



Universidad de San Carlos de Guatemala  
Facultad de Ingeniería  
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica

**ANÁLISIS DE LA RESISTENCIA DE UN SISTEMA DE PUESTA EN LA TIERRA  
(SPT) EN UNA LÍNEA DE TRASMISIÓN DE 15 KM EN 69 KV APLICANDO  
CORRIENTES DE ALTA FRECUENCIA**

**Henry Rolando Pérez Ramírez**

Asesorado por el Ing. José David Mazariegos Murcia

Guatemala, noviembre de 2019

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**ANÁLISIS DE LA RESISTENCIA DE UN SISTEMA DE PUESTA EN LA TIERRA  
(SPT) EN UNA LÍNEA DE TRASMISIÓN DE 15 KM EN 69 KV APLICANDO  
CORRIENTES DE ALTA FRECUENCIA**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
POR

**HENRY ROLANDO PÉREZ RAMÍREZ**

ASESORADO POR EL ING. JOSÉ DAVID MAZARIEGOS MURCIA

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

**INGENIERO ELECTRICISTA**

GUATEMALA, NOVIEMBRE DE 2019

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA  
FACULTAD DE INGENIERÍA



**NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA**

DECANA	Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
VOCAL I	Ing. José Francisco Gómez Rivera
VOCAL II	Ing. Mario Renato Escobedo Martínez
VOCAL III	Ing. José Milton de León Bran
VOCAL IV	Br. Luis Diego Aguilar Ralón
VOCAL V	Br. Christian Daniel Estrada Santizo
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

**TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO**

DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
EXAMINADOR	Ing. Armando Alonso Rivera Carrillo
EXAMINADOR	Ing. Jorge Gilberto González Padilla
EXAMINADOR	Ing. Armando Gálvez Castillo
SECRETARIA	Inga Lesbia Magalí Herrera López

## **HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR**

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

**ANÁLISIS DE LA RESISTENCIA DE UN SISTEMA DE PUESTA EN LA TIERRA  
(SPT) EN UNA LÍNEA DE TRASMISIÓN DE 15 KM EN 69 KV APLICANDO  
CORRIENTES DE ALTA FRECUENCIA**

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, con fecha 23 de octubre de 2017.



**Henry Rolando Perez Ramirez**

Guatemala 18 de julio de 2019

Ingeniero  
Fernando Alfredo Moscoso Lira  
Coordinador del Área de Potencia  
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica  
Facultad de Ingeniería  
Universidad de San Carlos de Guatemala

Estimado Ingeniero Moscoso:

Por medio de la presente, me dirijo a usted para presentarle el trabajo de graduación elaborado por el estudiante Henry Rolando Perez Ramírez, con número de carné 2008 - 15206, titulado "**ANÁLISIS DE LA RESISTENCIA DE UN SISTEMA DE PUESTA EN LA TIERRA (SPT) EN UNA LÍNEA DE TRANSMISIÓN DE 15 km EN 69 kV APLICANDO CORRIENTES DE ALTA FRECUENCIA.**", el cual he asesorado y revisado.

Por lo que considero que dicho trabajo de graduación reúne los requisitos establecidos y doy la aprobación de este.

Atentamente,



Asesor  
José David Mazariegos Murcia  
Ingeniero Electricista  
Colegiado No. 12030

*José David Mazariegos M.*  
INGENIERO ELECTRICISTA  
Col. No. 12030



REF. EIME 59. 2019.

4 de SEPTIEMBRE 2019.

Señor Director

Ing. Armando Alonso Rivera Carrillo  
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica  
Facultad de Ingeniería, USAC.

Señor Director:

Me permito dar aprobación al trabajo de Graduación titulado: **ANÁLISIS DE LA RESISTENCIA DE UN SISTEMA DE PUESTA EN LA TIERRA (SPT) EN UNA LÍNEA DE TRASMISIÓN DE 15 KM EN 69 kV APLICANDO CORRIENTES DE ALTA FRECUENCIA**, del estudiante; **Henry Rolando Pérez Ramírez**, que cumple con los requisitos establecidos para tal fin.

**Sin otro particular, aprovecho la oportunidad para saludarle.**

Atentamente,  
**ID Y ENSEÑAD A TODOS**

Ing. Fernando Alfredo Moscoso Lira  
Coordinador de Potencia





**REF. EIME 59. 2019.**

**El Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, después de conocer el dictamen del Asesor, con el Visto bueno del Coordinador de Área, al trabajo de Graduación de el estudiante: HENRY ROLANDO PÉREZ RAMÍREZ titulado; ANÁLISIS DE LA RESISTENCIA DE UN SISTEMA DE PUESTA EN LA TIERRA (SPT) EN UNA LÍNEA DE TRASMISIÓN DE 15 KM EN 69 kV APLICANDO CORRIENTES DE ALTA FRECUENCIA, procede a la autorización del mismo.**

**Ing. Armando Alonso Rivera Carrillo**



**GUATEMALA, 30 DE SEPTIEMBRE 2019.**



La Decana de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, al trabajo de graduación titulado: **ANÁLISIS DE RESISTENCIA DE UN SISTEMA DE PUESTA EN LA TIERRA (SPT) EN UNA LÍNEA DE TRANSMISIÓN DE 15 KM EN 69 KV APLICANDO CORRIENTES DE ALTA FRECUENCIA**, presentado por el estudiante universitario: **Henry Rolando Pérez Ramírez**, y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, se autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE.

  
Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada  
Decana

  
UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA  
DECANO  
FACULTAD DE INGENIERIA

Guatemala, Noviembre de 2019

AACE/asga  
cc



## **ACTO QUE DEDICO A:**

<b>Dios</b>	Por ser lo más importante en mi vida y en mi carrera. “Todo lo puedo en cristo que me fortalece” filipenses 4:13”
<b>Mis padres</b>	Vicente Pérez y Amelia Ramírez. Su amor será siempre mi inspiración.
<b>Mis abuelos</b>	Devora Hernández y Estanislao Ramírez, por sus consejos y por ser una importante influencia en mi carrera.
<b>Mi hermano</b>	Byron Pérez Ramírez, por su apoyo en mi carrera.
<b>Mis tíos</b>	Raymundo y Oscar Pérez, por el apoyo y los sabios consejos.
<b>Mis primos</b>	Por sus palabras motivadoras y por sus enseñanzas a lo largo de mi carrera.
<b>Sara Méndez Arriola</b>	Por sus sabios consejos, su dedicación, motivación, buenos deseos y por estar siempre al pendiente.
<b>Paula Elías</b>	Por estar ahí y por sus palabras.

**Morelia Ramírez**

Por sus oraciones y consejos.

## **AGRADECIMIENTOS A:**

<b>Universidad de San Carlos de Guatemala</b>	Por ser mi casa de estudios a la que me enorgullece pertenecer.
<b>Facultad de Ingeniería</b>	Por proporcionarme los conocimientos en la industria y en la rama eléctrica.
<b>Ariel Tsoy Tzirin</b>	Por todo el apoyo, colaboración, y asesoría en la elaboración de esta investigación.
<b>Mis compañeros de trabajo</b>	Por brindarme de su conocimiento y apoyo para la realización de este trabajo de graduación.
<b>Julio García</b>	Por brindarme de su conocimiento y por ser una importante influencia.
<b>José David Mazariegos Murcia</b>	Por su apoyo, asesoría e importante influencia en la realización de este trabajo de graduación.
<b>Moisés Reyes</b>	Por brindarme de su apoyo y conocimientos.

## ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	VII
LISTA DE SÍMBOLOS .....	XIII
GLOSARIO .....	XVII
RESUMEN.....	XXVII
OBJETIVOS.....	XXIX
INTRODUCCIÓN .....	XXXI
1. GENERALIDADES.....	1
1.1. Antecedentes.....	1
1.1.1. Planteamiento del problema .....	2
1.1.2. Justificación .....	3
1.1.3. Alcances y limitaciones.....	4
1.1.4. Metodología de investigación .....	5
1.1.5. Normas aplicables .....	6
1.2. Parámetros del sistema.....	8
1.3. Características de la línea .....	9
1.4. Selección del conductor.....	10
1.5. Cálculo de la capacidad de transporte de la línea de transmisión .....	11
1.6. Selección de aisladores poliméricos por coordinación de aislamiento eléctrico .....	12
1.7. Distancias mínimas de seguridad.....	13
1.8. Geología regional .....	14
1.9. Ubicación de sondeos .....	15

2.	MARCO TEÓRICO .....	17
2.1.	Objetivos de los sistemas de puesta a tierra .....	17
2.2.	Requerimientos básicos .....	17
2.3.	Establecer conexiones equipotenciales .....	19
2.4.	Suficiente capacidad de conducción efectiva de la corriente de falla.....	19
2.5.	Necesidad de las mediciones de los parámetros. ....	20
2.6.	Resistencia de puesta a tierra .....	20
2.7.	Potenciales superficiales.....	21
2.8.	Objetivos de las mediciones.....	23
2.9.	Medición de resistividad de la tierra. ....	23
2.10.	Medición de la resistencia de puesta a tierra .....	23
2.11.	Medición de la resistencia a tierra con el método de la alta frecuencia.....	24
2.12.	Medición de la impedancia y potenciales superficiales .....	25
2.13.	Resistividad del suelo.....	25
2.14.	Principios de prospección eléctrica .....	25
2.15.	Resistividad aparente.....	28
2.16.	Tipos de prospecciones para mediciones de resistividad .....	29
2.17.	Sondeo eléctrico vertical (SEV).....	29
2.18.	Tomografía eléctrica resistiva .....	31
2.19.	Factores que influyen en la resistividad del suelo .....	34
2.20.	Composición del suelo .....	35
2.21.	Sales solubles y su concentración .....	36
2.22.	Estado higrométrico del suelo .....	37
2.23.	Temperatura.....	38
2.24.	Granulometría .....	39
2.25.	Compacidad .....	40
2.26.	Estratigrafía.....	40

2.27.	Otros factores .....	41
2.28.	Potenciales y gradientes.....	43
2.28.1.	Circulación de corriente por el suelo.....	43
2.29.	Reparto de potenciales en una red de tierra con retorno de corriente en el infinito .....	45
2.30.	Reparto de potenciales en una red de tierra con retorno de corriente por otra .....	51
2.31.	Deformación de las superficies equipotenciales en un suelo heterogéneo .....	54
3.	<b>MEDIDA DE LA RESISTIVIDAD DEL TERRENO.....</b>	<b>57</b>
3.1.	Introducción .....	57
3.2.	Métodos de medida .....	58
3.2.1.	Método de los cuatro electrodos.....	58
3.2.2.	Método de Wenner .....	59
3.3.	Cálculo de la resistividad aparente del suelo con datos tomados en campo a un metro de distancia .....	61
3.4.	Cálculo de la resistividad aparente del suelo con los datos tomados en campo a 2 metros de distancia .....	63
3.5.	Cálculo de la resistividad aparente del suelo con los datos tomados en campo, a tres metros de distancia .....	67
3.6.	Cálculo de la resistividad aparente del suelo con los datos tomados en campo a cuatro metros de distancia .....	70
3.7.	Descripción de las medidas de resistividad del suelo.....	73
3.8.	Análisis de resultados.....	82
3.9.	Criterios para el diseño del sistema de puesta a tierra .....	83
3.10.	Especificaciones de las redes de tierra convencionales.....	85
3.11.	Ubicación de la línea de transmisión propuesta .....	85

4.	MEDIDA DE LA RESISTENCIA DE LOS ELEMENTOS DE PUESTA A TIERRA .....	87
4.1.	Cálculo de la resistencia de los elementos básicos .....	87
4.2.	Telurómetro Tm25m.....	88
4.3.	Método para la medición de puesta a tierra (método de caída de potencial).....	88
4.4.	Descripción del método de caída de potencial.....	88
4.5.	Electrodo vertical.....	92
4.6.	Electrodo horizontal.....	93
4.7.	Cimentación en concreto.....	94
4.8.	Cálculo del conductor horizontal de puesta a tierra (contrapesos) .....	94
4.9.	Metodología de cálculo .....	96
4.10.	Configuración tipo I .....	97
4.11.	Configuración tipo II .....	99
4.12.	Configuración tipo III .....	101
4.13.	Configuración tipo I en anillo .....	102
4.14.	Configuración tipo II en anillo .....	103
4.15.	Configuración tipo III en anillo .....	104
4.16.	Detalle de caja de registro para mediciones de resistividad...	105
4.17.	Configuraciones presentadas.....	106
4.18.	Cálculo de la resistencia del sistema de puesta a tierra utilizando el método de caída de potencial con el telurómetro tm25m .....	108
4.19.	Principio de funcionamiento del telurómetro Tm25m .....	112
4.20.	Influencia de un buen diseño de puesta a tierra en general...	119
4.21.	ASPIX.....	121
4.22.	Análisis de resultados .....	122

CONCLUSIONES .....	127
RECOMENDACIONES .....	129
BIBLIOGRAFÍA.....	131
APÉNDICES .....	133
ANEXOS .....	153





## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

### FIGURAS

1.	Distribución de gradiente de voltaje y potenciales de toque y paso .....	22
2.	Principio de prospección y medición de potenciales debido a corrientes inyectadas .....	26
3.	Suelo heterogéneo resistividad aparente es el promedio de las resistividades presentes.....	29
4.	Líneas de corriente y equipotenciales presentes en el momento de la medición .....	30
5.	Distribución de los electrodos de prueba para una tomografía eléctrica resistiva.....	31
6.	Equipo tradicional para realizar una tomografía eléctrica resistiva .....	33
7.	Resultado de una tomografía. Las resistividades se apresian en un modelado 2D.....	33
8.	Resistividad de suelo en función de la salinidad del suelo.....	37
9.	Porcentaje de la resistividad en relación a la humedad .....	38
10.	Resistividad en relación a la temperatura .....	39
11.	El electrodo esférico.....	46
12.	El electrodo semiesférico .....	48
13.	Superficies equipotenciales y reparto de potencial alrededor de una pica y su electrodo semiesférico equivalente .....	50
14.	Reparto de potenciales en un terreno homogéneo .....	52
15.	Distribución de las superficies equipotenciales .....	53

16.	Deformación de las superficies equipotenciales alrededor de una medición de tierras según las variaciones de resistividad de un terreno homogéneo.....	55
17.	Esquema general de medición método de Wenner .....	59
18.	Fotografías tomadas en campo, para el cálculo de la resistividad aparente del suelo medición a 1 metro en paralelo .....	61
19.	Fotografías tomadas en campo, para el cálculo de la resistividad aparente del suelo medición a 1 metro 90 grados .....	62
20.	Fotografías tomadas en campo, para el cálculo de la resistividad aparente del suelo medición a 1 metro 45 grados .....	63
21.	Fotografías tomadas en campo, para el cálculo de la resistividad aparente del suelo medición a 2 metros en paralelo.....	64
22.	Fotografías tomadas en campo para el cálculo de la resistividad aparente del suelo medición a 2 metros 90 grados .....	65
23.	Fotografías tomadas en campo, para el cálculo de la resistividad aparente del suelo medición a 2 metros 45 grados .....	66
24.	Fotografías tomadas en campo para el cálculo de la resistividad aparente del suelo medición a 3 metros en paralelo.....	67
25.	Fotografías tomadas en campo para el cálculo de la resistividad aparente del suelo medición a 3 metros 90 grados .....	68
26.	Fotografías tomadas en campo para el cálculo de la resistividad aparente del suelo medición a 3 metros 45 grados .....	69
27.	Fotografías tomadas en campo, para el cálculo de la resistividad aparente del suelo medición 4 metros en paralelo.....	70
28.	Fotografías tomadas en campo para el cálculo de la resistividad aparente del terreno medición a 4 metros 90 grados.....	71
29.	Fotografías tomadas en campo para el cálculo de la resistividad aparente del suelo medición a 4 metros 45 grados .....	72

30.	Gráfica de la resistividad del suelo conforme a la distancia horizontal tramo 1.....	81
31.	Gráfica de la resistividad del suelo conforme a la distancia horizontal tramo 2.....	82
32.	Línea de transmisión Carlos Dorion a Incinate/Lourdes.....	86
33.	Esquema de conexión del telurómetro .....	89
34.	Circuito eléctrico del sistema de medición .....	90
35.	Electrodo vertical de puesta a tierra .....	92
36.	Electrodo horizontal de puesta a tierra.....	93
37.	Configuración tipo I .....	98
38.	Configuración tipo II .....	100
39.	Configuración tipo III .....	102
40.	Configuración tipo I en anillo .....	103
41.	Configuración tipo II en anillo .....	104
42.	Configuración tipo III en anillo .....	105
43.	Detalle de caja de registro de verificación de resistividad de puesta a tierra .....	106
44.	Áreas de resistencia efectiva y método de la caída de potencial .....	109
45.	Pantalla del telurómetro resistencia equivalente configuración tipo 1 .....	110
46.	Pantalla del telurómetro resistencia equivalente configuración tipo 2 .....	111
47.	Pantalla del telurómetro resistencia equivalente configuración tipo 3 .....	111
48.	Gráfica de la resistencia $R (\Omega)$ , del sistema de puesta a tierra conforme a la distancia horizontal y la resistividad del suelo para configuraciones que integren ( $\rho < 60 \Omega - m$ ).....	117

49.	Gráfica de la resistencia $R$ ( $\Omega$ ), del sistema de puesta a tierra conforme a la distancia horizontal y la resistividad del suelo para configuraciones que integren ( $60 < \rho < 120 \Omega - m$ ).....	118
50.	Gráfica de la resistencia $R$ ( $\Omega$ ), del sistema de puesta a tierra conforme a la distancia horizontal y la resistividad del suelo para configuraciones que integren ( $120 < \rho < 180 \Omega - m$ ).....	119

## TABLAS

I.	Valores recomendados de resistencia de sistemas eléctricos de puesta a tierra.....	18
II.	Factores que influyen en la resistividad del terreno.....	35
III.	Composición del terreno.....	36
IV.	Resumen de resistividad aparente del suelo en un punto de medición de la línea de transmisión propuesta.....	73
V.	Resultados de la medición de la resistividad aparente del suelo utilizando el método de Wenner en la línea de transmisión planteada.....	74
VI.	Resultados de la medición de la resistividad aparente del suelo utilizando el método de Wenner en la línea de transmisión Carlos Dorión y Incinate/Lourdes.....	79
VII.	Cálculo del conductor mínimo.....	96
VIII.	Resistencia equivalente configuración tipo I a una resistividad de $60 \Omega m$ .....	98
IX.	Lista de materiales, para la configuración tipo I.....	99
X.	Resistencia equivalente configuración tipo II a una resistividad de $120 \Omega m$ .....	99
XI.	Lista de materiales, para la configuración tipo II.....	100

XII.	Resistencia equivalente configuración tipo III a una resistividad de 180 $\Omega m$ .....	101
XIII.	Lista de materiales para la configuración tipo III .....	102
XIV.	Lista de materiales para la configuración tipo I en anillo .....	103
XV.	Lista de materiales para la configuración tipo II en anillo .....	104
XVI.	Lista de materiales para la configuración tipo III en anillo .....	105
XVII.	Resumen configuraciones a usar para las estructuras seleccionadas de la línea de transmisión en 69 Kv de 15 km de longitud del tramo Carlos Dorión-Kerns Carlos Dorión y Incinate/Lourdes, para la memoria de medición de la red de tierras..	107
XVIII.	Resistencia equivalente para configuración tipo 1 ( $\rho < 60 \Omega - m$ )...	110
XIX.	Resistencia equivalente para configuración tipo 2 ( $60 < \rho < 120 \Omega - m$ ).....	110
XX.	Resistencia equivalente para configuración tipo 3 ( $120 < \rho < 180 \Omega - m$ ).....	111
XXI.	Resumen valores de resistencia obtenidos de la línea de transmisión Carlos Dorión/Kerns y Incinate/Lourdes en 69 Kv de 15 km de longitud.....	114
XXII.	Resumen configuraciones que integran ( $\rho < 60 \Omega - m$ ) .....	116
XXIII.	Resumen configuraciones que integran ( $60 < \rho < 120 \Omega - m$ ).....	117
XXIV.	Resumen configuraciones que integran ( $120 < \rho < 180 \Omega - m$ ).....	118



## LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
$A$	Amperaje
$\beta$	Ángulo de la corriente
$\theta$	Ángulo de la impedancia
$\delta$	Ángulo de voltaje
$A$	Área
$AWG$	Calibre de alambre
$E$	Campo eléctrico
$C$	Capacitancia
$q$	Carga
$Cu$	Cobre
$\alpha_r$	Coefficiente térmico de resistividad
$G$	Conductancia
$K_0$	Constante del material en °C
$I$	Corriente
$i(t)$	Corriente instantánea
$J$	Densidad de corriente
$S$	Desviación estándar
$d$	Diámetro
$d$	Distancia
$a$	Distancia entre dos electrodos adyacentes
$T_c$	Duración de la corriente en segundos
$F$	Frecuencia
$K$	Factor geométrico



<b><i>Z</i></b>	Fasor de impedancia
<b><i>E</i></b>	Fasor de voltaje de la fuente
<b><i>F(z)</i></b>	Función de distribución normal acumulada
<b><i>E</i></b>	Gradiente de potencial
<b><i>C°</i></b>	Grados centígrados
<b><i>L</i></b>	Inductancia
<b><i>IEB</i></b>	Ingeniería especializada
<b><i>A</i></b>	Inyector de corriente A
<b><i>B</i></b>	Inyector de corriente B
<b><i>Km</i></b>	Kilómetros
<b><i>KV</i></b>	Kilo voltios
<b><i>L</i></b>	Longitud
<b><i>I</i></b>	Magnitud de corriente
<b><i>m</i></b>	Metros
<b><i>mm</i></b>	Milímetros
<b><i>GPR</i></b>	Nivel de tensión que adquiere la malla a una falla de puesta a tierra
<b><math>\Omega</math></b>	Ohmios
<b><i>C</i></b>	Parámetro de la línea de transmisión
<b><i>b</i></b>	Profundidad de enterramiento de los electrodos
<b><i>R</i></b>	Radio
<b><i>r<sub>h</sub></i></b>	Radio del electrodo semiesférico
<b><i>X</i></b>	Reactancia
<b><i>R</i></b>	Resistencia
<b><math>\rho</math></b>	Resistividad
<b><i>Pr</i></b>	Resistividad del electrodo a la temperatura de referencia en $\mu\Omega$ -cm
<b><i>SPT</i></b>	Sistemas de puesta a tierra
<b><i>Ta</i></b>	Temperatura ambiente

<b><i>T<sub>m</sub></i></b>	Temperatura máxima permisible para los conductores y empalmes
<b><i>X<sub>Prom</sub></i></b>	Valor promedio
<b>R</b>	Valor de resistencia
<b>V</b>	Voltaje
<b>V</b>	Voltímetro



## GLOSARIO

<b>Amperio</b>	Unidad de medida de la corriente eléctrica, que debe su nombre al físico francés André Marie Ampere, y representa el número de cargas (coulombs), por segundo que pasan por un punto de un material conductor. (1 amperio = 1 coulombs/segundo).
<b>Carga eléctrica</b>	Propiedad física intrínseca de algunas partículas subatómicas que se manifiesta mediante fuerzas de atracción y repulsión entre ellas.
<b>Curva de gradiente de potencial</b>	Gráfica del potencial de un sistema como función de la distancia a lo largo de una ruta específica.
<b>Corriente eléctrica</b>	Tasa de flujo de carga que pasa por un determinado punto de un circuito eléctrico, medido en culombios/segundo.
<b>Campo eléctrico</b>	Es un campo de fuerza creado por la atracción y repulsión de cargas eléctricas (la causa del flujo eléctrico) y se mide en voltios por metro (V/m). El flujo decrece con la distancia a la fuente que provoca el campo.
<b>Compacidad</b>	Efectuada la compactación de un suelo la compacidad relativa varía en función directa del

trabajo de compactación referido a peso de suelo y también de la humedad.

**Conductancia** Pérdida de potencia real entre conductores o entre los conductores y la tierra.

**Conductividad** La conductividad eléctrica es la capacidad que tiene una sustancia o material para permitir el paso de la corriente eléctrica a través de sí, es decir de trasportar electrones.

**Conductor de puesta a tierra** Es aquel tipo de conductor que es utilizado para conectar un equipo o circuito a tierra a los distintos electrodos que se pueden utilizar en una instalación de puesta a tierra.

**Conexiones Equipotenciales** Es la práctica de conectar eléctricamente de forma tal que todas las superficies metálicas expuestas que no deban transportar corriente, como protección contra descargas eléctricas accidentales.

**Contrapeso (Protección contra rayos)** Es aquel conductor o conjuntos de conductores que se encuentran por debajo de una línea de transmisión o distribución, específicamente bajo la superficie del suelo y que se encuentran conectado al sistema de tierras de las líneas de transmisión como soporte para así poder protegerlas contra todo tipo de descargas atmosféricas.

<b>Cooperweld</b>	Cable de acero recubierto de cobre.
<b>Corriente de falla</b>	Es la circulación de una corriente de fuga que provoca una elevación de la tensión entre la masa del equipo eléctrico y tierra, apareciendo, por tanto, una tensión de falla que es peligrosa si es superior a la tensión de protección.
<b>Diferencia de potencial</b>	Trabajo por unidad de carga ejercido por el campo eléctrico sobre una partícula cargada para moverla entre dos posiciones determinadas.
<b>Estratificado</b>	Disponer algo en capas o estratos, formar un terreno en estratos o en capas.
<b>Electricidad</b>	Fenómeno físico resultado de la existencia e interacción de cargas eléctricas. Cuando una carga es estática, esta produce fuerzas sobre objetos en regiones adyacentes y, cuando se encuentra en movimiento producirá efectos magnéticos.
<b>Electrodo de tierra</b>	Es aquel conductor o conjuntos de conductores que se encuentran incrustados en la tierra que si función principal es drenar las corrientes de falla a tierra. Puede ser también un cable que permita la unión de dos partes del sistema para así poder mantener el mismo potencial.

**Elevación del potencial de tierra (GPR)**

El máximo potencial eléctrico que un electrodo de puesta a tierra, malla o un sistema de puesta a tierra puede alcanzar con respecto a un punto distante de tierra asumido a ser un potencial de tierra remota. Elevación de voltaje debido a una falla en el sistema y por la configuración de la conexión de la conexión de los cables de neutro al sistema de puesta a tierra.

**Estratigrafía**

Parte de la geología que estudia la disposición y las características de las rocas sedimentarias y los estratos.

**Falla a tierra**

Es una conexión que se da de forma no intencional entre un conductor en forma activa de un circuito y los conductores que normalmente no están conduciendo corriente, las envolventes metálicas, canalizaciones metálicas, en general equipo metálico o tierra.

**Flujo magnético**

Número de líneas de fuerza de campo magnético que atraviesa una superficie determinada y depende de cómo está orientada dicha superficie con respecto a la dirección de las líneas.

**Frecuencia**

Magnitud que mide el número de repeticiones por unidad de tiempo de cualquier fenómeno o suceso periódico.

<b>Granulometría</b>	Es la medición y graduación que se lleva a cabo de los granos de una formación sedimentaria, de los materiales sedimentarios, así como de los suelos con fines de análisis tanto de su origen como de sus propiedades mecánicas.
<b>Impedancia</b>	Oposición al paso de la corriente alterna. A diferencia de la resistencia, esta incluye los efectos de acumulación y eliminación de carga (capacitancia) e inducción magnética (inductancia).
<b>Impedancia de tierra</b>	El vector suma de la resistencia y la reactancia entre un electrodo de tierra, rejilla y la tierra remota.
<b>Inductancia mutua</b>	Razón de voltaje generada en el circuito por la razón de cambio de la corriente en otro circuito.
<b>Líneas de flujo eléctrico</b>	Trayectoria o línea imaginaria trazada de tal manera que su dirección en cualquier punto sea la dirección del campo eléctrico en ese punto.
<b>NTDOD</b>	Normas Técnicas de Diseño y Operación de las Instalaciones de Distribución.
<b>Perfil del suelo estratificado</b>	Es aquella representación que se hace de forma esquemática de la sección transversal del suelo en una localización donde se da a conocer su conformación por superposición de capas de diferente resistividad y espesor.



<b>Potencial</b>	En un punto, es el trabajo que debe realizar un campo electrostático para vencer una carga positiva.
<b>Potencial de paso</b>	Es la diferencia de potencial de superficie que una persona experimenta a una distancia de un metro con los pies sin hacer contacto con cualquier objeto conectado al sistema de puesta a tierra.
<b>Potencial de toque o contacto</b>	Es la diferencia de potencial entre el aumento de potencial de tierra (GPR) de una red o sistema de puesta a tierra y el potencial de superficie en la que una persona puede estar de pie, mientras que, al mismo tiempo se presenta la situación que su otra mano la tiene en contacto con una estructura u objeto conectado al sistema de puesta a tierra. Las mediciones del voltaje de toque pueden ser en “circuito abierto” (sin la resistencia del cuerpo equivalente incluido en el circuito que se está midiendo) o en un “circuito cerrado” (con la resistencia del cuerpo equivalente incluido en el circuito que se está midiendo).
<b>Profundidad de exploración</b>	Se refiere al alcance eficaz de las distintas medidas de resistividad del suelo es aproximadamente el doble de la profundidad del electrodo piloto (método de los tres puntos o el método de la distancia de los electrodos de medida).

<b>Prospección</b>	Exploración del terreno para descubrir la existencia de yacimientos de minerales agua u otra cosa.
<b>Resistencia de dispersión de un electrodo de puesta a tierra</b>	Es aquella resistencia entre el electrodo de tierra y la tierra física.
<b>Resistencia de tierra</b>	La impedancia, entre un electrodo de tierra, rejilla o el sistema y la tierra remota. Es de tomar en cuenta que en algunas veces se refiere a impedancia de tierra como resistencia de tierra si la parte reactiva de la impedancia se toma con un criterio insignificante o igual a cero.
<b>Resistencia mutua de los electrodos de puesta a tierra</b>	Es aquella que se presenta de forma similar a la variación de voltaje en un electrodo producido por un cambio de la corriente en otro electrodo y se expresa en ohmios.
<b>Resistividad aparente del suelo</b>	Se refiere a la resistividad global de un volumen de suelo con diferentes propiedades. Es la que se obtiene en el trabajo de campo aplicando los distintos métodos de medición que existen.
<b>Resistividad</b>	Es la resistencia eléctrica específica de un determinado material.

<b>Resistividad del suelo</b>	Es la resistencia eléctrica específica de un material, medida en ohmios por metro. Es la constante de proporcionalidad entre la caída de potencial por unidad de longitud y la densidad de corriente.
<b>Solubilidad</b>	Capacidad de una sustancia o un cuerpo para disolverse al mezclarse con un líquido.
<b>Suelo heterogéneo</b>	Es un suelo formado por dos o más capas. Se reconoce porque se puede apreciar las distintas capas que componen el suelo.
<b>Suelos homogéneos</b>	El sistema homogéneo está formado por una única fase, esto quiere decir que, desde el punto de vista de la química, exhibe propiedades intensivas del mismo valor en todos sus puntos.
<b>Superficie equipotencial</b>	Es cualquier superficie con igual potencial en cualquier punto de esa misma superficie.
<b>Temperatura</b>	Grado o nivel térmico de un cuerpo o de la atmósfera.
<b>Sistema de puesta a tierra (SPT)</b>	Una conexión conductora, ya sea de manera intencional o accidental, por el cual un circuito eléctrico o un equipo está conectado a tierra a algún cuerpo conductor de medida relativamente grande que cumple la función de tierra.

<b>Tierra remota</b>	Es aquel concepto teórico que se refiere a un electrodo de tierra con impedancia cero ubicado a una distancia infinitamente lejana de la tierra bajo prueba. En la práctica, se aproxima a la tierra remota cuando se produce la resistencia mutua entre la tierra bajo prueba y el electrodo de prueba se considera despreciable. La tierra remota se debe considerar normalmente a un potencial de cero.
<b>Vano</b>	Distancia horizontal entre dos estructuras consecutivas.
<b>Voltajes transitorios</b>	Son perturbaciones en una línea de transmisión, pero de corta duración se les conoce como picos de voltaje debido a su forma de comportamiento.
<b>Voltímetro</b>	Es un instrumento utilizado para medir la diferencia de voltaje de dos puntos distintos y su conexión dentro de un circuito eléctrico es en paralelo.



## RESUMEN

El presente trabajo de graduación plantea una metodología para medir un sistema de puesta a tierra (SPT), a partir de 69 kV en las estructuras eléctricas de líneas de transmisión; de un proyecto tomando en cuenta factores y criterios para conocer y determinar cómo varía la resistencia de los sistemas de puesta a tierra al aplicar una corriente de alta frecuencia.

En el capítulo II se presentan los conceptos fundamentales para el estudio del análisis de la resistividad aparente del suelo y de resistencia en los sistemas de puesta a tierra, empezando por los objetivos de los sistemas de puesta a tierra y terminando con los factores que afectan las mediciones de la resistencia de puesta a tierra después de ser instalada; se plantean los criterios de selección del equipo de medición, las precauciones generales, el equipo de protección personal, para poder prevenir los efectos a los que las personas quedan expuestas cuando se encuentran dentro de las cercanías de una instalación eléctrica; en especial en un vano en una línea de transmisión al momento de ocurrir una falla en el sistema a altas frecuencias de corriente (provocado por una descarga atmosférica).

En el capítulo III se desarrollan los procedimientos y los criterios para la medición de la resistividad aparente del suelo y la descripción óptima de un sistema de puesta a tierra. Se utilizó el método de Wenner para determinar la resistividad aparente del suelo a lo largo de la línea de transmisión.

En el capítulo IV se determinó el estudio de casos, en el cual se desarrolla la medición de la resistencia del sistema de puesta a tierra y se describe la

metodología a utilizar, para poder realizar las mediciones de los cálculos de resistencia equivalente de los electrodos horizontal y vertical.

La metodología descrita en el capítulo IV, contiene los resultados que se obtuvieron en las mediciones de resistividad del suelo en el capítulo 3, de acuerdo con la resistividad que se obtuvo, se integraron los resultados en 3 grupos de resistividad aparente del suelo.

Así también, los resultados finales de la resistencia de los SPT, para así poder dar una conclusión de los datos obtenidos, haciendo un análisis determinante de resultados para poder observar las recomendaciones necesarias que deben de hacerse en el caso de que la resistencia de puesta a tierra no cumpla con los parámetros normalizados.

## **OBJETIVOS**

### **General**

Elaborar un análisis teórico y práctico, en el cual se pueda observar el comportamiento de la medición de la resistividad aparente del suelo y para determinar el comportamiento de la resistencia en los sistemas de puesta a tierra (SPT), aplicando alta frecuencia.

### **Específico**

1. Elaborar un análisis para determinar el comportamiento de la resistividad aparente del suelo, en varios puntos de medición a lo largo de la línea de transmisión.
2. Elaborar un análisis para determinar mediante la aplicación de corrientes de alta frecuencia, el comportamiento de la resistencia del SPT, a lo largo de la línea de transmisión.
3. Identificar los tipos de diseño recomendables de los SPT, para las distintas configuraciones de los suelos según su resistividad aparente.
4. Determinar el cumplimiento de las Normas Técnicas de Diseño y Operación del Servicio de Transporte de Energía Eléctrica (NTDOST) respecto a las mediciones de resistencia de los SPT, a lo largo de la línea de transmisión.





## INTRODUCCIÓN

El flujo de carga a través de cualquier material encuentra una fuerza opuesta que es similar en muchos aspectos a la fricción mecánica. A esta oposición, debida a las colisiones entre electrones y otros átomos en el material, que convierte la energía eléctrica en otra forma de energía como calor, se le denomina resistencia del material.

Por otra parte, la resistividad del suelo: es la resistencia específica de un material al paso de la corriente eléctrica, la cual es medida en ohmios por metro. Los SPT, permiten hacer una conexión a una bajada a tierra a través de un cable conductor efectivamente puesto a tierra, consiste en realidad: en una conexión eléctrica a tierra con suficiente baja impedancia y de capacidad de conducción de corriente, para limitar la formación de tensiones a niveles menores de aquellos que resultarían en daños a las personas o a los equipos conectados en un punto dado en la red de una instalación eléctrica.

Esta investigación se realizó por medio de la aplicación de corrientes de alta frecuencia y mediante un análisis teórico y práctico, para determinar la resistividad aparente del suelo y la resistencia de los SPT de la línea de transmisión Carlos Dorión/Kerns - Lourdes/Incinate con la aplicación de un telurómetro de alta frecuencia.

La investigación demostró que la resistencia de puesta a tierra está directamente relacionada con la composición del suelo (descripción en que están integradas las capas naturales del suelo), que influyen en las características físicas y químicas de este, de tal forma que el suelo está

indicando si la resistencia será baja o no; esto en función del contenido de la humedad.

Se analizaron 33 puntos de medición de resistividad del suelo, los cuales fueron realizados por el método de Wenner a lo largo de la línea de transmisión Carlos Dorión/Kerns - Lourdes/Incinate. Se seleccionó esta línea por la ubicación, la cercanía y la accesibilidad al lugar, de manera que se obtuvieron 3 grupos de resistividades que van desde los valores de 60  $\Omega$ -m hasta 180  $\Omega$ -m.

Por lo antes expuesto dependiendo de la resistividad del suelo, así fue elegida la configuración que mejor se adaptó a la necesidad de obtener un valor bajo de resistencia en los SPT.

Los sistemas de puesta a tierra son parte esencial de toda red de energía eléctrica en los sistemas de baja tensión, como de alta tensión. Por ello la importancia de esta investigación para analizar los SPT, se espera que estas mediciones de (resistividad y de resistencia), sean útiles a personas o compañías o cualquier entidad que se dedique a la realización de instalaciones de sistemas de puesta a tierra SPT.

# 1. GENERALIDADES

## 1.1. Antecedentes

Las Normas Técnicas de Diseño y Operación del Servicio De Transporte de Energía Eléctrica (NTDOST), su objetivo es establecer las disposiciones, criterios y requerimientos mínimos para asegurar que las mejoras y expansiones de instalaciones del servicio de transporte de energía eléctrica, se diseñen y operen, garantizando la seguridad de las personas y bienes y la calidad del servicio. En el capítulo III, del título II establece en el artículo 15 los métodos de puesta a tierra, en el que se indica que se deben de utilizar los métodos descritos en el capítulo IV, del título II de las Normas Técnicas de Diseño y Operación de las Instalaciones de Distribución (NTDROID), en lo que corresponda, además de otros criterios de puesta a tierra descritos en los diferentes títulos de esa misma norma siempre que sean aplicables.

Las normas anteriores no muestran una metodología que indique el procedimiento general para realizar las mediciones de la resistencia de los SPT, la resistividad del suelo y los voltajes superficiales de acuerdo con un estándar.

La norma IEEE Std 81-2012 presenta una metodología para efectuar dichas mediciones y se utilizara como referencia, junto con otras normas existentes para el presente estudio.

Hay procedimientos que no se realizan de rutina y es necesario su identificación. Las investigaciones previas a este estudio generalmente se basan en el diseño de red de tierras, pero la metodología para comprobar los

valores de resistencia y de más parámetros no está dada. De igual manera esta investigación, servirá de referencia para determinar los valores adecuados en los SPT.

### **1.1.1. Planteamiento del problema**

La CNEE ha establecido los valores máximos permitidos de resistencia de una red de tierras en función de su capacidad en MVA, según la instalación eléctrica a utilizar.

En la mayoría de los países subdesarrollados se realizan estas mediciones sin seguir ningún tipo de estándar por lo cual está la incertidumbre que los resultados garanticen los niveles de seguridad requeridos por la normativa de regulación aplicada.

El problema primordial es que en el país no se guía bajo un esquema que indique el procedimiento general que debe de realizarse para medir los parámetros de los SPT de líneas de transmisión, lo que conlleva a la probabilidad de tomar una medición errónea, con la utilización de los métodos no estandarizados o en un caso más severo que las mediciones no se hagan y no se tenga ningún control de la variabilidad de todos estos parámetros a lo largo del tiempo y solo se tengan suposiciones de un buen funcionamiento de dicho sistema de puesta a tierra.

La problemática será resuelta al presentar un método bajo una norma específica, que en este caso nos referimos a la norma IEEE Std 81-2012, para las mediciones de los parámetros de las redes de tierra. El procedimiento se respaldará con estudios de campo y así poder obtener las mediciones de resistividad de los suelos y la resistencia de los SPT.

### **1.1.2. Justificación**

La seguridad del personal, la integridad física de las personas, la integridad de los equipos de potencia, de comunicación y de electrónica sensible que se operan o se instalan en las cercanías de los postes y subestaciones de transmisión, se ven amenazados por la incorrecta implementación del sistema de puesta a tierra SPT.

Estos SPT se conectan a tierra por medio de una bajada a través de un cable conductor; las piezas metálicas que corren el riesgo de entrar en contacto casualmente con la corriente eléctrica producida por una falla, debido a un defecto de aislamiento en un equipo eléctrico, no representará en este caso, ningún peligro para las personas, ya que podrá eliminarse por el SPT. Al no existir un sistema de puesta a tierra de forma adecuada, las personas que se encuentren en contacto con las líneas de transmisión quedarán sometidas a una tensión eléctrica, la cual puede provocar una fatalidad.

La puesta a tierra consiste: en una conexión entre un punto dado en la red de una instalación eléctrica o de un material en una bajada a tierra. Esta bajada a tierra es un sistema conductor, que se incorpora en el suelo.

En cualquier instalación doméstica e industrial, la conexión de una toma de tierra es una de las partes fundamentales y a respetar, para así garantizar el buen funcionamiento de la red eléctrica, la ausencia de un punto de puesta a tierra supone serios riesgos para la vida de las personas y asentar un peligro para las instalaciones eléctricas, sin embargo, la presencia de una toma de tierra no es lo suficiente para garantizar una seguridad total, solo los mantenimientos preventivos realizados con la debida programación pueden garantizar el correcto funcionamiento de las instalaciones eléctricas.

