro emplea estos valores para calcular la resistencia de la tierra.

Las mediciones se realizaron conforme a la normativa IEEE 81, la cual establece los procedimientos adecuados para determinar la resistividad del suelo. La metodología seguida se ilustra en la figura 2 (Zhou y collaborators, 2017).

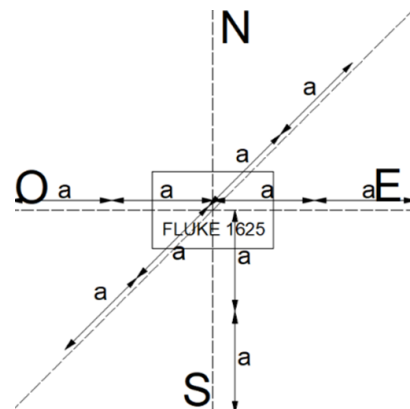


Fig. 2: Mediciones de resistencia del terreno.

Las mediciones se realizaron en tres direcciones: norte-sur, este-oeste y en diagonal. En cada caso, los valores de a fueron de 4, 6 y 10 m, permitiendo obtener un total de nueve mediciones por punto de muestreo (Trifunovic y Kostic, 2015).

Se recopilaron datos de resistencia y resistividad del terreno en el sector de Sangolquí, Ecuador ($-0,33405, -78,45217$). Se seleccionaron sesenta ubicaciones estratégicas, tomando en consideración el tipo de suelo determinado por el mapa geológico del Ecuador, datos del

Tabla 2: Comparación entre métodos para la medición de resistividad del suelo

Método	Ventajas	Desventajas
Schlumberger	Fácil instalación, requiere menor cantidad de conductor al mover los electrodos de corriente.	Da una sensibilidad menor a variaciones locales y cuenta con una interpretación más compleja.
Half–Schlumberger	Utiliza menos cantidad de conductor que el método de Schlumberger completo; es más efectivo en terrenos irregulares.	La precisión en la medición es menor que el método completo.
Wenner (Alpha)	Fácil instalación y método de cálculo; se logra una alta sensibilidad a posibles cambios de resistividad.	Se requiere un mayor espacio para poder realizar mediciones a mayor profundidad.
Wenner (Beta)	Se adapta mejor a terrenos con geometría irregular, con una instalación similar al Wenner (Alpha).	Más complejo que Wenner (Alpha) por la configuración de las picas; menor uso dentro de las normativas estándar.
Pole–Pole	Mayor profundidad de medición con menos espacio.	Posee una alta influencia a los efectos de borde y alta probabilidad de ruido por objetos metálicos en el terreno.

Tabla 3: Procedimiento para la medición del terreno

Pasos	Descripción
Preparación del sitio	Se debe seleccionar un área representativa, evitando cualquier interferencia del sector y asegurar condiciones naturales del suelo.
Disposición de electrodos de prueba	Se colocan los electrodos en línea recta con una separación equidistante (a); el valor de a fue 4, 8 y 10 m para obtener una profundidad adecuada del suelo.
Conexión del equipo de medición	Se aplica una corriente a una frecuencia de 111 Hz con un voltaje de 42 V. Este paso se realiza para cada una de las distancias y direcciones de a .
Cálculo de la resistividad	Se aplica la ecuación de Wenner para obtener la resistividad aparente, junto con el descarte de datos aplicando Gauss.
Análisis de resultados	Se repiten las mediciones con los valores de 4 m, 8 m y 10 m, se grafican los resultados y se analiza la estratificación del suelo.
Registro de datos	Se registran las condiciones ambientales, ubicación y se presentan valores obtenidos con una interpretación.

Instituto Geográfico Militar y la altura sobre el nivel del mar. La tabla 4 resume el número de lugares considerados en función del intervalo de alturas.

Tabla 4: Número de datos según la altura sobre el nivel del mar

No.	Rango mínimo [msnm]	Rango máximo [msnm]	Número de lugares
1	2463	2481	1
2	2481	2500	9
3	2500	2529	11
4	2519	2538	11
5	2538	2557	9
6	2557	2575	8
7	2575	2594	4
8	2594	2613	5
9	2613	2632	2

Los puntos de medición se ilustran en la figura 3. Posteriormente, los datos obtenidos fueron procesados siguiendo un algoritmo específico para su análisis y tratamiento, como se muestra en la figura 4.

