



UNIVERSIDAD  
DE PIURA

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**Estudio comparativo de métodos de medición de la  
resistividad del terreno y propuesta de protocolo de  
medición**

Tesis para optar el Título de  
Ingeniero Mecánico - Eléctrico

**Carlos Alberto Lavallo Oliva**

**Asesor:**  
**Mgtr. Ing. José Hugo Fiestas Chévez**

**Piura, mayo de 2021**



## **Dedicatoria**

A Dios y a mis padres Víctor y María, por enseñarme a dar lo mejor de mí en cualquier circunstancia, a mis hermanas, a Felipa, a mi familia y a Julieta, por su apoyo incondicional y por inspirarme a ser mejor persona y profesional cada día. Con mi alma, amor y cariño, este trabajo va en nombre de ellos.





## **Agradecimientos**

A mis queridos maestros del 80, que me enseñaron realmente el valor que poseen, no solamente los principios matemáticos y científicos sino también los principios morales, en la formación del criterio de una persona. La vida universitaria ha marcado tanto mi vida, que agradezco toda la paciencia y consejo recibido durante todos estos años por parte de ellos, modelos de vida y guías para seguir aprendiendo algo nuevo cada día.





## Resumen

Existe una cultura poco extendida sobre la seguridad eléctrica en el Perú que, si bien poco a poco las industrias van adaptándose a las nuevas normativas y estándares, el conocimiento sobre seguridad eléctrica en el hogar es aún subestimado. El conocimiento de los sistemas de protección eléctricos como interruptores diferenciales, termomagnéticos y sistema de puesta a tierra son esenciales para expandir esta cultura. Al carecer de un protocolo claro y de acceso público sobre la medición de la resistividad del terreno, siendo un paso clave en el procedimiento de elaboración y diseño de puestas a tierra, se dispuso a llevar la presente investigación.

En primer lugar, se hace un marco teórico inicial abarcando definiciones, tipos de sistemas de puesta a tierra, umbrales de soportabilidad en el ser humano, así como las diversas normativas nacionales e internacionales. Luego se emplea una comparativa entre diversas metodologías tanto de medición como de interpretación de los resultados, para finalmente terminar con un protocolo de medición de la resistividad del terreno tomando como ejemplo mediciones en campo realizadas en la zona experimental de la Universidad de Piura.

Los resultados presentarán el mejor espacio físico sobre dónde colocar un sistema de puesta a tierra, según la zona estudiada, así como la interpretación posterior que tuvo que ser realizada para realmente obtener información útil sobre la resistividad real aproximada del terreno, así como su constitución o estructura equivalente relativa a sus estratos.

Un buen protocolo de medición abarca no solamente un conjunto de normas estrictas y fijas, sino que es en realidad una estrategia para llevar a cabo una buena medición y posterior interpretación de las mediciones. Ello se resume en realizar un estudio de prospección de manera efectiva, minimizando errores y trabajando con seguridad por encima de todo.



## Prólogo

En nuestro país, la cultura en seguridad se ha ido desarrollando de manera relativamente lenta comparando otros países de la región. Si bien a lo largo de los años, las industrias y empresas se han ido adaptando poco a poco a los estándares y normativas nacionales e internacionales, la población en general se ha quedado rezagada en cuanto a la importancia que posee la seguridad en el mundo que nos rodea.

Existe un tipo de sistemas con los que, sin pensar, interactuamos día a día y desde hace ya muchos años, son parte esencial de nuestra vida, los sistemas eléctricos. La cantidad de accidentes eléctricos han ido en aumento en la misma medida en que los aparatos tecnológicos y electrodomésticos se han ido haciendo cada vez más accesibles a la población. Es por dicho motivo, que las personas, al ser susceptibles y estar expuestas a peligros eléctricos, deben de desarrollar cada vez más una cultura básica de seguridad eléctrica.

Dentro de los principales dispositivos de protección como los interruptores termomagnéticos y diferenciales, los sistemas de puesta a tierra y su utilidad, son de los que más se subestiman. Es así como a pesar de que la normativa actual exige que toda edificación cuente con un sistema de puesta a tierra, muchas veces éste, es desarrollado a manera de un simple cumplimiento de las reglas, mas no como parte de un mecanismo de protección importante, que puede desviar corrientes de falla a tierra, dentro de una vivienda.

El presente estudio, fue motivado a partir de una característica esencial de los sistemas de puesta a tierra, y quizá la que genera más dudas, la resistividad del terreno. Al ser una propiedad íntimamente ligada al suelo, limita y posee una gran implicancia en el diseño y protección de los sistemas de puesta a tierra.

Finalmente vale decir, que esta investigación no hubiera sido posible ser llevada a cabo, sin la ayuda de los ingenieros Justo Oqueli y Hugo Fiestas, ya que la oportunidad de realizar los laboratorios del curso de sistemas de utilización y distribución fue básica para la culminación del trabajo.