Existen numerosos métodos de medición de tierra, dependiendo de los distintos tipos de regímenes de neutros o del tipo de instalación (doméstico industrial, medio urbano, rural, entre otros).

Los diseños de los esquemas de protección requieren de un valor máximo de la resistencia de tierra, que garantice el correcto funcionamiento de estas. Por lo cual, es necesario seguir una metodología, en cumplimiento de un estándar, tal como la norma IEEE Std 81-2012, para asegurar que la instalación de la red de tierra cumpla con los requerimientos establecidos. Antes de realizar un diseño de una red de tierra es necesario conocer los parámetros de resistividad del suelo.

### **1.1.3. Alcances y limitaciones**

Se realizó, el estudio de investigación en los postes de la línea de transmisión Carlos Dorión-Kerns, - Carlos Dorión-Incinate/Lourdes, bajo la norma IEEE Std 81-2012; se analizó, se verificó y comprobó si el sistema de red de tierras en estudio puede ser confiable en términos de seguridad. Se determinó la necesidad de aplicar este estudio a líneas de transmisión actualmente instaladas y a las que a futuro se instalen.

Las limitaciones de la investigación fueron: los tiempos en los permisos a los diferentes lugares para la medición, así también el tiempo para obtener los equipos que se ocuparon, la logística de seguridad del equipo de investigación al hacer las mediciones de resistividad y resistencia en los diferentes tipos de suelos.

#### **1.1.4. Metodología de investigación**

El presente trabajo de investigación está constituido en distintas etapas con las cuales se busca dar solución al problema primordial, que en el país no se guía bajo un esquema que indique el procedimiento general que debe realizarse para medir los parámetros de los SPT de líneas de transmisión en 69kV.

La presente investigación se realizó de forma teórica y con un trabajo de campo aplicando las metodologías que indica la norma IEEE standard 81-2012. Este trabajo de campo fue elaborado y supervisado en la empresa TRELEC, S.A.

Para la ejecución de esta investigación se realizaron las siguientes actividades:

- Se procedió a la lectura de las normas que tratan la problemática planteada (en el numeral 1.1.1.), tomando de cada una los tópicos de importancia más relevante para su aplicación.
- Se investigó sobre los equipos que se utilizaron en las mediciones para obtener los parámetros en estudio, leyendo los instructivos de los fabricantes y así poder hacer un uso adecuado de esta tecnología en la investigación.
- Se realizó el trabajo de campo, el cual consistió en hacer mediciones de resistividad a lo largo de la línea de transmisión en diferentes puntos de esta, registrando en cada uno de ellos las mediciones de resistencia de puesta a tierra, utilizando métodos descritos en la norma.



- Posteriormente se analizó toda la información obtenida en el trabajo de campo y se comparó con lo que indican las normas y se determinó que se cumple con la normativa.

Se presentó el modelo de Wenner, el cual fue utilizado para poner en práctica la metodología de las mediciones, de los valores y resistividad de los distintos suelos, los cuales nos fueron de utilidad para el posterior diseño de la red de tierra.

#### **1.1.5. Normas aplicables**

En la biblioteca de normas y estándares se encuentra la IEEE STD 81-2012 *Guide for Measuring Earth Resistivity, Ground Impedance, and Earth Surface Potentials of a Grounding System*, siendo esta la que mejor se adecua y la más reciente aplicable a la investigación. Por lo que será la guía que se tomará de base en este trabajo la cual presenta las prácticas y técnicas recomendadas para la medición de las características eléctricas de los SPT.

De acuerdo con el documento memoria de coordinación de aislamiento y verificación de apantallamiento contra descargas eléctricas atmosféricas de líneas de transmisión 896-LTM-141, y para las Normas Técnicas de diseño y Operación de las Instalaciones de Distribución (NTDOID) la resistencia a tierra de una conexión individual a través de un electrodo deberá ser lo más cercana a cero ohmios, y en ningún caso deberá ser mayor de 25 ohmios. Cuando la resistencia es mayor a 25 ohmios, deberá usarse otro tipo de configuración el valor citado es el máximo admisible medido en verano. Además, se consideró un valor de resistencia de puesta a tierra de 15 ohm como aceptable.

El criterio para validar como aceptable el valor de 15 ohm hace referencia al cálculo de máxima corriente de cortocircuito de los cables de guarda, utilizando el valor de 10 kA para la corriente de cortocircuito monofásica, según se indica en el numeral 1.2 siguiente. Se consideró además que un porcentaje del 18 % de la corriente de falla es disipada por el SPT de la estructura más cercana a la ocurrencia de la falla, es decir en el escenario planteado no se considera que el 100 % de la corriente de falla se dirige hacia el SPT de la subestación más cercana, a través de los cables de Guarda.

Para determinar el porcentaje exacto de una corriente de falla que toman los cables de guarda, de acuerdo con las simulaciones realizadas, estas nos indica que un 92 % de la corriente de falla es asumida por los cables de guarda conectados hacia una subestación en el caso crítico en que las resistencias de puesta a tierra de las torres sean altas a lo largo de toda la línea (25 Ohm).

Así también en los casos en que se presentan bajas resistencias de puesta a tierra en las estructuras de transmisión , combinadas con altas resistencias en el trayecto de la línea, los valores que retornan a tierra por el cable de guarda conectado a la subestación más cercana, son del orden del 72 %, por lo tanto, para efectos del diseño planteado en la línea de transmisión Carlos Dorión-Kerns, - Carlos Dorión-Incinate/Lourdes, se considera que en promedio un 82 % del total de la corriente de falla, circula a través de los cables de guarda hacia la malla de puesta a tierra de la subestación más cercana al punto de falla, por lo tanto, la resistencia de 15 ohm planteada anteriormente en un conjunto de estructuras se considera aceptable para un SPT confiable.

## 1.2. Parámetros del sistema

Para efectos de la selección de los cables de Guarda de las líneas de transmisión se consideraron los siguientes parámetros del sistema:

- Tensión Nominal fase – fase 69 kV (1\*)
- Cantidad de cables de guarda 1
- Numero de circuitos 2
- Corriente simétrica de corto circuito monofásica 10 kA (\*2)
- Corriente de descarga atmosférica 50 Ka (\*3)

“Valores acorde con el documento memoria descriptiva, criterios básicos de diseño y parámetros”.<sup>1</sup>

“Teniendo en cuenta que las corrientes de corto circuito monofásico especificadas en el documento IEB 2018 criterios de plantillado, selección de conductor de guarda, aisladores, y verificación del conductor de fase presenta valores de 2,12 kA y 6,09 kA para las líneas en el nivel de tensión de 69 kV, se asume un valor conservador de 10 kA para efectos de cálculo, previendo las ampliaciones futuras del sistema”.<sup>2</sup>

“Tomando del libro El rayo de Horacio Torres, tabla 6 – Parámetros de distribución In-normal para cada una de las curvas de corriente de retorno del rayo. Para tal efecto, se tienen en cuenta los criterios contenidos en las Normas

---

<sup>1</sup> IEB. *Memoria de coordinamiento de aislamiento y verificación de apantallamiento contra descargas Eléctricas Atmosféricas de líneas de trasmisión 896-LTM-141, Memoria de selección del cable de guarda,896-LTM-010-R2,896-LTM-002 Memoria descriptiva, criterios básicos de diseño” memoria de selección del conductor,896-LTM-141-R3 Selección del aislamiento y apantallamiento, TRE-PET-69 Memoria de estudio de Distancias mínimas de seguridad,TRE-PET-69 Memoria de cálculo de estudio de Suelos aplicación en el diseño de las cimentaciones.* p. 45.

<sup>2</sup> Ibíd.

ANSI-IEEE Standard 142-2007 Recommended Practice for Grounding of Industrial and Commercial Power Systems y la ANSI-IEEE.80 de 2013- Guide For Safety in AC Substation Grounding”.<sup>3</sup>

### 1.3. Características de la línea

Se presenta la selección de los conductores de fase para la línea Carlos Dorión-Kerns y Carlos Dorión-Incinate/Lourdes.

Para efectos de la selección de los conductores de fase de la línea de transmisión, se consideraron los siguientes parámetros del sistema:

- Tensión nominal fase -fase  $V_{n_{F-F}}$  69 kV
- Tensión máxima fase-fase  $V_{n_{F-F}}$  72.5 kV
- Temperatura ambiente máxima promedio 25°C
- Ancho de la zona servidumbre 15m
- Temperatura máxima de operación de conductor 75°C
- Velocidad de viento mínima en m/s 0,61 (2 ft/s)
- Coeficiente de emisividad 0,5
- Coeficiente de absorción solar 0,5
- Latitud Norte 15°
- Elevación máxima sobre el nivel del mar (msnm) 1 400 (\*6)
- Capacidad en amperios 790 A
- Resistencia eléctrica AC a 75°C 0,146 ohm/km

---

<sup>3</sup> IEB. Memoria de coordinamiento de aislamiento y verificación de apantallamiento contra descargas Eléctricas Atmosféricas de líneas de trasmisión 896-LTM-141, Memoria de selección del cable de guarda,896-LTM-010-R2,896-LTM-002 Memoria descriptiva, criterios básicos de diseño” memoria de selección del conductor,896-LTM-141-R3 Selección del aislamiento y apantallamiento, TRE-PET-69 Memoria de estudio de Distancias mínimas de seguridad,TRE-PET-69 Memoria de cálculo de estudio de Suelos aplicación en el diseño de las cimentaciones. p. 45.

- Configuración de la línea” Vertical

Valores acordes a lo indicado en el documento 896 -LTM- 002 memoria descriptiva, criterios básicos de diseño.

Máxima tensión de diseño acorde a lo indicado en documento Normas Técnicas de Diseño y Operación del Servicio de Transporte de Energía Eléctrica -NTDOST- artículo 11.4 de la república de Guatemala.

Valor tomado de acuerdo con el mapa de isotermas, temperatura máxima promedio anual 1928-2018 del instituto Nacional de sismología, Vulcanología, Metodología e hidrología de la república de Guatemala ver (anexo 7).

Ancho de servidumbre establecido por TRELEC, S.A.

Valor proporcionado por la página del Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e hidrología de la república de Guatemala”. (IEB, 2018)

#### **1.4. Selección del conductor**

A continuación, se presenta el conductor a validar para la línea de transmisión Carlos Dorión-Kerns, - Carlos Dorión-Incinate/Lourdes se realizó una preselección del conductor, verificado que cumpliera con los requisitos mínimos especificados en el numeral 1.3 características de la línea como son capacidad de corriente mínima 790 A, por circuito y una resistencia eléctrica máxima en corriente alterna de 0,0169 ohm/km a una temperatura del conductor 75°C. Se determinó.

- Conductor: 740 Flint AAAC
- Diámetro 25.146 mm
- Peso 1,0280 (kg/m)
- R DC 20°C (0,0169) (ohm/km)
- R AC 75°C (0,0203) (ohm/km)

### 1.5. Cálculo de la capacidad de transporte de la línea de transmisión

“Los cálculos de la capacidad de transporte se realizaron para el conductor seleccionado para la línea de transmisión Carlos Dorión-Kerns, - Carlos Dorión-Incinate/Lourdes a 69 kV objeto del presente estudio. Para tal efecto, se utilizó el programa SWRate los cálculos se realizaron con las siguientes consideraciones.”<sup>4</sup>

- Los cálculos se hicieron considerando la temperatura ambiente máxima promedio de acuerdo con las zonas geográficas del trazado de la línea.
- Temperatura máxima de operación del conductor de 75°C.
- Coeficiente de emisividad de 0,5, considerando un conductor de varios años de uso.
- Coeficiente de absorción solar de 0,5, considerando un valor intermedio de absorción solar.
- Se calculó la capacidad de transporte a las 10 am para la condición ambiental de viento mínimo y con sol, por ser las condiciones más críticas para este cálculo.

---

<sup>4</sup> IEB. *Memoria de coordinamiento de aislamiento y verificación de apantallamiento contra descargas Eléctricas Atmosféricas de líneas de trasmisión 896-LTM-141, Memoria de selección del cable de guarda,896-LTM-010-R2,896-LTM-002 Memoria descriptiva, criterios básicos de diseño” memoria de selección del conductor,896-LTM-141-R3 Selección del aislamiento y apantallamiento, TRE-PET-69 Memoria de estudio de Distancias mínimas de seguridad,TRE-PET-69 Memoria de cálculo de estudio de Suelos aplicación en el diseño de las cimentaciones.* p. 45.

Resumiendo, la capacidad de transporte de la línea de transmisión con el conductor especificado a temperatura máxima promedio, con viento mínimo y con sol es de Capacidad de transporte del conductor:

- Conductor 740 AAAC FLINT
- Elevación de la línea (m.sn.m.) 1 400
- Temperatura máxima 75°C
- Capacidad de transporte 791A

“Lo anterior significa que hasta para las condiciones más críticas y relacionadas al área, es decir con viento mínimo y con sol, el conductor considerado supera los 790 A, requeridos para el nivel de tensión de 69 kV.”<sup>5</sup>

#### **1.6. Selección de aisladores poliméricos por coordinación de aislamiento eléctrico**

“Para la línea de transmisión Carlos Dorión-Kerns, Carlos Dorión-Incinate/Lourdes a 69 kV, los aisladores eléctricos a utilizar serán del tipo poliméricos.”<sup>6</sup>

Para la selección de los aisladores poliméricos, se tienen en cuenta los parámetros calculados por las sobretensiones ocasionadas por descargas atmosféricas y frecuencia industrial, como también las distancias eléctricas asociadas a estas sobretensiones, las cuales se nombran a continuación.

---

<sup>5</sup> IEB. *Memoria de coordinamiento de aislamiento y verificación de apantallamiento contra descargas Eléctricas Atmosféricas de líneas de trasmisión 896-LTM-141, Memoria de selección del cable de guarda,896-LTM-010-R2,896-LTM-002 Memoria descriptiva, criterios básicos de diseño” memoria de selección del conductor,896-LTM-141-R3 Selección del aislamiento y apantallamiento, TRE-PET-69 Memoria de estudio de Distancias mínimas de seguridad,TRE-PET-69 Memoria de cálculo de estudio de Suelos aplicación en el diseño de las cimentaciones.*

p. 46.  
<sup>6</sup> Ibíd.

- Sobretensión ocasionada a frecuencia industrial.
- Distancia de fuga.
- Sobretensión a impulso atmosférico.
- Distancia eléctrica mínima en aire por sobretensiones de impulso atmosférico.

En tal sentido los aisladores poliméricos a seleccionar para la línea de transmisión deben tener las siguientes características eléctricas mínimas:

- |                          |           |
|--------------------------|-----------|
| • Longitud de la sección | 1117 (mm) |
| • Distancia de arco seco | 818 (mm)  |
| • Distancia de fuga      | 2083 (mm) |
| • Voltaje industrial     | 255 (kV)  |
| • Impulso positivo       | 480 (kV)  |
| • Impulso negativo       | 580 (kV)  |

### **1.7. Distancias mínimas de seguridad**

A continuación, se presenta la memoria de cálculo para las distancias de seguridad para la línea de transmisión Carlos Dorión-Kerns y Carlos Dorión-Incinate/Lourdes a 69 kV.

Distancia de seguridad (DS) en cualquier dirección desde los conductores hacia los soportes y hacia conductores verticales o laterales de otros circuitos, o retenidas unidos al mismo soporte.

- Distancia de seguridad a conductor vertical del mismo circuito DS=0,86m
- Distancia de seguridad a superficie de los brazos de soporte: DS=0,44m
- Distancia de seguridad a superficie de estructuras: DS=0,47m



En la presente investigación haremos mención solamente de la normativa ya que estos datos no constituyen punto de análisis directamente en los (SPT). Según las Normas Técnicas de Diseño y Operación de las Instalaciones de Distribución (NTDOID) en el capítulo I. Líneas aéreas contiene los requisitos mínimos que deben cumplir el diseño y la construcción de líneas aéreas de distribución de energía eléctrica y sus equipos asociados, con la finalidad de obtener la máxima seguridad y protección a las personas y bienes, específicamente en el Artículo 18 tabla No.2, distancias mínimas de seguridad verticales de conductores sobre vía férreas, el suelo o agua. en relación a este tema ver apéndice núm. 8 y el anexo núm. 8.

### **1.8. Geología regional**

Se presenta el reconocimiento geotécnico del suelo donde se construyó la línea de transmisión de 69 kV ubicada en el tramo de la subestación Carlos Dorion – Incinate/Lourdes. Ubicado en zona 17 de la ciudad de Guatemala del departamento de Guatemala.

Topografía de la zona metropolitana de Guatemala, la configuración topografía de la zona metropolitana de Guatemala nos muestra un valle central de orientación aproximada Norte-Sur bordeando por áreas montañosas al occidente y oriente. Esta configuración ha sido interpretada por algunos autores como un hundimiento técnico o graben, donde el bloque central se hunde con respecto a los bloques levantados en sus bordes por la acción de la zona de falla de Mixco en Occidente y de la zona de falla Santa Catarina Pinula en el Oriente.

Internamente, el valle forma secuencias de planicies y barrancos como resultado de procesos erosivos del tipo fluvial relacionados a ríos, cañadas y

quebradas. Los sistemas fluviales más prominentes en el valle corresponden al río Villalobos al Sur y a los ríos El Zapote, Chinautla y las vacas al Norte. (ver anexo 10).

La morfología del valle de la ciudad de Guatemala ha sido modelada por la actividad volcánica, los movimientos tectónicos, la meteorización y la erosión fluvial, esta clase de cenizas y pómez de origen volcánico se encuentran diseminados principalmente en un cinturón volcánico.

El suelo se encuentra en zona geológica QP (ver anexo 11) que está conformada por rocas ígneas y metamórficas, cuaternario, rellenos y cubiertas gruesas de cenizas pómez y arenas pomáceas con fragmentos líticos basálticos; andesíticos, escoriáceo y cristales propios de la diferenciación de los magmas emergidos que se fragmentan con las erupciones y explosiones.

En los alrededores pueden encontrarse las zonas geológicas, Tv (ver anexo 11) que está formada por rocas volcánicas sin dividir más viejas del terciario, que incluyen coladas de lava de basalto-andesita, vulcano-sedimentos y algunos depósitos de lahares, predominante Mio-Paleoceno. Incluye tovas, material lahárico, y sedimentos volcánicos y Ksd (ver anexo 11). Son rocas de edad Cretácica, carbonatos neocomianocamanianos, incluye formaciones de Cobán, Ixoy, Campur, Sierra Madre y Grupo Yojoa.

### **1.9. Ubicación de sondeos**

“El tramo de línea de transmisión de 69 kV tiene una longitud de 15 km, se hicieron 8 sondeos a lo largo del tramo de la línea, se Geo-referenciaron en coordenadas UTM (ver anexo 12), la cantidad de sondeos, profundidad 5m y ubicación fueron seleccionados por TRELEC. S. A., para obtener la información

del estudio de suelos, en algunos sondeos no se pudo llegar a 5 metros, porque se encontraron extractos de suelos muy densos que no se pudieron atravesar para llegar a 5 m, se hicieron 3 pruebas en diferentes puntos del sondeo hasta que dio rechazo de 60 golpes para avanzar un tramo de 15 cm.”<sup>7</sup>

---

<sup>7</sup> IEB. *Memoria de coordinamiento de aislamiento y verificación de apantallamiento contra descargas Eléctricas Atmosféricas de líneas de trasmisión 896-LTM-141, Memoria de selección del cable de guarda,896-LTM-010-R2,896-LTM-002 Memoria descriptiva, criterios básicos de diseño” memoria de selección del conductor,896-LTM-141-R3 Selección del aislamiento y apantallamiento, TRE-PET-69 Memoria de estudio de Distancias mínimas de seguridad,TRE-PET-69 Memoria de cálculo de estudio de Suelos aplicación en el diseño de las cimentaciones.* p. 46.

## **2. MARCO TEÓRICO**

Los sistemas de puesta a tierra son parte importante del sistema eléctrico en todos sus niveles: generación, transmisión y distribución de la energía, ya que el sistema de puesta a tierra es el que protege al sistema eléctrico, a las personas y todos los equipos que pudieran estar conectados. Desde su diseño e implementación se deben seguir las normas correspondientes que garanticen con el cumplimiento del numeral 2.1. descrito a continuación.

### **2.1. Objetivos de los sistemas de puesta a tierra**

- Establecer los límites de voltajes debido a rayos, sobre voltajes transitorios y por contacto accidental con las líneas de voltaje.
- Proteger y salvaguardar la vida de las personas.
- Regular el voltaje (estabilizar el voltaje durante operaciones normales).
- Dar facilidad a la operación de las protecciones asociadas a los circuitos.

### **2.2. Requerimientos básicos**

Todos los sistemas de puesta a tierra necesitan cumplir algunos requerimientos, para así poder desempeñar los objetivos que se plantearon en el numeral 2.1. estos son:

- Presentar una baja resistencia de puesta a tierra. Esto previene que existan potenciales peligrosos durante una falla. Los valores que son recomendados por las normas según el tipo de instalación se presentan en la tabla I.

- Garantizar bajos potenciales superficiales dentro de la instalación: las “NORMAS IEEE 80-2013 no se presentan un valor máximo para potenciales de toque y de paso a excepción de los siguientes criterios de diseño  $E_{malla} < E_{toque\ tolerable}$  y  $E_{paso} < E_{paso\ tolerable}$ . mientras que para el GPR se toma un valor de 5,000 V máximo referenciados al código eléctrico canadiense. Este valor se establece buscando la seguridad de las personas dentro del área de la subestación o de la estructura de la línea de transmisión o en contacto con la valla perimetral”. (Pérez Loarca, 2015)

Tabla I. **Valores recomendados de resistencia de sistemas eléctricos de puesta a tierra**

<b>Tipo de Instalación eléctrica</b>	<b>Resistencia de puesta a tierra (Ohmios)</b>
Subestación de gran tamaño (20,000 m <sup>2</sup> ) y de transmisión.	1 o menos
Subestaciones de plantas industriales, edificios e instalaciones comerciales grandes y subestaciones pequeñas.	Rango de 1 0 5
Electrodos individuales (Residenciales)	25
Estructuras de Trasmisión Individuales	10

Fuente: PÉREZ LOARCA, Walter Esaú; SERRANO BARRIOS, Christian Javier; SURIO GUEVARA, Oscar Orlando. *Manual de aplicación de la Norma IEEE*. p. 9.

### **2.3. Establecer conexiones equipotenciales**

Toda estructura metálica conductiva expuesta que puede estar en contacto con una persona, se debe conectar a través de conductores de conexión eléctrica a tierra.

“La mayoría de los equipos eléctricos se aloja en el interior de cubiertas metálicas, y si un conductor energizado llegase a entrar en contacto con estas, la cubierta también quedará temporalmente energizada. La conexión eléctrica es para que se asegure que, si se produce una falla en el sistema, el potencial sobre todas las estructuras metálicas conductivas expuestas sea el mismo.”<sup>8</sup>

### **2.4. Suficiente capacidad de conducción efectiva de la corriente de falla**

Esto es el efecto de poseer una baja impedancia. El sistema debe ser capaz de permitir que la corriente inducida regrese a su origen de una forma controlada, es decir, que se disipe y que se permita la actuación de forma correcta de los sistemas de protección. Este camino de retorno debe ser muy seguro para poder así evitar lesiones a las personas o bien para evitar los daños a los equipos.

El valor de la impedancia debe diseñarse para tal fin, tomando en cuenta el tipo de instalación y las frecuencias que se manejan en el sistema.

---

<sup>8</sup> PÉREZ LOARCA, Walter Esaú; SERRANO BARRIOS, Christian Javier; SURIO GUEVARA, Oscar Orlando. *Manual de aplicación de la Norma IEEE*. p. 13.

## **2.5. Necesidad de las mediciones de los parámetros.**

Lo primero que se debe de hacer antes que una instalación eléctrica entre a servicio, se hace una medición de rutina, de la resistencia de puesta a tierra y si se tratase de subestaciones, se hacen las mediciones de los potenciales superficiales para poder así, comprobar que cumplen con los valores de diseño, puesto que la mayoría de los modelos de cálculo no consideran los factores que inciden directamente en la resistencia del sistema, como puede ser la humedad y la temperatura del terreno. Esta medición es la única manera de saber su valor real.

## **2.6. Resistencia de puesta a tierra**

“Al momento de puesta en operación comercial un equipo, se requiere de la necesidad de hacer pruebas habituales para corroborar que el sistema de puesta a tierra sigue en condiciones óptimas de funcionamiento, y prestando seguridad a las personas y equipos. Después de la instalación de una subestación u otra estructura de alguna línea de transmisión la puesta a tierra se ha podido determinar que hasta en un periodo de 18 años presenta poca variación en el valor medido inicialmente de la resistencia, esto dependerá de la calidad de los materiales y de la calidad de la instalación del sistema.”<sup>9</sup>

Se puede dar el caso también. Que la resistencia este aumentando con el tiempo, para ello son necesarias acciones que tengan la finalidad de devolverle al sistema el valor óptimo para el que fue diseñado.

---

<sup>9</sup> PÉREZ LOARCA, Walter Esaú; SERRANO BARRIOS, Christian Javier; SURIO GUEVARA, Oscar Orlando. *Manual de aplicación de la Norma IEEE*. p. 14.

Estas acciones pueden ser, dependiendo de la dificultad de la situación: como medida se puede añadir electrodos a la instalación, también podemos proceder a la sustitución de conexiones que presenten corrosión, aumentar el contenido de humedad y el tratamiento químico del suelo. Los valores de resistencia bajos son requeridos para poder mantener a un nivel seguro los potenciales que se puedan dar en caso de fallas en las instalaciones eléctricas.

“Generalmente el valor de la impedancia del sistema es medido solo en términos de la resistencia esto debido a que la reactancia se considera despreciable con respecto a esta. La reactancia aumenta con el tamaño del sistema o por conexiones a neutros aterrizados, o a los sistemas de blindaje de cables. La componente reactiva del sistema es necesaria cuando los análisis son para corrientes transitorias o de impulso, por ejemplo, las descargas atmosféricas.”<sup>10</sup>

## **2.7. Potenciales superficiales**

“Al ocurrir una falla las estructuras metálicas pueden quedar energizadas a una diferencia de potencial peligrosa, en caso que ocurra, no estar aterrizadas correctamente. Aun estando aterrizada, por ley de ohm, dada una corriente circulando a través de una resistencia provoca una caída de voltaje en sus extremos, teniendo así el concepto de GPR. A partir de este efecto y la resistencia de tierra circundante en el sistema (IEEE Std 80-2013) se tienen dos potenciales importantes a la hora de evaluar la seguridad, el potencial de toque y potencial de paso.”<sup>11</sup>

---

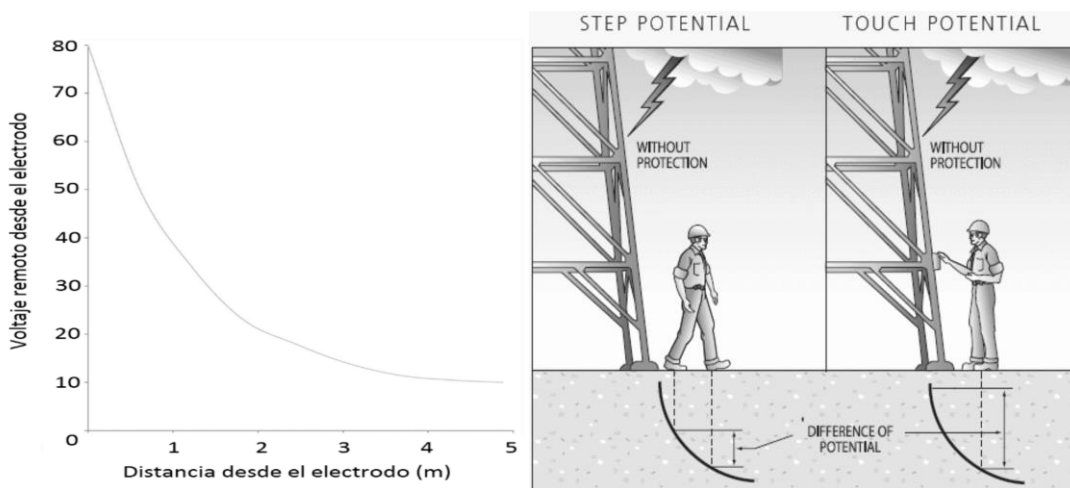
<sup>10</sup> PÉREZ LOARCA, Walter Esaú; SERRANO BARRIOS, Christian Javier; SURIO GUEVARA, Oscar Orlando. *Manual de aplicación de la Norma IEEE*. p. 15.

<sup>11</sup> *Ibíd.*



Teniéndose una curva de la distribución del gradiente de potencial (figura 1) se puede observar que, a medida que se aleja del electrodo de tierra, el potencial medido entre un punto a una distancia  $x$ , y un punto remoto que se asume a un potencial de 0V, disminuye rápidamente de forma exponencial. Además, tanto el potencial de toque como el de paso, dependen directamente de esta curva y del valor de GPR. En este punto surge la necesidad de comprobar que el valor teórico de diseño se cumpla en la práctica para poder así garantizar que el nivel de aislamiento del equipo de protección personal, con el que se esté trabajando dentro de la subestación, sea superior al del voltaje al que se debería someter una persona.

Figura 1. **Distribución de gradiente de voltaje y potenciales de toque y paso**



Fuente: PÉREZ LOARCA, Walter Esaú; SERRANO BARRIOS, Christian Javier; SURIO GUEVARA, Oscar Orlando. *Manual de aplicación de la Norma IEEE*. p. 12.

La administración de seguridad y salud ocupacional del gobierno de los Estados Unidos de América, Osha exige que se determine estos potenciales para poder así determinar el nivel de aislamiento requerido y de ser necesario se pueda instalar zonas equipotenciales, por ejemplo con una malla metálica conectada a una estructura aterrizada.

Usualmente dentro de las subestacion se utiliza grava para poder así crear una capa superficial con alta resistividad que reduzca significativamente estos potenciales.<sup>12</sup>

## **2.8. Objetivos de las mediciones**

La norma determina los objetivos principales que se esperan cumplir cuando se realizan las mediciones de los parámetros de tierra. Pueden ir enfocadas en proporción al diseño como al mantenimiento de los (SPT).

Para la realización de este trabajo de investigación, no se buscará el cumplimiento de todos los objetivos, acaso los que más se apeguen a los alcances de esta investigación.

## **2.9. Medición de resistividad de la tierra**

- Estimar la resistencia de la tierra de un sistema aterrizado.
- Calcular el acoplamiento inductivo entre circuitos cercanos de potencia.
- Estimar los sistemas de protección catódica.
- Llevar a cabo estudios geológicos.

## **2.10. Medición de la resistencia de puesta a tierra**

- Determinar la resistencia actual de un sistema de puesta a tierra.
- Detectar cambios en un sistema de tierra existente.

---

<sup>12</sup> PÉREZ LOARCA, Walter Esaú; SERRANO BARRIOS, Christian Javier; SURIO GUEVARA, Oscar Orlando. *Manual de aplicación de la Norma IEEE*. p. 14.

- Determinar el GPR para poder establecer las protecciones del sistema de potencia.

## **2.11. Medición de la resistencia a tierra con el método de la alta frecuencia**

El funcionamiento se basa, en el empleo de una corriente de medida de alta frecuencia (25 kHz), para la cual la impedancia inductiva del cable de guarda, considerando un vano de longitud típica que es razonablemente alta, lo que permite reducir el efecto que proporcionan las estructuras adyacentes a la que se está midiendo, y así poder medir solamente la resistencia de la puesta a tierra del poste.

“De manera que, el valor leído represente el comportamiento frente a una señal de impulso, semejante a la descarga atmosférica para así poder obtener valores que figuren la capacidad del sistema para conducir las corrientes de rayo que los que se podrían obtener con equipos convencionales de baja frecuencia aun desconectando el cable de guarda”.<sup>13</sup>

El ensayo se realizará haciendo circular una corriente a través de la resistencia de difusión de tierra y de un electrodo auxiliar denominado electrodo de corriente, midiendo la tensión producida entre la puesta a tierra y otro electrodo auxiliar insertado en el terreno en la zona plana del potencial creado por la corriente que circula, (Meseta del potencial). El equipo mide la resistencia calculando el cociente entre la tensión y la corriente.<sup>14</sup>

“El instrumento dispone de un banco de capacitores que permite evaluar la componente inductiva de la puesta a tierra medida. El proceso de sintonía

---

<sup>13</sup> MEGABRAS. *Telúmetro digital de alta frecuencia TM25m*. www.megabras.com. Consulta: 18 de octubre de 2018.

<sup>14</sup> PÉREZ LOARCA, Walter Esaú; SERRANO BARRIOS, Christian Javier; SURIO GUEVARA, Oscar Orlando. *Manual de aplicación de la Norma IEEE*. p. 13.

tendría que ser automático y el equipo muestra el valor de la inductancia equivalente y de la capacitancia producida por la sintonía”.<sup>15</sup>

La corriente inyectada por el telurómetro digital se regula automáticamente y el equipo indica directamente el valor de la resistencia en ohm.

## **2.12. Medición de la impedancia y potenciales superficiales**

- Determinar la adecuación de un nuevo sistema de puesta a tierra.
- Detectar los cambios en un sistema de tierra existente.
- Identificar potenciales de toque y paso peligrosos.
- Determinar el GPR para estimar la protección de los sistemas de potencia.

## **2.13. Resistividad del suelo**

Se define como la resistencia específica del suelo o de un estrato de este a una profundidad dada, se obtiene indirectamente al desarrollar un grupo determinado de medidas de campo; su unidad de medida es el ohmio-metro que corresponde a la intensidad de un amperio, que permite pasar un conductor, cuando se le aplican en sus caras opuestas una diferencia de potencial de un voltio.

Es el valor determinado con el cual se procede a diseñar las redes de puesta a tierra de un sistema eléctrico en general. De ahí la suma importancia de conectarla. La resistividad se obtiene con el uso de métodos de prospección del suelo mediante la inyección continua de corriente que se basa en los principios físicos que a continuación se describen.<sup>16</sup>

## **2.14. Principios de prospección eléctrica**

Los métodos utilizados de prospección eléctrica en corriente continua tienen su fundamento en la teoría general del campo eléctrico estacionario y se basan en detectar los efectos superficiales que son producidos por el flujo de una corriente

---

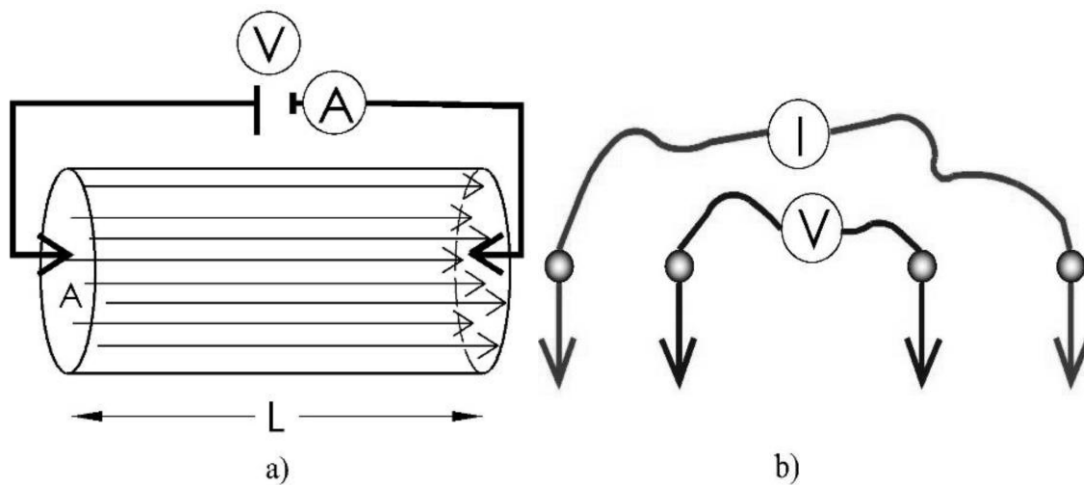
<sup>15</sup> PÉREZ LOARCA, Walter Esaú; SERRANO BARRIOS, Christian Javier; SURIO GUEVARA, Oscar Orlando. *Manual de aplicación de la Norma IEEE*. p. 13.

<sup>16</sup> *Ibíd.* p. 14.

eléctrica, natural o inducida, por el subsuelo. Se sabe que todo material presenta cierto valor de conductividad eléctrica, la cual es inversamente proporcional a la resistividad.

Este parámetro es la constante de proporcionalidad que relaciona la corriente que circula a través de un material cuando es aplicado un voltaje, lo cual corresponde con la ley de ohm. Pero para el caso de los estudios que se realizan a los suelos por métodos geo-eléctricos se toma necesario calcular una magnitud física independiente del volumen de la muestra que se tiene bajo prueba. Primero, se asume una muestra homogénea e isotrópica con longitud  $L$  y una sección transversal  $A$  (figura 2).<sup>17</sup>

Figura 2. **Principio de prospección y medición de potenciales debido a corrientes inyectadas**



Fuente: PÉREZ LOARCA, Walter Esaú; SERRANO BARRIOS, Christian Javier; SURIO GUEVARA, Oscar Orlando. *Manual de aplicación de la Norma IEEE*. p. 14.

Este Volumen de un material homogéneo, cuando se le aplica una diferencia de potencial en sus extremos circula una corriente que se distribuye uniformemente en toda la sección transversal del volumen, teniéndose así una densidad de corriente  $J$  en  $\frac{A}{M^2}$ , el cual es constante para las diferentes

<sup>17</sup> PÉREZ LOARCA, Walter Esaú; SERRANO BARRIOS, Christian Javier; SURIO GUEVARA, Oscar Orlando. *Manual de aplicación de la Norma IEEE*. p. 13.

secciones de un mismo material sometido a una misma diferencia de potencial. Mientras que el campo eléctrico  $E$ , que se genera a partir del voltaje aplicado entre los extremos del volumen, en  $\frac{V}{M}$ , dentro del material varía linealmente a lo largo de la longitud total, teniendo entonces la forma puntual de la ley de ohm:

$$\vec{E} = K * \vec{J} \quad (1)$$

El campo eléctrico es uniforme en un material homogéneo. Por lo cual se puede relacionar con el voltaje aplicado en sus extremos (figura 2b).

Además, la corriente se distribuye uniformemente en toda la sección transversal perpendicular a las líneas de campo eléctrico, teniéndose:

$$J = \frac{I}{A} \quad (2) \quad Y \quad E = \frac{V}{d} \quad (3)$$

Al relacionar las ecuaciones 1,2 y 3 se obtiene la ecuación 4 y al relacionarla con la forma general de la ley de ohm se obtiene la siguiente ecuación:

$$\frac{V}{I} = \rho \frac{L}{A} = R \quad (4)$$

De aquí tenemos la relación entre la resistividad y resistencia. En la ecuación (4) se basan los métodos utilizados para la medición de la resistividad de los suelos. Se hace circular una corriente y se mide un voltaje inducido. En prospección geo-eléctricas las resistividades pueden calcularse porque se conoce  $V$ ,  $I$  y  $L$  (la distancia entre electrodos). El área  $A$  se estima unitaria.

Si aplicamos la ley de ohm directamente, el parámetro que se obtiene es la resistencia total del circuito "R", lo cual no es un buen indicador del tipo de material que se está utilizando ya que depende del área y de su longitud. Se necesita, en proporción de un parámetro en específico de cada material e independiente de sus dimensiones. Es donde se presenta la idea fundamental del concepto de resistividad de un material. Al cociente L/A se le denomina factor geométrico K. Este depende del dispositivo usado para la inyección de la corriente.<sup>18</sup>

## 2.15. Resistividad aparente

El concepto de resistividad solamente es aplicable para los suelos homogéneos. Como en la práctica se tienen suelos con concentraciones de diferentes elementos y cantidades variables surge de este punto el concepto de resistividad aparente. Esto se debe a las propiedades heterogéneas del terreno provocando que las líneas de campo eléctrico y de corriente no se compartan uniformemente. Los suelos son por naturaleza de este tipo.

El concepto de resistividad es de importancia fundamental en prospección y se da cuando se realizan mediciones sobre un subsuelo heterogéneo donde la resistividad que se está midiendo se le conoce como resistividad aparente, es ficticia ya que en realidad es el promedio de las resistividades bajo cada uno de los electrodos; ni siquiera puede considerarse media ponderada. La resistividad aparente es la variable experimental con que expresan los datos de campo de los métodos que se aplican a la prospección y se toma como base de su interpretación.

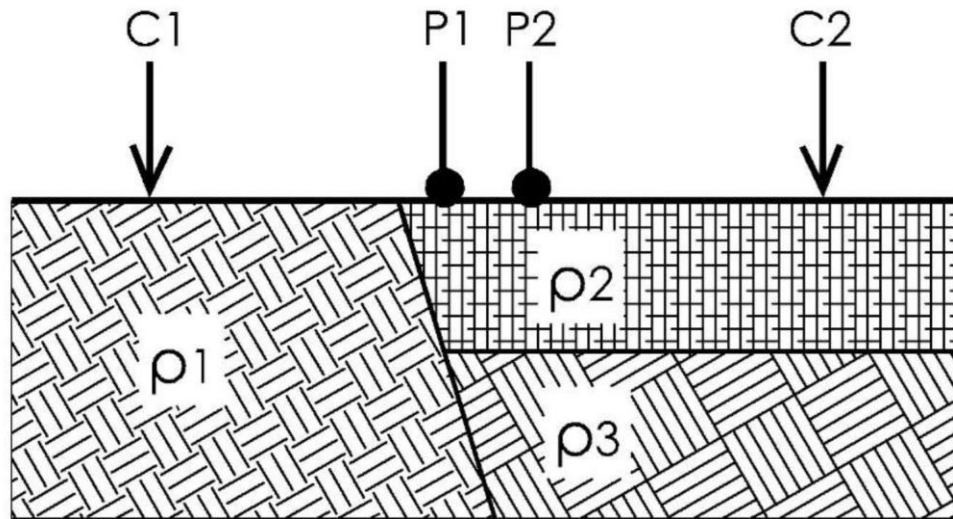
Se requiere de experiencia de parte del investigador para poder interpretar los datos de resistividad aparente obtenidos en el trabajo de campo, con el fin de determinar los modelos con un grado de certeza adecuado de acuerdo con la aplicación para la cual se está realizando.<sup>19</sup>

---

<sup>18</sup> PÉREZ LOARCA, Walter Esaú; SERRANO BARRIOS, Christian Javier; SURIO GUEVARA, Oscar Orlando. *Manual de aplicación de la Norma IEEE*. p. 14.