Se evaluaron diferentes configuraciones de mallas considerando la distribución de electrodos y conexiones, los tipos de materiales conductores de cobre y la profundidad y separación óptima de electrodos. El objetivo de la optimización fue minimizar la resistencia de la malla sin incrementar costos excesivamente.

RESULTADOS

La medición de la resistencia del terreno es una práctica no destructiva. Los métodos empleados son sencillos y ampliamente utilizados, lo que los hace adecuados para diversas aplicaciones. La incorporación de la tomografía en el análisis de la resistividad eléctrica permite obtener características del suelo de manera más rápida y precisa en términos de profundidad y distancia (Ho, 2008).

El modelo de resistividad aparente actual se basa en relaciones empíricas para estimar el perfil de resistividad en función de la profundidad. Sin embargo, estas relaciones pueden presentar imprecisiones debido a factores como la variabilidad del suelo, el contenido de humedad, la temperatura y otros parámetros geológicos. Además, los resultados pueden fluctuar en función de la distancia horizontal, lo que puede comprometer la exactitud de las mediciones, especialmente en suelos superficiales (Abdullah y cols., 2011).

La influencia de la variabilidad del suelo, el contenido de humedad, la temperatura y otros parámetros geológicos sigue siendo un desafío en la obtención de mediciones precisas. Estas limitaciones deben considerarse al interpretar los datos de resistividad del terreno, ya que pueden afectar significativamente la confiabilidad de los resultados obtenidos (Senthilkumar, 2017).

Para el cálculo de la resistividad del terreno se empleó la ecuación (Yang y collaborators, 2001):

$$\rho = 2\pi aR, \quad (1)$$

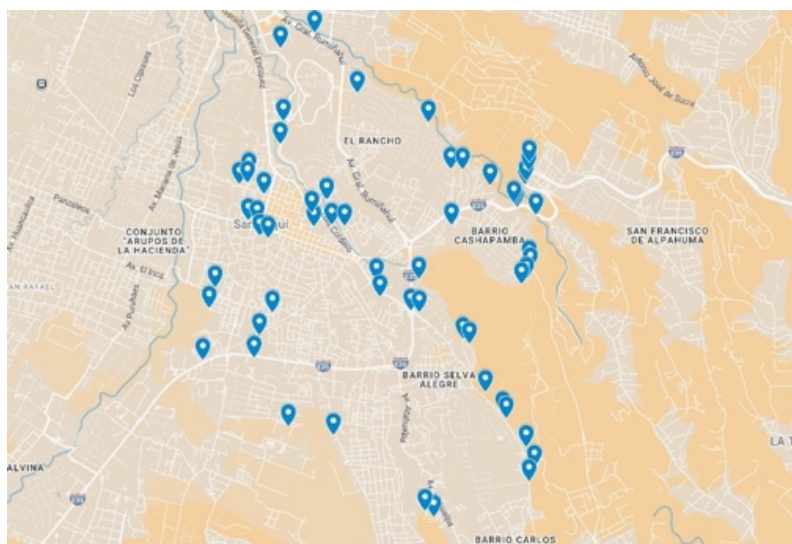


Fig. 3: Puntos de medición en el sector de Sangolquí.

donde ρ es la resistividad del terreno [$\Omega \cdot m$], a la distancia de separación entre las picas de prueba [m] y R la resistencia del terreno [Ω] obtenida mediante el telurómetro.

Los datos provienen de las sesenta ubicaciones mostradas en la figura 3; sin embargo, se presentan únicamente los puntos representativos de las áreas más densamente pobladas, ya que en estas ubicaciones se reflejan de manera más concisa las condiciones generales del sector y permiten una mejor evaluación del comportamiento de las diferentes configuraciones de los sistemas de puesta a tierra. La tabla 5 resume estos datos.

Los valores obtenidos mostraron una gran variabilidad, con resistividades entre $45.76 \Omega \cdot m$ y $109.32 \Omega \cdot m$, lo que confirma la necesidad de un diseño adaptable según la zona. Se presentan los datos obtenidos y su comparación con estudios previos y estándares internacionales.