## Tabla de contenido

<b>Introducción .....</b>	<b>21</b>
<b>Capítulo 1. Marco teórico.....</b>	<b>23</b>
1.1 Introducción .....	23
1.2 Definición de un sistema de puesta a tierra.....	23
1.3 Funciones de un sistema de puesta a tierra.....	23
1.4 Requisitos mínimos de un sistema de puesta a tierra .....	25
1.5 Definiciones asociadas con un sistema de puesta a tierra.....	25
1.6 Componentes básicos de un sistema de puesta a tierra .....	28
1.7 Tipos de sistemas de puesta a tierra .....	30
1.7.1 Según el uso en el tiempo .....	30
1.7.2 Según el tipo de conexión del sistema.....	30
1.7.3 Puesta a tierra en sistemas de bajo voltaje y en el interior de locales.....	32
1.8 Conceptos complementarios.....	34
1.8.1 Normativas relacionadas a los sistemas de puesta a tierra.....	34
1.8.2 Electropatología .....	36
1.8.3 Efectos de la corriente en los seres humanos.....	37
1.8.4 Impedancia eléctrica del cuerpo humano .....	39
1.8.5 Umbrales de soportabilidad normalizados.....	42
1.8.6 Fallas de los aparatos eléctricos.....	44
1.8.7 Tensiones de seguridad .....	45
1.8.8 Corrientes espurias .....	47
1.8.9 Electricidad estática.....	47

<b>Capítulo 2. Metodologías de medición de la resistividad del terreno .....</b>	<b>49</b>
2.1 Resistividad del terreno.....	49
2.2 Elementos que influyen en la resistividad del terreno .....	51
2.2.1 <i>Naturaleza de los suelos</i> .....	51
2.2.2 <i>La humedad</i> .....	52
2.2.3 <i>La temperatura del terreno</i> .....	53
2.2.4 <i>La concentración de sales disueltas</i> .....	53
2.2.5 <i>La compactación del terreno</i> .....	54
2.2.6 <i>Granulación de los suelos</i> .....	55
2.2.7 <i>La estratificación del terreno</i> .....	55
2.2.8 <i>Anisotropía de la resistividad</i> .....	55
2.3 Valores típicos de resistividad del terreno .....	56
2.3.1 <i>Resistividad por edad</i> .....	56
2.3.2 <i>Resistividad por constitución</i> .....	56
2.4 Equipos de medición .....	57
2.4.1 <i>Componentes del instrumento</i> .....	57
2.4.2 <i>Requisitos básicos de los instrumentos</i> .....	57
2.4.3 <i>Ensayos tipo</i> .....	57
2.4.4 <i>Consideraciones generales para la medición</i> .....	58
2.5 Tipos de prospecciones para medición de resistividad.....	59
2.5.1 <i>Usando la información geológica y muestras de suelo</i> .....	59
2.5.2 <i>Sondeo eléctrico vertical</i> .....	59
2.5.3 <i>Calicatas eléctricas</i> .....	61
2.5.4 <i>Tomografía eléctrica resistiva</i> .....	62
2.6 Métodos de medición de la resistividad del terreno .....	63
2.6.1 <i>Método de la variación de la profundidad</i> .....	64
2.6.2 <i>Método de los dos puntos</i> .....	64
2.6.3 <i>Método de los cuatro puntos</i> .....	64
2.7 Interpretación gráfica de los resultados .....	68
2.7.1 <i>Consideraciones preliminares</i> .....	68

2.7.2 Estructura equivalente del suelo .....	68
2.8 Interpretación de las mediciones de campo .....	72
2.8.1 Métodos empíricos de interpretación .....	73
2.8.2 Sobre los métodos científicos de interpretación de las mediciones .....	74
2.8.3 Interpretación mediante curvas patrón .....	76
2.8.4 Métodos cuantitativos de interpretación .....	79
2.9 Normativa aplicada a la medición de la resistividad del terreno .....	79
<b>Capítulo 3. Comparativa de métodos de medición de la resistividad del terreno .....</b>	<b>81</b>
3.1 Introducción .....	81
3.2 Síntesis de los métodos de medición de la resistividad del terreno.....	81
3.3 Síntesis de los métodos de interpretación de la resistividad del terreno.....	85
3.4 Elección y justificación de los métodos a ensayar.....	85
3.4.1 Manera tradicional de aplicar la comparación de las curvas patrón.....	85
3.4.2 Uso de software para el procesamiento comparativo de curvas patrón.....	86
3.4.3 Elección y justificación.....	91
3.5 Elección y especificación de los equipos a utilizar .....	91
3.5.1 Descripción .....	92
3.5.2 Especificaciones técnicas .....	93
3.5.3 Panel de control.....	94
3.5.4 Rango de medidas .....	96
3.5.5 Batería y carga .....	97
3.5.6 Pasos para la medición de la resistividad aparente del terreno .....	97
3.5.7 Anormalidades.....	99
3.5.8 Comunicación con PC y descarga de información .....	100
<b>Capítulo 4. Propuesta de protocolo de medición de la resistividad del terreno .....</b>	<b>103</b>
4.1 Introducción .....	103
4.2 Planificación de las mediciones .....	104
4.2.1 Elección del área a medir.....	104
4.2.2 Croquis informativo.....	106
4.2.3 Definición de las direcciones de medida sobre el terreno.....	107

4.2.4	<i>Propuesta de formatos de recopilación de la información</i> .....	108
4.2.5	<i>Programación del trabajo de medición</i> .....	109
4.3	Consideraciones generales sobre el circuito de medición .....	109
4.4	Efecto de las pendientes en el terreno .....	110
4.5	Efecto de estructuras aledañas a la zona de medición .....	111
4.6	Recomendaciones generales en la ejecución de la medición .....	112
4.7	Comprobación en el transcurso de la medición.....	113
4.8	Análisis posterior .....	113
	<b>Resultados</b> .....	<b>115</b>
	<b>Conclusiones</b> .....	<b>121</b>
	<b>Recomendaciones</b> .....	<b>123</b>
	<b>Referencias bibliográficas</b> .....	<b>125</b>
	<b>Apéndices</b> .....	<b>129</b>
	Apéndice A-1 .....	131
	Apéndice A-2 .....	132
	Apéndice A-3 .....	133
	Apéndice A-4 .....	134
	Apéndice A-5 .....	135
	Apéndice A-6 .....	136
	Apéndice A-7 .....	137
	Apéndice A-8 .....	138