<sup>19</sup> *Ibíd.*

Figura 3. **Suelo heterogéneo resistividad aparente es el promedio de las resistividades presentes**



Fuente: PÉREZ LOARCA, Walter Esaú; SERRANO BARRIOS, Christian Javier; SURIO GUEVARA, Oscar Orlando. *Manual de aplicación de la Norma IEEE*. p. 16.

## 2.16. Tipos de prospecciones para mediciones de resistividad

Para determinar la resistividad se usan prospecciones geo-eléctricas mediante la aplicación de diferentes métodos. Estas prospecciones son necesarias porque permiten trazar mapas de resistividades aparentes de las capas del subsuelo mediante las mediciones hechas en la superficie de este, con lo que se obtiene el modelado del terreno. En otras aplicaciones se utilizan para encontrar mantos acuíferos, aplicaciones de geofísica aplicada, entre otros.<sup>20</sup>

## 2.17. Sondeo eléctrico vertical (SEV).

Este tipo de prospección se utiliza cuando se desea tener un modelado del suelo que describa las diferentes variaciones de la resistividad aparente bajo el punto que se está sondeando en relación con la profundidad que se tiene del mismo. El

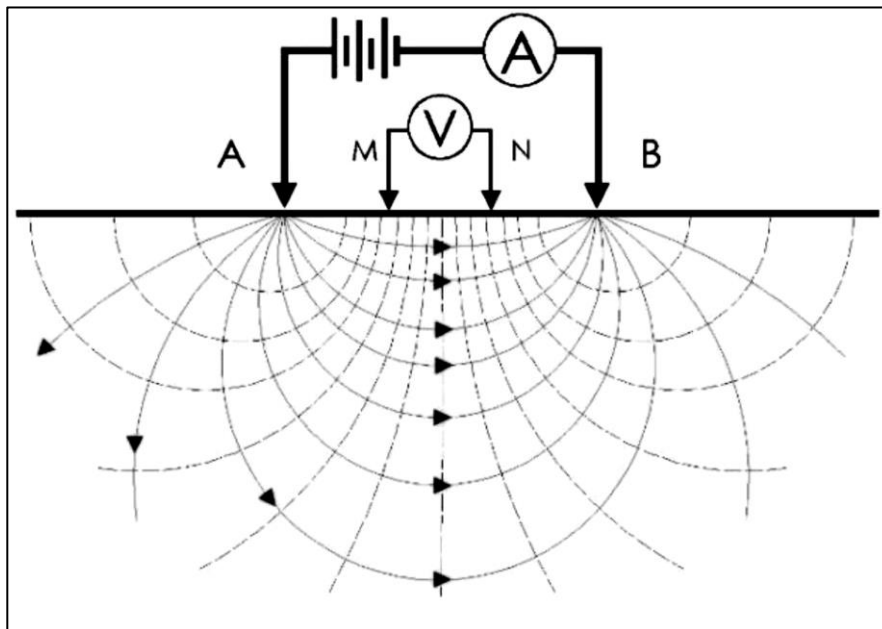
<sup>20</sup> PÉREZ LOARCA, Walter Esaú; SERRANO BARRIOS, Christian Javier; SURIO GUEVARA, Oscar Orlando. *Manual de aplicación de la Norma IEEE*. p. 16.



producto final que se obtiene es un modelo de varias capas, cada una con un valor de resistividad aparente con un cambio considerable con respecto a otra, con lo que se puede suponer o demostrar que hay materiales de distinta naturaleza en el terreno en estudio. Se tienen cuatro electrodos (figura 4) generalmente dispuestos en una línea recta, dos de ellos (A y B) son los inyectores de corriente, que son los de los extremos del arreglo; y los del centro (M y N) que es donde se mide el potencial generado debido a la corriente inyectada.

La profundidad a la que penetra la corriente eléctrica inyectada depende de la distancia a la que se encuentran separados los electrodos A y B. Si estos electrodos se separan más, mayor será la profundidad a la que llegará. La densidad de corriente va disminuyendo conforme se aumenta la distancia de profundidad. El modelo que se obtiene en una gráfica que es representada en una dimensión, que corresponde al punto en el suelo bajo el punto que se está tomando a prueba. Los métodos más utilizados con los que se aplican los Sondeos Eléctricos Verticales son: Wenner y Schlumberger.<sup>21</sup>

Figura 4. **Líneas de corriente y equipotenciales presentes en el momento de la medición**



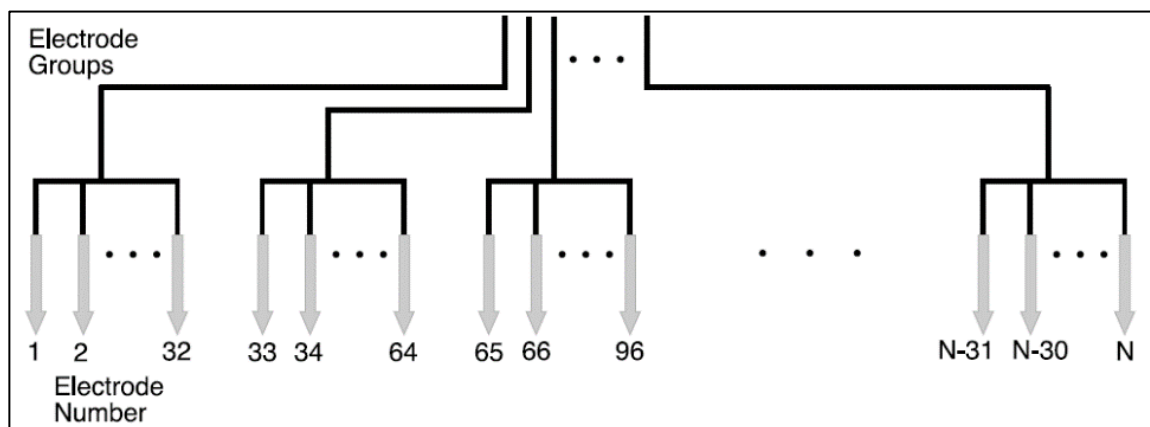
Fuente: PÉREZ LOARCA, Walter Esaú; SERRANO BARRIOS, Christian Javier; SURIO GUEVARA, Oscar Orlando. *Manual de aplicación de la Norma IEEE*. p. 17.

<sup>21</sup> PÉREZ LOARCA, Walter Esaú; SERRANO BARRIOS, Christian Javier; SURIO GUEVARA, Oscar Orlando. *Manual de aplicación de la Norma IEEE*. p. 16.

## 2.18. Tomografía eléctrica resistiva

Es una técnica geofísica de prospección del subsuelo que consiste en determinar la distribución de un parámetro de este, como es la resistividad eléctrica, dentro de un espacio limitado y a través de un número grande de medidas de potenciales en la superficie, esto se debe a la inyección de corrientes eléctricas continuas de prueba. Es un método multi-electródico y su característica principal es que presenta una modelización en 2D del terreno. La gráfica que se obtiene es distancia-profundidad, y según como se use, la prospección podría llegar a unos cientos de metros de profundidad del terreno, y extenderse en líneas de varios kilómetros de distancia.<sup>22</sup>

Figura 5. **Distribución de los electrodos de prueba para una tomografía eléctrica resistiva**



Fuente: PÉREZ LOARCA, Walter Esaú; SERRANO BARRIOS, Christian Javier; SURIO GUEVARA, Oscar Orlando. *Manual de aplicación de la Norma IEEE*. p. 19.

La técnica consiste en obtener medidas de resistividad aparente mediante un dispositivo capaz de manejar una gran cantidad de electrodos conectados con una separación constante entre ellos. Lo siguiente es programar los equipos para que así se pueda tomar las medidas a diferentes distancias y a distintas profundidades. El resultado que se obtiene es un modelo del terreno a

<sup>22</sup> PÉREZ LOARCA, Walter Esaú; SERRANO BARRIOS, Christian Javier; SURIO GUEVARA, Oscar Orlando. *Manual de aplicación de la Norma IEEE*. p. 17.

diferentes profundidades, la técnica ofrece información en dos dimensiones. La distribución de electrodos es generalmente de 20 hasta un máximo de 80 por línea (figura 5).

En la figura 6 se muestra un dispositivo característico para la recopilación de datos mediante el método de tomografía eléctrica resistiva. Cuenta con un dispositivo que mide la resistencia (ohmmetro), con un control de switcheo donde son conectados los grupos de electrodos, una fuente de energía, electrodos y una serie de cables; todo esto es programable para que las medidas sean tomadas bajo una secuencia específica y así poder obtener resultados controlados, es decir, limitados en espacio, pero con una alta resolución.

La resolución depende de la cantidad de datos tomados y la colocación que se asumió con los electrodos, que pueden estar muy cerca o muy lejos entre ellos. Cuando se combina adecuadamente la resolución lateral y la profundidad de la investigación, la tomografía eléctrica es, sin duda una de las herramientas de carácter no destructivo más eficaz para el estudio y caracterización de posibles discontinuidades del subsuelo.

La figura (7) muestra una tomografía. Este es el resultado que arroja la técnica. Se puede observar que se tiene una alta resolución del corte del terreno, cuya profundidad y distancia se ha realizado aproximadamente a 7 y 80 metros respectivamente.<sup>23</sup>

---

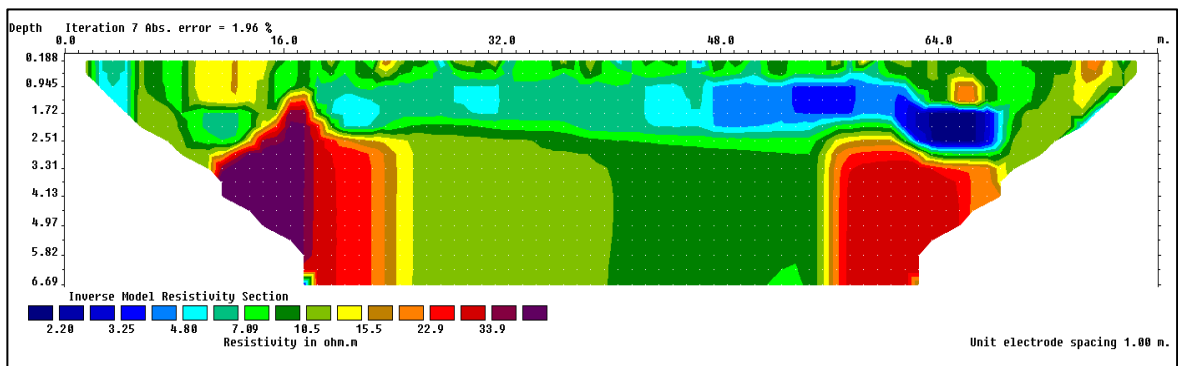
<sup>23</sup> PÉREZ LOARCA, Walter Esaú; SERRANO BARRIOS, Christian Javier; SURIO GUEVARA, Oscar Orlando. *Manual de aplicación de la Norma IEEE*. p. 17.

Figura 6. **Equipo tradicional para realizar una tomografía eléctrica resistiva**



Fuente: PÉREZ LOARCA, Walter Esaú; SERRANO BARRIOS, Christian Javier; SURIO GUEVARA, Oscar Orlando. *Manual de aplicación de la Norma IEEE*. p. 20.

Figura 7. **Resultado de una tomografía. Las resistividades se apresian en un modelado 2D**



Fuente: PÉREZ LOARCA, Walter Esaú; SERRANO BARRIOS, Christian Javier; SURIO GUEVARA, Oscar Orlando. *Manual de aplicación de la Norma IEEE*. p. 20.

“Entre las ventajas que se puede mencionar: presenta capturas de datos en forma automática, también presenta la versatilidad de tomar un gran número de medidas sin la necesidad de mover los electrodos de tal manera se obtienen secciones 2-D tanto para la profundidad como lateralmente”.<sup>24</sup>

## **2.19. Factores que influyen en la resistividad del suelo**

Si bien los componentes más importantes del terreno, en época de verano, son: (la sílice, el óxido de aluminio, entre otros), su resistividad disminuye rápidamente en presencia de sales solubles y de la humedad.

Por otro lado, la composición de la tierra, incluso en un lugar determinado, es muy heterogénea, presentándose capas, bolsas, depósitos, entre otros. Tanto horizontal como verticalmente.

Las zonas superficiales en que se instalan las tomas de tierra tampoco son uniformes y además están afectadas fuertemente por los cambios climáticos, lluvias y heladas.

Todo ello hace que la resistividad sea muy variable de un lugar a otro y pueda resumirse en que la modifican, de manera muy notable, los siguientes factores del terreno:

- La composición
- Las sales solubles y su concentración
- El estado higrométrico
- La temperatura

---

<sup>24</sup> PÉREZ LOARCA, Walter Esaú; SERRANO BARRIOS, Christian Javier; SURIO GUEVARA, Oscar Orlando. *Manual de aplicación de la Norma IEEE*. p. 21.

- La granulometría
- La compacidad
- La estratigrafía

Tabla II. Factores que influyen en la resistividad del terreno

Naturaleza del terreno	Valor medio de la resistividad, en $\Omega \cdot m$
Terrenos cultivables y fértiles, terraplenes compactos y húmedos	50
Terraplenes cultivables poco fértiles, terraplenes	500
Suelos pedregosos desnudos, arenas secas permeables	3 000

Fuente: GARCÍA MÁRQUEZ, Rogelio. *Puesta a tierra de instalaciones eléctricas*. p. 14.

## 2.20. Composición del suelo

El autor García Márquez indica en su libro que “la variación de la resistividad según la composición del terreno es muy acusada, con la dificultad de que las diferentes clases de terreno no están delimitadas como para saber, de antemano, el valor de la resistividad en el punto elegido para efectuar la toma de tierra.

Sucede, incluso que, para una misma clase de terreno, situada en distintos parajes, la resistividad puede ser sensiblemente diferente. Debido a esto se hace necesario hacer una medición específicamente en punto donde se instalará la puesta tierra.<sup>25</sup>

<sup>25</sup> GARCÍA MÁRQUEZ, Rogelio. *Puesta a tierra de instalaciones eléctrica*. p. 14.

Tabla III. **Composición del terreno**

<b>Naturaleza del terreno</b>	<b>Resistividad en <math>\Omega \cdot m</math></b>
Terrenos pantanosos	De algunas unidades a 30
Limo	20 a 100
Humus	10 a 150
Turba húmeda	5 a 100
Arcilla plástica	50
Margas y arcillas compactas	100 a 200
Margas del Jurásico	30 a 40
Arena arcillosa	50 a 500
Arena silíceo	200 a 3000
Suelo pedregoso cubierto de césped	300 a 500
Suelo pedregoso desnudo	1500 a 3000
Calizas blandas	100 a 300
Calizas compactas	1000 a 5000
Calizas agrietadas	500 a 1000
Pizarras	50 a 300
Rocas de mica y cuarzo	800
Granitos y gres procedentes de alteración	1500 a 10000
Granitos y gres muy alterados	100 a 600
Hormigón	2000 a 3000
Balasto o grava	3000 a 5000

Fuente: GARCÍA MÁRQUEZ, Rogelio. *Puesta a tierra de instalaciones eléctricas*. p. 14.

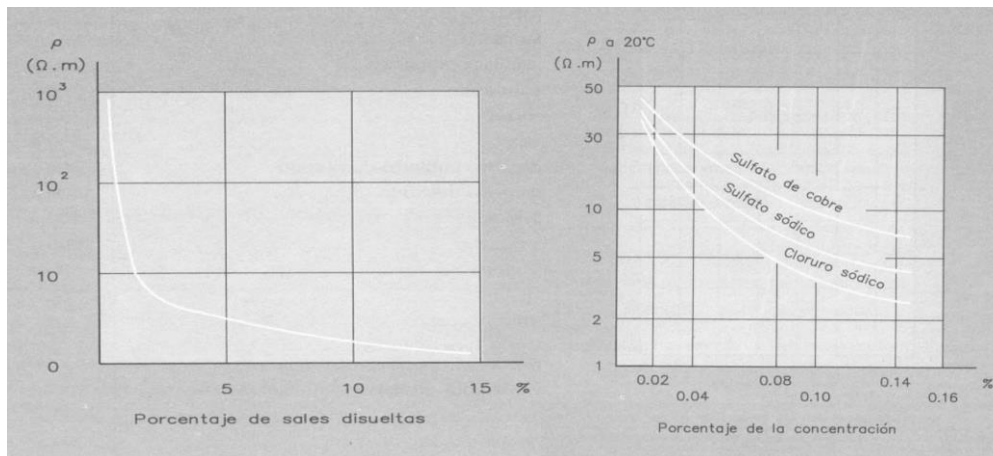
## 2.21. Sales solubles y su concentración

“Al ser aislantes los principales componentes del terreno, la conductividad del suelo es, esencialmente de naturaleza electrolítica, esto es por la conducción de corriente principalmente, a través del electrólito formado por las sales y el agua habitualmente contenida en el terreno”.<sup>26</sup>

En la figura 8 se refleja cómo la cantidad de sales disueltas afectan la resistividad, y en la figura 9 los distintos efectos de sales diferente.

<sup>26</sup> GARCÍA MÁRQUEZ, Rogelio. *Puesta a tierra de instalaciones eléctrica*. p. 14.

Figura 8. Resistividad de suelo en función de la salinidad del suelo



Fuente: GARCÍA MÁRQUEZ, Rogelio. *Puesta a tierra de instalaciones eléctricas*. p. 14.

## 2.22. Estado higrométrico del suelo

El contenido de agua o grado de humedad del terreno influye, de forma apreciable sobre su resistividad. Su valor no es constante, ya que varía con el clima, época del año, naturaleza del subsuelo, la profundidad considerada y la situación del nivel freático pero rara vez es nulo, incluso al referirse a zonas desérticas.

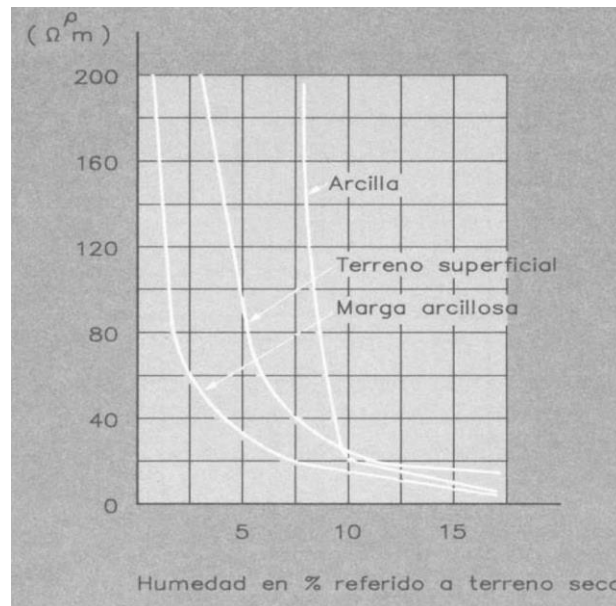
A medida que el grado de humedad aumenta. Cuyo principal efecto es disolver las sales solubles, la resistividad disminuye con rapidez, pero a partir de cifras del orden del 15 % en peso, esta disminución es mucho menos acusada, a causa de la práctica saturación del terreno, tal como puede verse en la figura 9.<sup>27</sup>

El porcentaje de humedad modifica la resistividad del suelo porque, en definitiva, es el agua y las sales en ella disueltas quienes facilitan la conducción eléctrica. No obstante, su incidencia es mucho menos acusada al alcanzarse la práctica saturación del terreno, lo que sucede entorno a porcentajes del orden de un 15 %.

<sup>27</sup> GARCÍA MÁRQUEZ, Rogelio. *Puesta a tierra de instalaciones eléctrica*. p. 15.



Figura 9. **Porcentaje de la resistividad en relación a la humedad**



Fuente: GARCÍA MÁRQUEZ, Rogelio. *Puesta a tierra de instalaciones eléctricas*. p. 14.

“Cuando la humedad del terreno varié considerablemente de unas épocas del año a otra, se tendrá en cuenta esta circunstancia al dimensionar y establecer el sistema de tierra. Se podrán usar recubrimientos de grava como ayuda para conservar la humedad del suelo”.<sup>28</sup>

### 2.23. Temperatura

La resistividad del terreno aumenta a medida que desciende la temperatura y ese aumento se atribuye mucho al alcanzarse los 0°C hasta el punto que, a medida que es mayor la cantidad de agua en estado de congelación, se va reduciendo el movimiento de los electrólitos que, como se ha visto, influyen decisivamente en la resistividad del terreno, elevándose ostensiblemente la misma tal como se aprecia en la figura 10.

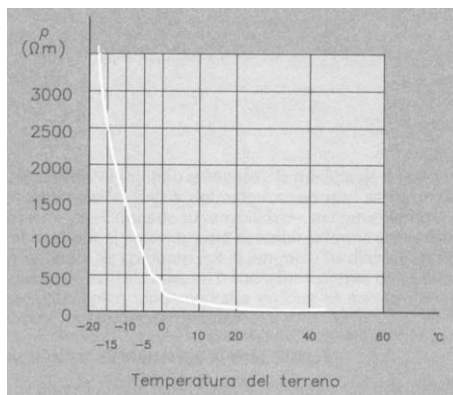
Al alcanzar el suelo temperaturas inferiores a los 0°C aumenta mucho su resistividad. Por ello en zonas con peligro de heladas los electrodos se enterrarán

<sup>28</sup> GARCÍA MÁRQUEZ, Rogelio. *Puesta a tierra de instalaciones eléctrica*. p. 15.

a una profundidad que no alcance esa temperatura o se tendrá en cuenta esta circunstancia en el cálculo.<sup>29</sup>

La temperatura, en general, incrementa la solubilidad de las sales en el agua, por cuya razón disminuirá la resistividad. Su descenso por debajo de los 0 °C, aparte de reducir la solubilidad, origina la congelación de electrolitos, dificultando notablemente la conducción eléctrica y ocasionando un importante incremento de la resistividad

Figura 10. **Resistividad en relación a la temperatura**



Fuente: GARCÍA MÁRQUEZ, Rogelio. *Puesta a tierra de instalaciones eléctrica*. p. 17.

## 2.24. Granulometría

Es un elemento importante que influye, a la vez, sobre la porosidad y el poder retenedor de humedad y también sobre la calidad del contacto. Con los electrodos, incrementándose la resistividad con el mayor tamaño de los granos. Esta es la razón de que el valor de la resistividad de la grava sea superior al correspondiente a la arena y que el de esta supere al de la arcilla.

Los suelos de grano grueso (gravas, guijarros, entre otros) se prestan mal al establecimiento de buenas redes de tierra, circunstancia que se puede disminuir

<sup>29</sup> GARCÍA MÁRQUEZ, Rogelio. *Puesta a tierra de instalaciones eléctrica*. p. 15.

rodeando la superficie de los electrodos de un cierto espesor de tierra fina o de otro material relativamente conductor.<sup>30</sup>

## 2.25. Compacidad

La resistividad se ve también afectada por el grado de compactación del terreno, disminuyendo al aumentar este.

“Se procurará utilizar las capas de tierra más conductoras, haciéndose la colocación de electrodos con el mayor cuidado posible en cuanto a la compactación del terreno”.<sup>31</sup>

## 2.26. Estratigrafía

La resistividad total de un terreno es la resultante de las correspondientes capas que lo constituyan. Puede suceder que una sola capa presente una resistividad tan baja que la influencia de las demás sea imperceptible, tal como cuando se alcanzan zonas de agua o el nivel freático.

Queda, pues, justificado que la resistividad de las capas superficiales de un terreno presente variaciones estacionales bajo el efecto del hielo y de la sequedad (que la aumentan) o de la humedad (que la disminuye). Esta acción puede hacerse notar hasta una profundidad de varios metros, en condiciones climáticas extremas y prolongadas.

Será, por tanto, prudente tener en cuenta estas variaciones, de resistividad en el establecimiento de una red de tierras enterrada a una profundidad del orden de 1 metro.

Puede concluirse en que claramente se ve que la resistividad del terreno es una magnitud variable y que el único camino aceptable para conocer su valor consistirá en medirla, lo que permitirá establecer su magnitud en las condiciones existentes en cada caso.<sup>32</sup>

---

<sup>30</sup> GARCÍA MÁRQUEZ, Rogelio. *Puesta a tierra de instalaciones eléctrica*. p. 17.

<sup>31</sup> *Ibíd.*

<sup>32</sup> *Ibíd.*

## 2.27. Otros factores

La resistividad del suelo es, en ausencia de efectos secundarios, prácticamente independiente de la intensidad de la corriente que lo recorre, propiedad de la que se hará uso más adelante. En el capítulo referente a mediciones, para la utilización de intensidades débiles en las comprobaciones en las tenciones de seguridad, para extrapolar esos resultados a regímenes de corriente mucho más importantes.<sup>33</sup>

Existen, sin embargo, otros factores distintos de los ya enumerados que son susceptibles de modificar apreciablemente la resistividad del terreno pero que, por su naturaleza eléctrica, solo pueden surgir posteriormente al establecimiento de la red de tierra, tales como:

- El efecto causado por el gradiente de potencial elevado.
- El calentamiento del suelo a consecuencia de la circulación de corrientes de puesta a tierra elevadas o de forma prolongada.
- Gradientes de potencial elevados.

Cuando el contacto entre un electrodo y el suelo, no es el adecuado puede establecerse en condiciones de circulación de corriente de defecto y a partir de un cierto valor, pequeñas descargas que franqueando las delgadas capas aislantes que separen los dos medios, contribuyan a igualar los potenciales de ambos. La resistencia del sistema de puesta a tierra arrojaría, en estas condiciones, valores inferiores a los que se hubieran obtenido cuando no se está produciendo el fenómeno, acusándose principalmente esta reducción en instalaciones de puesta a tierra de pequeñas dimensiones.

Para magnitudes de la corriente de puesta a tierra son muy importantes, el gradiente de potencial puede llegar, en las proximidades inmediatas de los electrodos, hasta alcanzar valores que provoquen la perforación del suelo, dando lugar a la formación de uno o varios arcos que, a partir de puntos del electrodo, se propaguen a través del suelo en diversas direcciones y con eventuales ramificaciones, hasta que se deje de verificar la superación del nivel de tensión crítico (algunos kV/cm).

Prescindiendo de la caída de tensión en los arcos, la traducción de este efecto que solo será apreciable en el caso de electrodos de pequeñas dimensiones es prolongar, de alguna manera, las dimensiones de estos, que se comportarán como si fueran de mayor tamaño o bien se hubiera reducido la resistividad del

---

<sup>33</sup> GARCÍA MÁRQUEZ, Rogelio. *Puesta a tierra de instalaciones eléctrica*. p. 18.

suelo, pero por diseño, debe evitarse el establecimiento de tales descargas porque deterioran rápidamente los electrodos. Tampoco desde el punto de vista de las descargas atmosféricas, es posible beneficiarse de lo anterior porque la velocidad de propagación de los arcos en el suelo es muy lenta para ser tenida en cuenta durante la breve duración del abrupto frente de la descarga del rayo.<sup>34</sup>

- Calentamiento del suelo por circulación de corrientes elevadas

El calentamiento del suelo tiende a aumentar su conductividad mientras no vaya acompañado de evaporación. La resistividad de una capa de terreno puede disminuir en una relación de 2 a 1 para temperaturas entre algunos grados y 20 a 25 °C, y en una relación del mismo orden entre 20 y 80 °C.

La cantidad de calor que se genera en un electrodo puede considerarse que se divide en dos partes: la acumulada en el volumen de suelo en contacto directo con el mismo, (terreno que presenta un calor específico medio,  $\gamma$ , de  $1\,075,10 \text{ WS}/\text{M}^3 \cdot ^\circ\text{C}$ ). Y otra parte que la absorben, las capas circundantes más frías, circulando a través del terreno ( que tiene una conductividad calorífica,  $A$ , del orden de  $\text{W}\cdot\text{m}^\circ\text{C}$ ).

El efecto inicial de una circulación prolongada de corriente por una toma de tierra es disminuir su resistencia, con una importancia que depende de la contribución al valor total de la misma de las capas de terreno próximas, pero que no es apreciable más que para las tomas de tierra de dimensiones pequeñas.

Sin embargo, las corrientes que se presentan normalmente en las instalaciones de puesta a tierra son de corta duración, aunque a veces sean de gran magnitud, así que la influencia de la conductividad calorífica del terreno es, prácticamente, despreciable y solo el calor específico determina la energía que puede disiparse en una toma de tierra, siendo la elevación de temperatura proporcional al tiempo.

La temperatura es máxima en la proximidad inmediata del electrodo, convirtiéndose las condiciones en críticas cuando se acerca a 100°C, al provocarse la evaporización rápida del agua obstruida y dejará al electrodo en contacto con una capa deshidratada muy resistente e incluso, llegar a producir la calcinación del terreno a su alrededor. La toma de tierra pierde entonces su poder de evacuación y entonces tiende a subir su potencial hasta la tensión simple de la red, situación evidentemente peligrosa. Puede evitarse que se produzca la

---

<sup>34</sup> GARCÍA MÁRQUEZ, Rogelio. *Puesta a tierra de instalaciones eléctrica*. p. 18.

evaporación si las protecciones de la red eliminan la corriente de defecto inicial en un tiempo t, tal que limiten la corriente i, evacuada por metro al valor aproximado de:

$$i = \pi d * \sqrt{\frac{\gamma^{\theta}}{\rho t}} = \pi d * \frac{\sqrt{1\ 75\ 10^6 * 10^2}}{\sqrt{\rho t}} = 4\ 156,10^4 \frac{d}{\sqrt{\rho t}} \text{ A/m}$$

Expresión en que (d) es el diámetro, en metros, del electrodo. “se tendrán en cuenta las variaciones posibles de las características del suelo en épocas secas y después de haber sufrido corrientes de defecto elevadas.”<sup>35</sup>

## 2.28. Potenciales y gradientes

Antes de abordar el capítulo referente a la medida de la resistividad del terreno- continuación lógica del anterior, en el cual se ha tratado este relevante factor las causas de su variabilidad, es conveniente considerar describir la forma general en que se propagan las líneas de corriente por el terreno y las diferencias de potencial y gradientes eléctricos que, en torno a los sistemas de puesta a tierra, se generan, conceptos fundamentales en que se apoyan los métodos utilizados para realizar las mediciones.<sup>36</sup>

### 2.28.1. Circulación de corriente por el suelo

Ya se ha mencionado que el terreno, medio de tres dimensiones, posee, generalmente, naturaleza heterogénea.

En razón al conocimiento tan imperfecto que se posee de su resistividad y de las posibles variaciones de esta, tanto en sentido horizontal como en profundidad, no es posible abordar un cálculo preciso de la distribución de las corrientes que lo recorren. Y hay que tomar la opción con evaluaciones sencillas cuyo grado de aproximación esté en relación con la incertidumbre de los parámetros de que depende.

De una manera general, haciendo referencia, por ejemplo, a la corriente que se está derivando por una toma de tierra a causa de una línea que presente

---

<sup>35</sup> GARCÍA MÁRQUEZ, Rogelio. *Puesta a tierra de instalaciones eléctrica*. p. 19.

<sup>36</sup> *Ibíd.*

un defecto, puede observarse que busca la vuelta al circuito por las vías que minimicen la impedancia del recorrido.

Alrededor de la toma de tierra, empieza por extenderse en todas las direcciones que se le ofrecen, sin doblarse, después, los filetes de corriente que a concentrarse en una zona subyacente al trayecto de la línea considerada.

La distribución que se siga es fruto de dos factores opuestos: por un lado, una amplia dilución de los filetes de corriente reduce las caídas óhmicas, mientras que, por otro, el máximo acercamiento posible al conductor que presenta la falta minimiza la inductancia del bucle que con él constituyen. La solución resultante corresponde al régimen en que los dos efectos se contrarresten.

Las corrientes tienden a penetrar más profundamente en el suelo cuando más elevada sea la conductividad de este y por el contrario, se reúnen hacia la superficie a medida que la frecuencia, es más alta. En definitiva, a 60 Hz, las capas de filetes de corrientes de retorno por el suelo pueden asimilarse a un conductor difuso único, situado a una profundidad que va desde algunos centenaes hasta mil o dos mil metros, según la resistividad del terreno.

La importante profundidad a la cual penetran los filetes de corriente permite considerar que la zona donde radialmente se expande la corriente en torno a la toma de tierra, se extiende hasta una gran distancia con respecto a las dimensiones de aquella, aceptándose, en esos casos, que el retorno por el suelo puede asimilarse a un conductor difuso único, situado a una profundidad que va desde algunos centenaes hasta mil o dos mil metros, según la resistividad del terreno.

La importante profundidad a la cual penetran los filetes de corriente permite considerar que la zona donde radialmente se expanden en torno a la toma de tierra se extiende hasta una gran distancia con respecto a las dimensiones de aquella, aceptándose, en esos casos, que el retorno de corrientes se efectúa a una distancia infinita de las tomas de tierra y en todas las direcciones.

No obstante, también puede contemplarse el retorno de corriente por otra red de tierra más o menos alejada, como sucede, por ejemplo, en el caso de la medición del valor de la resistencia de una puesta a tierra.<sup>37</sup>

## **2.29. Reparto de potenciales en una red de tierra con retorno de corriente en el infinito**

El razonamiento se efectuará, por simplicidad, sobre el tipo de electrodo más cómodo enterrado en la superficie de un terreno homogéneo, de resistividad  $\rho$ .

“Los filetes de corriente se distribuirán radialmente en todas las direcciones, determinando superficies equipotenciales que serán semiesferas concéntricas con la del electrodo y cuyas intersecciones con la superficie del suelo o trazas, tendrán forma circular.”<sup>38</sup>

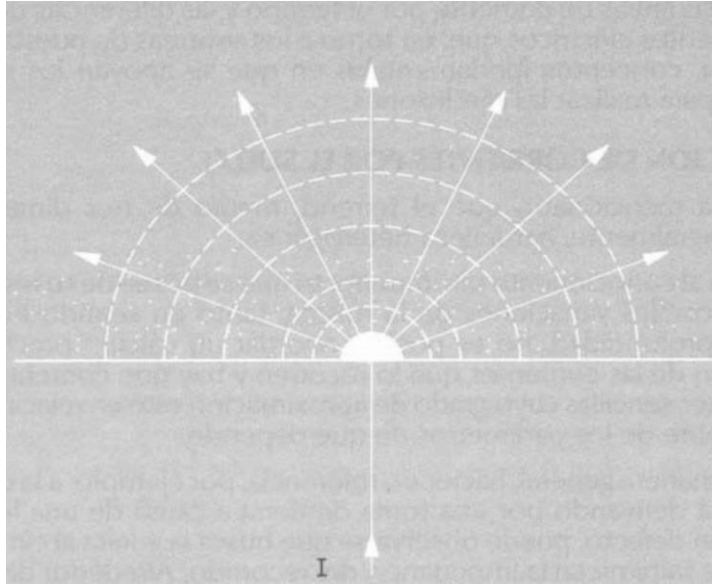
---

<sup>37</sup> GARCÍA MÁRQUEZ, Rogelio. *Puesta a tierra de instalaciones eléctrica*. p. 19.

<sup>38</sup> *Ibíd.* p. 21.



Figura 11. **El electrodo esférico**



Fuente: GARCÍA MÁRQUEZ, Rogelio. *Puesta a tierra de instalaciones eléctrica*. p. 21.

En la figura 11 el electrodo esférico es el más simple por ser simétrico en todas las direcciones y al enterrar solo el hemisferio inferior, todavía se simplifica más su análisis, en un terreno homogéneo, las líneas de corriente se esparcirán radialmente, en todas las direcciones si se inyecta una corriente I.

Si el valor de la corriente de puesta a tierra es I (A), la densidad de corriente, i, a una distancia X (m) del centro, será:

$$i: \frac{I}{S} = \frac{I}{2\pi \cdot x^2} \quad (\text{A/m})$$

El valor del campo eléctrico, E, (o gradiente de potencial), que se creará en ese lugar vendrá dado por:

$$E = G = \frac{dU}{dx} = \rho * i = \rho * \frac{I}{2\pi * x^2} \quad (\text{V/m})$$

De manera que la diferencia de potencial entre el electrodo, de radio r, y el punto considerado,  $U_r - x'$ .

$$U_{r-x} = \int_r^x e * dx = \int_r^x \frac{\rho I}{2\pi} * \int_r^x \frac{dx}{x^2} = \frac{\rho I}{2\pi} * \left[ -\frac{1}{x} \right]_r^x$$

$$\frac{\rho I}{2\pi} * \left[ -\frac{1}{x} - \left( -\frac{1}{r} \right) \right] = \frac{\rho I}{2\pi} * \left( \frac{1}{r} - \frac{1}{x} \right) \quad (\text{V})$$

El potencial absoluto del electrodo con respecto a un punto de referencia infinitamente alejado (“tierra lejana”), tendrá por expresión:

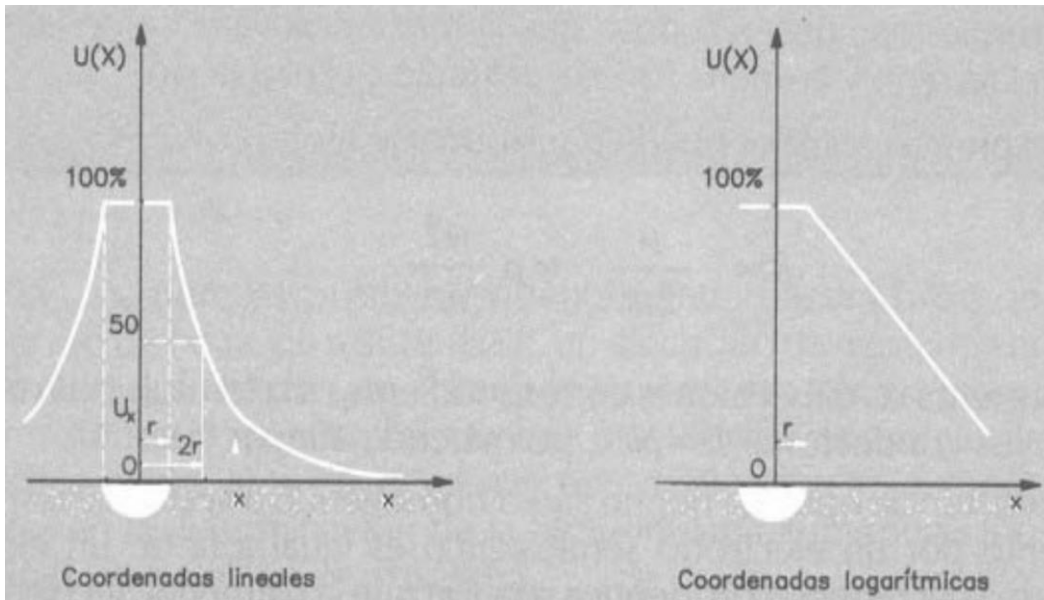
$$U_{r-x} = \frac{\rho I}{2\pi} \left( \frac{1}{r} - \frac{1}{\infty} \right) = \frac{\rho I}{2\pi r} = 0,16 * \frac{\rho I}{r} \quad (\text{V})$$

Y, análogamente, para cualquier punto que diste X del electrodo, podrá escribirse que el potencial absoluto es:

$$U_x = \frac{\rho I}{2\pi x} = 0,16 * \frac{\rho I}{x} \quad (\text{V})$$

De forma que, para una corriente de defecto y un terreno determinado, varía inversamente proporcional a su distancia al centro del electrodo, con independencia del radio de este siendo la curva que representa su variación una hipérbola (figura 12). Puede apreciarse que el valor de la tensión absoluta del electrodo se reduce a la mitad para puntos que disten de la periferia de este una distancia igual al radio.

Figura 12. **El electrodo semiesférico**



Fuente: GARCÍA MÁRQUEZ, Rogelio. *Puesta a tierra de instalaciones eléctricas*. p. 22.

En la figura 12 se representa, utilizando coordenadas lineales, un perfil del potencial que adquiere respecto a un punto de referencia, infinitamente alejado, a potencial cero. Obsérvese cómo a la distancia  $2r$  del centro, el potencial se ha reducido a la mitad de su valor. A la derecha, la misma representación en coordenadas logarítmica.

El gradiente, sin embargo, aunque tampoco depende de las dimensiones del electrodo, se ha visto que, para una corriente dada, varía con el inverso del cuadrado de la distancia al centro, por lo que decrece muy rápidamente.

El electrodo semiesférico posee una resistencia que se puede determinar por el cociente de su potencial absoluto y la intensidad que lo recorre, esto es:

$$R = \frac{U_{R-\infty}}{I} = \frac{\rho I}{2\pi I} = \frac{\rho}{2\pi} = 0.16 * \frac{\rho}{r} (\Omega)$$

Igual, por tanto, al cociente entre la resistividad del terreno y el perímetro de la semiesfera, observándose que la resistencia varía como la resistividad del terreno y como la inversa del radio del electrodo.