El diseño de la malla de tierra se enfoca en alcanzar una resistencia inferior a 25Ω , conforme a los requisitos establecidos por la NEC. Para ello se emplean las ecuaciones definidas en la norma IEEE 81, las cuales permiten una correcta configuración y dimensionamiento de la malla de tierra (De Electricidad Evaluación y cols., 2023). Se consideró el uso de un cable desnudo de cobre #2 AWG para el diseño de la malla a tierra y una corriente de corto circuito de 10 kA, dado que es la capacidad máxima que puede soportar un interruptor termomagnético residencial, según normativas vigentes.

Las ecuaciones para el cálculo de la resistencia de diferentes configuraciones de mallas se resumen en la tabla 6. En cada caso, se emplearon imágenes ilustrativas de las configuraciones para facilitar la interpretación.

Donde ρ es la resistividad del terreno [$\Omega \cdot m$], a el radio de la varilla [m], L la longitud de la varilla [m], S la separación entre las varillas [m] y R la resistencia de la malla [Ω].

A continuación, se muestra en la figura 5 la variación de la resistencia de puesta a tierra calculada en los distintos puntos del sector de Sangolquí. Este gráfico refleja cómo la resistencia del suelo y las características de las diferentes configuraciones del sistema de puesta a tierra afectan a la eficiencia de la resistencia.

Se realizaron simulaciones y análisis de configuraciones de mallas utilizando las ecuaciones establecidas en la norma

IEEE 81. Los resultados indican que la configuración de dos varillas de 1.8 m, separadas por 2 m, es suficiente para cumplir con la resistencia máxima permitida de 25Ω en el 90 % de los casos evaluados.

La validación del sistema de puesta a tierra se logra al demostrar que en las configuraciones presentadas el valor del GPR se mantiene por debajo del voltaje de paso, cumpliendo de esta manera con los criterios de seguridad establecidos según la normativa de la IEEE Std 80 (of Electrical y Engineers, 2013). Se emplearon las siguientes ecuaciones:

$$\text{GPR} = I_G R_g, \quad (2)$$

$$I_b = \frac{0,166}{\sqrt{t_s}}, \quad (3)$$

$$E_{\text{touch}} = I_b(R_b + 1,5\rho), \quad (4)$$

$$E_{\text{step}} = I_b(R_b + 6\rho), \quad (5)$$

donde I_G es la corriente de falla a tierra (10 kA), R_g la resistencia de la puesta a tierra [Ω], I_b la corriente de falla por el cuerpo humano para una persona de 50 kg, t_s el tiempo de duración de la falla (0.5 s), R_b la resistencia del cuerpo humano (1000 Ω), ρ la resistividad del terreno [$\Omega \cdot \text{m}$], E_{touch} el voltaje de toque y E_{step} el voltaje de paso.

En las figuras 6–9 se presentan los resultados obtenidos a partir de los modelos de puesta a tierra. Las figuras muestran las variaciones que se encuentran dentro del GPR en relación con los voltajes de paso y de toque, destacando las diferencias entre los modelos propuestos.

DISCUSIÓN

Dentro del estudio de las mallas de puesta a tierra desarrollado en este documento se logró determinar la resistividad del suelo en el sector de Sangolquí y, como resultado, la resistencia de la malla de puesta a tierra de acuerdo con el número y configuración de las varillas, enfocado en el sector residencial.

Según la normativa del NEC, la IEEE Std 80 especifica que para el sector residencial la resistencia máxima debe ser de 25Ω , y para el sector de Sangolquí en un 90 % de los casos se logra con la instalación de dos varillas de *copperweld* de