### Lista de tablas

Tabla 1. Relación entre energía específica y reacciones fisiológicas. ....	36
Tabla 2. Porcentaje de personas que se protegen según la corriente de disparo.....	36
Tabla 3. Clasificación de los efectos fisiológicos por zonas. ....	43
Tabla 4. Resistividades de diversos tipos de aguas. ....	54
Tabla 5. Resistividad el terreno según su antigüedad.....	56
Tabla 6. Resistividad por constitución.....	56
Tabla 7. Síntesis de los métodos de medición de la resistividad. ....	82
Tabla 8. Comparativa de estructuras equivalentes.....	118
Tabla 9. Resistividad equivalente según criterio de Burgsdorf-Yakobs. ....	120



## Lista de figuras

Figura 1. Esquema físico de un sistema de puesta a tierra típico.....	29
Figura 2. Corrientes capacitivas en un sistema trifásico. ....	31
Figura 3. Sistema TN-S típico, fuente puesta a tierra en un único punto.....	32
Figura 4. Sistema TN-C-S donde el neutro es puesto a tierra por el proveedor en múltiples ubicaciones. El usuario dispone de una tierra conectada al neutro de servicio.....	33
Figura 5. Sistema PNB donde el usuario tiene transformador propio, se usan cables CNE con tierra y neutro en un único punto.....	33
Figura 6. Sistema TT donde la fuente posee se pone a tierra en un único punto y el cliente instala su propia tierra, independiente de la alimentación. ....	34
Figura 7. Sistema IT donde todas las partes conductivas de la instalación se colocan a tierra. ....	34
Figura 8. Modificaciones de la piel humana con la densidad de la corriente y la duración del paso de la corriente.....	38
Figura 9. Circuito eléctrico de las impedancias del cuerpo humano. ....	39
Figura 10. Distribución de las impedancias internas en el cuerpo humano. ....	40
Figura 11. Valores estadísticos de las impedancias totales del cuerpo, válidos para sujetos humanos vivos para un trayecto de corriente de mano a mano o de mano a pie, para tensiones de contacto de hasta 5000 V en corriente alterna de 50/60 Hz.....	40
Figura 12. Valores de la impedancia total $Z_t$ , medida sobre 10 sujetos humanos vivos. ....	41
Figura 13. Valores de la impedancia total $Z_t$ , medidas sobre un sujeto humano vivo, con un trayecto de corriente de mano a mano y con importante zona de contacto, para una tensión de 25 V y frecuencias entre 25 Hz a 2 kHz. ....	41
Figura 14. Relación entre la impedancia total del cuerpo humano con la superficie de contacto y la tensión de contacto a 50 Hz. ....	42

Figura 15. Umbrales de soportabilidad en función del tiempo de contacto y la corriente eléctrica de paso.....	43
Figura 16. Desencadenamiento de la fibrilación ventricular en el periodo vulnerable y sus efectos en el electrocardiograma y tensión arterial. ....	44
Figura 17. Tensiones de seguridad.....	45
Figura 18. Tensión transferida.....	46
Figura 19. Valores máximos normalizados para la tensión de contacto. ....	46
Figura 20. Resistividad de un cubo de determinado terreno de 1m de arista. ....	50
Figura 21. Variación de la resistividad en función de la humedad y dos temperaturas distintas según Albrecht.....	52
Figura 22. Resistividad relativa, según la variación de temperatura del terreno. ....	53
Figura 23. Variación de la resistividad con la compacidad del terreno. ....	54
Figura 24. Influencia de la estratificación del terreno con dos capas en la resistividad.....	55
Figura 25. Resistividad aparente vs profundidad usando método de sondeo vertical con configuración de Wenner.....	60
Figura 26. Aplicación correcta e incorrecta del método de Wenner.....	60
Figura 27. Variaciones laterales típicas en un terreno. a) Inclusión de un estrato en otro superior, b) acumulación de material diferente al alrededor, c) contactos de distintos materiales.....	61
Figura 28. Calicata eléctrica usando la configuración de Wenner.....	62
Figura 29. Ejemplo de tomografía eléctrica resistiva con las respectivas graficas en 2D de resistividad eléctrica aparente medida.....	63
Figura 30. Configuración de Wenner. ....	65
Figura 31. Configuración de Schlumberger.....	66
Figura 32. Configuración Azimutal. ....	67
Figura 33. Representación gráfica de un suelo homogéneo.....	68
Figura 34. Representación gráfica de un suelo formado por dos capas.....	69
Figura 35. Curvas típicas de resistividad para dos suelos de dos capas. Caso A. $\rho_2 > \rho_1$ y caso B. $\rho_1 > \rho_2$ .....	70
Figura 36. Representación gráfica de un suelo formado por tres capas. ....	71
Figura 37. Dos de las seis combinaciones posibles de curvas típicas de resistividad para un suelo de tres capas. ....	71