La expresión anterior puede ser transformada a:

$$R = \frac{\rho}{2\pi r} = \rho \frac{r/2}{\pi r^2}$$

Que presenta las dimensiones a la fórmula de la resistencia de los conductores ( $R=\rho/l/s$ ), permitiendo afirmar que:

La resistencia opuesta por un suelo homogéneo a la circulación de una corriente por un electrodo semiesférico es igual a la de un elemento cilíndrico del terreno con idéntica sección que la diametral del electrodo y con una longitud o altura igual a la mitad del radio del electrodo.<sup>39</sup>

Sin embargo, los electrodos semiesféricos apenas se emplean ya que sus formas recogidas producen una mala utilización del metal y es preferible hacer que este tenga una zona de contacto mucho más extensa con el terreno.

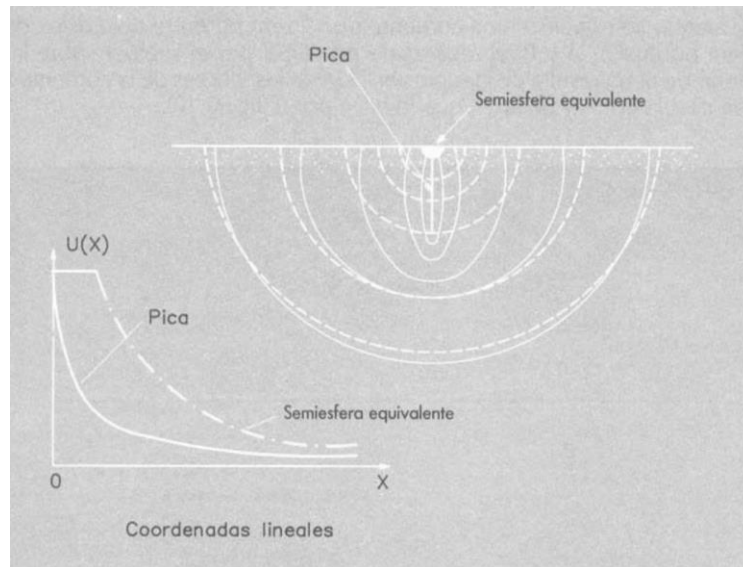
En esos casos, el perfil de las superficies equipotenciales evoluciona con su alejamiento del electrodo, adoptando una forma tanto más parecida al electrodo como más próximas estén de él y proporciones diferentes de la semiesfera como el electrodo considerado sea de una forma más compacta, pero, en terreno homogéneo, es importante remarcar que, por irregular que sea la forma del electrodo de tierra, las mediciones superficiales tenderán siempre a acercarse a la que presenta la semiesfera a medida que se alejen del electrodo.<sup>40</sup>

---

<sup>39</sup> GARCÍA MÁRQUEZ, Rogelio. *Puesta a tierra de instalaciones eléctrica*. p. 23.

<sup>40</sup> Ibí.

Figura 13. **Superficies equipotenciales y reparto de potencial alrededor de una pica y su electrodo semiesférico equivalente**



Fuente: GARCÍA MÁRQUEZ, Rogelio. *Puesta a tierra de instalaciones eléctrica*. p. 15.

En la figura 13, a distancias pequeñas de la pica, las superficies equipotenciales respetan su forma fina, pero en el alejamiento, van tendiendo a las de la semiesfera.

Además, siempre es posible, evidentemente, hacer corresponder a cualquier red de tierra, de resistencia  $R$ , un electrodo semiesférico equivalente de radio  $r_h$  de forma que, enterado en el mismo terreno, presente la misma resistencia de puesta a tierra y que recorrido por la misma corriente de puesta a tierra, alcance el mismo potencial, aspecto que adquiere relevancia en la determinación de la profundidad de la investigación de la resistividad, como allí ya se expondrá.

En suelo homogéneo, el radio del electrodo semiesférico equivalente es:

$$r_h = \frac{\rho}{2\pi R} \quad (\text{m})$$

- Nota

“El radio del electrodo semiesférico equivalente será intermedio entre las tres dimensiones del electrodo real. Una pica: es equivalente a una semiesfera de radio próximo a un sexto de su longitud y a una placa superficial semiesférica de un radio equivalente al 65 % de su proporción.

Por otro lado, es evidente que la resistencia de un electrodo cualquiera será superior a la de todo electrodo semiesférico circunscrito”.<sup>41</sup>

### **2.30. Reparto de potenciales en una red de tierra con retorno de corriente por otra**

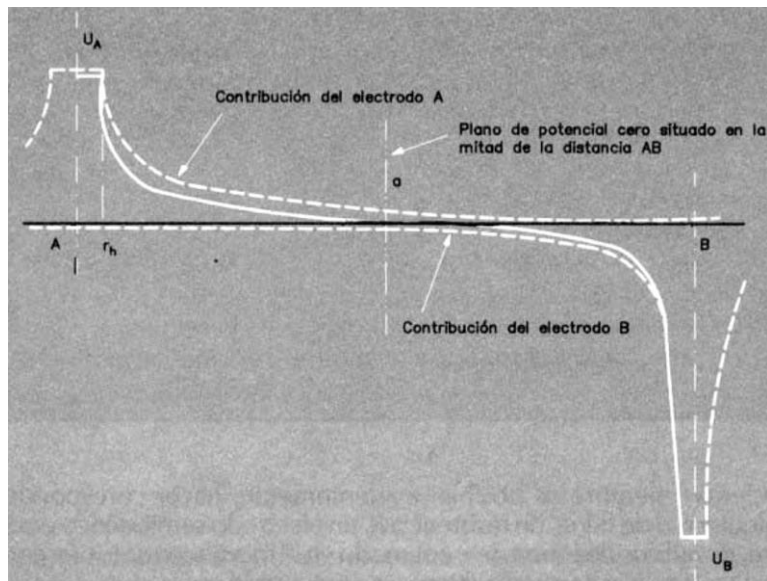
“Cuando se establece una corriente por el terreno entre dos tomas de tierra puntuales, A Y B, el reparto de potencial por el suelo y sobre las tomas de tierra resulta de la superposición de los efectos de la corriente I, que circula por A y de la -I, que circula por A y de la -I, que lo hace por B”.<sup>42</sup>

---

<sup>41</sup> GARCÍA MÁRQUEZ, Rogelio. *Puesta a tierra de instalaciones eléctrica*. p. 24.

<sup>42</sup> *Ibíd.*

Figura 14. Reparto de potenciales en un terreno homogéneo



Fuente: GARCÍA MÁRQUEZ, Rogelio. *Puesta a tierra de instalaciones eléctricas*. p. 24.

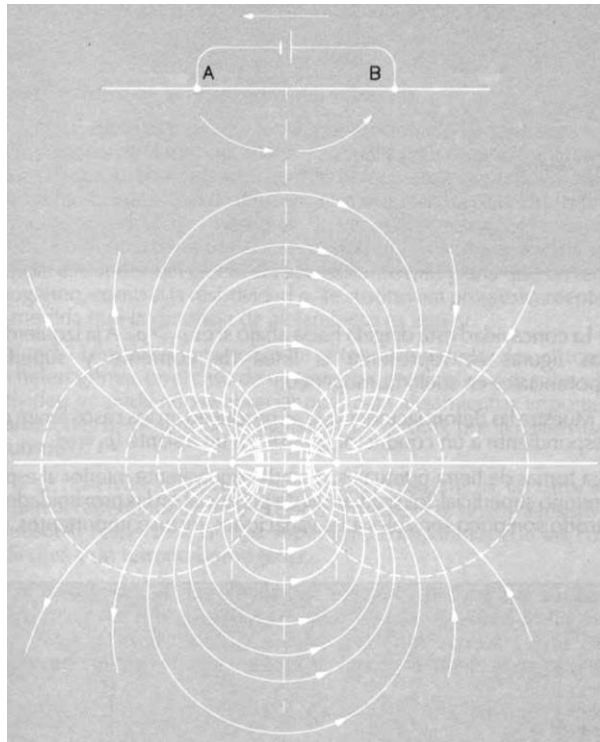
Figura 14 reparto de potenciales en un terreno homogéneo, para dos tomas de tierra puntuales, A y B, entre las cuales circula una corriente. El perfil resultante, en trazo continuo, es el obtenido al sobreponer los potenciales individuales correspondientes a A y B, bajo la circulación de las corrientes  $I$  y  $-I$ , respectivamente.

En la proximidad de cada electrodo, el reparto de potencial difiere en menor proporción del que tendría en ausencia del otro electrodo, como alejándose de él.

En el caso de un terreno homogéneo y de dos electrodos de dimensiones pequeñas respecto a su alejamiento, la distribución de las superficies equipotenciales se establece como se muestra en la figura 15.

Las superficies equipotenciales son idénticas a las que se originarían por dos cargas eléctricas iguales y de signos contrarios.

Figura 15. **Distribución de las superficies equipotenciales**



Fuente: GARCÍA MÁRQUEZ, Rogelio. *Puesta a tierra de instalaciones eléctrica*. p. 25.

Para las tomas anteriores, la distribución de las superficies equipotenciales (líneas de trazos), serían idénticas a las que producirían dos cargas eléctricas iguales y de signos contrarios. Las líneas de corriente se han dibujado con trazo continuo.



## 2.31. Deformación de las superficies equipotenciales en un suelo heterogéneo

Cuando el subsuelo no es homogéneo, las superficies equipotenciales no son semiesféricas, sino que se deforman en función de las variaciones de la resistividad del suelo.

Así, razonando sobre el caso simple de un suelo superficial, de espesor  $H$ , resistividad  $\rho_1$ , y un subsuelo homogéneo indefinido, de resistividad diferente,  $\rho_2$ , se tendrá que si el subsuelo es más conductor que el terreno superficial y está a una profundidad insuficiente, tenderá a inflexionar hacia abajo, los filetes de corriente que salen del electrodo, mientras más resistentes, los dirigirá hacia la superficie, dificultando su expansión en profundidad (figura 16). De forma que penetrarán lentamente en el suelo que cuando este es homogéneo.

- Si el terreno superficial tiene una resistencia  $\rho_1$ , inferior a la del subsuelo,  $\rho_2$ , las líneas de la corriente presentan una concavidad dirigida hacia arriba.
- La concavidad está dirigida hacia abajo si es  $\rho_1 > \rho_2$ , a la izquierda de ambas figuras se representa la línea de corriente y superficies equipotenciales en suelo homogéneo.
- Muestra las deformaciones, que se producen en los casos límite de  $\rho_2$ , correspondiente a un conductor ( $\rho_2 = 0$ ) o a un aislante ( $\rho_2 = \infty$ ).

Para las mediciones de tierra puntuales, de radio equivalente inferior al espesor del terreno superficial, los gradientes de potencial en las proximidades del electrodo son poco sensibles a las variaciones, incluso importantes, de la resistividad del subsuelo y prácticamente los mismos que si el suelo fuera homogéneo y de resistividad  $\rho$ .

Sin embargo, para distancias iguales o superiores al espesor  $H$ , del suelo superficial, la ley de variación del potencial del terreno está muy afectada por la resistividad del subsuelo:

- Si este es muy conductor, la mayor parte de los filetes de corriente no tardan en abandonar la capa superficial, disminuyendo rápidamente la tensión alrededor del electrodo, que se acerca a la expresión:

$$U_x = \rho_2 \frac{I}{2\pi x} \quad (V)$$

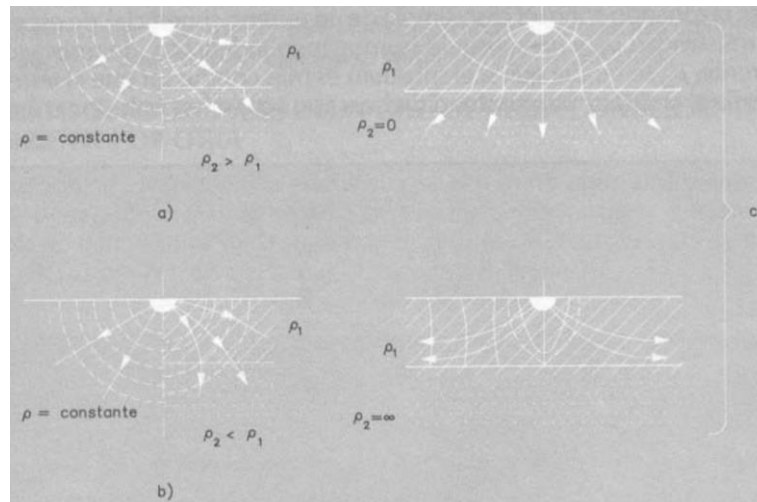
Función exclusiva de la resistividad del suelo.

- Si el subsuelo es muy resistente, por el contrario, las tensiones estarán dadas a los valores de la fórmula anterior para una gran distancia ( $V$ ). Conservando los filetes de corriente mucho más tiempo en la capa superficial que desempeña un papel de difusor, la corriente que circula todavía por ella es la mitad de la corriente, cuando la distancia es  $\frac{\rho_2}{\rho_1}$  veces

el espesor H. Esta trayectoria de las corrientes tiene por consecuencia que la curva de variación del potencial alrededor del electrodo, sea bastante más plana que en terreno homogéneo, como si la resistividad  $\rho_2$  se sustituyera progresivamente por  $\rho_1$ , a medida que la distancia de separación es mayor.<sup>43</sup>

La figura 16 ilustra las variaciones de potencial alrededor de una toma de tierra heterogénea, en el caso de un terreno superficial  $\rho_1$  y un subsuelo de resistividad  $\rho_2$ , se puede apreciar que, para separaciones pronunciadas, las variaciones de potencial están fijadas, sobre todo, por la resistividad  $\rho_2$  del subsuelo.

Figura 16. **Deformación de las superficies equipotenciales alrededor de una medición de tierras según las variaciones de resistividad de un terreno homogéneo**



Fuente: GARCÍA MÁRQUEZ, Rogelio. *Puesta a tierra de instalaciones eléctricas*. p. 26.

En la figura se observa, utilizando coordenadas logarítmicas, las variaciones de potencial alrededor de un electrodo semiesférico, según la

<sup>43</sup> GARCÍA MÁRQUEZ, Rogelio. *Puesta a tierra de instalaciones eléctricas*. p. 26.

resistividad del subsuelo respecto a la capa superficial, comparadas con las correspondientes a un terreno homogéneo.

En la figura mediante coordenadas lineales, se efectúa esa comparación para el caso concreto de que  $\rho_2 = 10$  y  $\rho_1 =$  -curva 1 y la obtenida en un medio homogéneo de resistividad  $\rho_1 =$  - curva 2. Entre ambas curvas, se ha representado el caso en que el espesor  $H \cong r$  en la hipótesis de  $\rho_2 = 10 \rho_1$ .

### 3. MEDIDA DE LA RESISTIVIDAD DEL TERRENO

A la luz del conocimiento cualitativo de cómo circulan por el suelo las corrientes eléctricas, se analizaron los procedimientos utilizados para llevar a cabo las mediciones de resistividad de los suelos.

#### 3.1. Introducción

La instalación de puesta a tierra requiere conocer previamente el perfil de la resistividad del suelo según la profundidad, de esta forma facilita la elección de la disposición de los electrodos de tierra.

Para realizar un proyecto de una instalación de puesta a tierra, las instalaciones de tercera categoría y de intensidad de cortocircuito a tierra inferior o igual a 1 kA, no es imprescindible realizar la citada investigación previa de la resistividad del suelo.

Debe resaltarse, no obstante, que la estimación de la resistividad con base en la clasificación del suelo involucrado, la dificultad de situarlo en el período geológico correspondiente a su formación y consiguiente utilización de tablas con una gama amplia de valores para un terreno determinado, esto puede dar lugar a grandes errores, que obligan a correcciones posteriores, por lo que teniendo presente la relativa simplicidad para establecer la resistividad media por métodos sancionados por la práctica, es aconsejable realizar siempre, incluso en las instalaciones de tercera categoría, las medidas necesarias para determinar el valor de la resistividad.<sup>44</sup>

---

<sup>44</sup> PÉREZ LOARCA, Walter Esaú; SERRANO BARRIOS, Christian Javier; SURIO GUEVARA, Oscar Orlando. *Manual de aplicación de la Norma IEEE*. p. 21.

### **3.2. Métodos de medida**

Existen diversos métodos para determinar la resistividad de un terreno pudiendo citarse, en primer lugar, el basado en toma de muestras y el de los dos electrodos, pero estos a su vez solo proporcionan indicaciones muy locales y, consecuentemente, insuficientes o engañosas para la concepción de las tomas de tierra.

En algunas ocasiones, se utiliza el sistema consistente en medir la resistencia de tierra de un electrodo que responda a una fórmula bien conocida (pica, por ejemplo) para determinar, la resistividad del terreno que la rodea, método que tiene la ventaja de proporcionar una medida global pero cuya aplicación no resulta adecuada, más que si la toma de tierra a implantar con las dimensiones comparables a la de los electrodos utilizados como referencia.

Por otra parte, los electrodos de medida también poseen resistencia de tierra y su valor puede ser considerablemente más alto que el que se desea medir, de forma análoga a como ocurre cuando se tienen que efectuar mediciones de resistencias metálicas muy bajas con resistencia de contacto comparables con ella, la mejor solución es utilizar el método de Wenner.

#### **3.2.1. Método de los cuatro electrodos**

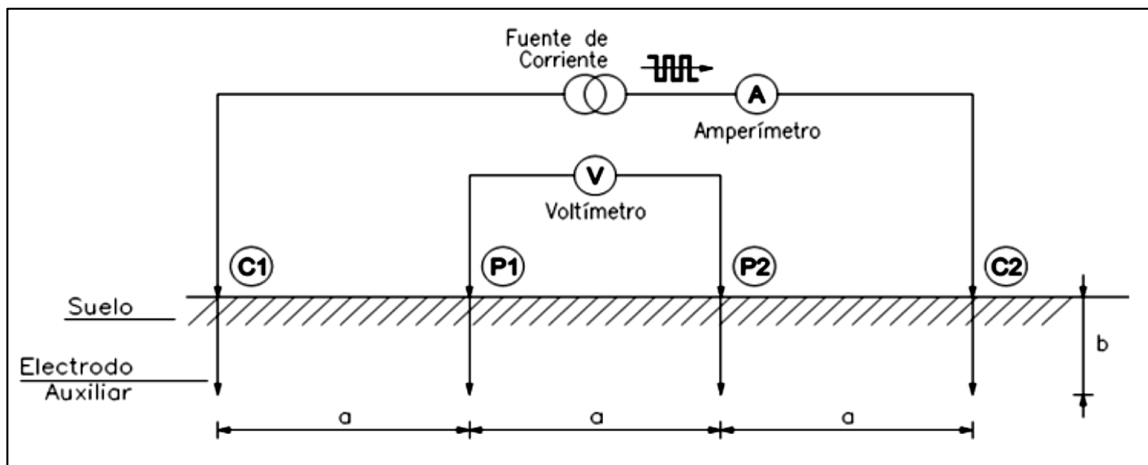
Es utilizado para determinar la resistividad del terreno. En este procedimiento se establece la resistividad, en función de la profundidad, en la vertical de un punto O haciendo circular una corriente ( $I$ ), con ayuda de un generador ( $G$ ) entre dos electrodos puntuales, de pequeñas dimensiones colocados en el suelo.

### 3.2.2. Método de Wenner

Las mediciones de resistividad en el presente trabajo se realizaron con base en el método de wenner, el cual es un caso particular del método de los cuatro electrodos, que se disponen en línea recta y equidistantes simétricamente respecto al punto en el que se desea medir la resistividad del suelo, no es necesario que la profundidad de las piquetas, que para ello se utilizan, sobrepase los 30 cm.

El aparato de medida es un telurómetro digital con cuatro terminales, siendo las primeras dos extremos las de inyección de corriente (C1 y C2) y las dos centrales restantes los electrodos de medida de potencial (P1 y P2); en la figura 17 se muestra el esquema general de la disposición del equipo utilizado para la medición.

Figura 17. Esquema general de medición método de Wenner



Fuente: elaboración propia, empleando AutoCAD 2016.

Una corriente  $I$  es inyectada entre los dos electrodos externos y potencial  $V$  entre los dos electrodos internos es medido por el instrumento. El instrumento mide la resistencia  $R = \frac{V}{I}$  del volumen de suelo cilíndrico de radio  $a$  encerrado entre los electrodos internos. La resistividad aparente del suelo  $\rho$ , a la profundidad “ $a$ ” es aproximada por la siguiente ecuación.

$$\rho = \frac{4\pi a R}{1 + \frac{2a}{\sqrt{a^2 + 4b^2}} - \frac{a}{\sqrt{a^2 + b^2}}}$$

Donde  $b$  corresponde a la profundidad de enterramiento de las picas. Dado que en la práctica  $a$  es mucho mayor de  $b$  ( $a \gg b$ ) la expresión se simplifica tal como se muestra a continuación:

$$\rho = 2\pi a R$$

Donde:

- $R$ : valor de resistencia medida [ $\Omega$ ]
- $a$ : distancia entre dos electrodos adyacentes [ $m$ ]
- $b$ : profundidad de enterramiento de los electrodos [ $m$ ]

Con los datos obtenidos en campo se procederá a calcular la resistividad  $\rho$  a las diferentes distancias “ $a$ ”.

### 3.3. Cálculo de la resistividad aparente del suelo con datos tomados en campo a un metro de distancia

A medida de ejemplo se tomaron datos en campo utilizando el método de Wenner.

Partiendo de la fórmula descrita con anterioridad a modo de ejemplo se encontró analíticamente la resistividad aparente del suelo partiendo de los datos extraídos en campo, medición a 1 metro de distancia.

Figura 18. **Fotografías tomadas en campo, para el cálculo de la resistividad aparente del suelo medición a 1 metro en paralelo**



Fuente: elaboración propia.

Donde:

- R: 10,73 [ $\Omega$ ]
- a: 1 [ $m$ ]



- b: 0,3 [m]

$$\rho = \frac{4\pi(1)(10,73)}{1 + \frac{2(1)}{\sqrt{1^2 + 4(0,3)^2}} - \frac{(1)}{\sqrt{(1)^2 + (0,3)^2}}} = 76,74$$

Figura 19. **Fotografías tomadas en campo, para el cálculo de la resistividad aparente del suelo medición a 1 metro 90 grados**



Fuente: elaboración propia.

Donde:

- R: 34,4 [Ω]
- a: 1 [m]
- b: 0,3 [m]

$$\rho = \frac{4\pi(1)(6,01)}{1 + \frac{2(1)}{\sqrt{1^2 + 4(0,3)^2}} - \frac{(1)}{\sqrt{(1)^2 + (0,3)^2}}} = 246,01$$

Figura 20. **Fotografías tomadas en campo, para el cálculo de la resistividad aparente del suelo medición a 1 metro 45 grados**



Fuente: elaboración propia.

Donde:

- R: 26,1 [ $\Omega$ ]
- a: 1 [m]
- b: 0,3 [m]

$$\rho = \frac{4\pi(1)(26,1)}{1 + \frac{2(1)}{\sqrt{1^2 + 4(0,3)^2}} - \frac{(1)}{\sqrt{(1)^2 + (0,3)^2}}} = 186,65$$

### 3.4. **Cálculo de la resistividad aparente del suelo con los datos tomados en campo a 2 metros de distancia**

Partiendo de la formula descrita con anterioridad a modo de ejemplo se encontró analíticamente la resistividad aparente del suelo partiendo de los datos extraídos en campo, medición a 2 metros de distancia.

Figura 21. **Fotografías tomadas en campo, para el cálculo de la resistividad aparente del suelo medición a 2 metros en paralelo**



Fuente: elaboración propia.

Donde:

- R: 6,01 [ $\Omega$ ]
- a: 2 [m]
- b: 0,3 [m]

$$\rho = \frac{4\pi(2)(6,01)}{1 + \frac{2(2)}{\sqrt{(2)^2 + 4(0,3)^2}} - \frac{(2)}{\sqrt{(2)^2 + (0,3)^2}}} = 78,40$$

Figura 22. **Fotografías tomadas en campo para el cálculo de la resistividad aparente del suelo medición a 2 metros 90 grados**



Fuente: elaboración propia.

Donde:

- R: 18,76 [ $\Omega$ ]
- a: 2 [m]
- b: 0,3 [m]

$$\rho = \frac{4\pi(2)(18,76)}{1 + \frac{2(2)}{\sqrt{(2)^2 + 4(0,3)^2}} - \frac{(2)}{\sqrt{(2)^2 + (0,3)^2}}} = 244,71$$

Figura 23. **Fotografías tomadas en campo, para el cálculo de la resistividad aparente del suelo medición a 2 metros 45 grados**



Fuente: elaboración propia.

Donde:

- R: 13,98 [ $\Omega$ ]
- a: 2 [m]
- b: 0,3 [m]

$$\rho = \frac{4\pi(2)(13,98)}{1 + \frac{2(2)}{\sqrt{(2)^2 + 4(0,3)^2}} - \frac{(2)}{\sqrt{(2)^2 + (0,3)^2}}} = 182,36$$

### 3.5. Cálculo de la resistividad aparente del suelo con los datos tomados en campo, a tres metros de distancia

Partiendo de la fórmula descrita con anterioridad a modo de ejemplo se encontró analíticamente la resistividad aparente del suelo partiendo de los datos extraídos en campo, medición a 3 metros de distancia.

Figura 24. **Fotografías tomadas en campo para el cálculo de la resistividad aparente del suelo medición a 3 metros en paralelo**



Fuente: elaboración propia.

Donde:

- R: 3,78 [ $\Omega$ ]
- a: 3 [m]
- b: 0,3 [m]

$$\rho = \frac{4\pi(3)(3,78)}{1 + \frac{2(3)}{\sqrt{(3)^2 + 4(0,3)^2}} - \frac{(3)}{\sqrt{(3)^2 + (0,3)^2}}} = 72,48$$

Figura 25. Fotografías tomadas en campo para el cálculo de la resistividad aparente del suelo medición a 3 metros 90 grados



Fuente: elaboración propia.

Donde:

- R: 9,12 [ $\Omega$ ]
- a: 3 [ $m$ ]
- b: 0,3 [ $m$ ]

$$\rho = \frac{4\pi(3)(9,12)}{1 + \frac{2(3)}{\sqrt{(3)^2 + 4(0,3)^2}} - \frac{(3)}{\sqrt{(3)^2 + (0,3)^2}}} = 174,87$$

Figura 26. **Fotografías tomadas en campo para el cálculo de la resistividad aparente del suelo medición a 3 metros 45 grados**



Fuente: elaboración propia.

Donde:

- R: 9 [Ω]
- a: 3 [m]
- b: 0,3 [m]

$$\rho = \frac{4\pi(3)(9)}{1 + \frac{2(3)}{\sqrt{(3)^2 + 4(0,3)^2}} - \frac{(3)}{\sqrt{(3)^2 + (0,3)^2}}} = 172,57$$



### 3.6. Cálculo de la resistividad aparente del suelo con los datos tomados en campo a cuatro metros de distancia

Partiendo de la fórmula descrita con anterioridad a modo de ejemplo se encontró analíticamente la resistividad aparente del suelo partiendo de los datos extraídos en campo, medición a 4 metros de distancia.

Figura 27. Fotografías tomadas en campo, para el cálculo de la resistividad aparente del suelo medición 4 metros en paralelo



Fuente: elaboración propia.

Donde:

- R: 3,92 [ $\Omega$ ]
- a: 4 [ $m$ ]
- b: 0,3 [ $m$ ]

$$\rho = \frac{4\pi(4)(3,92)}{1 + \frac{2(4)}{\sqrt{(4)^2 + 4(0,3)^2}} - \frac{(3)}{\sqrt{(4)^2 + (0,3)^2}}} = 99,48$$

Figura 28. **Fotografías tomadas en campo para el cálculo de la resistividad aparente del terreno medición a 4 metros 90 grados**



Fuente: elaboración propia.

Donde:

- R: 4,96 [ $\Omega$ ]
- a: 4 [m]
- b: 0,3 [m]

$$\rho = \frac{4\pi(4)(4,96)}{1 + \frac{2(4)}{\sqrt{(4)^2 + 4(0,3)^2}} - \frac{(3)}{\sqrt{(4)^2 + (0,3)^2}}} = 125,87$$

Figura 29. **Fotografías tomadas en campo para el cálculo de la resistividad aparente del suelo medición a 4 metros 45 grados**



Fuente: elaboración propia.

Donde:

- R: 5,19 [ $\Omega$ ]
- a: 4 [m]
- b: 0,3 [m]

$$\rho = \frac{4\pi(4)(5,19)}{1 + \frac{2(4)}{\sqrt{(4)^2 + 4(0,3)^2}} - \frac{(3)}{\sqrt{(4)^2 + (0,3)^2}}} = 131,71$$

Tabla IV. **Resumen de resistividad aparente del suelo en un punto de medición de la línea de transmisión propuesta**

Núm.	Distancia (metros)	$\rho_a = \frac{4\pi a R}{1 + \frac{2a}{\sqrt{a^2 + 4b^2}} - \frac{a}{\sqrt{a^2 + b^2}}}$						Resistividad Promedio Total $\rho_{PR}$
		A - A'		B - B'		C - C'		
		$R_1$	$\rho_1$	$R_2$	$\rho_2$	$R_3$	$\rho_3$	
1	1	10,73	76,74	34,40	246,01	26,10	186,65	<b>169,80</b>
2	2	6,01	78,40	18,76	244,71	13,98	182,36	<b>168,49</b>
3	3	3,78	72,48	9,12	174,87	9,00	172,57	<b>139,97</b>
4	4	3,92	99,48	4,96	125,87	5,19	131,71	<b>120,95</b>

Fuente: elaboración propia.

### 3.7. Descripción de las medidas de resistividad del suelo

En los sitios donde se realizaron las medidas de resistividad, se buscó que las mismas se hicieran tanto en el eje transversal como en el eje longitudinal de la línea; sin embargo, por limitaciones en el terreno (obstáculos ubicados al lado de las estructuras), únicamente fue posible realizar mediciones en el eje longitudinal de la línea de transmisión, de esta forma, se realizaron medidas de resistividad cada 1,5 km, dejando en cada medida, una separación entre electrodos de 1,2,3,4 m y conservando el mismo eje de medición .

A partir del procedimiento descrito en los numerales 3.3. al 3.6. y de los datos obtenidos en campo, se realizó el cálculo de la resistividad aparente del suelo para cada punto a lo largo de la línea de transmisión planteada.

Se realizaron mediciones de resistividad del suelo en 33 puntos estratégicos durante el recorrido de la línea de transmisión, seccionados en dos tramos Carlos Dorión-Kerns y Carlos Dorión-Incinate/Lourdes, tomando en cuenta el acceso a la línea de transmisión y la disponibilidad de espacio para realizar la medición utilizando el método de Wenner.

Tabla V. **Resultados de la medición de la resistividad aparente del suelo utilizando el método de Wenner en la línea de transmisión planteada**

VALORES DE RESISTIVIDAD MEDIDOS Y CALCULADOS EN LOS POSTES DE LA LÍNEA DE TRASMISIÓN PLANTEADA PARA ESTE TRABAJO DE GRADUACIÓN EN 69 kV			
Poste	ABSCISA [m]	SEP,[m]	Resistividad aparente [ $\Omega$ -m]
1	46	1	126,7
		2	
		4	
		6	
		8	
		10	
		16	
		32	
2	106	1	150
		2	
		4	
		6	
		8	
		10	
		16	
		32	
3	217	1	149,8
		2	
		4	
		6	
		8	
		10	
		16	
		32	
4	316	1	90,3
		2	
		4	
		6	
		8	
		10	
		16	
		32	

Continuación de la tabla V.

5	490	1	150
		2	
		4	
		6	
		8	
		10	
		16	
		32	
6	592	1	19,4
		2	
		4	
		6	
		8	
		10	
		16	
		32	
7	728	1	30,3
		2	
		4	
		6	
		8	
		10	
		16	
		32	
8	877	1	62,3
		2	
		4	
		6	
		8	
		10	
		16	
		32	

Continuación de la tabla V.

9	1007	1	26,2
		2	
		4	
		6	
		8	
		10	
		16	
		32	
10	1122	1	11,4
		2	
		4	
		6	
		8	
		10	
		16	
		32	
11	1247	1	14,8
		2	
		4	
		6	
		8	
		10	
		16	
		32	
12	1319	1	16,8
		2	
		4	
		6	
		8	
		10	
		16	
		32	

Continuación de la tabla V.

13	1382	1	25,8
		2	
		4	
		6	
		8	
		10	
		16	
		32	
14	1418	1	31
		2	
		4	
		6	
		8	
		10	
		16	
		32	
15	1601	1	57,1
		2	
		4	
		6	
		8	
		10	
		16	
		32	
16	1692	1	70,3
		2	
		4	
		6	
		8	
		10	
		16	
		32	
17	1906	1	85,1
		2	
		4	
		6	
		8	
		10	
		16	
		32	



Continuación de la tabla V.

16	1692	1	70,3
		2	
		4	
		6	
		8	
		10	
		16	
		32	
17	1906	1	85,1
		2	
		4	
		6	
		8	
		10	
		16	
		32	

Fuente: elaboración propia.

Se realizaron mediciones de resistividad del suelo en 10 puntos correspondientes al tramo 2, Carlos Dori3n y Incinate/Lourdes, tomando en cuenta el acceso a la l3nea de transmisi3n y la disponibilidad de espacio para realizar la medici3n utilizando el m3todo de Wenner.

Tabla VI. **Resultados de la medición de la resistividad aparente del suelo utilizando el método de Wenner en la línea de transmisión Carlos Dorión y Incinate/Lourdes**

VALORES DE RESISTIVIDAD MEDIDOS Y CALCULADOS EN LOS POSTES DE LA LÍNEA DE TRASMISION PLANTEADA PARA ESTE TRABAJO DE GRADUACION EN 69kV			
Poste	ABSCISA [m]	SEP,[m]	Resistividad aparente [ $\Omega$ -m]
1	9,18	1	28
		2	
		4	
		6	
		8	
		10	
		16	
		32	
2	20,44	1	45,95
		2	
		4	
		6	
		8	
		10	
		16	
		32	
3	71,1	1	126,69
		2	
		4	
		6	
		8	
		10	
		16	
		32	
4	285,85	1	117,35
		2	
		4	
		6	
		8	
		10	
		16	
		32	

Continuación de la tabla VI.

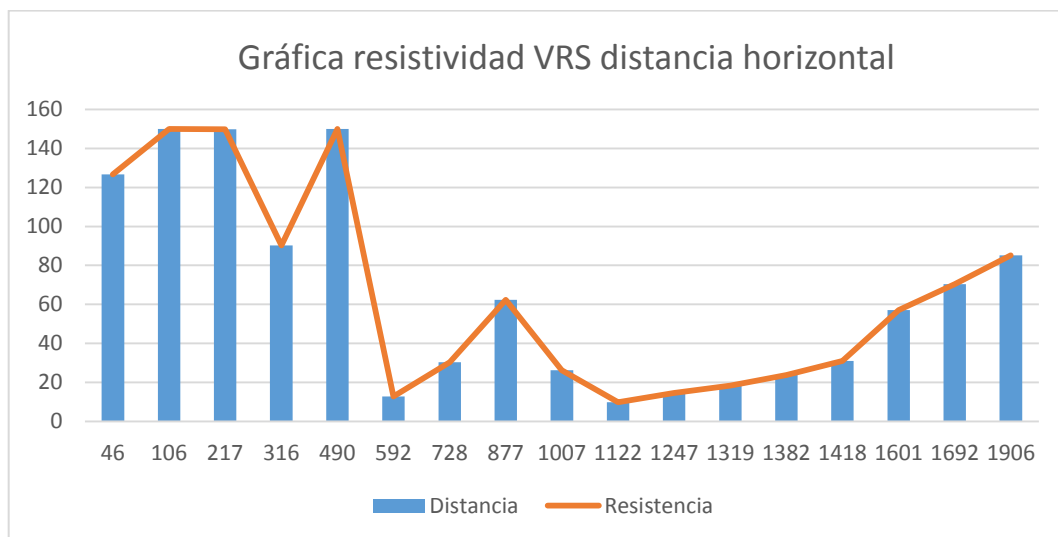
5	605,24	1	103,47
		2	
		4	
		6	
		8	
		10	
		16	
		32	
6	803,19	1	98,65
		2	
		4	
		6	
		8	
		10	
		16	
		32	
7	1 304,87	1	121,66
		2	
		4	
		6	
		8	
		10	
		16	
		32	
8	1 458,91	1	67,9
		2	
		4	
		6	
		8	
		10	
		16	
		32	

Continuación de la tabla VI.

9	1810,21	1	85,14
		2	
		4	
		6	
		8	
		10	
		16	
		32	
		10	
2			
4			
6			
8			
10			
16			
32			

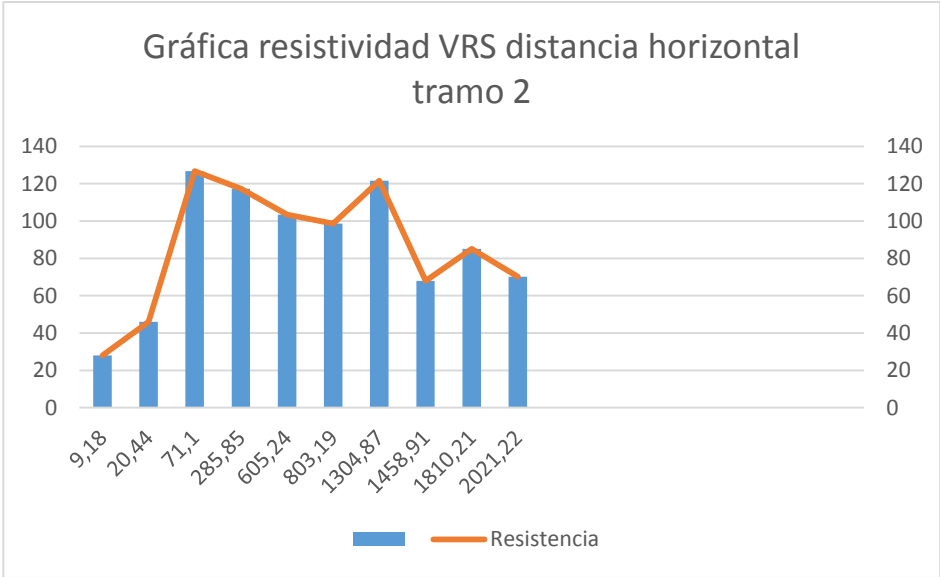
Fuente: elaboración propia.

Figura 30. **Gráfica de la resistividad del suelo conforme a la distancia horizontal tramo 1**



Fuente: elaboración propia.

**Figura 31. Gráfica de la resistividad del suelo conforme a la distancia horizontal tramo 2**



Fuente: elaboración propia.

**3.8. Análisis de resultados**

De acuerdo con los valores obtenidos de resistividad del suelo para cada poste mostrado en las tablas anteriores, tabla VI y tabla VII, se debe utilizar la configuración del sistema de puesta a tierra que mejor se aplique, descrito en el análisis del capítulo siguiente.

### 3.9. Criterios para el diseño del sistema de puesta a tierra

Los criterios de diseño del sistema de puesta a tierra son los siguientes:

- Para determinar el tipo de puesta a tierra se requiere que las mismas garanticen la seguridad de las personas, operación del sistema y correcta actuación de las protecciones.

Según el Artículo 33. Resistencia a Tierra

- El sistema de tierras deberá consistir en uno o más electrodos conectados entre sí. Este sistema deberá tener una resistencia a tierra suficientemente baja, para minimizar los riesgos a las personas, en función a la tensión de paso y de contacto.
- En el numeral 33.1 Sistema de un solo electrodo. La resistencia a tierra de una conexión individual a través de un electrodo deberá ser lo más cercana a cero ohmios, y en ningún caso deberá ser mayor de 25 ohmios, cuando la resistencia es mayor de 25 ohmios, deberán usarse dos o más electrodos hasta alcanzar este valor. El valor citado, es el máximo admisible medido en época de verano.<sup>45</sup>
- De lo analizado anteriormente se debe alcanzar una resistencia de puesta a tierra igual o menor a 25 ohmios en cada estructura, de acuerdo con la norma NTDOID. Sin embargo, para que el desempeño de esta línea de transmisión cumpla con los requerimientos y confiabilidad, se debe alcanzar una resistencia de puesta a tierra menor o igual 15 ohmios esto a lo indicado en el apartado 1.1.5.
- Se utilizó electrodos verticales cooperweld de 10 pies de largo por 5/8” de diámetro, con materiales de acero revestido de cobre (electrodo depositado.)
- El conductor o electrodo horizontal de puesta a tierra es #2 AWG cobre o copperweld #2 AWG, el cual será enterrado a una profundidad mínima de 0,5 metros.

---

<sup>45</sup> NTDOID. Normas *Técnicas de diseño y operación de las instalaciones de distribución*. p. 145.

- La conexión de la puesta a tierra entre el hilo de guarda y la red de tierras se realizó conectando ambos puntos por medio de cable cooperweld #2 AWG, fue instalado en el centro del poste, por lo tanto, el poste se diseñó con un agujero en la parte superior del mismo y otro en la base, el cual está ubicado a 50 cm por debajo del nivel del suelo (se utilizó acero-cooperweld por motivos que el cobre es susceptible a que se lo roben).
- Los contrapesos se alojaron en las zanjas que tienen una profundidad mínima de 0,6 m y deben cumplir las especificaciones de los documentos de referencia.
- Si la instalación subterránea no es factible debido a la presencia, proximidad o interferencia de rocas grandes o lecho de roca, deberá efectuarse una zanja en la roca hasta una profundidad de diez (10) centímetros y el conductor deberá ser tendido, cubierto con hormigón y luego extendido más allá de la roca o del lecho de roca hasta donde haya tierra.
- Para estructuras ubicadas en suelos con resistividades menores o iguales a 50 Ohm-m o suelos con un  $\text{pH} < 5$  se recomienda la utilización de acero recubierto de cobre debido a que es más resistente a la corrosión, la cual se puede presentar de acuerdo con las propiedades ácidas del suelo con las características indicadas anteriormente.