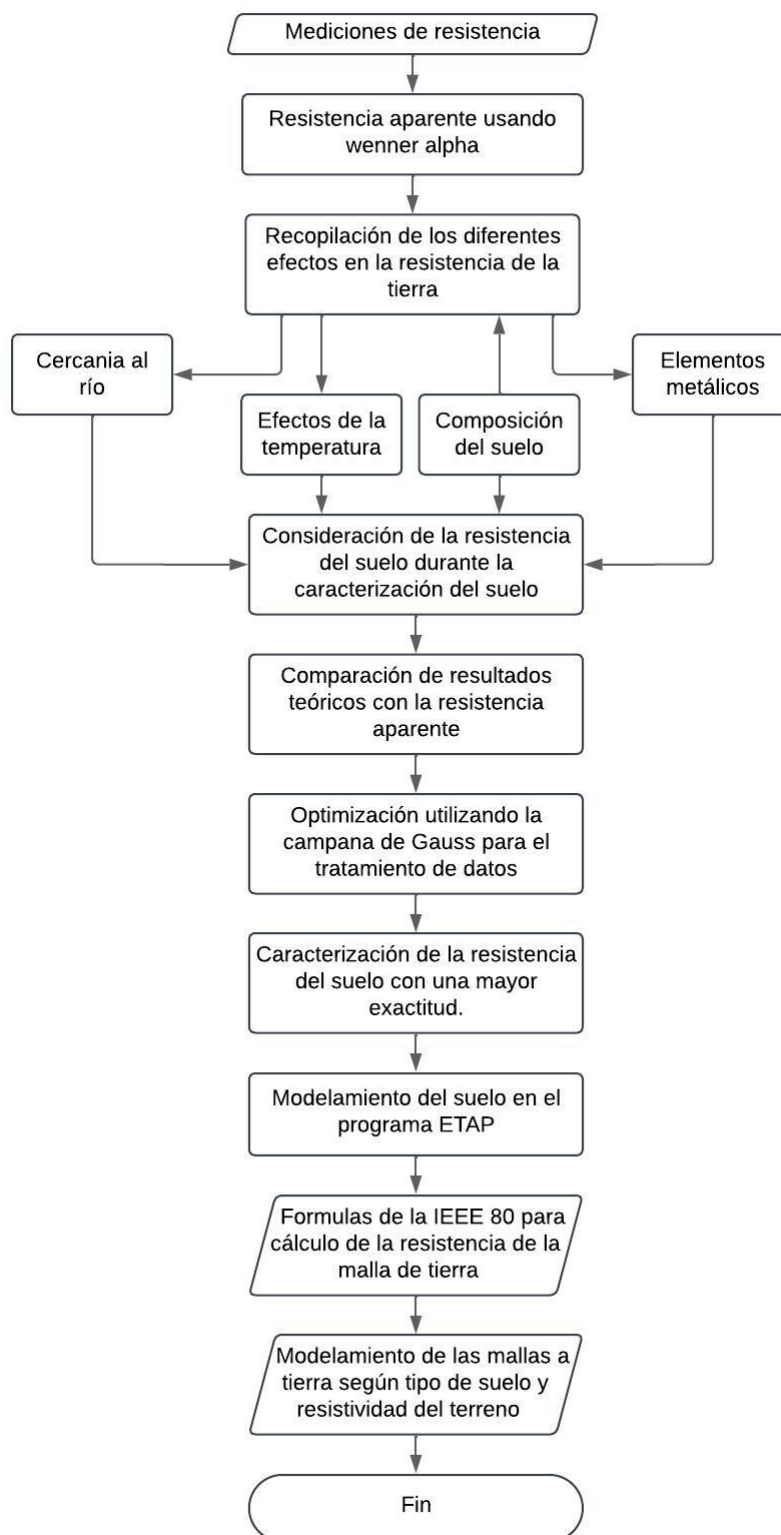


Fig. 4: Algoritmo para el modelado del suelo y mallas a tierra.

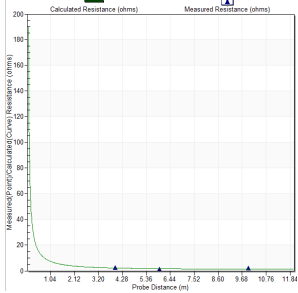
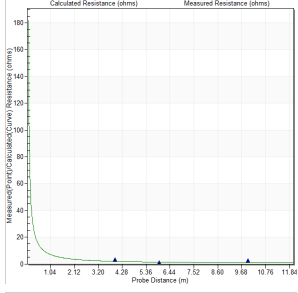
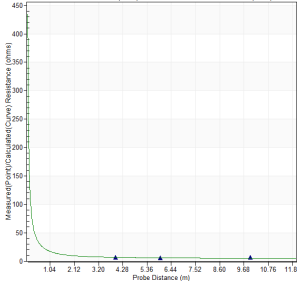
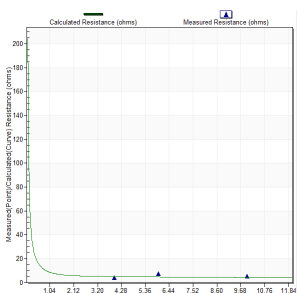
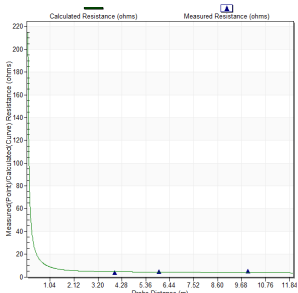
1.8 m, 5/8 pulgadas de diámetro y una separación entre sí de 2 m, proporcionando una solución adecuada para construcciones de viviendas y garantizando una correcta instalación de los sistemas de puesta a tierra.