Figura 38. Estructura estratificada de un suelo. ....	75
Figura 39. Tipos de curvas patrón. ....	76
Figura 40. Procedimiento de interpretación para suelo de dos capas. ....	77
Figura 41. Interpretación para suelo de tres capas. ....	78
Figura 42. Esquema de resumen gráfico sobre los métodos de medición de resistividad del terreno. ....	82
Figura 43. Esquema sintético sobre los métodos de interpretación de los resultados. ....	85
Figura 44. Ejemplo de ajuste de curvas tipos H o A siguiendo el método de Orellana. ....	86
Figura 45. Vista inicial cuando se ejecuta el software. ....	87
Figura 46. Creación de nuevo archivo. ....	88
Figura 47. Elección de configuración de los electrodos. ....	88
Figura 48. Entrada de valores de prueba. ....	89
Figura 49. Guardado del archivo para la simulación. ....	89
Figura 50. Simulación sin aplicar la autocorrección. ....	90
Figura 51. Resultado aplicando una autocorrección. ....	90
Figura 52. Cuadro de resultados. ....	91
Figura 53. Equipo empleado en las mediciones en campo. Megabras EM-4058. ....	92
Figura 54. Vista de planta enfocando el panel de control del equipo. ....	95
Figura 55. Guía de teclas para operar equipo. ....	96
Figura 56. Aviso de batería baja en pantalla. ....	97
Figura 57. Conexiones del equipo con las jabalinas o electrodos. ....	97
Figura 58. Procedimiento para realizar una medición de resistividad del terreno con el equipo. ....	98
Figura 59. Ejemplo de ejecución de medición a una distancia de 2 metros entre electrodos. ....	98
Figura 60. Resultados de medición de resistividad. ....	99
Figura 61. Error sobre revisar un conector. ....	99
Figura 62. Advertencia sobre corrientes espurias altas. ....	99
Figura 63. Resistencia de SPT muy alta. ....	100
Figura 64. Resistividad del terreno fuera del rango. ....	100
Figura 65. Instalación de software principal. ....	101

Figura 66. Instalación de drivers. ....	101
Figura 67. Archivo exportado contenedor de historial de mediciones.....	102
Figura 68. Ventajas obtenidas cuando se cuenta con un protocolo de medición. ....	103
Figura 69. Representación gráfica de los pasos que componen un protocolo de medición. ....	104
Figura 70. Zona experimental reservada a pruebas – UDEP.....	105
Figura 71. Vista general satelital del área en estudio. ....	105
Figura 72. Zona de trabajo abierta dentro de la zona experimental. ....	106
Figura 73. Plano de distribución de zona experimental.....	106
Figura 74. Direcciones para caracterizar un terreno.....	107
Figura 75. Direcciones de las diversas mediciones realizadas. ....	107
Figura 76. Formato de recopilación de información.....	108
Figura 77. Ejemplo de resultado impreso de una medición. ....	109
Figura 78. Variaciones en la configuración de Wenner. ....	110
Figura 79. Ejemplo de familia de curvas patrón para contacto inclinado de la colección de Alpin (según Kalenov). ....	110
Figura 80. Factor de corrección Kw, de los valores de resistividad aparente medidos.....	111
Figura 81. Medición tomada en el tercer día de trabajo de campo, dirección 5.....	115
Figura 82. Interpretación de medición del día 4, dirección 7. ....	116
Figura 83. Interpretación de medición en día 4, dirección 8. ....	116
Figura 84. Interpretación día 5, dirección 9. ....	116
Figura 85. Equivalencia a tres estratos, día 3, dirección 5. ....	117
Figura 86. Equivalencia a tres estratos, día 4 en dirección 8. ....	117
Figura 87. Equivalencia a tres estratos día 4, dirección 7. ....	117
Figura 88. Equivalencia a tres estratos día 5, dirección 9. ....	118
Figura 89. Área con más baja resistividad de terreno.....	119
Figura 90. Área propuesta para SPT con circunferencia de radio 8 metros. ....	119

## **Introducción**

La importancia de los sistemas de puesta a tierra como parte de los mecanismos de protección tanto de personas como equipos, es fundamental para cualquier industria, empresa, vivienda o edificaciones y estructuras en general. La relevancia que cobra la correcta medición de la resistividad y su posterior interpretación resulta esencial para el futuro diseño de un sistema de puesta a tierra.

En el contexto actual, el uso de un protocolo de medición de la resistividad del terreno es vital, pues permite realizar una efectiva medición en términos de tiempo, dinero, seguridad y confiabilidad de los resultados. Dicho protocolo, debe abarcar no solamente un conjunto de normas rígidas, sino ser flexible y adaptarse a las condiciones del suelo y ambiente en general.

Conocer las buenas prácticas y los tipos de métodos relativos a la medición de la resistividad del terreno, permite obtener medidas más confiables y generar mejores interpretaciones de los resultados. Es un error común el suponer la estructura que compone un determinado suelo como un problema simple de aproximar, por ello es necesario nunca perder de vista todas variables que intervienen en un correcto cálculo e interpretación.



## **Capítulo 1**

### **Marco teórico**

#### **1.1 Introducción**

Un sistema de puesta a tierra es una parte vital en una instalación eléctrica, por lo cual se le debe dar un tratamiento que concuerde con su relevancia. Es válido comparar al sistema de puesta a tierra como los cimientos o bases en la estructura de un edificio. (Casas Ospina, 2010, pág. 23).

Morales (1999b) sostiene que aun cuando la puesta a tierra es un componente intrínseco del sistema eléctrico, permanece en general como un tema mal comprendido y sin la adecuada atención que este tipo de instalación amerita. En consecuencia, dada la importancia que posee en la seguridad de personas y equipos, es obligatorio prestar especial cuidado a todos los detalles y variables que intervienen en la instalación y que podrían alterar su correcto funcionamiento.

#### **1.2 Definición de un sistema de puesta a tierra**

La palabra tierra ha sido objeto de muchas confusiones a lo largo de la historia de los sistemas eléctricos. Para esclarecer este término, se empleará la definición que aporta la IEEE en su estándar 81: "Tierra: Una conexión conductora, ya sea intencional o accidental, por medio de la cual un circuito eléctrico o equipo se conecta a la Tierra o a algún cuerpo conductor de dimensión relativamente grande que cumple la función de la Tierra".