### **3.10. Especificaciones de las redes de tierra convencionales**

- De acuerdo con especificaciones de la Norma Técnica de Diseño y Operación del sistema de Distribución NTDOID, capítulo IV Métodos de puesta a tierra, Art. 31.

Electrodos de puesta a tierra. Cuando se utilicen electrodos artificiales, estos deberán penetrar, tanto como sea posible (hasta alcanzar un nivel por debajo de humedad permanente y en ese nivel penetrar como mínimo 0,5 m).

El electrodo de puesta a tierra deberá ser permanente y adecuado para el sistema eléctrico, que se trate en los diversos casos, los electrodos de puesta a tierra deberán ser de cobre u otros metales o aleaciones que minimicen la corrosión durante toda su vida útil prevista. Toda la superficie externa de los electrodos deberá ser conductora, esto es, que no tenga pintura, esmalte u otra cubierta aislante.

La cantidad y tamaño de los electrodos a seleccionar deberá considerar sus limitaciones de descarga de corriente y no deberán ser menores de 2,40 m de longitud y 12,5 mm de diámetro.<sup>46</sup>

De acuerdo con el nivel de resistividad del suelo del área de ubicación del poste, en el capítulo siguiente se describe las configuraciones para la selección del sistema de puesta a tierra, según se indica para estructuras a 69 kV.

Si la resistencia de puesta a tierra de las estructuras es mayor a la indicada, se debe continuar instalando los electrodos horizontales uno por uno con su correspondiente medida de resistencia de tierra, hasta que se obtenga la resistencia deseada.

### **3.11. Ubicación de la línea de transmisión propuesta**

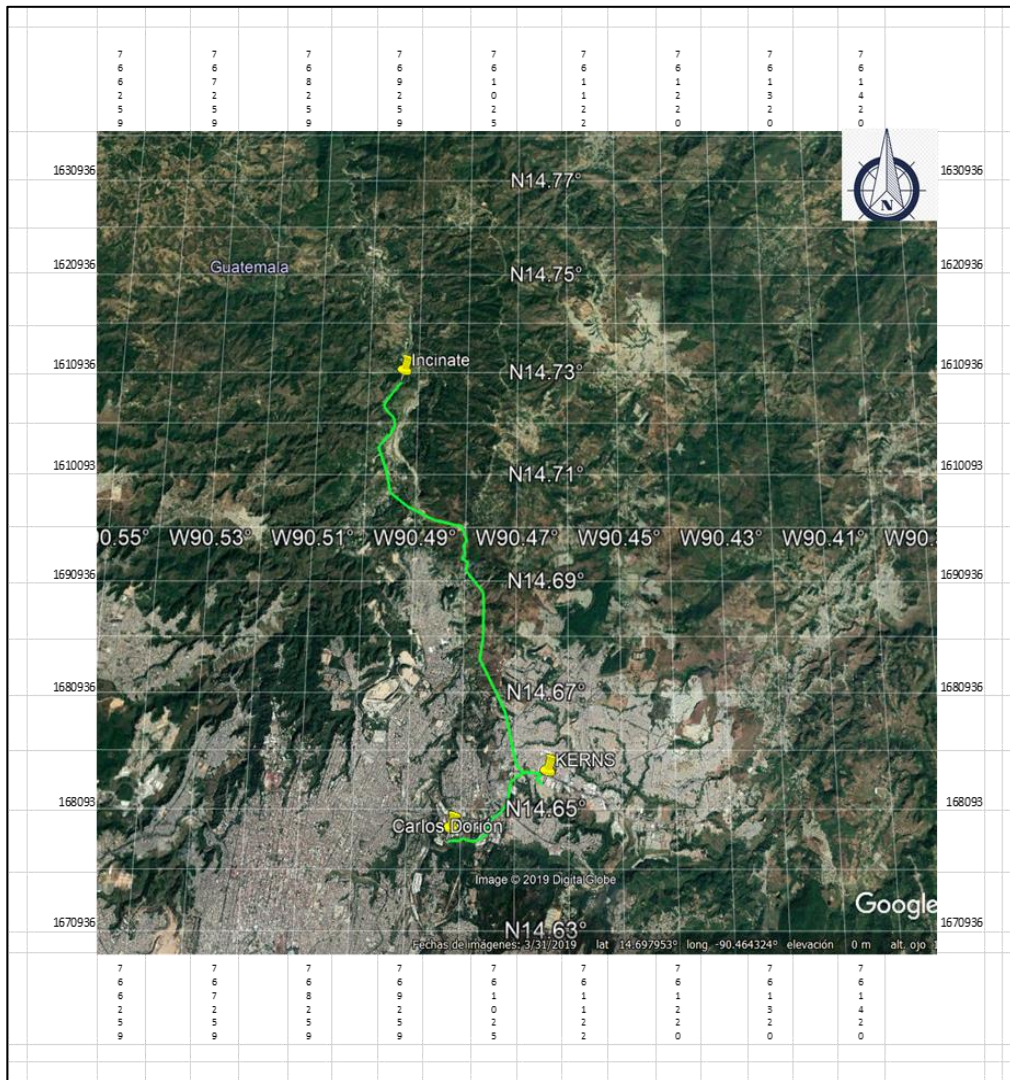
A continuación se presenta la Ubicación de la línea de transmisión propuesta en coordenadas UTM.

---

<sup>46</sup> NTDOID. Normas *Técnicas de diseño y operación de las instalaciones de distribución*. p. 145.



Figura 32. Línea de transmisión Carlos Dorion a Incinate/Lourdes



Fuente: elaboración propia, empleando Google Earth 2018.

## **4. MEDIDA DE LA RESISTENCIA DE LOS ELEMENTOS DE PUESTA A TIERRA**

En este capítulo se presenta el diseño del sistema de puesta a tierra para las estructuras de la línea de transmisión de 69 KV planteada en esta investigación, donde se consideraron los parámetros del sistema expuestos en el numeral 1.2,1.3 del capítulo 1 de este trabajo.

### **4.1. Cálculo de la resistencia de los elementos básicos**

De acuerdo con la IEEE STD 81-2012, la resistencia de puesta a tierra de cualquier electrodo (vertical u horizontal) está compuesta por:

- Resistencia de material del electrodo vertical u horizontal.
- Resistencia de contacto entre el electrodo y el suelo.
- Resistencia del suelo, que se opone al flujo de corriente desde la superficie del electrodo hacia la tierra.

Las primeras dos resistencias (electrodos verticales u horizontales) son relativamente pequeñas (del orden de  $10^{-4}$  ohm) con respecto a la tercera, de tal manera que pueden ser despreciadas para efectos prácticos.

Por lo tanto, solo la tercera resistencia tendrá importancia en el presente cálculo.

#### **4.2. Telurómetro Tm25m**

Telurómetro digital de alta frecuencia diseñado para la medición de puesta a tierra de estructuras de transmisión de energía. Su principio de funcionamiento consiste en el empleo de una corriente de medida de alta frecuencia (25 kHz), para la cual la impedancia inductiva del cable de guarda, considerando un vano de longitud típica, es razonablemente alta, lo que permite reducir el efecto de otras estructuras adyacentes a la que se está midiendo. El equipo mide la resistencia de puesta a tierra de la estructura en estudio de modo tal que el valor leído represente el comportamiento frente a una señal de impulso, semejante a la descarga atmosférica.

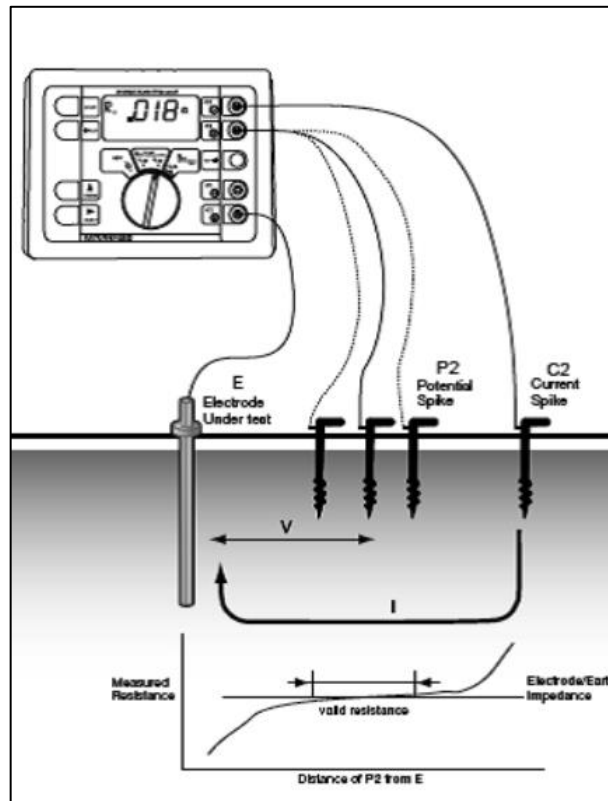
#### **4.3. Método para la medición de puesta a tierra (método de caída de potencial)**

El método de caída de potencial es el método “tradicional” de medida de la resistencia, de la toma de tierra, es el que utilizan los equipos conocidos como telurómetros.

#### **4.4. Descripción del método de caída de potencial**

El telurómetro requiere tres conexiones para realizar la medida de la resistencia de la toma de tierra. Si bien los medidores más precisos pueden requerir de una cuarta conexión para eliminar del resultado la medida de la resistencia de los propios cables de prueba, las conexiones son las siguientes.

Figura 33. Esquema de conexión del telurómetro



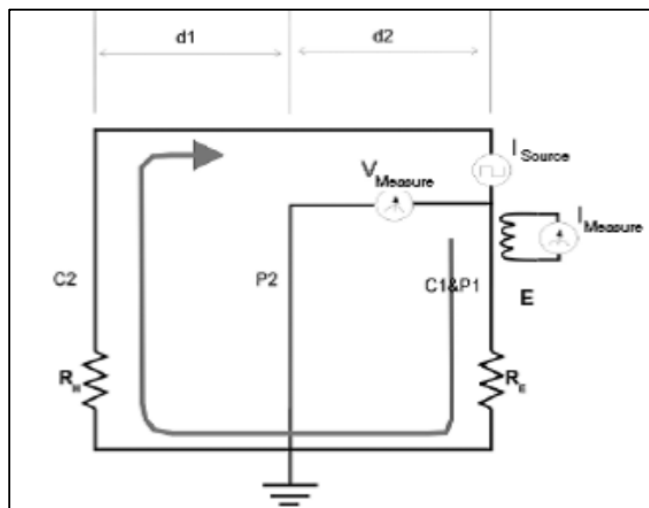
Fuente: AGUILAR, Lorg. *Manual aterramiento desde cero. Fundamentos del sistema de puesta a tierra y su importancia para verificar la puesta a tierra y la resistividad en los terrenos* p. 1.

- E/C1: conexión del borne C1 del telurómetro a los electrodos bajo prueba.
- S/P2: conexión del borne S del telurómetro a la pica P2 llamada pica auxiliar de referencia de potencial. Esta pica pertenece a la dotación del telurómetro y se deberá de clavar en la tierra a cierta medida de distancia del o de los electrodos que en ese momento estén bajo prueba.
- H/C2: conexión del borne H del telurómetro a la pica C2 auxiliar de inyección de corriente. Esta pica también es un accesorio del telurómetro y se deberá de clavar en la tierra a una distancia considerable si las instalaciones lo permiten.

La siguiente figura muestra el circuito eléctrico a la medida que el telurómetro inyecta una corriente alterna en la tierra a través del o de los electrodos que se estén comprobando en ese preciso momento, E, y la pica de corriente C2; a

continuación, procede a medir la caída de tensión entre las picas P2 y E, por último y mediante de la ley de Ohm, calcula el valor aproximado del sistema de puesta a tierra entre P2 y E. Como se puede ver, la resistencia de conexión a tierra de las picas auxiliares no afecta a la medida.<sup>47</sup>

Figura 34. **Circuito eléctrico del sistema de medición**



Fuente: AGUILAR, Lorg. *Manual aterramiento desde cero. Fundamentos del sistema de puesta a tierra y su importancia para verificar la puesta a tierra y la resistividad en los terrenos* p. 2.

Para realizar la prueba, la pica C2 se coloca a cierta distancia del o de los electrodos que se están verificando, posteriormente, manteniendo la pica C2 fija, se desplaza la pica P2 por la línea entre E y C2 para así poder verificar si hay variación de la impedancia en el trayecto.

La parte difícil de esta prueba es determinar el lugar en el que se deben clavar las picas para obtener una lectura correcta de la resistencia de la toma de tierra, se debe de observar en qué punto la tierra que rodea al electrodo deja de contribuir a la resistencia y se convierte en simple suelo, a un potencial de cero voltios esto a través de las distintas pruebas que se realizaron a los suelos.

La corriente que circula entre los electrodos y la pica auxiliar de inyección de corriente provoca una caída de tensión en las proximidades tanto del electrodo como de dicha pica.

<sup>47</sup> AGUILAR, Lorg. *Manual aterramiento desde cero. Fundamentos del sistema de puesta a tierra y su importancia para verificar la puesta a tierra y la resistividad en los terrenos* p. 1.

Para que la medida de resistencia de la toma de tierras sea fiable, la pica auxiliar de referencia de tensión debe de estar a fuera de estas dos áreas de influencia.

La curva de la figura del esquema de conexión del telurómetro muestra la distribución de la medida de impedancia en relación con la posición de la pica auxiliar de referencia de tensión. Evidentemente si esta pica está en contacto con los electrodos bajo prueba, la medida que resulta será cero, mientras que el contacto se hace con la pica de inyección de corriente, la medida corresponderá a la suma de la resistencia de los electrodos de esta última pica. Se aprecia en la gráfica de la figura 33 que, para un determinado rango de posiciones de la pica de referencia, el valor medido no varía en todos estos puntos, quedamos fuera de las mencionadas zonas de influencia, por lo que estos puntos nos ofrecen la medida correcta de la resistencia del electrodo.

La prueba consiste entonces en la realización de varias medidas para establecer una curva similar a la figura 33 en la parte más plana de la curva es donde se mide la resistencia de la tierra. En realidad, la curva nunca se aplanan por completo, pero tiende a dibujar una pendiente muy suave en la que los cambios de resistencia que se presentan son muy pequeños.

El margen de influencia de los electrodos depende de su profundidad y su área. Los electrodos con más profundidad requieren un mayor alejamiento de la pica de corriente. En anillos, mallas o series de picas en paralelo, la influencia del electrodo puede extenderse decenas de metros.

Debido a la posibilidad de interacción entre los anillos, mallas o series de picas en paralelo y las picas auxiliares de medida, se deberá seguir estrictamente el método de caída de potencial, sin ignorar ningún paso para así poder tener resultados más precisos.

Al comparar una serie de electrodos en paralelo, la resistencia combinada será inferior a la menor de las lecturas obtenidas de cualquiera de los electrodos individuales.

Las mediciones a tres hilos proporcionan buenos resultados si se utiliza un cable C1 corto o si se asume que en la lectura habrá una imprecisión adicional de una fracción de ohmio por la resistencia que presenta el propio cable. Para medidas de resistencia de tierra superiores a los 10 ohmios, el efecto de la resistencia del cable C1 resulta inapreciable. Pero en situaciones en las que las medidas deben ser muy precisas, es decir, dónde se esperan valores de resistencia de tierra bajos, el método a cuatro hilos permite añadir un cuarto cable para así poder eliminar la resistencia debida al cable C1. De esta manera se elimina la caída de tensión en el cable de medida C1, y por lo tanto su influencia en el resultado de dicha prueba.<sup>48</sup>

---

<sup>48</sup> AGUILAR, Lorg. *Manual aterramiento desde cero. Fundamentos del sistema de puesta a tierra y su importancia para verificar la puesta a tierra y la resistividad en los terrenos* p. 3.

#### 4.5. Electrodo vertical

Para ver las especificaciones de los diferentes elementos que componen el sistema de puesta a tierra, referirse al numeral 3.10. especificaciones de las redes de tierra convencionales.

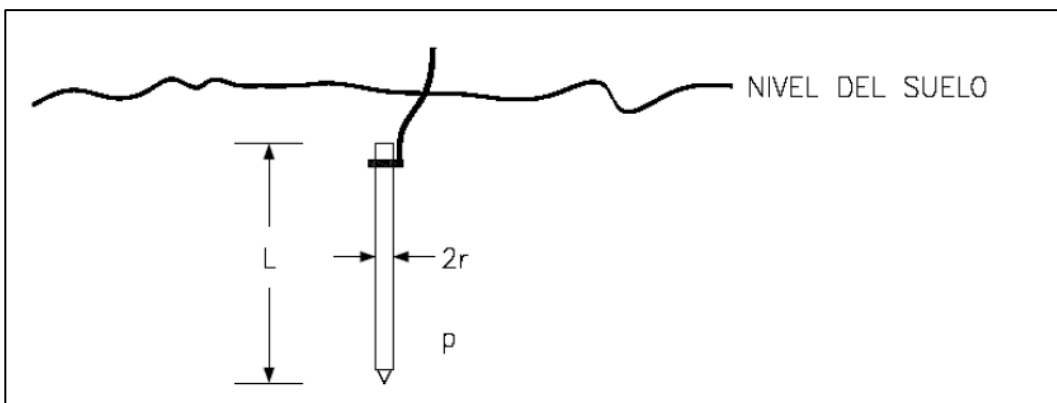
La resistencia de conexión a tierra de un electrodo vertical está dada por la siguiente expresión:

$$R_{ev} = \frac{\rho}{2\pi L} \left[ \ln \left( \frac{4L}{r} \right) \right]$$

Donde:

- $R_{ev}$ : resistencia del electrodo Vertical, Ohm.
- $\rho$ : resistividad del terreno, Ohm/m
- $L$ : longitud del electrodo vertical (m)
- $r$ : radio del electrodo vertical (m)

Figura 35. Electrodo vertical de puesta a tierra



Fuente: elaboración propia, empleando Visio 2016.

#### 4.6. Electrodo horizontal

Para ver las especificaciones de los diferentes elementos que componen el sistema de puesta a tierra, referirse al numeral 3.10. especificaciones de las redes de tierra convencionales.

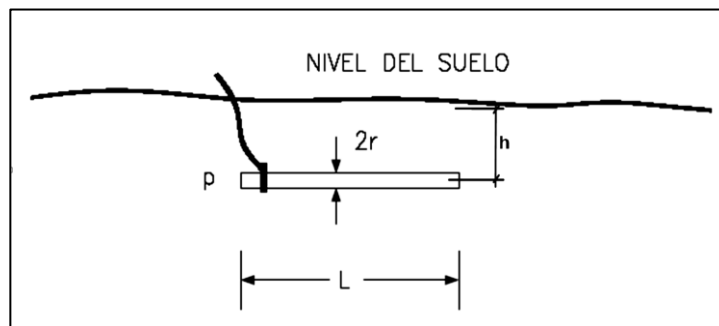
Para electrodos horizontales de longitud L se aplica la siguiente expresión:

$$R_{eh} = \frac{\rho}{2\pi L} \left[ \ln\left(\frac{2L}{r}\right) + \ln\left(\frac{L}{h}\right) - 2 + \frac{2h}{L} - \frac{h^2}{L^2} + \frac{h^4}{2L^4} \right]$$

Donde:

- $R_{eh}$  = resistencia del electrodo horizontal, Ohm
- $\rho$  = resistividad del terreno, Ohm-m
- L = longitud del electrodo horizontal, m
- r = radio del electrodo horizontal, m
- h = profundidad de enterramiento, m

Figura 36. Electrodo horizontal de puesta a tierra



Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Visio 2016.



#### 4.7. Cimentación en concreto

Todas las estructuras auto soportadas de las líneas de transmisión pueden tener cimentaciones tipo zapatas, parrillas, pilas y tipo anclaje. Dichas cimentaciones tienden a comportarse como un electrodo vertical de puesta a tierra, cuya resistencia está en paralelo con la resistencia del electrodo vertical (varilla de puesta a tierra) y horizontales (contrapesos). Sin embargo, para efectos de la presente investigación, la resistencia de los electrodos de concreto no se considerará en los cálculos, debido a que la misma puede variar con disminuciones drásticas de la humedad. De esta forma se deja un margen de seguridad en el diseño.

#### 4.8. Cálculo del conductor horizontal de puesta a tierra (contrapesos)

De acuerdo con la Norma IEEE Std 80, Numeral 11.3 conductor, el área mínima de un conductor horizontal de puesta a tierra está dado por la siguiente relación:

$$AMmm^2 = I \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{TCAP * 10^{-4}}{t_c \alpha_r \rho_r}\right) \ln \left(\frac{K_0 + T_m}{K_0 + T_a}\right)}}$$

Donde:

- $AMmm^2$  = Sección transversal del conductor calculado ( $mm^2$ )
- I: Corrientes rms en KA

En la presente investigación, se considera el caso de una falla monofásica de 10 kA y un tiempo de despeje de 30 ciclos: Para las estructuras tipo poste la corriente de falla monofásica se drena al sistema de puesta a tierra por una

única bajante, por lo que el conductor de puesta a tierra soportará 10 kA en el caso más crítico. Para conocer el tiempo de duración de esta corriente de falla se tiene en cuenta el tiempo que se demoran las protecciones en actuar. Considerando las protecciones digitales que se usan hoy en día, se tienen tiempos de respuesta de las protecciones primarias menores de 150 ms y secundarias hasta de 500 ms. Considerando lo anterior, en el presente caso se tomó un valor de 500 ms.

TCAP: Capacidad Térmica por unidad volumétrica según el material  
 $\left(\frac{J}{cm^3}\right)^\circ C$

$$TCAP= 3,93 \left(\frac{J}{cm^3}\right) c^0$$

- Tc: duración de la corriente en segundos (s)
- Tc: 0,5 s (según lo especificado en I: corriente rms en kA)
- $\alpha r$ : coeficiente térmico de resistividad en 1/ °C
- $\alpha r$ : 0,0032 1/ °C
- $\rho r$ : resistividad del electrodo de tierra a la temperatura de referencia en  $\mu\Omega$ -cm
- $\rho r$ : 20,1  $\mu\text{Ohm}^*\text{cm}$
- $K_0$  : constante del material en °C
- $K_0$ : 293 °C
- Tm: temperatura máxima permisible para los conductores y empalmes (grados Celsius).
- Ta: temperatura ambiente en °C
- Ta: temperatura ambiente (grados Celsius). Se toma el valor máximo de 35,5 °C, los valores de algunos de los anteriores coeficientes están

resumidos en la siguiente tabla a una temperatura de referencia de 20 °C (IEEE Std 80)

Constantes de materiales:

Tabla VII. **Cálculo del conductor mínimo**

Conductor	Conductividad (%)	$\alpha_r$ a 20°C (1/°C)	$K_0$ a 0°C (°C)	Temperatura de fusión Tm (°C)	$\rho_r$ a 20°C ( $\mu\Omega * cm$ )	TCAP ( $J/cm^3 \cdot C$ )
Acero Galvanizado	8,7 %	0,0032	293	419	20,1	3,93

Fuente: elaboración propia.

Reemplazando estos valores en la fórmula anterior se obtiene:

A (calculado) = 18,5 mm<sup>2</sup> así, el conductor mínimo a utilizar sería uno de 18,5 mm<sup>2</sup> de sección transversal. Sin embargo, en el presente caso se utilizará un conductor de mínimo 33 mm<sup>2</sup>(por soportar más corriente y tiempo de exposición), correspondiente a un No. 2AWG, cuyo diámetro es 6,54 mm.

#### 4.9. Metodología de cálculo

De acuerdo con lo descrito en el apartado 3.3. de este estudio se seleccionó el método de medición de Wenner para determinar el valor de resistividad aparente del suelo la metodología está respaldada bajo la norma IEEE Std 81-2012 en el apartado 7.2.3.

Con los resultados que se obtuvieron en las mediciones realizadas en campo y utilizando la metodología descrita para la línea de transmisión

propuesta, Carlos Dori3n/ Kerns y Carlos Dori3n Incinate/Lourdes se integran los resultados en tres grupos:

- Para:  $\rho < 60 \Omega - m$
- Para:  $60 < \rho < 120 \Omega - m$
- Para:  $120 < \rho < 180 \Omega - m$

Y a continuaci3n se describen los tipos de configuraciones a utilizar en la medici3n de resistencia.

#### **4.10. Configuraci3n tipo I**

Considerando la ecuaci3n del electrodo vertical y la ecuaci3n del electrodo horizontal se obtienen las resistencias para dichos electrodos tanto vertical, como para el electrodo horizontal (cable conductor). Para motivo de c3lculo se considera que la resistencia del electrodo vertical trabaja en forma paralela con la resistencia del electrodo horizontal (cable conductor).

Para la configuraci3n tipo I se considera una resistividad del suelo de 0 a 60  $\Omega.m$  m3s 1 varilla de cobre de 5/8" x 10 pies, m3s un electrodo horizontal compuesto por 3,0 metros de cable de cobre #2 AWG con un di3metro de 6,54 mm, seg3n especificaciones de los materiales, enterrado 0,5 metros. Conforme a lo indicado se obtienen los siguientes resultados.

Tabla VIII. **Resistencia equivalente configuración tipo I a una resistividad de 60  $\Omega m$**

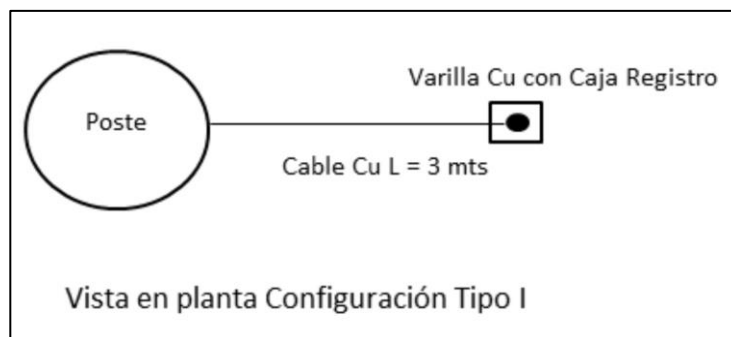
$\rho$ de suelo $\Omega. m$	Resistencia (1) Electrodo Vertical ( $\Omega$ )	Resistencia Electrodo Horizontal ( $\Omega$ )	Resistencia Equivalente ( $\Omega$ )
60	17,68	22,86	9,97

Fuente: elaboración propia.

Conforme a la resistencia solicitada en el numeral 3.9 la configuración tipo I cumple con la resistencia máxima de 15  $\Omega$

A continuación, se presenta una vista en planta de la configuración tipo I.

Figura 37. **Configuración tipo I**



Fuente: elaboración propia, empleando Visio 2016.

Tabla IX. **Lista de materiales, para la configuración tipo I**

Descripción	Unidad	Cantidad
Soldadura exotérmica cable # 2 AWG cobre a varilla copperweld de $\varnothing$ 5/8" x 10 pies	Pieza	1
Varilla de puesta a tierra Copperweld de $\varnothing$ 5/8" x 10 pies	Pieza	1
Cable de cobre desnudo Copperweld # 2 AWG	m	3
Caja de concreto prefabricado de 30 x45x30 cm (22x37x27 cm interiores)	Pieza	1

Fuente: elaboración propia.

#### 4.11. Configuración tipo II

Para la configuración tipo II se considera una resistividad del suelo entre 60 a 120  $\Omega$ .m más 2 varillas de cobre de 5/8"x10 pies más un electrodo horizontal compuesto por 6,0 metros de cable de cobre # 2 AWG con un radio conductor de 6,54 mm, según especificación de materiales, enterrado 0,5 metros. Conforme a lo indicado se obtiene los resultados de las ecuaciones correspondientes para el electrodo vertical como para el electrodo horizontal se detallan en la siguiente tabla.

Tabla X. **Resistencia equivalente configuración tipo II a una resistividad de 120  $\Omega$ m**

$\rho$ de suelo $\Omega$ .m	Resistencia (1) Electrodo Vertical ( $\Omega$ )	Resistencia Electrodo Horizontal ( $\Omega$ )	Resistencia Equivalente ( $\Omega$ )
120	35.36	26.67	10.63

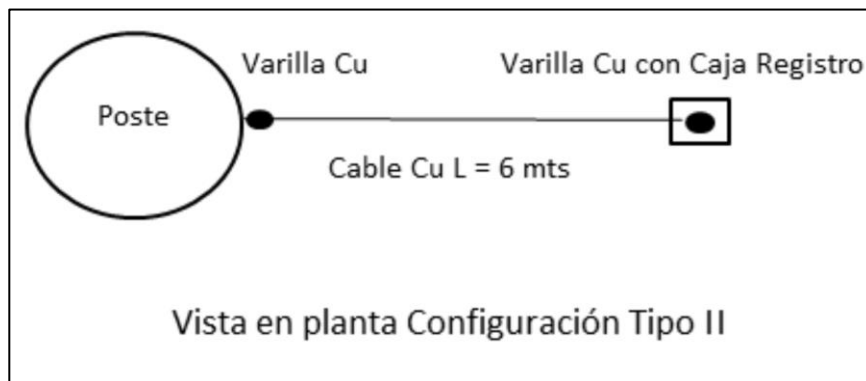
Fuente: elaboración propia.

Para obtener la resistencia equivalente se consideró la resistencia de cada electrodo vertical que en total son 2 más la resistencia del electrodo horizontal de 6 metros de longitud.

Conforme a la resistencia solicitada en el numeral 3.9., la configuración tipo II cumple con la resistencia máxima de 15  $\Omega$ .

A continuación, se presenta una vista en planta de la configuración tipo II

Figura 38. **Configuración tipo II**



Fuente: elaboración propia, empleando Visio 2016.

Tabla XI. **Lista de materiales, para la configuración tipo II**

Descripción	Unidad	Cantidad
Soldadura exotérmica cable # 2 AWG cobre a varilla copperweld de $\varnothing$ 5/8" x 10 pies	Pieza	2
Varilla de puesta a tierra Copperweld de $\varnothing$ 5/8" x 10 pies	Pieza	2
Cable de cobre desnudo Copperweld # 2 AWG	m	6
Caja de concreto prefabricado de 30 x45x30 cm (22x37x27 cm interiores)	Pieza	1

Fuente: elaboración propia.

#### 4.12. Configuración tipo III

Para la configuración tipo III se considera una resistividad del suelo entre 120 a 180  $\Omega.m$  más 3 varillas de cobre de 5/8" x10 pies más un electrodo horizontal compuesto por 8.0 metros de cable de cobre # 2 con un radio del conductor de 6.54 mm, según especificación de materiales, enterrado 0,5 metros. Conforme a lo indicado se obtiene los resultados de las fórmulas 1 y 2 en la siguiente tabla.

Tabla XII. **Resistencia equivalente configuración tipo III a una resistividad de 180  $\Omega m$**

<i><math>\rho</math> de suelo <math>\Omega.m</math></i>	Resistencia (1) Electrodo Vertical ( $\Omega$ )	Resistencia Electrodo Horizontal ( $\Omega$ )	Resistencia Equivalente ( $\Omega$ )
180	53,04	31,91	11,37

Fuente: elaboración propia.

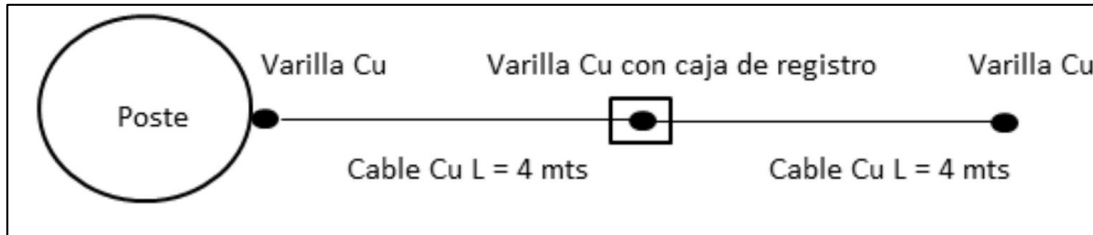
Para obtener la resistencia equivalente se consideró la resistencia de cada electrodo vertical que en total son tres más la resistencia del electrodo horizontal de 8 metros de longitud.

Conforme a la resistencia solicitada en el numeral 3.9. la configuración tipo III cumple con la resistencia máxima de 15  $\Omega$ .

A continuación, se presenta una vista en planta de la configuración tipo III.



Figura 39. Configuración tipo III



Fuente: elaboración propia, empleando Visio 2016.

Tabla XIII. Lista de materiales para la configuración tipo III

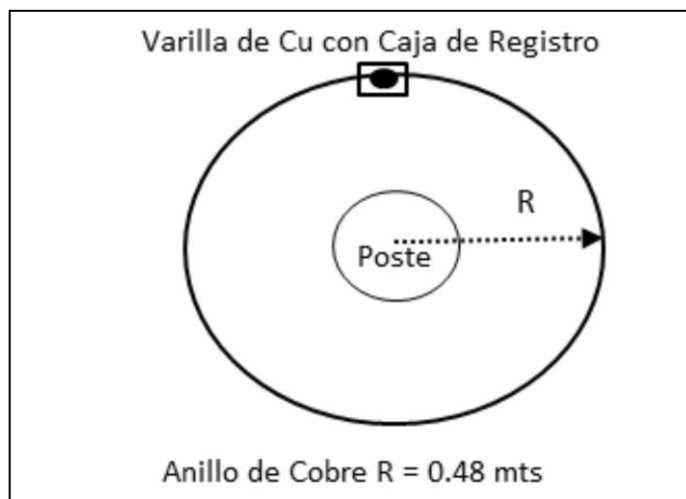
Descripción	Unidad	Cantidad
Soldadura exotérmica cable # 2 AWG cobre a varilla copperweld de $\varnothing$ 5/8" x 10 pies	Pieza	3
Varilla de puesta a tierra Copperweld de $\varnothing$ 5/8" x 10 pies	Pieza	3
Cable de cobre desnudo Copperweld # 2 AWG	m	8
Caja de concreto prefabricado de 30 x45x30 cm (22x37x27 cm interiores)	Pieza	1

Fuente: elaboración propia.

#### 4.13. Configuración tipo I en anillo

Debido a la falta de espacio físico en algunos puntos, para realizar la instalación de puesta a tierra, a continuación, se presentan las configuraciones especiales tipo anillo, las cuales tendrán un perímetro igual a la longitud del cable de cobre y el número de varillas correspondientes a su respectiva configuración, la resistencia resultante para cada caso será consideradas también conforme a las resistencias presentadas en los apartados anteriores. A continuación, se detalla la configuración tipo I en anillo.

Figura 40. **Configuración tipo I en anillo**



Fuente: elaboración propia, empleando Visio 2016.

Tabla XIV. **Lista de materiales para la configuración tipo I en anillo**

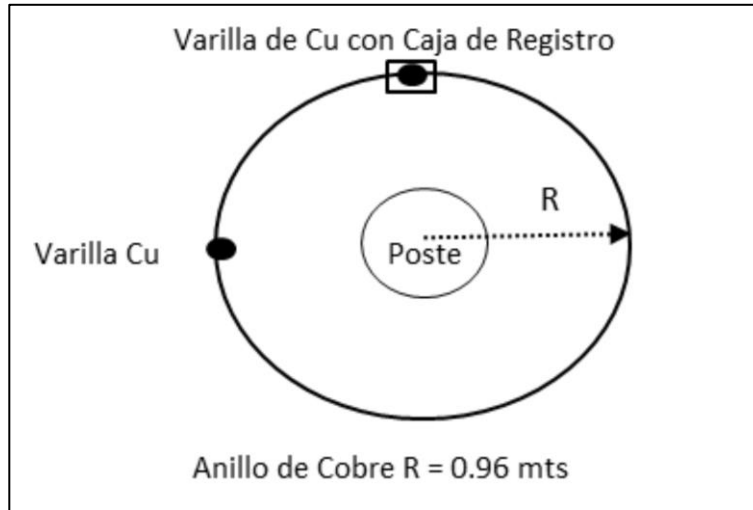
Descripción	Unidad	Cantidad
Soldadura exotérmica cable # 2 AWG cobre a varilla copperweld de $\varnothing$ 5/8" x 10 pies	Pieza	1
Varilla de puesta a tierra Copperweld de $\varnothing$ 5/8" x 10 pies	Pieza	1
Cable de cobre desnudo Copperweld # 2 AWG	m	3
Caja de concreto prefabricado de 30 x45x30 cm (22x37x27 cm interiores)	Pieza	1

Fuente: elaboración propia.

#### 4.14. Configuración tipo II en anillo

A continuación, se presenta una vista en planta de la configuración tipo II anillo.

Figura 41. Configuración tipo II en anillo



Fuente: elaboración propia, empleando Visio 2016.

Tabla XV. Lista de materiales para la configuración tipo II en anillo

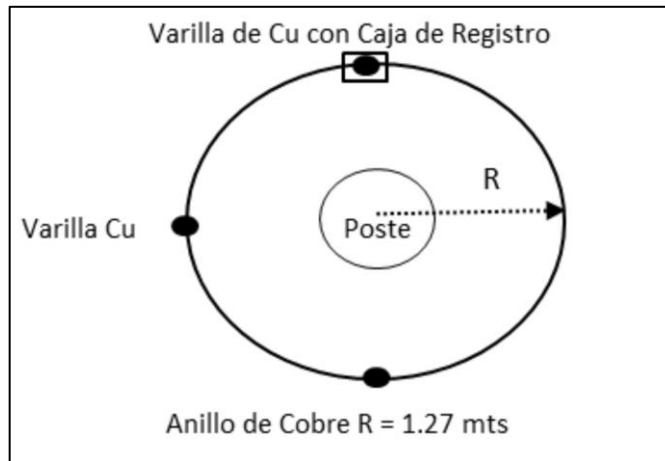
Descripción	Unidad	Cantidad
Soldadura exotérmica cable # 2 AWG cobre a varilla copperweld de $\varnothing$ 5/8" x 10 pies	Pieza	2
Varilla de puesta a tierra Copperweld de $\varnothing$ 5/8" x 10 pies	Pieza	2
Cable de cobre desnudo Copperweld # 2 AWG	m	6
Caja de concreto prefabricado de 30 x45x30 cm (22x37x27 cm interiores)	Pieza	1

Fuente: elaboración propia.

#### 4.15. Configuración tipo III en anillo

A continuación, se presenta una vista en planta de la configuración tipo III anillo.

Figura 42. **Configuración tipo III en anillo**



Fuente: elaboración propia, empleando Visio 2016.

Tabla XVI. **Lista de materiales para la configuración tipo III en anillo**

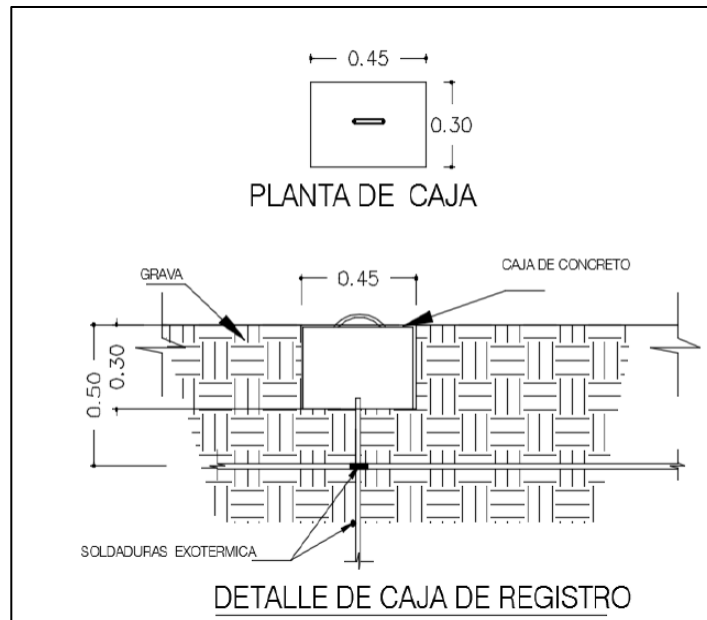
Descripción	Unidad	Cantidad
Soldadura exotérmica cable # 2 AWG cobre a varilla copperweld de $\varnothing$ 5/8" x 10 pies	Pieza	3
Varilla de puesta a tierra Copperweld de $\varnothing$ 5/8" x 10 pies	Pieza	3
Cable de cobre desnudo Copperweld # 2 AWG	m	8
Caja de concreto prefabricado de 30 x45x30 cm (22x37x27 cm interiores)	Pieza	1

Fuente: elaboración propia.

#### 4.16. **Detalle de caja de registro para mediciones de resistividad**

A continuación se presenta un esquema detallado de la caja de registro para la verificación de resistencia y resistividad de los sistemas de puesta a tierra.

Figura 43. **Detalle de caja de registro de verificación de resistividad de puesta a tierra**



Fuente: elaboración propia, empleando AutoCAD 2016.

#### 4.17. Configuraciones presentadas

De acuerdo con las configuraciones planteadas con anterioridad a continuación se presenta una tabla resumen con la configuración a utilizar para los puntos de medición de resistencia elegidos, aplicando corrientes de alta frecuencia. En las estructuras seleccionadas de la línea de transmisión, para este análisis de estudio en 69 kV según la resistividad aparente del suelo medida en el capítulo 3.