Para la verificación de las soluciones propuestas se realizó el cálculo de un escenario de accidente mediante circuitos equivalentes, en donde se consideró el voltaje de toque y de paso mayor al GPR, tomando como referencia a una persona

de 50 kg. Dado que el estudio está enfocado al área residencial, se contempló la presencia de niños dentro de las instalaciones eléctricas que pueden hacer contacto con elementos eléctricos conectados a tierra.

Se evaluó el comportamiento de los sistemas de puesta a tierra en diferentes configuraciones mediante el análisis del GPR, voltaje de toque y de paso, comparando tres escenarios. Los resultados muestran que la configuración de una

Tabla 5: Datos de la resistividad de los terrenos objetivos en Sangolquí

Punto de medición	Gráfico resistencia vs distancia	Resistividad [$\Omega \cdot m$]	Coordenadas decimales	Altura [m]	Profundidad [m]
Parque Turismo		47.83	-0,32693, -78,45074	2500	4.95
Parque San Sebastián		45.76	-0,33058, -78,44515	2517	8.038
Complejo turístico La Cascada		109.32	-0,34314, -78,42846	2568	3.055
Quinta Lomalta		51.30	-0,36308, -78,43173	2645	2.015
Centros Médicos Cruz Roja Sangolquí		53.86	-0,33187, -78,45026	2502	2.266

sola varilla presenta el mayor valor de GPR, logrando alcanzar valores de hasta 500 V en algunos puntos de medición. Esto representa un riesgo considerable en los sectores residenciales, donde se pueden producir accidentes por contacto directo con elementos eléctricos; además, en algunos casos los voltajes de paso muestran valores cercanos a los 300 V,

lo cual excede los límites de seguridad establecidos según la normativa de la IEEE Std 80.

Al aumentar el número de electrodos a dos varillas con una separación menor que la longitud de la varilla se observa una reducción significativa del GPR, con valores inferiores a 150 V, lo que muestra una mejora en la eficiencia de la

Tabla 6: Ecuaciones para el cálculo de la resistencia de la malla de puesta a tierra

Tipo	Nombre	Fórmula
	Una varilla	$R = \frac{\rho}{2\pi L} \left(\ln \frac{4L}{a} - 1 \right)$
	Dos varillas ($S > L$)	$R = \frac{\rho}{4\pi L} \left(\ln \frac{4L}{a} - 1 \right) + \frac{\rho}{4\pi S} \left(1 - \frac{L^2}{3S^2} + \frac{2L^4}{5S^4} \right)$
	Dos varillas ($S < L$)	$R = \frac{\rho}{4\pi L} \left(\ln \frac{4L}{a} + \ln \frac{4L}{S} - 2 + \frac{S}{2L} - \frac{S^2}{16L^2} + \frac{S^4}{512L^4} \right)$
	Tres varillas en forma de triángulo	$R = \frac{\rho}{6\pi L} \left(\ln \frac{2L}{a} + \ln \frac{2L}{S} + 1,071 - 0,209 \frac{S}{L} + 0,238 \frac{S^2}{L^2} - 0,054 \frac{S^4}{L^4} \right)$

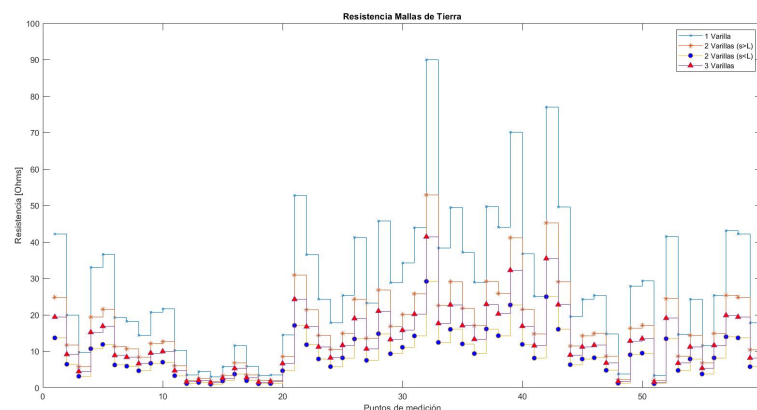


Fig. 5: Resistencia de las mallas a tierra.