Habiendo aclarado el significado de tierra, le sigue la definición de un sistema de puesta a tierra o SPT, que según Casas (2010) explica como un conjunto de elementos conductores de un sistema eléctrico específico, sin dispositivos de interrupción, que conectan los equipos eléctricos con el terreno o una masa metálica. Es importante tener en cuenta que el sistema de puesta a tierra comprende tanto la puesta a tierra como la red equipotencial.

#### **1.3 Funciones de un sistema de puesta a tierra**

La puesta a tierra de instalaciones eléctricas está relacionada en primer lugar con la seguridad. El sistema de puesta a tierra se diseña normalmente para cumplir dos funciones de

seguridad. La primera es establecer conexiones equipotenciales. Toda estructura metálica conductiva expuesta que puede ser tocada por una persona, se conecta a través de conductores y se hace perteneciente al sistema eléctrico. La mayoría de los equipos eléctricos se alojan en el interior de cubiertas metálicas y si un conductor energizado llega a entrar en contacto con éstas, la cubierta también quedará temporalmente energizada. La conexión eléctrica es para asegurar que, si tal falla ocurriese, entonces el potencial sobre todas las estructuras metálicas conductivas expuestas sea virtualmente el mismo. En otras palabras, la conexión eléctrica iguala el potencial, de modo que las diferencias de potencial resultantes son mínimas. De este modo, se crea una «plataforma» equipotencial. Si una persona está en contacto simultáneamente con dos piezas diferentes de una estructura metálica expuesta, el conductor de conexión eléctrica debiera garantizar que la persona no reciba un choque eléctrico, haciendo que la diferencia de potencial entre los equipos sea insuficiente para que esto ocurra. El mismo principio se aplica en el interior de grandes subestaciones eléctricas, industrias y casas. En industrias, la conexión eléctrica de estructuras metálicas expuestas garantizará normalmente que una falla eléctrica a la carcasa de la máquina no generará una diferencia de potencial entre ella y la estructura metálica puesta a tierra en una máquina adyacente. En la casa, la conexión eléctrica garantiza que, si ocurriese una falla dentro de un aparato, como una lavadora u otro electrodoméstico, y la cubierta metálica se exponga al voltaje de la línea eléctrica, cualquier persona que estuviese haciendo contacto, no experimentaría un choque eléctrico.

La segunda función de un sistema de puesta a tierra es garantizar que, en el evento de una falla a tierra, toda corriente de falla que se origine pueda retornar a la fuente de una forma controlada. Por una forma controlada se entiende que la trayectoria de retorno está predeterminada, de tal modo que no ocurra daño al equipo o lesión a las personas. La conexión a tierra no es de capacidad infinita e impedancia nula. Sin embargo, la impedancia del sistema de tierra debiera ser baja, de modo que pueda fluir suficiente corriente de falla a tierra, para que operen correctamente los dispositivos de protección e interrumpir el flujo de corriente. El diseñador de la protección calcula normalmente el valor requerido de impedancia a través de programas de análisis de fallas y este valor debe comunicarse a los responsables del diseño del sistema de puesta a tierra. Además, la elevación de potencial que experimentará el sistema de puesta a tierra mientras ocurre la falla, debiera ser limitada a un valor preestablecido.

Las funciones del SPT se citan a continuación:

- Proporcionar una impedancia suficientemente baja para facilitar la operación satisfactoria de las protecciones en condiciones de falla.
- Aportar seguridad a los seres vivos presentes en la vecindad de las subestaciones no queden expuestos a potenciales inseguros, en régimen permanente o en condiciones de falla.

- Mantener los voltajes del sistema dentro de límites razonables bajo condiciones de falla (tales como descarga atmosférica, ondas de maniobra o contacto inadvertido con sistemas de voltaje mayor), y asegurar que no se excedan los voltajes de ruptura dieléctrica de las aislaciones.
- Limitar el voltaje a tierra sobre materiales conductivos que circundan conductores o equipos eléctricos.
- Estabilizar los voltajes fase a tierra en líneas eléctricas bajo condiciones de régimen permanente, por ejemplo, disipando cargas electrostáticas que se han generado debido a nubes, polvo, agua, nieve, etc.
- Proporcionar una trayectoria alternativa para las corrientes inducidas y de tal modo minimizar el «ruido» eléctrico en cables.
- Proporcionar una plataforma equipotencial sobre la cual puedan operar equipos electrónicos. (Morales Osorio, 1999b).

#### **1.4 Requisitos mínimos de un sistema de puesta a tierra**

Casas (2010) afirma que los requisitos mínimos que todo SPT debe contemplar para que cumpla de manera correcta sus funciones, son los siguientes:

- El valor de la resistencia debe ser el adecuado para cada tipo de instalación.
- La variación de la resistencia debida a cambios ambientales debe ser la mínima posible.
- Su vida útil debe ser mayor de 20 años.
- Debe ser resistente a la corrosión.
- Su costo debe ser el más bajo posible, sin que se comprometa la seguridad.
- Debe permitir su mantenimiento periódico.
- Debe cumplir los requerimientos de las normas y sus respectivas especificaciones.

#### **1.5 Definiciones asociadas con un sistema de puesta a tierra**

Las siguientes definiciones se consideran esenciales en la terminología asociada al presente trabajo. (Casas Ospina, 2010, págs. 26-37).

- *Accidente (Accident)*: evento no deseado, incluidos los descuidos y las fallas de equipos, que da por resultado la muerte, una lesión personal, un daño a la propiedad o deterioro ambiental.
- *Acto Inseguro (Unsafe act)*: violación de una norma de seguridad ya definida.
- *Aislante (Insulating material)*: material que impide la propagación de algún fenómeno o agente físico. El aislante eléctrico es un material de tan baja conductividad eléctrica, que puede ser utilizado como no conductor.
- *Arco eléctrico (electric arc)*: Haz luminoso producido por el flujo de corriente eléctrica a través de un medio aislante, que produce radiación y gases calientes.