Tabla XVII. **Resumen configuraciones a usar para las estructuras seleccionadas de la línea de transmisión en 69 Kv de 15 km de longitud del tramo Carlos Dori3n-Kerns Carlos Dori3n y Incinate/Lourdes, para la memoria de medici3n de la red de tierras**

N3m. de estructura	Distancia DH	R. $\Omega$ -m	Configuraci3n
1	7,98	75	Tipo I
2	9,15	75	Tipo I
3	9,18	28	Tipo I
4	10,48	75	Tipo I
5	20,44	45,95	Tipo I
6	23	75	Tipo I
7	44	75	Tipo I
8	46	126,7	Tipo III en Anillo
9	55,15	150	Tipo III en Anillo
10	71,1	126,69	Tipo III en Anillo
21	1007	26,2	Tipo I
22	1122	11,4	Tipo I
23	1247	14,8	Tipo I
24	1319	16,8	Tipo I
25	1304,87	121,66	Tipo III en Anillo
26	1382	25,8	Tipo I
27	1418	31	Tipo I
28	1458,91	67,9	Tipo II
29	1601	57,1	Tipo I
30	1692	70,3	Tipo II
31	1810,21	85,14	Tipo II
32	1906	85,1	Tipo II
33	2021,22	70,25	Tipo II

(Nota se agregaron 6 datos correspondientes a vanos que se encuentran dentro de la instalaci3n subestaci3n Incinate)

Fuente: elaboraci3n propia.

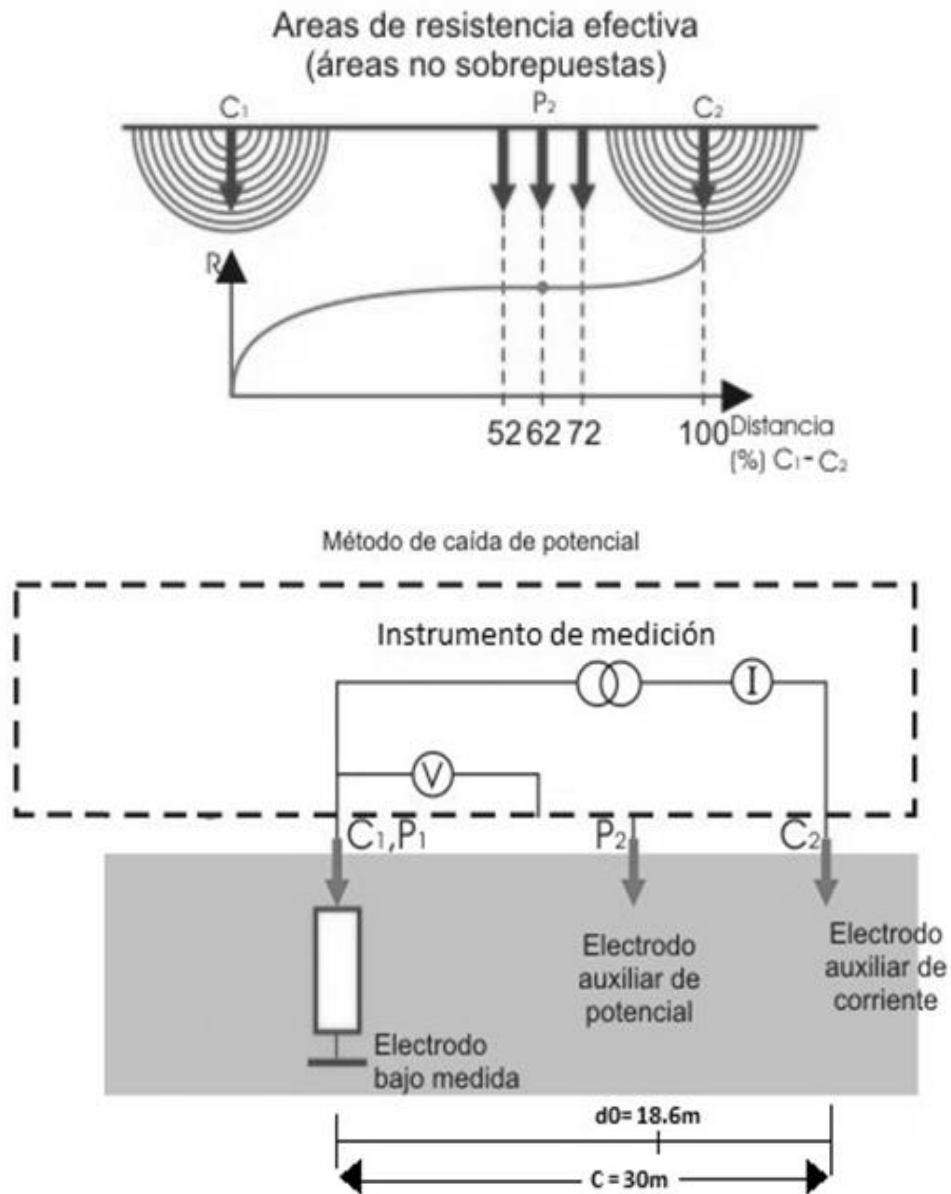
#### **4.18. Cálculo de la resistencia del sistema de puesta a tierra utilizando el método de caída de potencial con el telurómetro tm25m**

De acuerdo con lo descrito en el apartado 4.4. de este capítulo se seleccionó el método de medición de caída de potencial para determinar el valor de resistencia a través del telurómetro tm25m, la metodología está respaldada bajo la norma IEEE Std 81-2012 en el apartado 8.2.2.4.

A manera de ejemplo, a continuación, se desarrollan los cálculos utilizando el telurómetro para hallar la resistencia del sistema de puesta a tierra de algunas estructuras utilizando el criterio de la caída de potencial utilizando la resistividad aparente del suelo calculada anteriormente, de las mediciones que se obtuvieron en el capítulo 3.

Aplicando una corriente de 25 k Hz los valores de resistencia se presentan a continuación con las medidas en campo siguiendo el procedimiento antes descrito.

Figura 44. **Áreas de resistencia efectiva y método de la caída de potencial**



Fuente: EEGSA. *Área de resistencia efectiva y método de la caída de potencial.*  
<https://eegsa.com/conozcanos/lineas-de-negocio/trelec-s-a/>. Consulta: 15 de julio de 2018.



Tabla XVIII. Resistencia equivalente para configuración tipo 1 ( $\rho < 60 \Omega - m$ )

$\rho$ de suelo $\Omega \cdot m$	Resistencia (1) Electrodo Vertical ( $\Omega$ )	Resistencia Electrodo Horizontal ( $\Omega$ )	Resistencia Equivalente ( $\Omega$ )
11,4	17,68	22,32	9,86

Fuente: elaboración propia.

Figura 45. Pantalla del telurómetro resistencia equivalente configuración tipo 1



Fuente: elaboración propia.

Tabla XIX. Resistencia equivalente para configuración tipo 2 ( $60 < \rho < 120 \Omega - m$ )

$\rho$ de suelo $\Omega \cdot m$	Resistencia (1) Electrodo Vertical ( $\Omega$ )	Resistencia Electrodo Horizontal ( $\Omega$ )	Resistencia Equivalente ( $\Omega$ )
103,47	35,36	19,82	12,70

Fuente: elaboración propia.

Figura 46. **Pantalla del telurómetro resistencia equivalente configuración tipo 2**



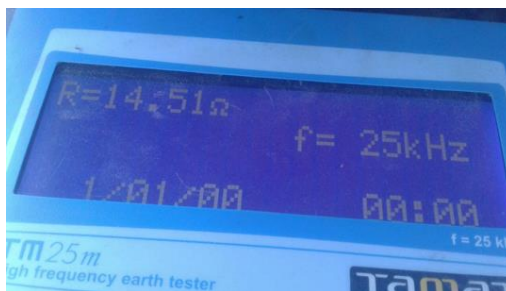
Fuente: elaboración propia.

Tabla XX. **Resistencia equivalente para configuración tipo 3 ( $120 < \rho < 180 \Omega - m$ )**

$\rho$ de suelo $\Omega \cdot m$	Resistencia (1) Electrodo Vertical ( $\Omega$ )	Resistencia Electrodo Horizontal ( $\Omega$ )	Resistencia Equivalente ( $\Omega$ )
150	26,8	31,65	14,51

Fuente: elaboración propia.

Figura 47. **Pantalla del telurómetro resistencia equivalente configuración tipo 3**



Fuente: elaboración propia.

#### **4.19. Principio de funcionamiento del telurómetro Tm25m**

Su principio de funcionamiento consiste en el empleo de una corriente de medida de alta frecuencia (25 kHz), para la cual la impedancia inductiva del cable de guarda se considera un vano de longitud típica, es razonablemente alta, lo que permite reducir el efecto de los vanos adyacentes al que se está midiendo, de esta manera el equipo logra medir la resistencia de puesta a tierra del poste en estudio.

De esta forma se logra obtener valores que representan mejor la capacidad del sistema para conducir a tierra las corrientes de rayo que los que se podrían obtener con los equipos convencionales de baja frecuencia, aún cuando se desconecta el cable de guarda.

El ensayo anterior se realizó haciendo circular una corriente a través de la resistencia de difusión de tierra y un electrodo auxiliar pica C2, denominado electrodo auxiliar de inyección de corriente y haciendo circular una corriente alterna en la tierra a través de los electrodos bajo prueba de las configuraciones presentadas anteriormente las cuales fueron configuración tipo I, configuración tipo II, configuración tipo III, configuración tipo II-anillo, configuración tipo III-anillo en la conexión E, midiendo la tensión producida entre la puesta a tierra, a continuación, se procede a medir la caída de tensión entre las picas P2 y E. Donde P2 es una pica auxiliar de referencia de potencial, colocado en el terreno en la zona plana del potencial creado por la corriente que circula (Meseta de potencial).

Por último, el equipo mide la resistencia calculando el cociente entre la tensión y la corriente mediante de la ley de Ohm, calcula el valor aproximado

del sistema de puesta a tierra entre P2 y E. Como se puede ver, la resistencia de conexión a tierra de las picas auxiliares no afecta a la medida.

La corriente inyectada por el telurómetro se regula automáticamente y el equipo indica directamente el valor de resistencia en su display alfanumérico, en ohm como se pudo observar en los casos planteados anteriormente.

Utilizando este equipo se realizó el análisis de las mediciones seleccionadas de resistencia para la línea de transmisión, que lleva el nombre de Carlos Dorión/Kerns y Incinate/Lourdes, de una longitud aproximada de 15km, aplicando corrientes de alta frecuencia para así poder verificar la disposición del sistema de puesta a tierra SPT, que se tiene en dicha línea de transmisión de energía.

Nota: la verificación de estos patrones evidencia dificultad al momento de realizar las correspondientes mediciones, por estar todas las estructuras eléctricamente interconectadas a través de los cables de guarda que actúan como pararrayos protegiendo las líneas de las descargas atmosféricas.

Por la existencia de esta interconexión, cualquier intento de medir la resistencia de un sistema de puesta a tierra SPT, de un poste individual utilizando un telurómetro convencional produce a resultados erróneos ya que, en la realidad, se está midiendo la resistencia de puesta a tierra de todos los postes en paralelo o más precisamente, su impedancia a baja frecuencia. Al tratar de desconectar el cable de guarda de una línea energizada es una operación altamente riesgosa, esto debido a la altura de la zona de trabajo la cual se ubica en lo más alto del poste, así mismo como la proximidad de los conductores de alta tensión.

Para realizar este tipo de ensayo, que es de vital importancia para garantizar el transporte de la energía eléctrica sin interrupciones, se ha optado por el uso del medidor de resistencia de puesta a tierra por medio de la alta frecuencia del telurómetro (TM-25m), instrumento adecuado para la medición rápida y confiable de la resistencia de un sistema de puesta a tierra, en cada poste de una línea de transmisión en operación comercial, lo que evita desconectar el cable de guarda.

A continuación, se enumeran los resultados de resistencia obtenidos a lo largo de las mediciones seleccionadas que se realizaron en campo; en la línea de transmisión Carlos Dorión/Kerns y Incinate/Lourdes con la utilización del telurómetro TM-25m, con la configuración adecuada para los distintos puntos de medición a lo largo de la línea de transmisión, partiendo de las mediciones que se obtuvieron de la resistividad aparente del suelo en el capítulo 3.

Tabla XXI. **Resumen valores de resistencia obtenidos de la línea de transmisión Carlos Dorión/Kerns y Incinate/Lourdes en 69 Kv de 15 km de longitud**

Núm. Estructura	Distancia DH	R. $\Omega$ -m	Configuración
1	7.98	58.9	Tipo I
2	9.15	57.3	Tipo I
3	9.18	28	Tipo I
4	10.48	56.4	Tipo I
5	20.44	45.95	Tipo I
6	23	54.2	Tipo I
7	44	59.7	Tipo I
8	46	126.7	Tipo III en Anillo
9	55.15	150	Tipo III en Anillo
10	71.1	126.69	Tipo III-Anillo
11	106	150	Tipo III en Anillo
12	217	149.8	Tipo III
13	285.85	117.35	Tipo II
14	316	90.3	Tipo II
15	490	150	Tipo III
16	592	19.4	Tipo I
17	605.24	103.47	Tipo II
18	728	30.3	Tipo I
19	803.19	98.65	Tipo II
20	877	62.3	Tipo II en Anillo

Continuación de la tabla XXI.

Núm. Estructura	Distancia DH	R. $\Omega$ -m	Configuración
21	1007	26,2	Tipo I
22	1122	11,4	Tipo I
23	1247	14,8	Tipo I
24	1319	16,8	Tipo I
25	1304,87	121,66	Tipo III-Anillo
26	1382	25,8	Tipo I
27	1418	31	Tipo I
28	1458,91	67,9	Tipo II
29	1601	57,1	Tipo I
30	1692	70,3	Tipo II
31	1810,21	85,14	Tipo II
32	1906	85,1	Tipo II
33	2021,22	70,25	Tipo II

Para la memoria de medición de la red de tierras.  
(Nota se agregaron 6 datos correspondientes a vanos que se encuentran dentro de la instalación de la subestación Incinate)

Fuente: elaboración propia.

A continuación, se presentan de forma precisa los valores obtenidos de resistencia en ( $\Omega$ ) en el sistema de puesta a tierra SPT planteado, los cuales se obtuvieron en los puntos de medición seleccionados de la línea de transmisión descrita, con su configuración asignada en cada vano, para cada uno de los criterios propuestos de acuerdo a los resultados que se obtuvieron en las mediciones de resistividad aparente del suelo en el capítulo 3, de este estudio para la línea de transmisión Carlos Dorión /Kerns y Carlos Dorión Incinate/Lourdes se integran los resultados en tres grupos:

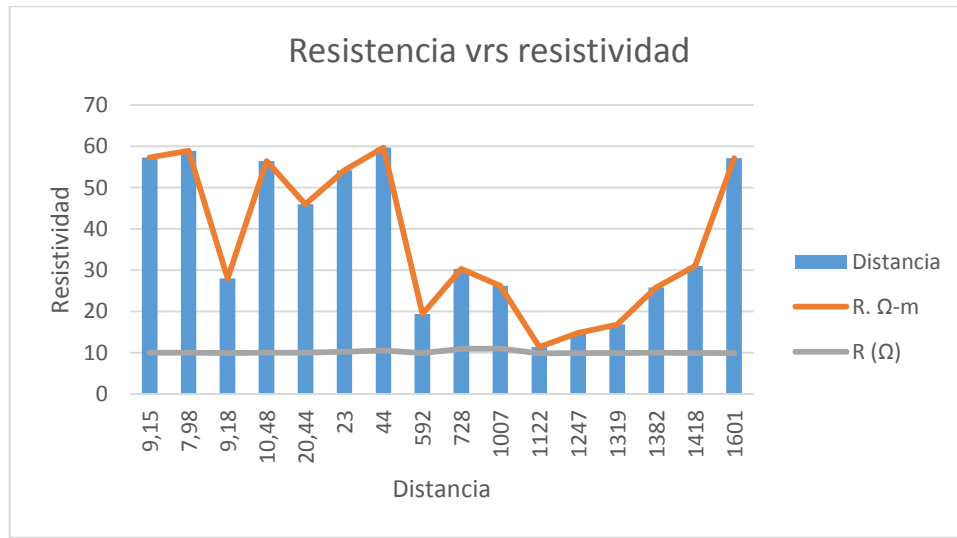
- Para:  $\rho < 60 \Omega - m$
- Para:  $60 < \rho < 120 \Omega - m$
- Para:  $120 < \rho < 180 \Omega - m$

Tabla XXII. **Resumen configuraciones que integran ( $\rho < 60 \Omega - m$ )**

	Distancia DH	R. $\Omega$ -m	configuraci on tipo I	R ( $\Omega$ )
1	7,98	58,9	Tipo I	9,97
2	9,15	57,3	Tipo I	9,86
3	9,18	28	Tipo I	9,89
4	10,48	56,4	Tipo I	9,95
5	20,44	45,95	Tipo I	9,99
6	23	54,2	Tipo I	10,2
7	44	59,7	Tipo I	10,5
8	592	19,4	Tipo I	9,88
9	728	30,3	Tipo I	10,88
10	1007	26,2	Tipo I	10,95
11	1122	11,4	Tipo I	9,85
12	1247	14,8	Tipo I	9,98
13	1319	16,8	Tipo I	9,82
14	1382	25,8	Tipo I	9,95
15	1418	31	Tipo I	9,93
16	1601	57,1	Tipo I	9,89

Fuente: elaboración propia.

Figura 48. **Gráfica de la resistencia R ( $\Omega$ ), del sistema de puesta a tierra conforme a la distancia horizontal y la resistividad del suelo para configuraciones que integren ( $\rho < 60 \Omega - m$ )**



Fuente: elaboración propia.

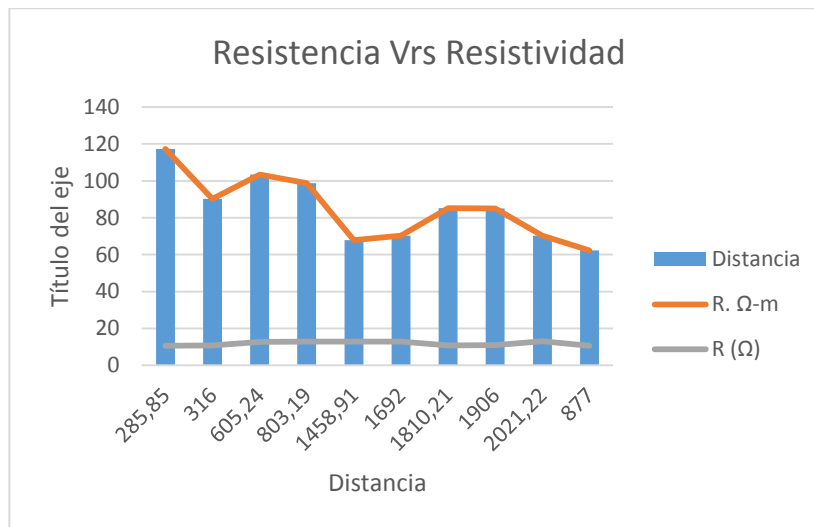
Tabla XXIII. **Resumen configuraciones que integran ( $60 < \rho < 120 \Omega - m$ )**

Núm. de estructura	Distancia DH	R. $\Omega$ -m	configuración tipo II	R ( $\Omega$ )
17	285,85	117,35	Tipo II	10,63
18	316	90,3	Tipo II	10,77
19	605,24	103,47	Tipo II	12,7
20	803,19	98,65	Tipo II	12,83
21	1 458,91	67,9	Tipo II	12,86
22	1692	70,3	Tipo II	12,81
23	1 810,21	85,14	Tipo II	10,74
24	1906	85,1	Tipo II	10,89
25	2 021,22	70,25	Tipo II	12,95
26	877	62,3	Tipo II-Anillo	14,9

Fuente: elaboración propia.



Figura 49. **Gráfica de la resistencia R ( $\Omega$ ), del sistema de puesta a tierra conforme a la distancia horizontal y la resistividad del suelo para configuraciones que integren (  $60 < \rho < 120 \Omega - m$  )**



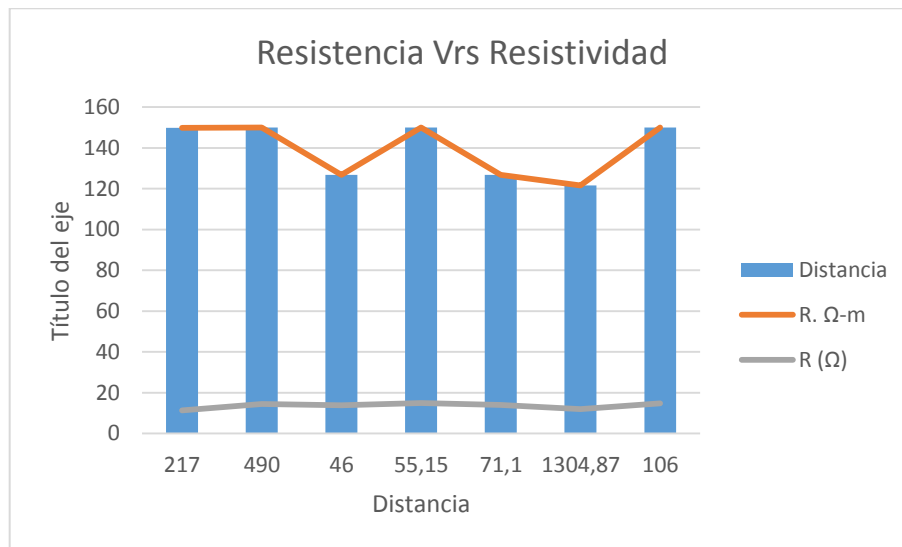
Fuente: elaboración propia.

Tabla XXIV. **Resumen configuraciones que integran (  $120 < \rho < 180 \Omega - m$  )**

Núm. de estructura	Distancia DH	R. $\Omega$ -m	configuración Tipo III	R ( $\Omega$ )
27	217	149,8	Tipo III	11,37
28	55,15	150	Tipo III-Anillo	14,51
29	46	126,7	Tipo III-Anillo	13,78
30	55,15	150	Tipo III-Anillo	14,51
31	71,1	126,69	Tipo III-Anillo	15,2
32	1 304,87	121,66	Tipo III-Anillo	15,22
33	106	150	Tipo III-Anillo	11,98

Fuente: elaboración propia.

Figura 50. **Gráfica de la resistencia R ( $\Omega$ ), del sistema de puesta a tierra conforme a la distancia horizontal y la resistividad del suelo para configuraciones que integren ( $120 < \rho < 180 \Omega - m$ )**



Fuente: elaboración propia.

#### 4.20. Influencia de un buen diseño de puesta a tierra en general

Puede resultar sencillo, para los ingenieros que se dedican al estudio y diseño de los sistemas de puesta a tierra SPT, entender la necesidad de un valor adecuado de la resistencia de puesta a tierra. Por ejemplo: se puede entender con relativa facilidad en base a los conocimientos generales que presenta la ingeniería, que un valor lo suficientemente bajo de una resistencia de puesta a tierra es necesario.

En los sistemas con cable neutral puesto a tierra, para poder garantizar la operación confiable de las protecciones con circulación de corriente de falla a tierra; es necesario un valor bajo de resistencia tanto como sea posible para

que no se limite la corriente a tierra, para que, en cualquier contingencia, las protecciones puedan funcionar adecuadamente.

Para garantizar que, con la circulación a tierra de una corriente, las tensiones de paso y de contacto que se le asocian al nivel de la superficie de la tierra, no constituyan un peligro para la vida, es necesario contar con un valor bajo de resistencia tanto como sea posible.

Para garantizar que con la circulación a tierra de una corriente de impulso (rayo), no se produzca una descarga inversa del aislamiento, es necesario un valor bajo de resistencia tanto como sea posible de tal manera que el producto de la corriente a tierra por la impedancia de impulso no supere la tensión crítica de ruptura de polaridad negativa del aislamiento.

Para garantizar un valor bajo de sobretensiones temporales en las fases (fase no falladas), con contingencia de falla a tierra de manera que no se violen los requerimientos de energía (capacidad térmica); de los modernos pararrayos, es necesario un valor bajo de resistencia tanto como sea posible.

Sin embargo, como se trata de presentar las características de no uniformidad y anisotropía del suelo y la respuesta a impulso de los sistemas de puesta a tierra SPT, muchos factores son involucrados en ocasiones difíciles de conocer o estimar en la práctica y el diseñador debe analizar y utilizar con inteligencia los resultados más confiables del conocimiento en estos campos en su debido momento.

En la mayoría de los países de Latinoamérica, por diversas razones, los sistemas de puesta a tierra de las líneas de transmisión no se presta la atención necesaria al mantenimiento de los SPT, y esto posteriormente constituye una

causa muy importante de malas operaciones a los equipos eléctricos instalados, que a la larga terminan en daño de aislamiento de elementos equipos en salidas indebidas de estas redes de transmisión, sobre todo ante el fenómeno de las descargas atmosféricas.

Si se tiene en cuenta que Guatemala, es un país con tormentas de alta intensidad se comprende el nivel de riesgo a que se somete el Sistema Nacional Interconectado (SNI) y en particular las redes de media tensión de 69 kV.

De acuerdo con lo anterior este trabajo presento énfasis en la medición de la resistividad aparente del suelo y en la determinación de la resistencia del sistema de puesta a tierra, aplicando alta frecuencia para así poder determinar un valor bajo de resistencia, tanto como sea posible para un buen funcionamiento del sistema eléctrico al momento de una falla.

#### **4.21. ASPIX**

Aspix es un software para el diseño de mallas de puesta a tierra de líneas de transmisión y de subestaciones eléctricas con base en los requerimientos en la norma IEEE 80, el software calcula la resistencia de la malla, así como las tensiones de toque y de paso para diferentes disposiciones de cables y de electrodos verticales (varillas). El programa permite simular las mallas de puesta a tierra en terrenos con el método de resistividad de Wenner.

Aspix contienen una barra de menú, una barra de herramientas y dos paneles. La barra de menú y la barra de herramientas proporcionan acceso a los archivos de datos, gráficos, simulación, y otras facilidades del programa. El panel izquierdo proporciona acceso a los datos físicos de la malla de puesta a tierra (conductores horizontales y varillas), a las áreas y a los perfiles en los cuales se evalúan las tensiones. El panel de la derecha muestra la vista en planta de la malla y los resultados de las simulaciones.<sup>49</sup>

Se presentan ejemplos de las configuraciones planteadas anteriormente utilizando el Software Aspix versión 2.0 2016.

---

<sup>49</sup> Sparta Lightning Protection. *Manual de usuario Aspix, Versión 2.0.* p. 20.

#### 4.22. Análisis de resultados

A lo largo de la línea de transmisión se obtuvieron datos de resistividad aparente del suelo en ohm-metro a través del método de Wenner dando como resultado los siguientes rangos: de 11,4  $\Omega$ -m hasta los 150  $\Omega$ -m.

Una baja resistividad de suelo nos indica que la resistencia de puesta a tierra será baja y viceversa.

Dando como resultado tres grupos de resistividad los cuales fueron:

- Para:  $\rho < 60 \Omega - m$
- Para:  $60 < \rho < 120 \Omega - m$
- Para:  $120 < \rho < 180 \Omega - m$

Dependiendo, de la resistividad del suelo así fue elegida el tipo de configuración para analizar el sistema de puesta a tierra de la línea planteada, para así poder obtener datos de acuerdo con el numeral 3.9 del capítulo 3 de este estudio.

Una resistividad 10-50  $\Omega$ -m se considera excelente, de 50-100  $\Omega$ -m se considera muy buena, de 100-200  $\Omega$ -m se considera buena, de 200-1000  $\Omega$ -m se considera no aceptable.

Se elaboró un análisis en el cual se pudo observar el comportamiento de la resistencia a lo largo de la línea de transmisión, aplicando corrientes de alta frecuencia en los SPT dando como resultado las siguientes resistencias: para la configuración tipo I 10,09  $\Omega$ , para la configuración tipo II 11,90  $\Omega$ , para la

configuración tipo III 12,94  $\Omega$ , para la configuración tipo II anillo 10,67  $\Omega$ , para la configuración tipo III anillo 13,90  $\Omega$ .

Conforme a la resistencia solicitada en el numeral 3.9 del capítulo 3 de este estudio las 5 configuraciones cumplen con la resistencia máxima de 15 $\Omega$ .

Para determinar las configuraciones en los distintos SPT que se utilizaron a lo largo de la línea de transmisión, se basó por medio del nivel de resistividad aparente del suelo, en el cual se pudo observar que para la configuración tipo I es recomendable utilizarla con una resistividad aparente del suelo del rango de 0 a 60  $\Omega$ -m, esta configuración presentó una resistencia aceptable que se modelo desde un valor de 9,86 ( $\Omega$ ) hasta un valor de 10,95 ( $\Omega$ ), estos valores se deben a que la resistividad del suelo es baja y no presenta una oposición fuerte al paso de la corriente y con un solo electrodo de bajada a tierra se cumple con la resistencia solicitada en el numeral 3.9 del capítulo 3.

Para la configuración tipo II, se recomienda que se utilice con una resistividad aparente del suelo de  $60 < \rho < 120$   $\Omega$ -m, con esta configuración se obtuvieron datos de resistencia que van desde el rango de los 10,63  $\Omega$  hasta un valor de 12,95  $\Omega$ . aquí se presentan valores un poco más elevados que los anteriores, esto se debe a que la resistividad aparente del suelo es mayor y presenta una mayor oposición al paso de la corriente eléctrica y por esta razón se utilizó la configuración tipo II, que utiliza 2 electrodos de bajada de puesta a tierra, y también se utilizó la configuración tipo II en anillo, presentando una resistencia de 10,67 ( $\Omega$ ), la cual es una configuración de dos electrodos de bajada de puesta a tierra óptima para resistividades de  $60 < \rho < 120$   $\Omega$ -m y cumple con la resistencia solicitada en el numeral 3.9 del capítulo 3.

Para las configuraciones tipo III y tipo III anillo, estas son recomendadas que se utilicen para resistividades de suelo mayores a las anteriores en el rango de:  $120 < \rho < 180 (\Omega - m)$  con esta configuración se obtuvieron datos de resistencia que van desde los rangos de los 11,37 ( $\Omega$ ) hasta un valor de 14,96 ( $\Omega$ ), como resultados se obtuvieron los valores de mayor resistencia a lo largo de la línea de transmisión, esto se debe a que la resistividad del suelo presenta mayor oposición al paso de la corriente eléctrica, por esto los modelos propuestos para este último rango, ya que las configuraciones que se utilizaron para medir la resistencia de los SPT poseen más electrodos de bajada de puesta a tierra y esto contribuye a tener los valores requeridos en el numeral 3.9 del capítulo 3 de este estudio.

Los valores obtenidos en campo, para las mediciones de resistencia para la configuración tipo I, si cumple con la resistencia máxima tolerable en un 100 %, para la configuración tipo II y tipo II anillo, si cumplen con la resistencia máxima tolerable en un 100 % para la configuración tipo III y tipo III anillo cumplen en un 98 % con la resistencia máxima tolerable.

Los datos obtenidos a lo largo de la línea de transmisión por el método de alta frecuencia utilizando el telurómetro tm25m, se determinaron por medio del método de caída de potencial, con una corriente máxima de 25 KHZ, los valores de resistencia para las diferentes configuraciones que se utilizaron están dentro de los parámetros establecidos en el numeral 3.9 del capítulo 3 y cumplen con la resistencia máxima de 15  $\Omega$ , dichos datos se obtuvieron en tiempo de verano.

La experiencia del operador del equipo influye en la toma de lecturas a través del uso continuo del equipo, el operador se especializa más en la toma de datos por lo que los resultados tienden a ser más confiables por la experiencia. Las relaciones que se determinan es que si la resistividad del suelo

es pequeña de un rango de 10-200  $\Omega$ -m, se considera buena de 200  $\Omega$ -m en adelante se considera no aceptable, pero esto solo con la experiencia del operador se puede lograr, se presenta una relación estadística que determina lo siguiente: una baja resistividad de suelo nos indica que la resistencia de puesta a tierra será baja y viceversa.





## CONCLUSIONES

1. Se obtuvieron datos de resistividad aparente del suelo en ohm-metro a través del método de Wenner dando como resultado los siguientes rangos de: 11,4  $\Omega$ -m hasta 180  $\Omega$ -m, los cuales se dividieron en tres grupos con los siguientes rangos de medición: datos menores a 60  $\Omega$ -m, datos entre 60  $\Omega$ -m y 120  $\Omega$ -m, y por último, datos de 120  $\Omega$ -m hasta 180  $\Omega$ -m, una baja resistividad de suelo nos indica que la resistencia de puesta a tierra será baja y viceversa.
2. Se elaboró un análisis, en el cual se pudo observar valores de resistencia aplicando corrientes de alta frecuencia en los (SPT) en ohm, dando como resultado valores de 10,09  $\Omega$  hasta 13,90  $\Omega$ , conforme a la resistencia solicitada en el numeral 3.9 del capítulo 3 de este estudio las 5 configuraciones cumplen con la resistencia máxima de 15  $\Omega$ .
3. Para determinar e identificar los tipos de diseño recomendables de los (SPT) para las distintas configuraciones de suelo, se basó por medio del nivel de resistividad aparente del suelo y se determinó que para valores pequeños de resistividad debe utilizarse la configuración tipo I para valores intermedios debe utilizarse la configuración tipo II y tipo II en anillo, y para valores mayores debe utilizarse la configuración tipo III y tipo III anillo.
4. El estado actual de la línea de transmisión cumple con las Normas Técnicas de Diseño y Operación del Servicio de Transporte de Energía Eléctrica (NTDOST) y con las Normas Técnicas de Diseño y Operación

de las Instalaciones de Distribución (NTDOID). Con respecto a las mediciones de resistencia de los (SPT) expuestas en el numeral 3.9 criterios para el diseño de una puesta a tierra del capítulo 3 de este estudio.

5. Se utilizó Aspix es un software para el diseño de mayas de puesta a tierra, se calculó la resistencia de la malla, de las configuraciones planteadas en esta investigación y se determinó que el programa muestra datos precisos como las mediciones hechas por el telurómetro digital tm25m, se comprobó la fiabilidad de los datos obtenidos y la confiabilidad de los mismos.

## RECOMENDACIONES

1. Para estructuras ubicadas en suelos con resistividades menores o iguales a 50 Ohm-m o suelos con un  $\text{ph} < 5$ , se recomienda la utilización de acero recubierto de cobre, debido a que es más resistente a la corrosión, la cual se puede presentar debido a las propiedades ácidas del suelo.
2. Verificar constantemente la calibración del equipo a utilizar y supervise constantemente la aplicación de los métodos recomendados en este estudio y realice las mediciones en época de verano.
3. Si la resistencia de puesta a tierra de la estructura es mayor a  $25\Omega$ , continúe instalando los electrodos horizontales, uno por uno con su correspondiente medición de resistencia de tierra, hasta que se obtenga la resistencia deseada.
4. Como una alternativa para suelos con resistividades mayores a 760 Ohm-m, se recomienda la instalación de un pozo especial (tratamiento químico de terrenos para instalaciones de puesta a tierra), para mejorar la resistividad del suelo.
5. Entre más alejado esté el electrodo de lectura, se obtendrán mejores resultados en la medición.



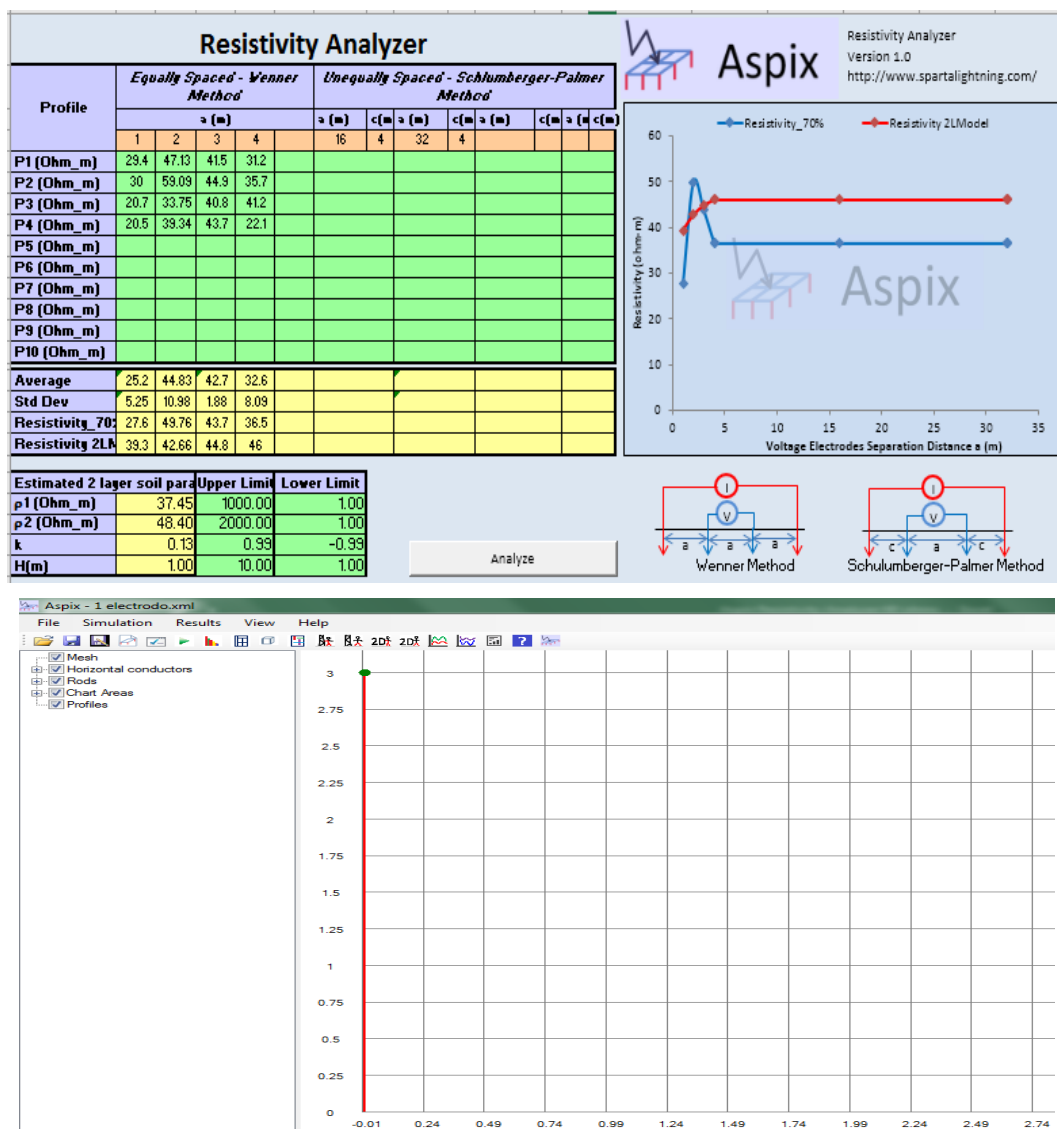
## BIBLIOGRAFÍA

1. Eléctrica, C. N. *Compendio de normas técnicas*. Guatemala: Servi Prensa, 2016. 89 p.
2. GARCÍA MÁRQUEZ, Rogelio. *La puesta a tierra de instalaciones eléctricas*. España: MARCOMBO, S. A., 2007. 192 p.
3. IEB. *Memoria de coordinamiento de aislamiento y verificación de apantallamiento contra descargas eléctricas atmosféricas de líneas de transmisión 896-LTM-141, Memoria de selección del cable de guarda,896-LTM-010-R2,896-LTM-002 memoria descriptiva, criterios básicos de diseño memoria de selección del conductor,896-ltm-141-r3 selección del aislamiento y apantallamiento, tre-pet-69 memoria de estudio de distancias mínimas de seguridad,tre-pet-69 memoria de cálculo de estudio de suelos aplicación en el diseño de las cimentaciones*. Guatemala: De la línea Incinate y Carlos Dori3n, 2008. 293 p.
4. IEEE Standards Association. *IEEE Guide for Measuring Earth Resistivity Ground Impedance, and Earth Surface Potentials of a Grounding System*. USA: Institute of Electrical and Electronics Engineers, INC., 2012. 239 p.
5. \_\_\_\_\_. *IEEE Guide for Safety in AC Substation*. USA: Institute of Electrical and Electronics Engineers, INC., 2013. 193 p.

6. INDEX. *Fundamentos del sistema de puesta a tierra y su importancia para verificar la puesta a tierra y la resistividad en los terrenos*. [en línea]. <<http://www.emb.cl/electroindustria>>. [Consulta: 20 de septiembre de 2018].
7. L. BOYLESTAD, Robert. *Introducción al análisis de circuitos*. México: Pearson Educación, 2007. 200 p.
8. MEGABRAS. *Telurómetro digital de alta frecuencia TM25m*. [en línea]. <[www.megabras.com](http://www.megabras.com)>. [Consulta: 20 de septiembre de 2018.]
9. PÉREZ LORCA, Walter Esaú; SERRANO BARRIOS, Christian Javier y SURIO GUEVARA, Oscar Orlando. *Manual de aplicación de la Norma IEEE Std 81 para líneas y subestaciones eléctricas de transmisión*. México: Pearson Education, 2015. 122 p.