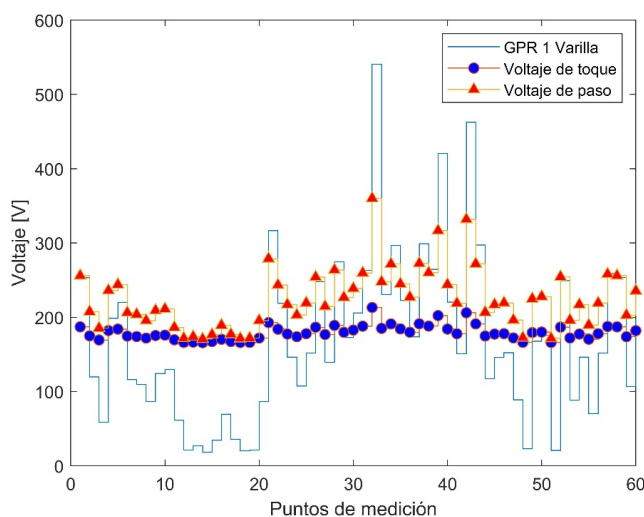


Fig. 6: Distribución del GPR, voltaje de toque y voltaje de paso con una varilla de puesta a tierra.

disipación de la corriente de falla. Aunque los voltajes de paso y pico presentan en algunos puntos valores elevados, la disminución del GPR contribuye a una reducción importante del riesgo general en una instalación residencial.

De igual manera, analizando la configuración con dos varillas pero con una distancia de separación mayor a la longitud de la varilla, se observa una reducción del GPR similar a la configuración anterior, aunque con valores alrededor de 250 V en contraste con los 150 V obtenidos anteriormente. No obstante, estos valores se mantienen dentro de los límites

que establece la normativa vigente.

La mejor respuesta del sistema se presenta con la configuración de tres varillas, en donde el GPR no supera los 100 V en la mayoría de los puntos y tanto los voltajes de paso como de toque son mucho más estables y uniformes en los diferentes puntos. Esta configuración permite una mejor distribución del potencial eléctrico del terreno, lo que implica una mejora sustancial en la seguridad de los sistemas de puesta a tierra.

Se destaca que en las configuraciones presentadas los voltajes de toque y de paso se mantienen en niveles relativa-

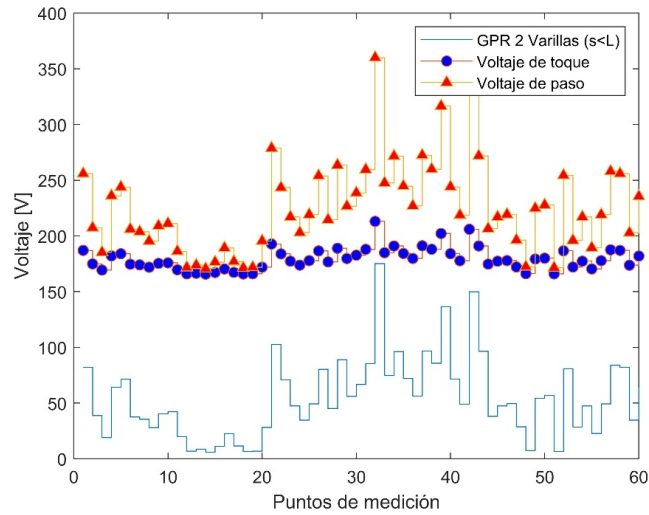


Fig. 7: Distribución del GPR, voltaje de toque y voltaje de paso con dos varillas de puesta a tierra ($S < L$).