- Barraje equipotencial - BE (*Ground busbar, Ground bar, Ground bus or Grounding block*): conductor de tierra colectiva, usualmente una barra de cobre o un cable que permite la unión de dos o más conductores y garantiza el mismo potencial.
- Conductividad eléctrica: capacidad de un cuerpo para conducir una corriente a través de él mismo. Es el recíproco o inverso de la resistividad. Su unidad es el siemens.
- Conductor a tierra o conductor del electrodo de puesta a tierra (*Conductor to earth - CE or grounding electrode conductor or earthing conductor*): conductor que es intencionalmente conectado a una puesta a tierra, desde el punto neutro, barraje principal de tierra o a través de una impedancia limitadora de corriente.
- Conductor de protección o conductor de puesta a tierra de equipo o tierra de protección (*grounding equipment conductor or protective earthing conductor - PE*): conjunto de conductores puestos a tierra, en circuitos, tomacorrientes y clavijas que se acoplan a los equipos, para prevenir contactos indirectos con partes metálicas energizadas accidentalmente.
- Conductor energizado: todo elemento de una instalación eléctrica que no esté conectado a tierra.
- Conductor neutro (*Neutral or grounded service conductor*): conductor activo conectado intencionalmente al punto neutro de un transformador.
- Conductor puesto a tierra: Conductor de un sistema eléctrico conectado intencionalmente a tierra.
- Conexión de puesta a tierra (*connection grounding terminal or ground clamp*): conexión especialmente diseñada y certificada para asegurar dos o más componentes de un sistema de puesta a tierra, como: soldadura exotérmica, lengüetas, conductores a presión o de cuña o abrazaderas.
- Conexión equipotencial (*Equipotential bonding*): conexión eléctrica entre dos o más puntos, de tal forma, que ante el paso de una corriente quedan esencialmente al mismo potencial.
- Contacto directo (*Direct contact*): contacto de personas o animales con conductores activos de una instalación eléctrica.
- Contacto indirecto (*Indirect contact*): contacto de personas o animales con algún elemento puesto accidentalmente bajo tensión.
- Corriente de falla a tierra: aquella que se presenta durante una falla y que fluye por el SPT.
- Corriente de fuga (*Leakage current*): corriente que circula en caminos no deseados, durante operación normal.

- Cortocircuito (*Short circuit*): fenómeno eléctrico ocasionado por una unión accidental o intencional de muy baja resistencia entre dos o más puntos de diferente potencial de un mismo circuito.
- Electricidad estática: fenómeno asociado con la aparición de carga eléctrica en la superficie de un aislante o de un cuerpo conductor aislado.
- Electrodo de puesta a tierra (*Grounding electrode*): conductor o grupo de conductores enterrados que permiten establecer una conexión eléctrica con el suelo o terreno. Puede ser una varilla, un tubo, una placa o un cable, resistentes a la humedad y a la acción química.
- Equipotencializar (*Bonding*): acción de conectar partes conductivas de las instalaciones, equipos o sistemas entre sí o a un sistema de puesta a tierra, mediante una baja impedancia, para que la diferencia de potencial sea mínima entre los puntos interconectados.
- Falla a tierra (*Earth fault*): conexión conductiva, bien sea intencional o accidental, entre cualquiera de los conductores activos de un sistema eléctrico y la tierra o los materiales conductivos que están puestos a tierra.
- Fase (*Phase or Line*): designación de un conductor, un grupo de conductores, un terminal, un devanado o cualquier otro elemento de un sistema polifásico que va a estar energizado durante el servicio normal.
- Fuente de energía: todo equipo o sistema que suministre energía eléctrica.
- Interruptor de fallas a tierra (*Ground fault circuit interrupter - GFCI or Residual current operated devices - RCD*): dispositivo diseñado para la protección de personas, que funciona desconectando una parte de un circuito por un tiempo establecido, cuando una corriente a tierra excede algún valor predeterminado.
- Masa (*Ground, mass or chassis*): conjunto de partes metálicas de un equipo eléctrico, susceptible de ser tocado que en condiciones normales no está bajo tensión, pero puede estarlo en caso de falla y que se toma como referencia para las señales de un circuito electrónico. Las masas pueden estar o no conectadas a tierra.
- Máximo potencial de tierra - GPR (*Ground Potential Rise*): máxima elevación del potencial de una puesta a tierra respecto de una puesta a tierra remota, cuando fluye a través de ella una corriente desde o hacia el terreno.
- Poner a tierra (*To earth or to ground*): realizar una conexión eléctrica entre un nodo de una instalación eléctrica y el suelo o terreno. Puedo ser intencional o accidental y permanente o temporal.
- Puesta a Tierra (PT) (*Grounding or grounding electrode or earthing or earth termination system*): grupo de elementos conductores equipotenciales, en contacto eléctrico con el

suelo o una masa metálica de referencia común, que distribuye las corrientes eléctricas de falla en el suelo o en la masa. Comprende electrodos, conexiones y cables enterrados.