# APÉNDICES

## Apéndice 1. Configuración tipo I (sistema de un electrodo)



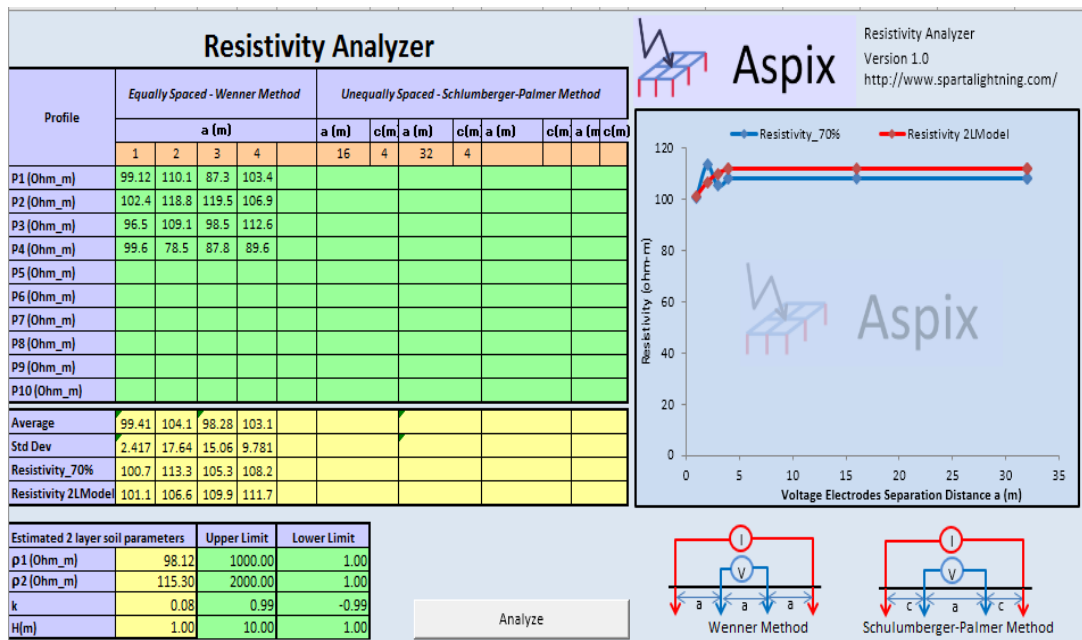
Fuente: elaboración propia, empleando Aspix 2.0.



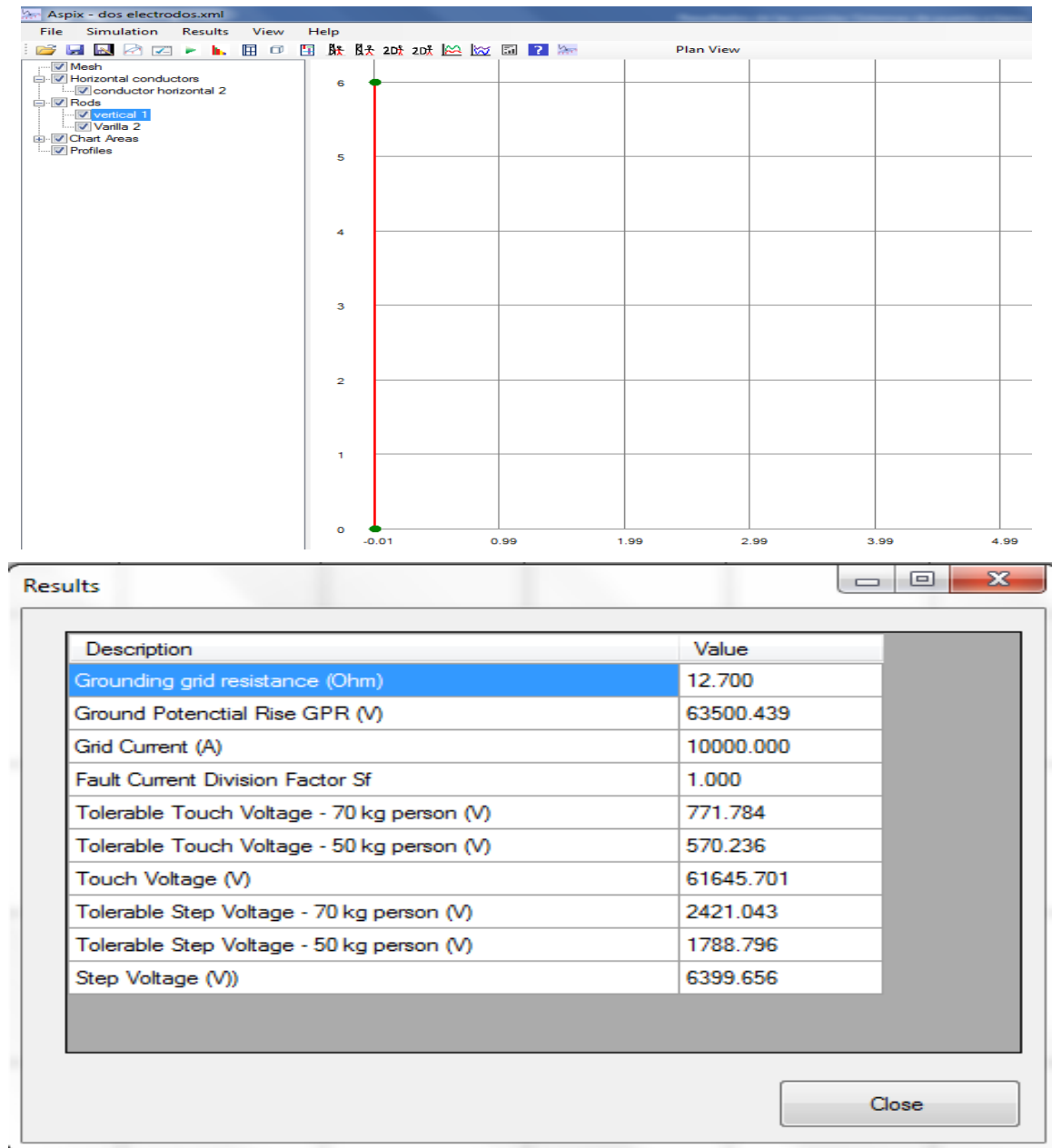
## Apéndice 2. Configuración tipo II (sistema de dos electrodos)

Description	Value
Grounding grid resistance (Ohm)	9.860
Ground Potential Rise GPR (V)	49299.889
Grid Current (A)	10000.000
Fault Current Division Factor Sf	1.000
Tolerable Touch Voltage - 70 kg person (V)	768.073
Tolerable Touch Voltage - 50 kg person (V)	567.494
Touch Voltage (V)	48530.138
Tolerable Step Voltage - 70 kg person (V)	2406.198
Tolerable Step Voltage - 50 kg person (V)	1777.828
Step Voltage (V)	1170.729

Close

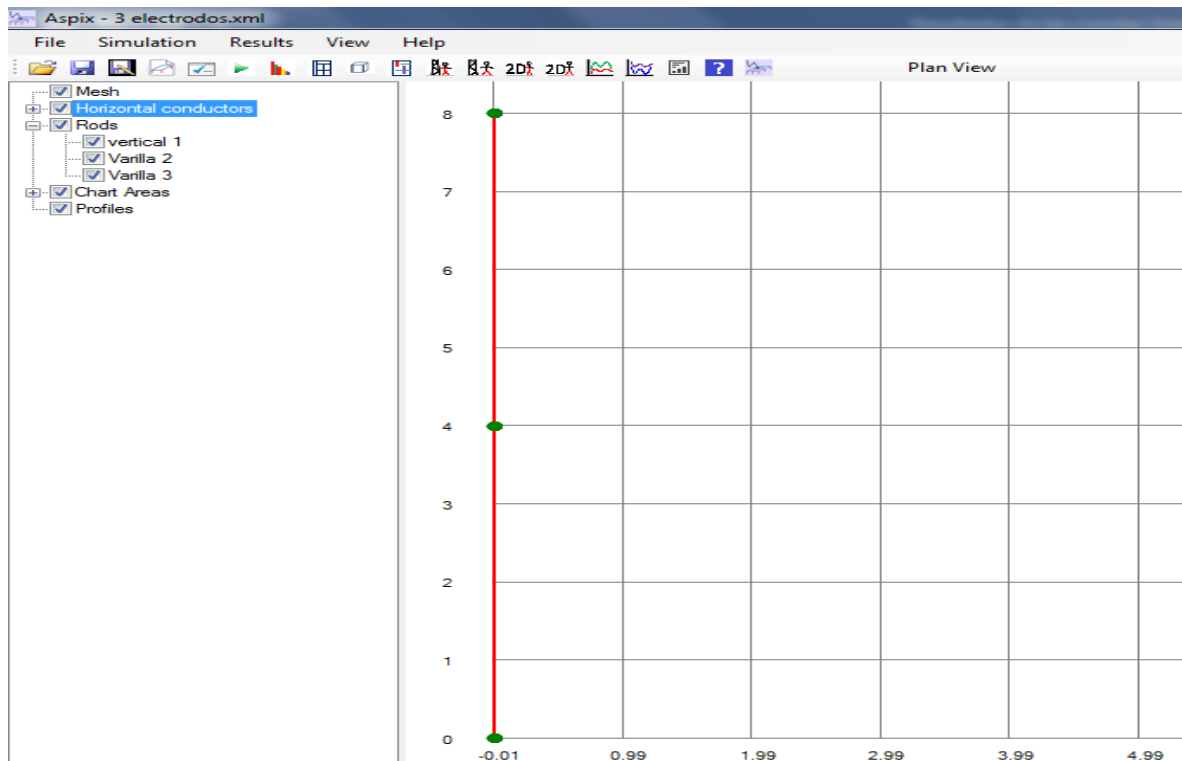
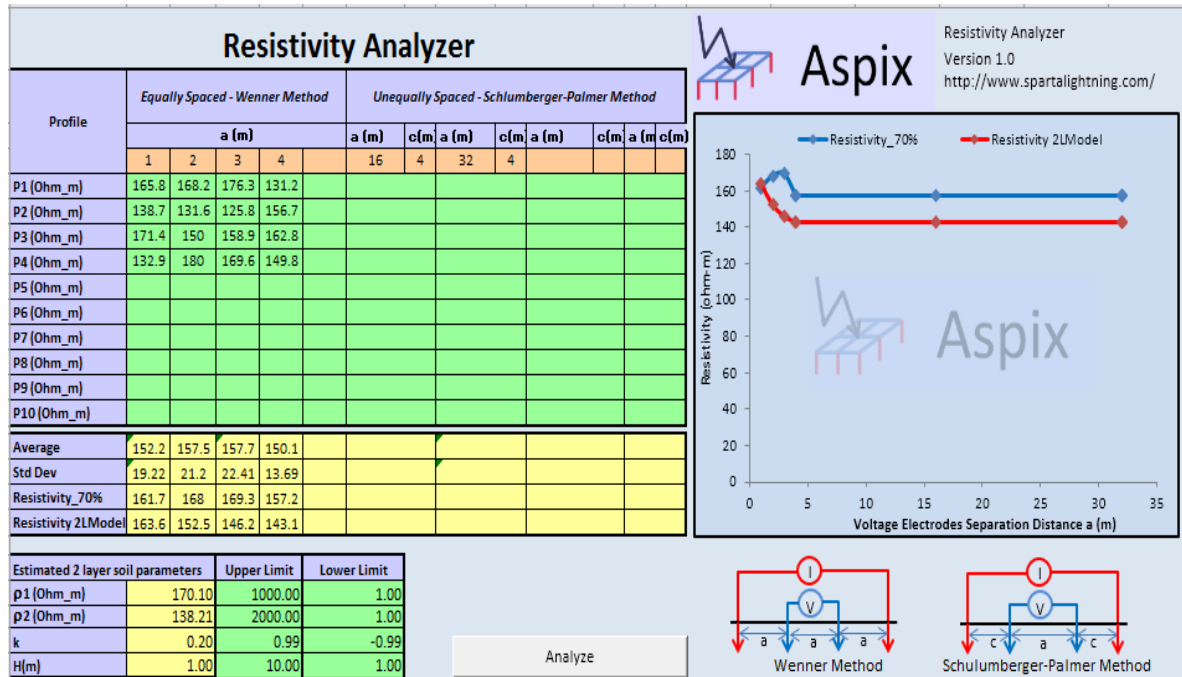


Continuación apéndice 2.



Fuente: elaboración propia, empleando Aspix 2.0.

### Apéndice 3. Configuración tipo III (sistema de tres electrodos)



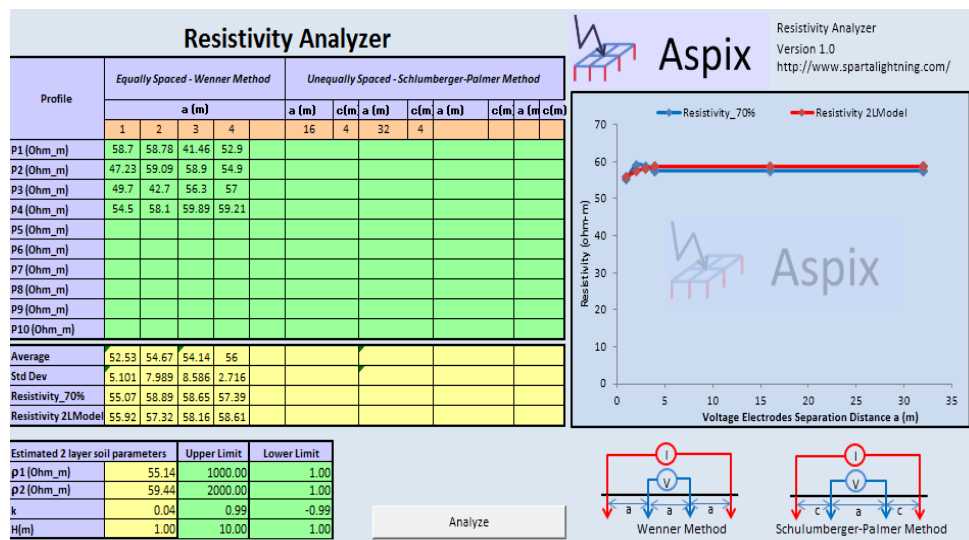
Continuación apéndice 3.

Description	Value
Grounding grid resistance (Ohm)	14.510
Ground Potential Rise GPR (V)	72549.568
Grid Current (A)	10000.000
Fault Current Division Factor Sf	1.000
Tolerable Touch Voltage - 70 kg person (V)	776.188
Tolerable Touch Voltage - 50 kg person (V)	573.489
Touch Voltage (V)	70297.813
Tolerable Step Voltage - 70 kg person (V)	2438.656
Tolerable Step Voltage - 50 kg person (V)	1801.809
Step Voltage (V)	12969.944

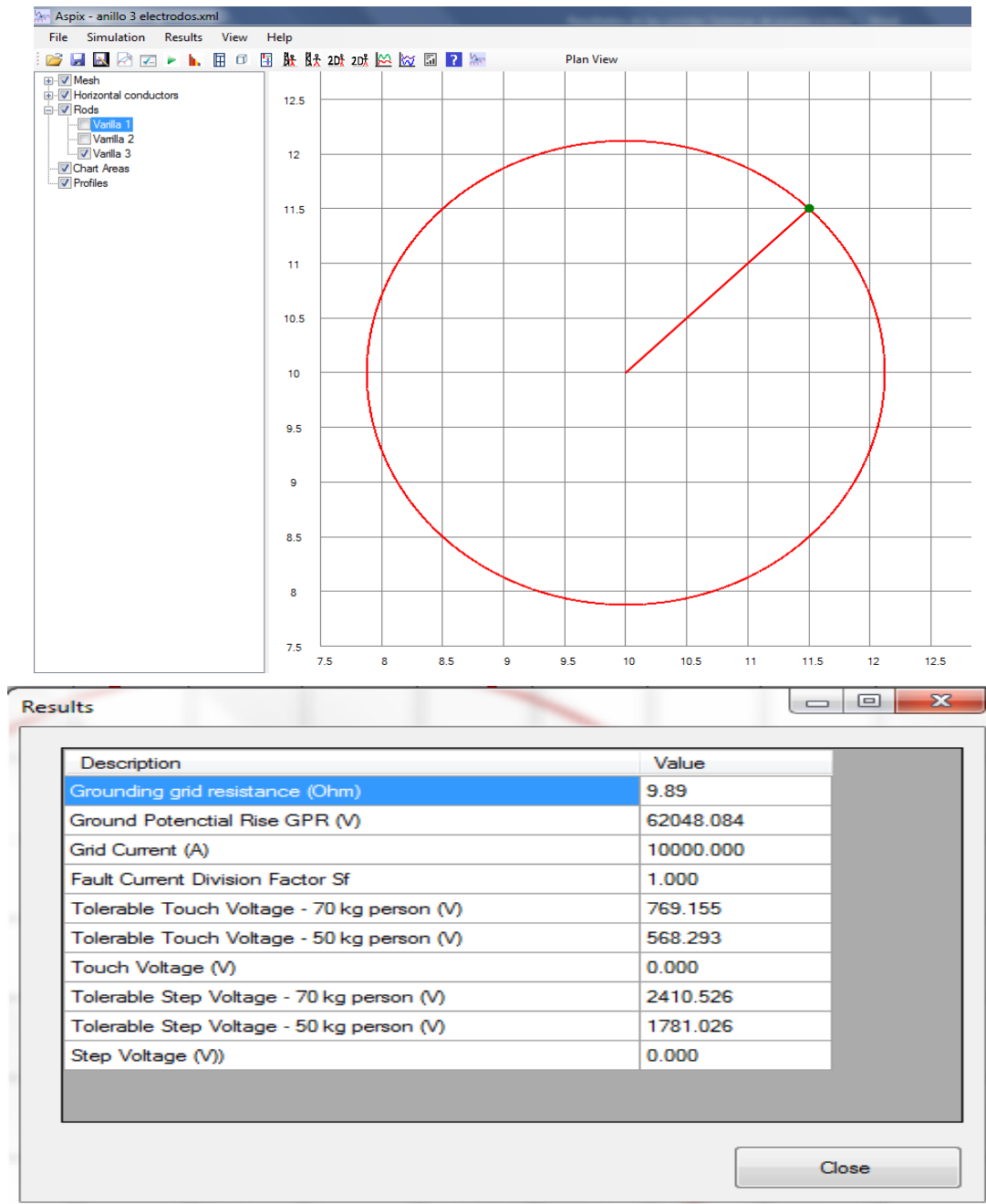
Close

Fuente: elaboración propia, empleando Aspix 2.0.

#### Apéndice 4. Configuración tipo I anillo (sistema de un electrodo)

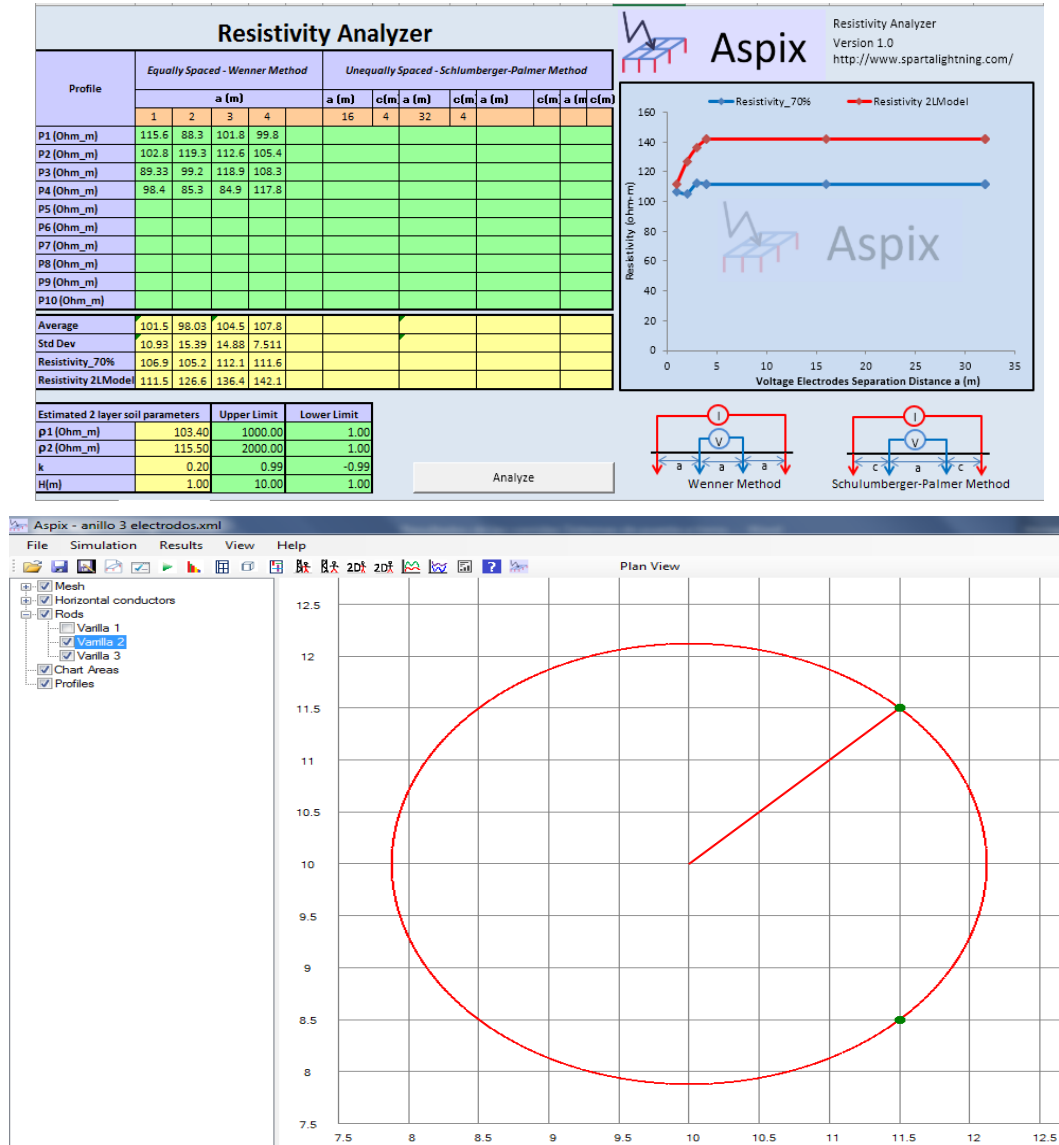


#### Continuación apéndice 4.



Fuente: elaboración propia, empleando Aspix 2.0.

## Apéndice 5. Configuración tipo II en anillo (sistema de dos electrodos)

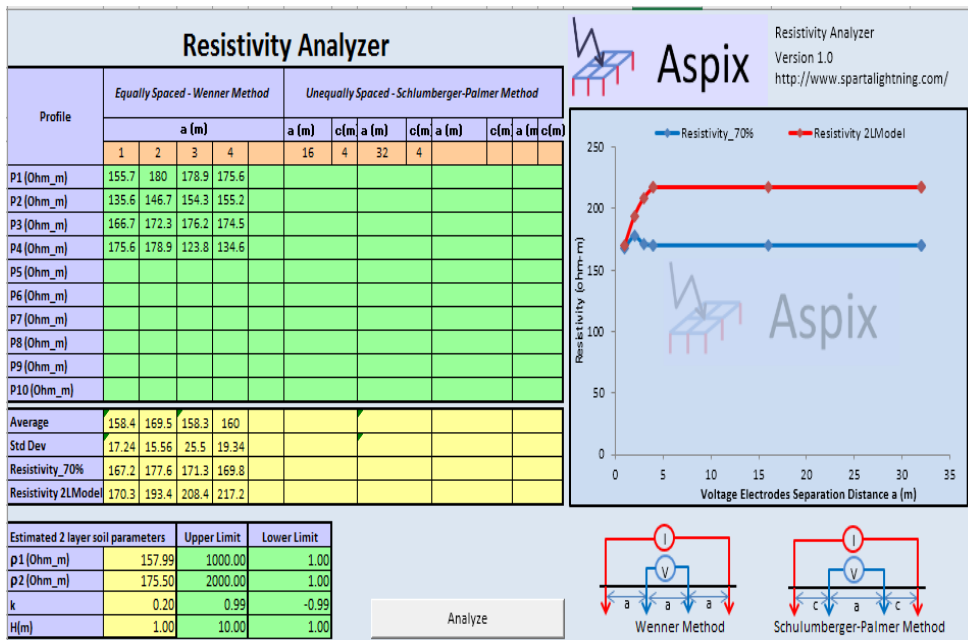


Continuación apéndice 5.

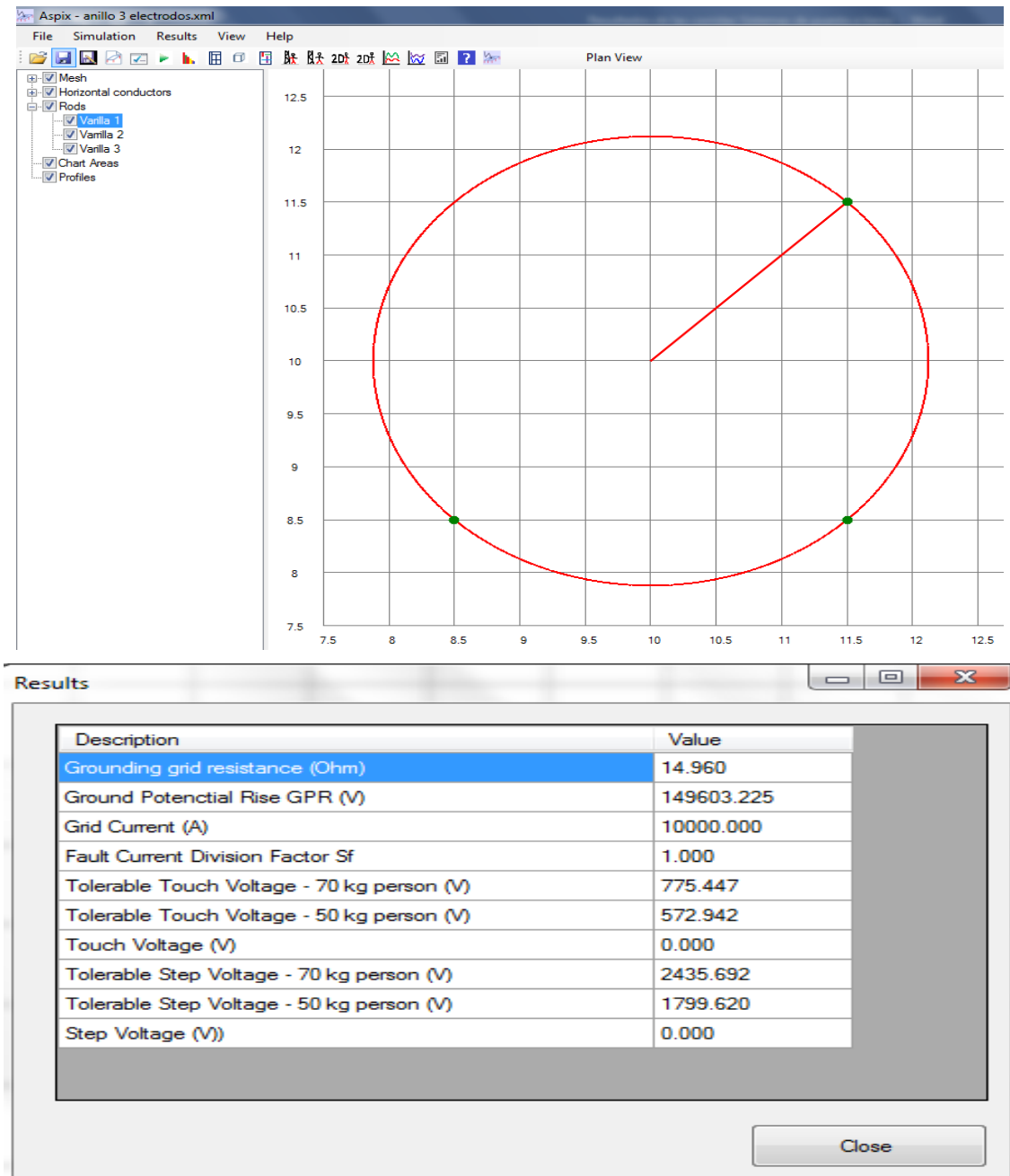
Description	Value
Grounding grid resistance (Ohm)	10.679
Ground Potential Rise GPR (V)	106791.113
Grid Current (A)	10000.000
Fault Current Division Factor Sf	1.000
Tolerable Touch Voltage - 70 kg person (V)	772.107
Tolerable Touch Voltage - 50 kg person (V)	570.474
Touch Voltage (V)	0.000
Tolerable Step Voltage - 70 kg person (V)	2422.335
Tolerable Step Voltage - 50 kg person (V)	1789.751
Step Voltage (V)	0.000

Fuente: elaboración propia, empleando Aspix 2.0.

Apéndice 6. **Configuración tipo III en anillo (sistema de tres electrodos)**



Continuación apéndice 6.



Fuente: elaboración propia, empleando Aspix 2.0.



## Apéndice 7. Disposición de electrodos



Fuente: elaboración propia.

## Apéndice 8. Mediciones realizadas en campo



Fuente: elaboración propia.

Apéndice 9. **Mediciones realizadas en postes**



Continuación apéndice 9.



Fuente: elaboración propia.

## Apéndice 10. **Disposición de electrodos**



Fuente: elaboración propia.

Apéndice 11. **Fotografías de mediciones en campo**



Continuación apéndice 11.



Continuación apéndice 11.



Fuente: elaboración propia.

Apéndice 12. **Fotografías configuración en anillo**



Continuación apéndice 12.





Continuación apéndice 12.



Fuente: elaboración propia.

Apéndice 13. **Fotografía ensayo sondeo 1**



Fuente: elaboración propia.

Apéndice 14. **Fotografías muestras sondeo 1**

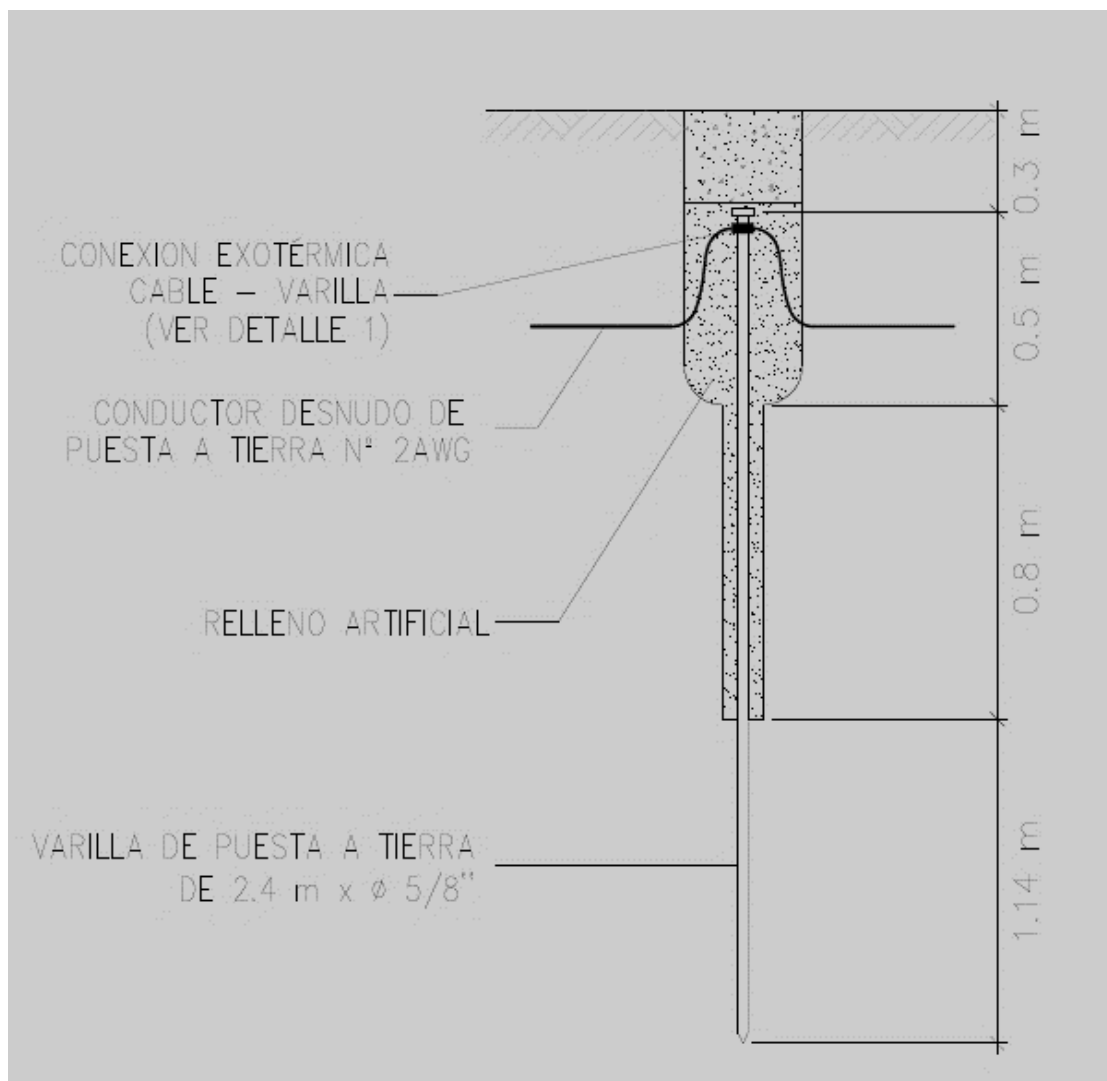


Fuente: elaboración propia.



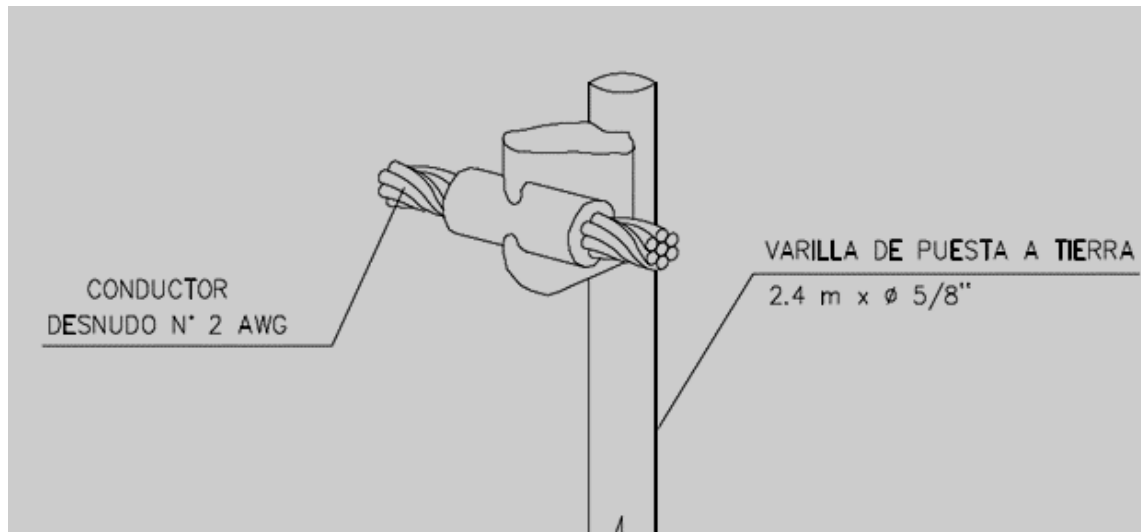
## ANEXOS

### Anexo 1. Instalación de la varilla de puesta a tierra con mejoramiento artificial de la resistividad del terreno



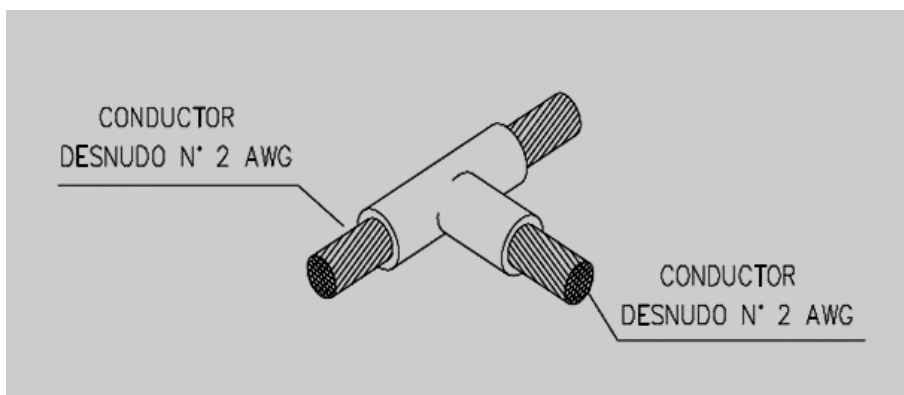
Fuente: TRELEC, S.A. *Varilla puesta a tierra*. [www.trelecsa.com](http://www.trelecsa.com). Consulta: 20 de septiembre de 2018.

Anexo 2. **Soldadura exotérmica cable pasante a varilla para conductor desnudo**



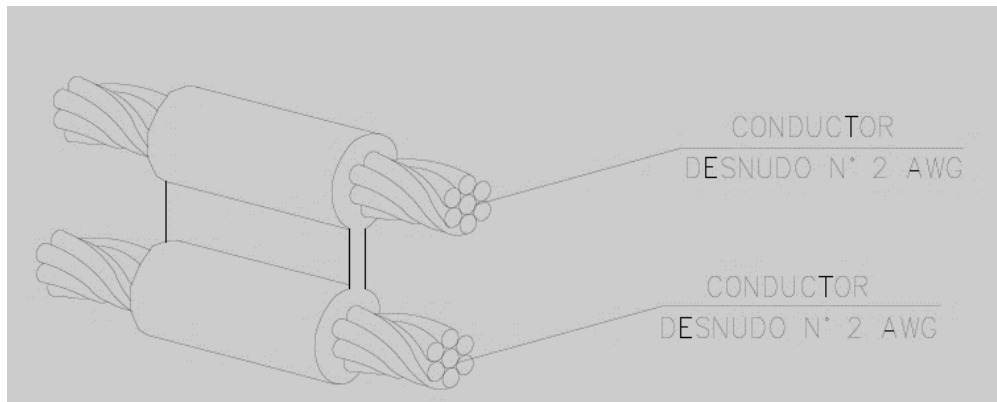
Fuente: TRELEC, S.A. *Varilla puesta a tierra.* [www.trelecsa.com](http://www.trelecsa.com). Consulta: 20 de septiembre de 2018.

Anexo 3. **Soldadura exotérmica cable en “T” para conductores de acero recubierto de cobre**



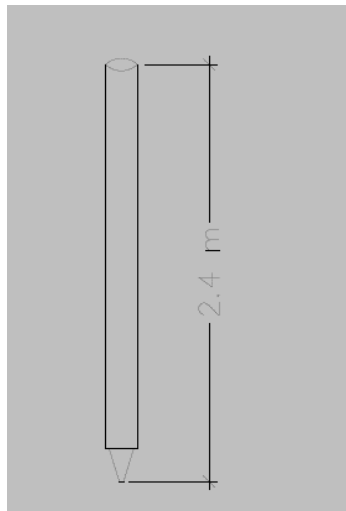
Fuente: TRELEC, S.A. *Cable en T para conductores de acero recubierto de cobre.* [www.trelecsa.com](http://www.trelecsa.com). Consulta: 20 de septiembre de 2018.

Anexo 4. **Soldadura exotérmica para dos conductores de acero recubierto de cobre o acero galvanizado**



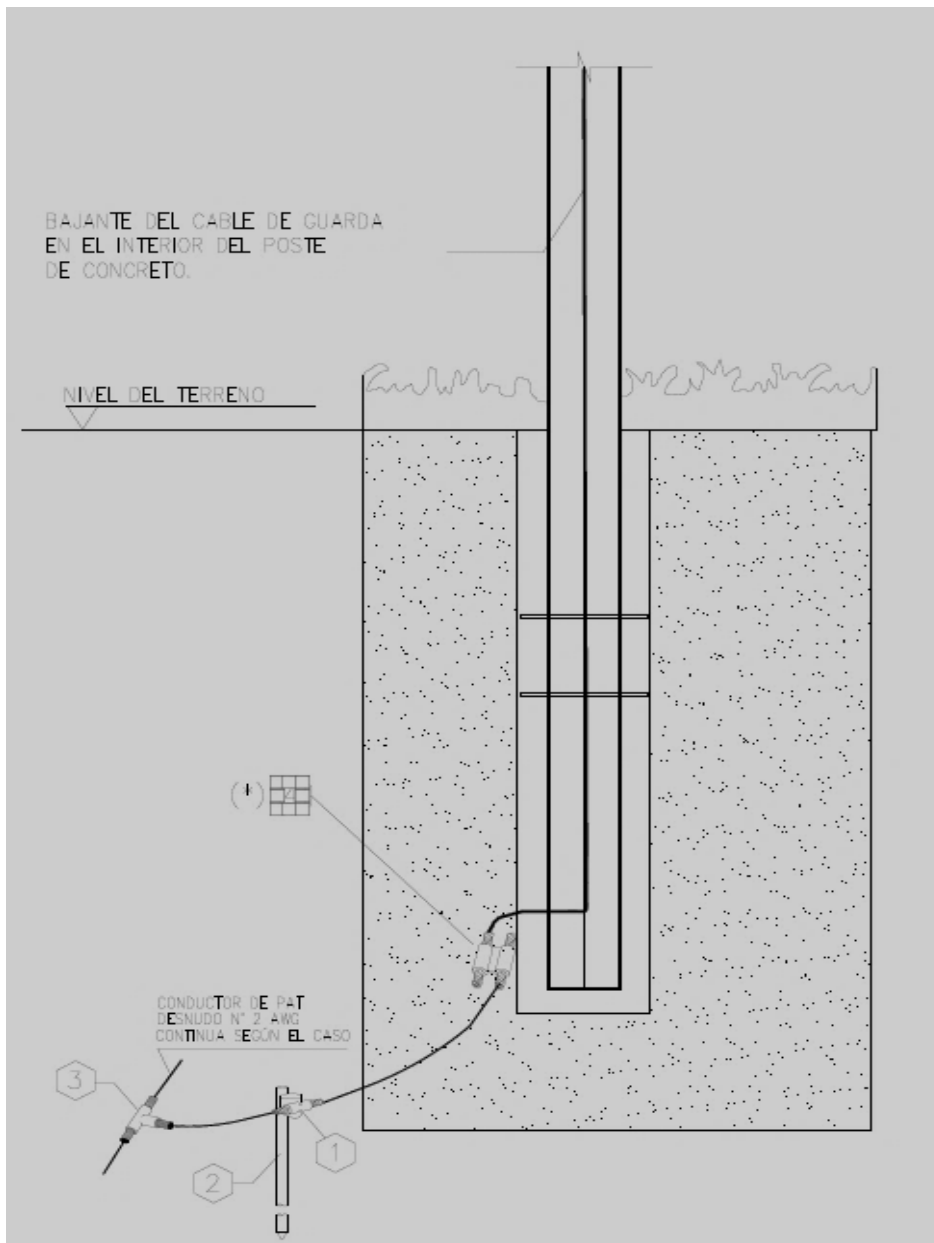
Fuente: TRELEC, S.A. *Soldadura exotérmica*. [www.trelecsa.com](http://www.trelecsa.com). Consulta: 20 de septiembre de 2018.