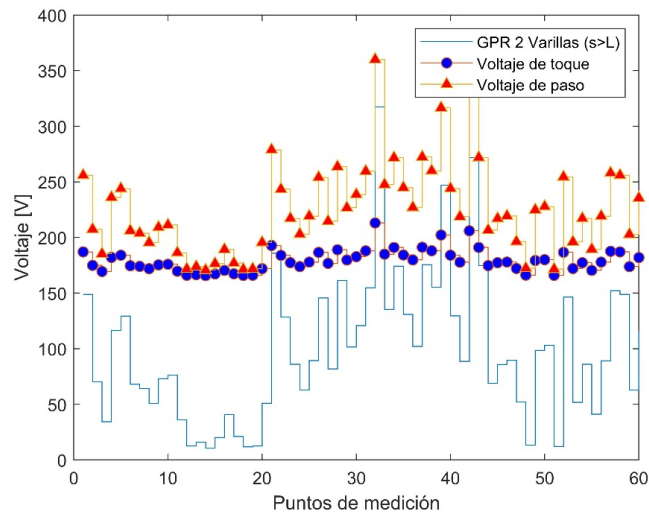


Fig. 8: Distribución del GPR, voltaje de toque y voltaje de paso con dos varillas de puesta a tierra ($S > L$).

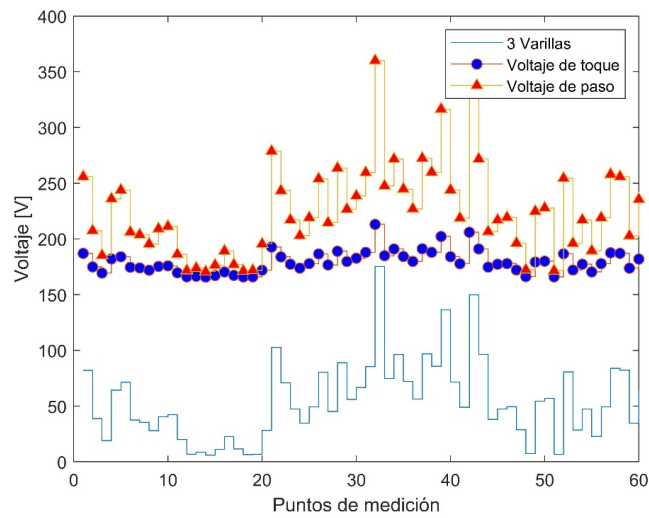


Fig. 9: Distribución del GPR, voltaje de toque y voltaje de paso con tres varillas de puesta a tierra.

mente estables y por debajo del GPR, lo que indica que los factores de seguridad frente a un contacto directo se han considerado adecuadamente en los diseños analizados.

CONCLUSIONES

El presente estudio sobre la optimización del diseño de mallas a tierra mediante el análisis de la resistividad del suelo en Sangolquí permite destacar la importancia de considerar las variaciones geológicas y climáticas en la implementación de sistemas de puesta a tierra. Los resultados obtenidos evidencian que la resistividad del suelo en la región presenta valores altamente variables, lo que subraya la necesidad de un diseño personalizado de las mallas de tierra para garantizar la seguridad y eficiencia de las instalaciones eléctricas.

La aplicación del método Wenner (Alpha) permitió obtener mediciones precisas que facilitaron el modelado del comportamiento del terreno. A partir de estos datos se logró diseñar mallas a tierra que cumplen con los estándares internacionales, asegurando una resistencia menor a los 25 Ω , conforme a la normativa NEC e IEEE 81.

Además, se destaca la importancia de la correcta selección de materiales y configuraciones para reducir costos y optimizar el desempeño del sistema de puesta a tierra. Se recomienda la aplicación de estas metodologías en otras regiones con condiciones geológicas similares para mejorar la seguridad eléctrica en instalaciones residenciales e industriales.

Finalmente, el estudio enfatiza la necesidad de actualizar y reforzar las normativas locales sobre sistemas de puesta a tierra, promoviendo la adopción de técnicas de medición y diseño más precisas para garantizar instalaciones eléctricas seguras y eficientes a nivel nacional.

El incremento de varillas de puesta a tierra permite una mejora significativa en la seguridad del sistema eléctrico. El diseño con tres varillas representa la mejor alternativa evaluada, ya que minimiza el GPR y estabiliza de mejor manera los voltajes de paso y toque en las diferentes zonas, resultando lo más adecuado para instalaciones residenciales con presencia de personas vulnerables como niños y ancianos.

AGRADECIMIENTOS

Esta investigación fue posible gracias a los docentes del Instituto Superior Rumiñahui, así como a un estudiante cuyo apoyo fue fundamental.