- Red equipotencial (*Equipotential bonding network*): conjunto de conductores del sistema de puesta a tierra que no están en contacto con el suelo o terreno, que conectan sistemas eléctricos, equipos o instalaciones con la puesta a tierra.
- Resistencia de puesta a tierra o resistencia de dispersión (*Earth resistance*): relación entre el potencial del sistema de puesta a tierra a medir, respecto a una tierra remota y la corriente que fluye entre estos puntos.
- Riesgo de electrocución: posibilidad de circulación de una corriente eléctrica mortal a través de un ser vivo.
- Seguridad Eléctrica: Proceso de Identificación de los riesgos asociados con el uso de la electricidad y toma de medidas para prevenirlos, minimizarlos o eliminarlos.
- *Shock*: estado patológico súbito de falla cardiocirculatoria entre otras manifestaciones se reconoce por palidez cutánea, sudoración fría, obnubilación mental e hipotensión arterial.
- Sobretensión (*Overvoltage*): tensión anormal existente entre dos puntos de una instalación eléctrica, superior a la tensión máxima de operación normal de un dispositivo, equipo o sistema.
- Suelo artificial (*Artificial Soil*): compuesto preparado industrialmente, de baja resistividad, para incrementar la conductividad de un electrodo enterrado.
- Tensión a tierra: para circuitos puestos a tierra, la tensión entre un conductor dado y el conductor del circuito puesto a tierra o a la puesta a tierra. Para circuitos no puestos a tierra, la mayor tensión entre un conductor dado y algún otro conductor del circuito.

### 1.6 Componentes básicos de un sistema de puesta a tierra

De acuerdo con Casas (2010), las partes básicas de un SPT pueden pertenecer a dos grandes bloques: la puesta a tierra (bajo el nivel del suelo) y los cableados o red equipotencial (sobre el nivel del terreno).

Los componentes esenciales de un sistema de puesta a tierra y que por lo tanto no pueden faltar, son los siguientes:

- Barraje aislado (de neutro o de tierra).
- Barraje de neutro.
- Barraje equipotencial.
- Canalización metálica certificada.
- Conductor a tierra.
- Conductor aislado de puesta a tierra de equipos.
- Conductor neutro.

- Conductores de puesta a tierra de equipos.
- Conexión equipotencial.
- Conexiones de puesta a tierra.
- Electrodo de puesta a tierra (varilla, tubo o placa de puesta a tierra).
- Estructuras metálicas del edificio.
- Masa (Partes metálicas no portadoras de corriente).
- Puente de conexión equipotencial principal.
- Puesta a masa.
- Puesta a tierra.
- Suelo o terreno.
- Tomacorriente con polo a tierra.

En la figura 1, se puede apreciar algunos de los elementos más importantes del SPT, representados de manera simbólica en un sistema de puesta a tierra de tipo malla (líneas color rojo rectangulares en la figura). El sentido común diría que un SPT está compuesto solamente por elementos enterrados en el suelo. Sin embargo, esta afirmación no puede ser más falsa. Para que este tipo de sistema sea efectivo, debe poseer la red equipotencial.

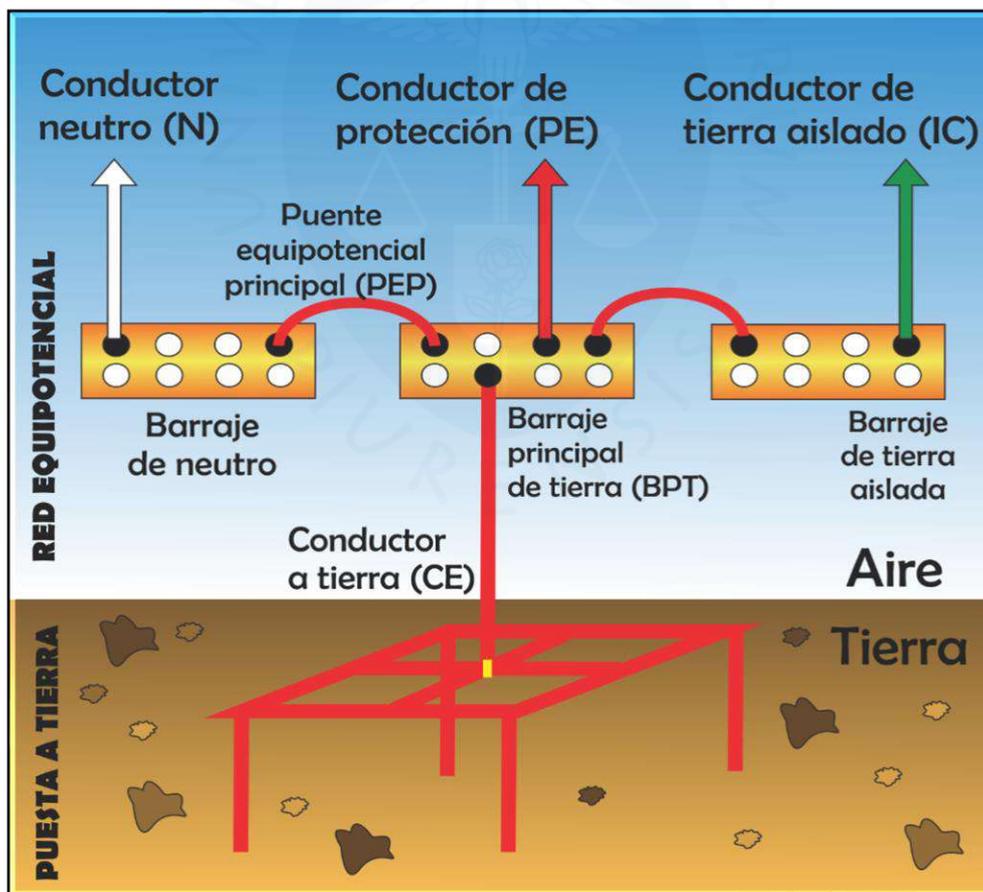


Figura 1. Esquema físico de un sistema de puesta a tierra típico.

Fuente: Casas (2010).

Elaboración propia.