Anexo 5. **Varilla de puesta a tierra de acero galvanizado clase "B" o acero recubierto de cobre**



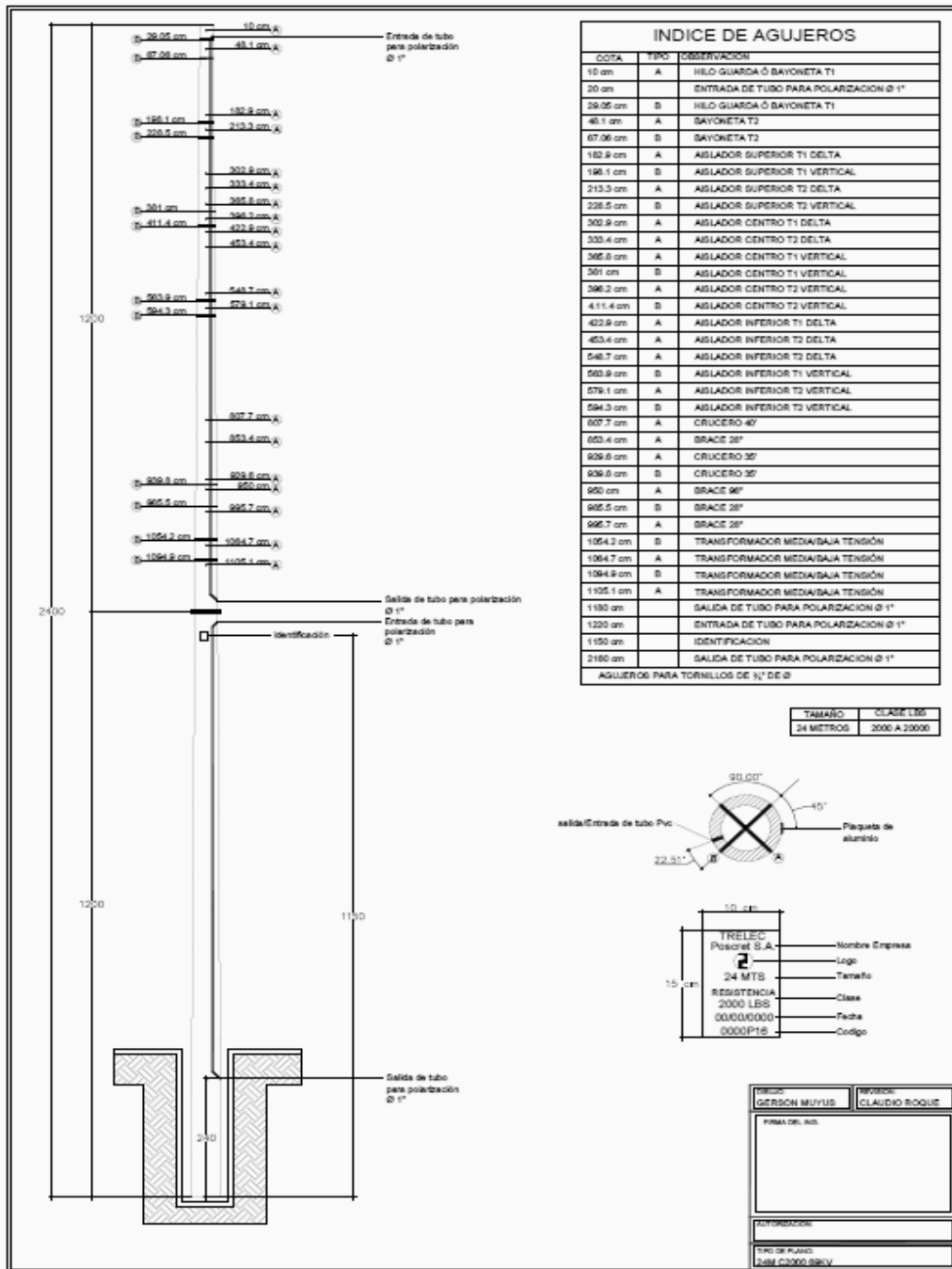
Fuente: TRELEC, S.A. *Varilla de puesta a tierra de acero galvanizado*. [www.trelecsa.com](http://www.trelecsa.com). Consulta: 20 de septiembre de 2018.

Anexo 6. **Bajante de puesta a tierra para postes desde el cable de guarda pasando en el interior del poste de concreto hasta la tierra**



Fuente: TRELEC, S.A. *Bajante de puesta a tierra*. [www.trelecsa.com](http://www.trelecsa.com). Consulta: 20 de septiembre de 2018.

## Anexo 7. Poste seccionado 24 metros clase 2 000 69 KV



Fuente: MUYUS, Gerson. Trelec S. A., Poste seccionado 24 metros clase 2000 69 KV. p. 7.



Anexo 8. **Distancia mínima de seguridad verticales de conductores sobre vías férreas, el suelo o agua**

**Tabla No. 2**  
**Distancias mínimas de seguridad verticales**  
**de conductores sobre vías ferreas,**  
**el suelo o agua**

Naturaleza de la superficie bajo los conductores	Conductores de comunicación aislados, retenidas aterrizadas, conductores neutros y cables eléctricos aislados (m)	Cables suministradores aislados de más de 750 V y conductores suministradores en línea abierta de 0 – 750 V (m)	Conductores suministradores en línea abierta arriba de 750 V a 22 kV. (m)	Conductores suministradores en línea abierta arriba de 22 a 470 kV. (m)
Vías férreas	7.2	7.5	8.1	8.1 + 0.01 m por cada kV arriba de 22 kV.
Carreteras, calles, caminos y otras áreas usadas para tránsito	4.7	5.0	5.6	5.6 m + 0.01 m por cada kV arriba de 22 kV.
Aceras o caminos accesibles sólo a peatones	2.9	3.8	4.4	4.4 m + 0.01 m por cada kV arriba de 22 kV.
Aguas donde no está permitida la navegación	4.0	4.6	5.2	5.2 m + 0.01 m por cada kV arriba de 22 kV
Aguas navegables incluyendo lagos, ríos, estanques, arroyos y canales con un área de superficie sin obstrucción de:	5.3	5.6	6.2	6.2/8.7/10.5 ó 12.3 m + 0.01 m por cada kV arriba de 22 kV
a) Hasta 8 ha	7.8	8.1	8.7	
b) Mayor a 8 hasta 80 ha	9.6	9.9	10.5	
c) Mayor de 80 hasta 800 ha	11.4	11.7	12.3	
d) Arriba de 800 ha				





Nota: todas las tensiones son dadas de fase a tierra

Fuente: MUYUS, Gerson. *Trelec S. A., Distancia de seguridad.* p. 2.

## Anexo 9. Especificaciones técnicas telurómetro TM-25M

TM 25m - ESPECIFICACIONES TÉCNICAS	
<b>RANGOS DE MEDICIÓN DE RESISTENCIA</b> 0 - 300 $\Omega$	<b>TEMPERATURA DE OPERACIÓN</b> de -5 °C a 50 °C
<b>FRECUENCIA DE OPERACIÓN</b> 25.000 Hz	<b>TEMPERATURA DE ALMACENAJE</b> de -15 °C a 65 °C
<b>CORRIENTE DE MEDICIÓN</b> 20 mA regulada automáticamente	<b>HUMEDAD</b> Hasta 95 % HRA, sin condensación
<b>COMPENSACIÓN DE COMPONENTE INDUCTIVA</b> Mediante banco de capacitores incorporado al equipo Capacidad máx.: 4,2 $\mu$ F Resolución: 10 nF	<b>ACCESORIOS PROVISTOS</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• 4 jabalinas de 50 cm de longitud, almas de acero con recubrimiento de cobre</li> <li>• 1 extractor de jabalina</li> <li>• 1 Cable blindado de 70 m</li> <li>• 1 Cable blindado extra de 50 m</li> <li>• 1 Cable de 30 m, para extensión del cable de corriente</li> <li>• 1 Cable de 70 m, para conectar la jabalina auxiliar de potencial</li> <li>• 1 Cable de 50 m, extra para conectar la jabalina auxiliar de potencial</li> <li>• 1 Adaptador de cable blindado a jabalina de corriente</li> <li>• 1 Cable para batería externa</li> <li>• 1 Cable para la conexión al electrodo incógnita</li> <li>• 1 Bolsa para el transporte de los accesorios</li> <li>• 1 Manual de operación en castellano</li> </ul>
<b>EXACTITUD EN LA MEDIDA DE RESISTENCIA</b> $\pm$ 2,5 % del valor medido $\pm$ 1 dígito	<b>DIMENSIONES DEL EQUIPO</b> 340 x 295 x 152 mm
<b>INDICADOR</b> Display alfanumérico (LCD)	<b>PESO DEL EQUIPO</b> Aprox. 4,5 kg
<b>RESISTENCIA MÁXIMA DE LAS JABALINAS AUXILIARES</b> 2000 $\Omega$ para la jabalina de corriente 2000 $\Omega$ para la jabalina de tensión	<b>PESO DE LOS ACCESORIOS</b> Aprox. 11 kg
<b>MEMORIA INTERNA</b> Con capacidad para almacenar hasta 2.000 mediciones	
<b>TRANSFERENCIA DE DATOS</b> Por conexión RS-232	
<b>SOFTWARE PROVISTO</b> Compatible con el sistema operativo Windows 2000, XP (Home o Profesional), NT 4.0	
<b>ALIMENTACIÓN</b> Batería recargable interna o batería externa de 12 V, autonomía de la batería interna mayor que 2 horas	
<b>CARGADOR DE BATERÍA</b> Para 100 - 240 V - 50/60 Hz	

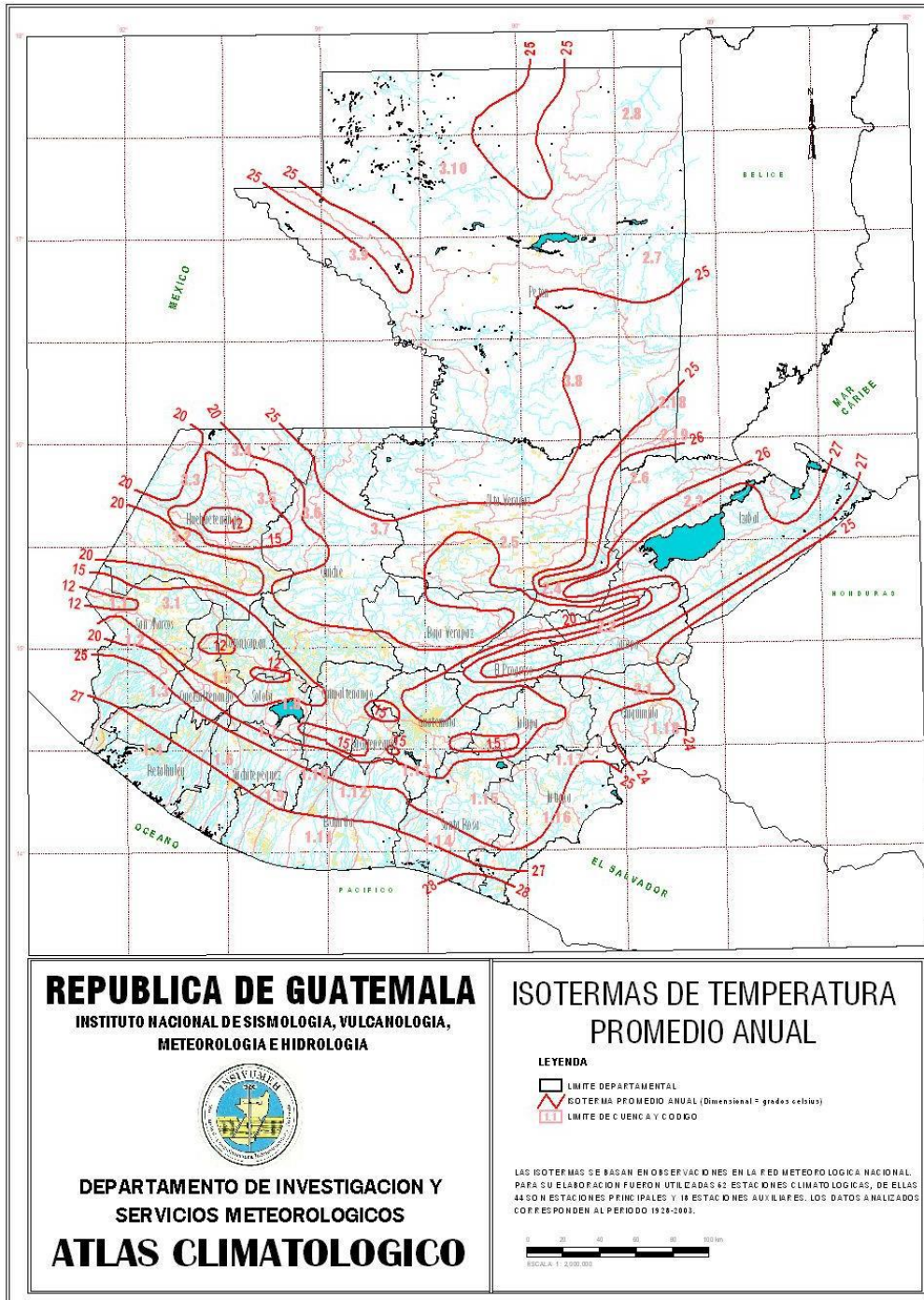
El fabricante se reserva el derecho de modificar estas especificaciones técnicas, sin previo aviso. Este catálogo no es un documento contractual.

	<p><b>MEGABRAS INDÚSTRIA ELETRÔNICA LTDA.</b> Rua General, 172 - Santo Amaro - CEP 04755-070 São Paulo - SP - Brasil Tel. +55 11 5641-8111 - Fax +55 11 5641-9755 megabras@megabras.com - www.megabras.com</p>			
---	--	---	---	---

Fuente: MEGABRAS. *Telurómetro digital de alta frecuencia TM25m.* www.megabras.com.

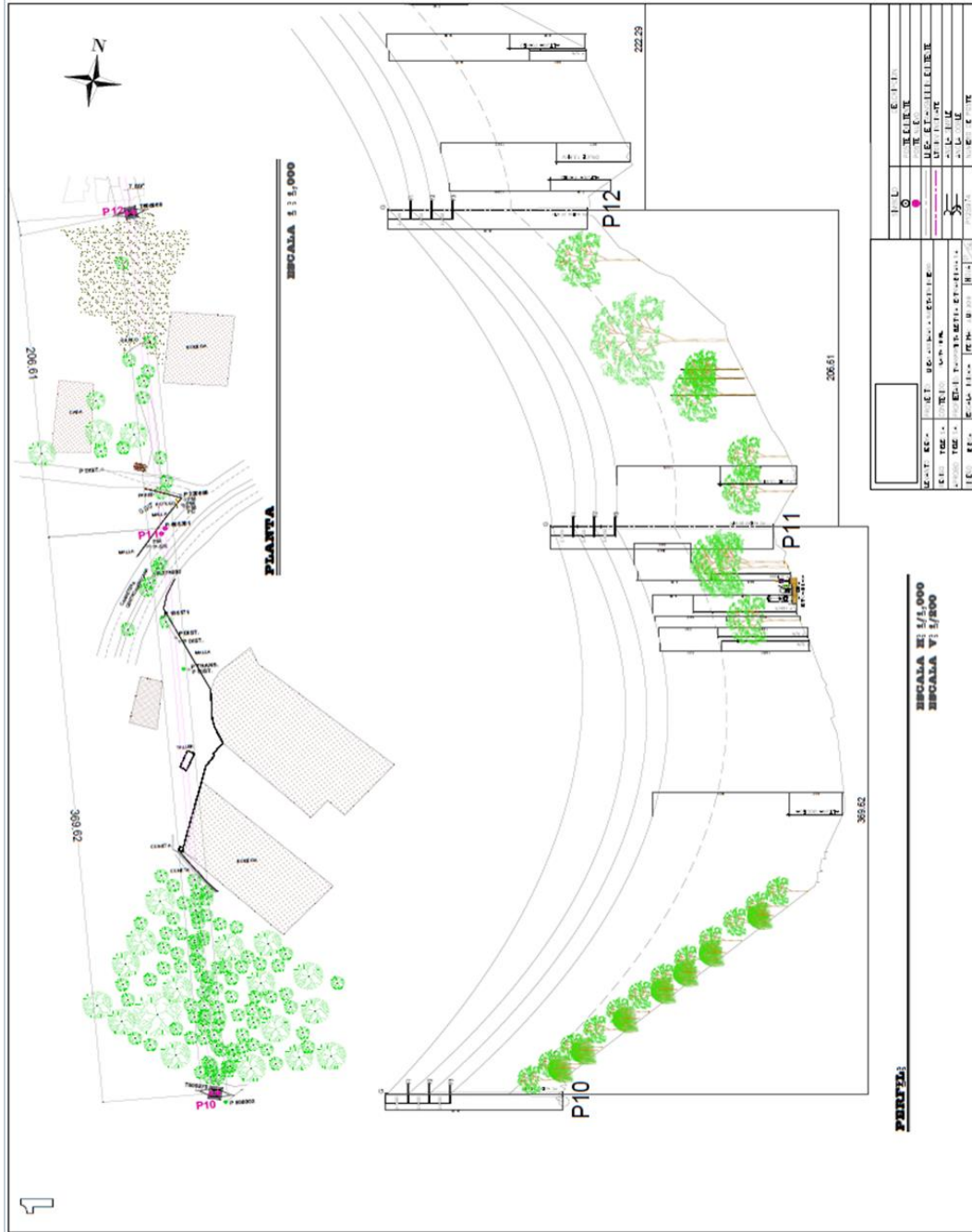
Consulta: 20 de septiembre de 2018.

Anexo 10. Mapa Insivumeh



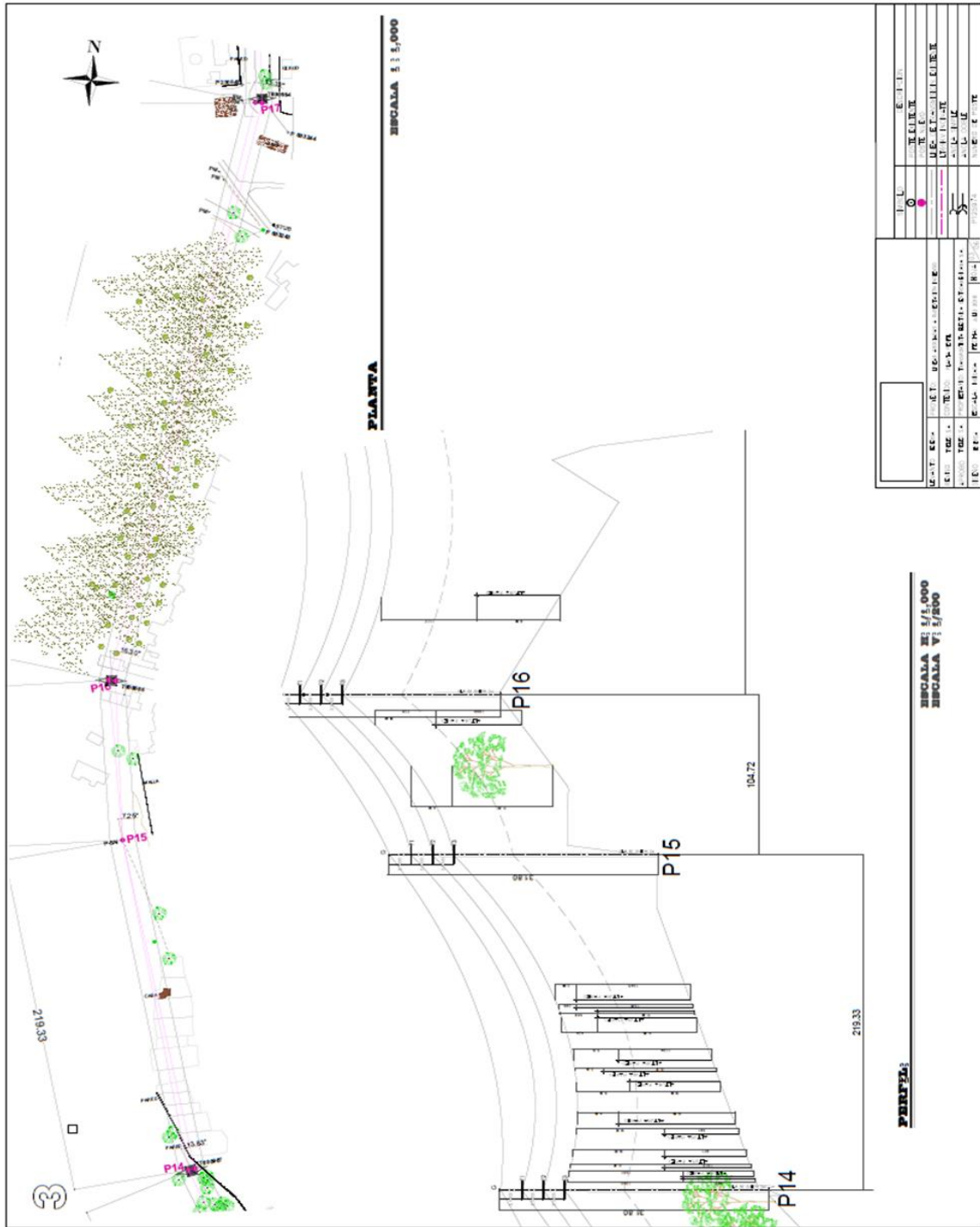
Fuente: República de Guatemala. *Atlas climatológico*. p. 5.

Anexo 11. Planos planta-perfil línea de transmisión Carlos Dorión-Kerns y Carlos Dorión-Incinate/Lourdes a 69 kV

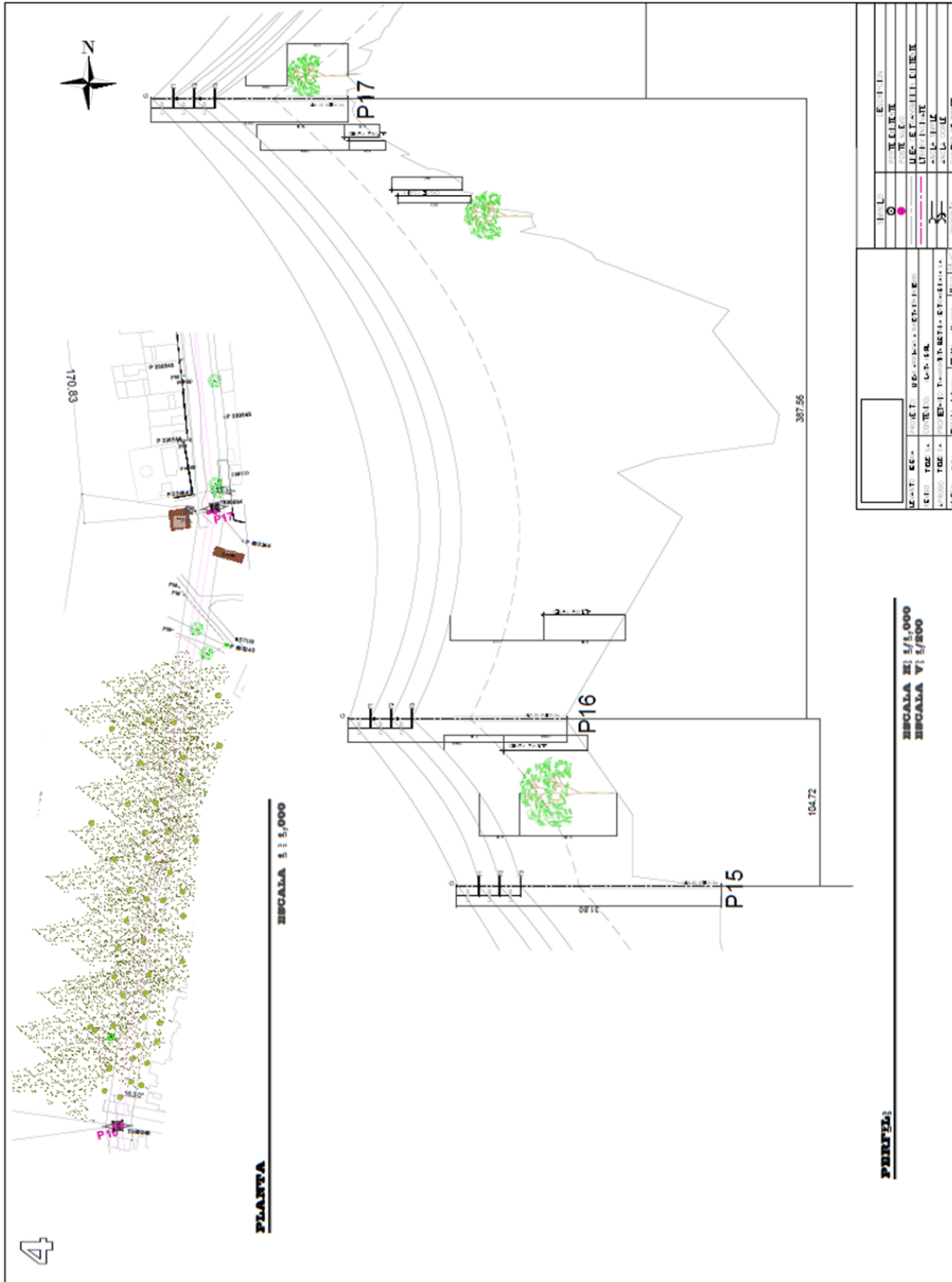




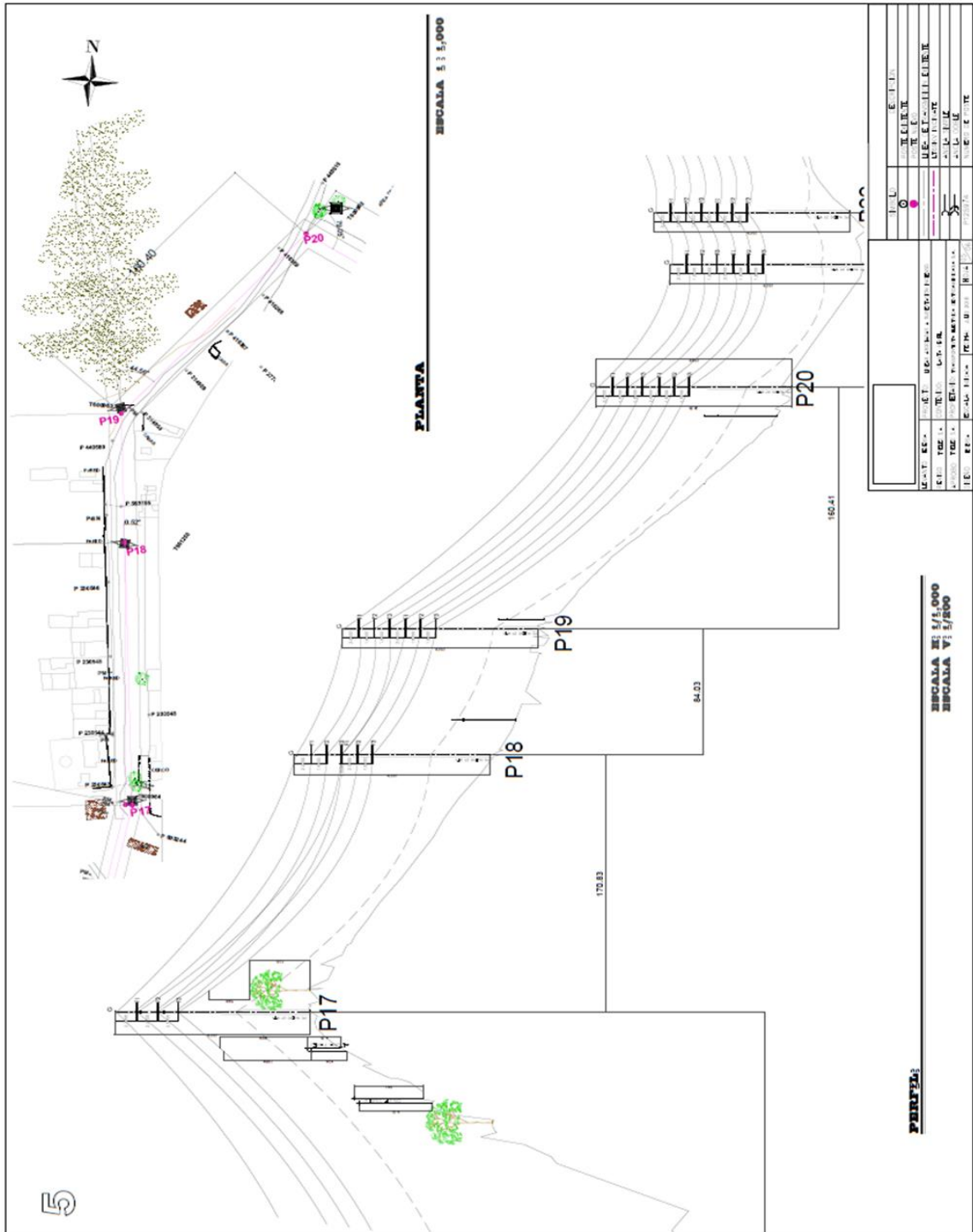
Continuación anexo 11.



Continuación anexo 11.



Continuación anexo 11.







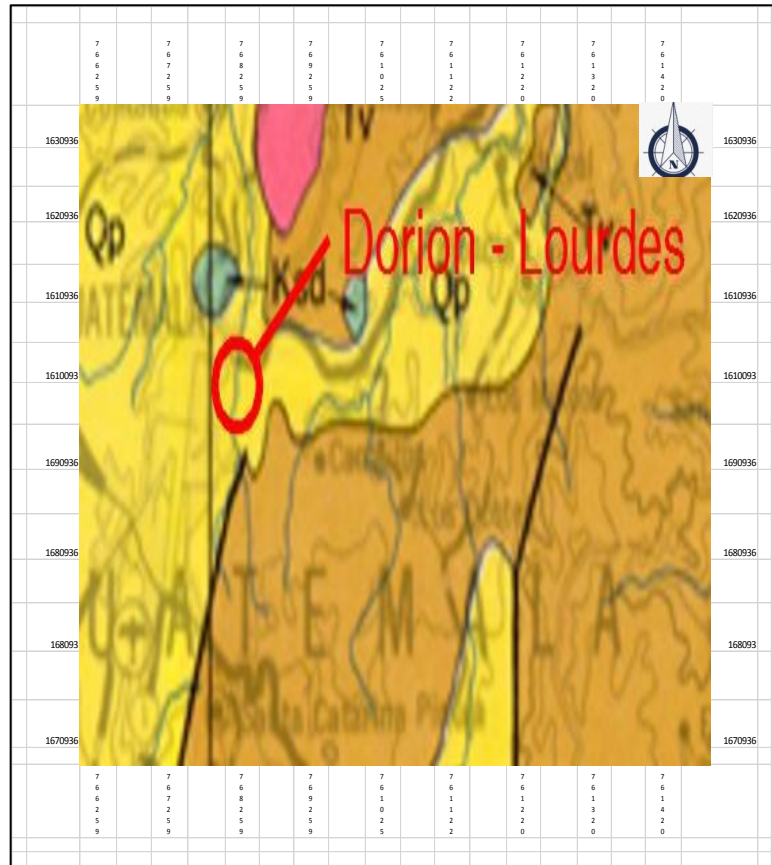


Anexo13. **Configuración topográfica de la zona metropolitana de Guatemala (Vista de mapa)**



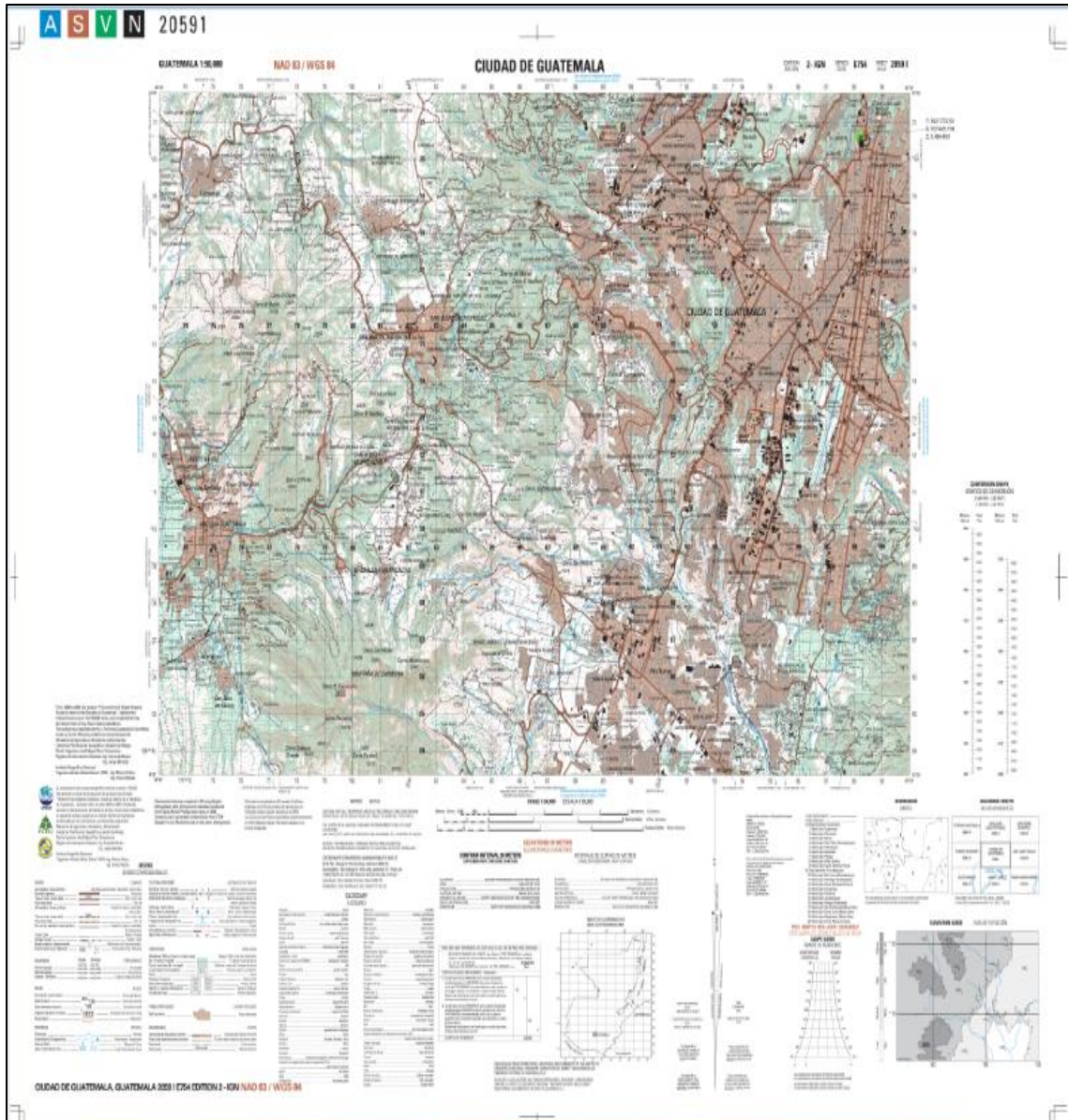
Fuente: IEB. Memoria de coordinamiento de aislamiento y verificación de apantallamiento contra descargas eléctricas atmosféricas de líneas de transmisión 896-LTM-141, Memoria de selección del cable de guarda, 896-LTM-010-R2, 896-LTM-002 memoria descriptiva, criterios básicos de diseño memoria de selección del conductor, 896-ltm-141-r3 selección del aislamiento y apantallamiento, tre-pet-69 memoria de estudio de distancias mínimas de seguridad, tre-pet-69 memoria de cálculo de estudio de suelos aplicación en el diseño de las cimentaciones. p. 133.

## Anexo 14. Gráfica Geología Regional

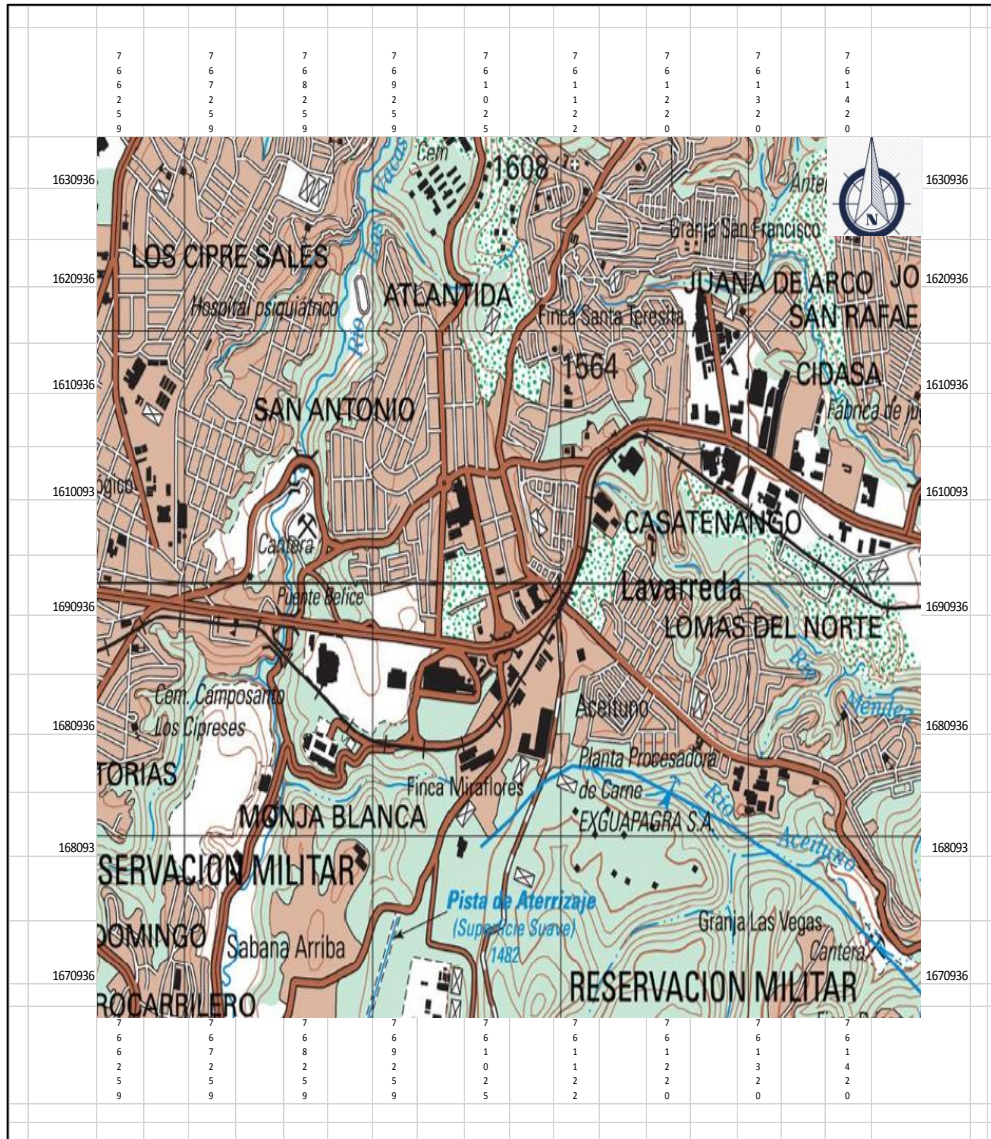


Fuente: IEB. *Memoria de coordinamiento de aislamiento y verificación de apantallamiento contra descargas eléctricas atmosféricas de líneas de transmisión 896-LTM-141, Memoria de selección del cable de guarda, 896-LTM-010-R2, 896-LTM-002 memoria descriptiva, criterios básicos de diseño memoria de selección del conductor, 896-ltm-141-r3 selección del aislamiento y apantallamiento, tre-pet-69 memoria de estudio de distancias mínimas de seguridad, tre-pet-69 memoria de cálculo de estudio de suelos aplicación en el diseño de las cimentaciones.* p. 133.

Anexo 15. **Mapa Instituto Geográfico Nacional Ciudad de Guatemala Geo-Referenciado, Guatemala. 2059 | E754 EDITION 2-ING**



Continuación anexo 15.



Fuente: IEB. Memoria de coordinamiento de aislamiento y verificación de apantallamiento contra descargas eléctricas atmosféricas de líneas de trasmisión 896-LTM-141, Memoria de selección del cable de guarda, 896-LTM-010-R2, 896-LTM-002 memoria descriptiva, criterios básicos de diseño memoria de selección del conductor, 896-ltm-141-r3 selección del aislamiento y apantallamiento, tre-pet-69 memoria de estudio de distancias mínimas de seguridad, tre-pet-69 memoria de cálculo de estudio de suelos aplicación en el diseño de las cimentaciones. p. 133.