CONTRIBUCIONES DE LOS AUTORES

Conceptualización: FB; metodología: FB y SP; análisis formal: FB; investigación: FB y SP; recursos: FB y SP; recopilación de datos: SP y KA; redacción — preparación del borrador original: FB y SP; redacción — revisión y edición: FB y SP; visualización: FB; supervisión: FB y SP; administración de proyecto: FB; adquisición de financiamiento para la investigación: FB. Todos los autores han leído y aceptado la versión publicada del manuscrito.

Flavio Barbosa: FB. Santiago Pérez: SP. Kevin Avilés: KA.

FINANCIAMIENTO

El presente estudio fue financiado por el Instituto Superior Rumiñahui, bajo resolución ISUISTER-INV-PRO-C-000059.

REFERENCIAS

- Abdullah, N., Marican, A. M. A., Osman, M., y Rahman, N. A. A. (2011). Case study on impact of seasonal variations of soil resistivities on substation grounding systems safety in tropical country. En *7th asia-pacific international conference on lightning* (pp. 150–154). doi: 10.1109/APL.2011.6111092
- De Electricidad Evaluación, C., Método De Wenner, D., Schlumberger, Y., De Ejecución, T., Eficacia, Y., y Su, E. N. (2023). *Universidad politécnica salesiana sede quito*. Report. (Available from the Universidad Politécnica Salesiana)
- Ho, V. N. C. (2008). Formulas for calculating physical grounding resistance of grounding wire – electric pole system of high voltage transmission lines. En *Joint international conference on power system technology and ieee power india conference* (pp. 1–6). doi: 10.1109/ICPST.2008.4745197
- Li, J., Jin, W., Jin, Z., y Wang, F. (2008). Study on measuring the grounding resistance of grounding grid with short lead wire. En *China international conference on electricity distribution* (pp. 1–4). doi: 10.1109/CICED.2008.5211767
- of Electrical, I., y Engineers, E. (2013). *Ieee guide for safety in ac substation grounding (ieee std 80-2013)*. Standard. (ANSI/IEEE Std 80-2013)
- Oyeyemi, K. D., Aizebeokhai, A. P., Metwaly, M., Omobulejo, O., Sanuade, O. A., y Okon, E. E. (2022). Assessing the suitable electrical resistivity arrays for characterization of basement aquifers using numerical modeling. *Heliyon*, 8(5), e09427. doi: 10.1016/j.heliyon.2022.e09427
- Pazha, H., Muhammad, F. H., Agustina, R. D., y Wiratama, R. (2019). The identification of hard bottom surface structure using correlation of geoelectrical resistivity methods and spt data as preliminary studies for laying the foundation at passing cross sumatera toll road, south lampung station. En *Journal of physics: Conference series* (Vol. 1155, p. 012007). doi: 10.1088/1742-6596/1155/1/012007
- Salam, M. A., Rahman, Q. M., Ang, S. P., y Wen, F. (2017). Soil resistivity and ground resistance for dry and wet soil. *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*, 5(2), 290–297. doi: 10.1007/s40565-015-0153-8
- Sazali, M. S., Wooi, C. L., Arshad, S. N. M., Wong, T. S., Abdul-Malek, Z., y Nabipour-Afrouzi, H. (2020). Study of soil resistivity using wenner four pin method: Case study. En *Ieee international conference on power and energy (pecon 2020)* (pp. 386–391). doi: 10.1109/PECon48942.2020.9314400
- Senthilkumar, R. T. (2017). Optimization of soil parameters in multiple layers of ground structure. En *Ieee pes asia-pacific power and energy engineering conference (ap-pec)* (pp. 1–5). doi: 10.1109/APPEEC.2017.8308979
- Trifunovic, J., y Kostic, M. (2015). An algorithm for estimating the grounding resistance of complex grounding systems including contact resistance. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 51(6), 5167–5174. doi: 10.1109/TIA.2015.2429644
- Yang, Y., y collaborators. (2001). *Grounding system design and analysis*. Technical report. (Datos no disponibles; citado como Yang et al., 2001)
- Zhou, Y., y collaborators. (2017). *Procedures for measuring soil resistivity and designing grounding systems*. Technical report. (Referenciado como Zhou et al., 2017 en el manuscrito)