## 1.7 Tipos de sistemas de puesta a tierra

### 1.7.1 Según el uso en el tiempo

#### 1.7.1.1 Permanentes (para sistemas eléctricos)

- Configurados artificialmente.
- De alta frecuencia.
- De corriente continua.
- De equipos de comunicaciones.
- De equipos de cómputo.
- De estática.
- De pararrayos.
- De protección catódica.
- De subestación.

#### 1.7.1.2 Temporales (para trabajos de mantenimiento)

- De baja tensión.
- De media tensión.
- De alta tensión.
- De electricidad estática.
- Para cargue y descargue de combustibles. (Casas Ospina, 2010, pág. 41).

### 1.7.2 Según el tipo de conexión del sistema

Además de la clasificación mostrada en el apartado 1.7.1, existe otra manera de indicar el tipo de sistema de puesta a tierra según el tipo de conexión en el que esté dispuesto. Para ello, las explicaciones tratadas dentro del presente apartado (1.7.2) y así como también las del apartado 1.7.3, estarán basadas en la categorización según Morales (1999b) y además en el Código Nacional de Electricidad Utilización 2006 que también las define.

**1.7.2.1 Sistema no puesto a tierra o levantado de tierra.** Este sistema no posee una conexión de tierra formal o intencional. El punto neutro sí existe y está muy cerca del potencial de la tierra. Las tensiones de cada fase están referidas a la tierra por medio de capacitancias parásitas. Durante una falla monofásica, fluye una corriente en el sistema levantado de tierra que retorna mediante los acoplamientos capacitivos.

Los daños en este tipo de sistemas son mayormente leves y por ello si la continuidad del servicio es importante, el sistema levantado de tierra es una buena opción. Cabe decir que a pesar de que el sistema es confiable, no es seguro, pues podría ser suficiente para que una persona que toque el conductor dañado se electrocute.

La figura 2 muestra el diagrama de conexión de un sistema levantado de tierra con configuración en estrella.

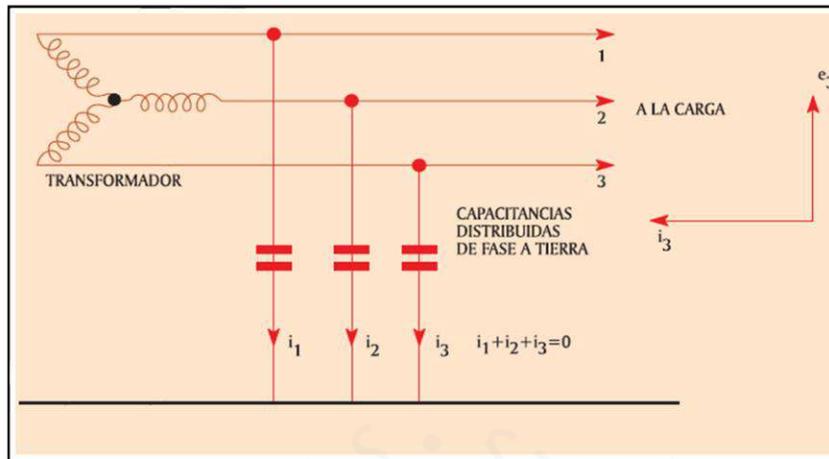


Figura 2. Corrientes capacitivas en un sistema trifásico.  
Fuente: Morales Osorio (1999b).

**1.7.2.2 Sistemas puestos a tierra.** En un sistema puesto a tierra, se tiene al menos un conductor o punto intencionalmente conectado a tierra. La conexión a tierra minimiza las variaciones de voltaje y los desequilibrios que podrían surgir con otras formas. Una ventaja de estos sistemas es que pueden usarse en armonía con relés residuales para detectar fallas antes de que se conviertan en fallas fase-fase. Los principales tipos de sistemas puestos a tierra son:

**A. Sistema puesto a tierra mediante impedancia.** En este caso se conectan adrede resistores o reactores en la conexión entre el punto neutro y la tierra con el fin de reducir la magnitud de la corriente de falla a un nivel aceptable.

Pueden usarse como conexión a tierra enrollados de suspensión de arco, conocidos también como bobinas de Peterson o neutralizadores de falla a tierra. Estos consisten en reactores sintonizados que neutralizan las capacitancias sanas y de esta manera limitan la corriente de falla.

La puesta a tierra por resistencia es de uso más común porque permite amortiguar los voltajes transitorios y limitar la corriente de falla eligiendo el valor correcto de resistencia en el momento de realizar el diseño.

**B. Sistema puesto a tierra con baja impedancia.** Son también llamados sistemas sólidamente puestos a tierra. Es una técnica común en bajos voltajes. En esta configuración, el neutro se conecta a tierra por medio de una adecuada conexión sin agregar ninguna impedancia. La desventaja principal es que las corrientes de falla son elevadas, pero los voltajes se mantienen controlados bajo dichas condiciones de falla.

### 1.7.3 Puesta a tierra en sistemas de bajo voltaje y en el interior de locales

Existen ciertos métodos de realizar una conexión a tierra con unos términos con definiciones estándares. Cada combinación de letras dada a continuación significará una configuración distinta de la conexión a tierra. Es importante notar que el electrodo poseerá una impedancia que es predominantemente resistiva:

T: conexión directa a tierra.

N: neutro.

C: combinada.

S: separada.

**1.7.3.1 TN-S.** Para este sistema, el neutro de la fuente tiene un único punto de conexión a tierra en el transformador de alimentación. Los cables de alimentación tienen neutro separado del conductor de tierra de protección. Generalmente, el conductor de neutro es un cuarto "conductor" y el conductor de tierra forma una vaina o cubierta protectora (conductor PE). Este era el arreglo estándar antes de la introducción de los sistemas de puestas a tierra de protección múltiples. La configuración de este tipo se muestra en la figura 3.

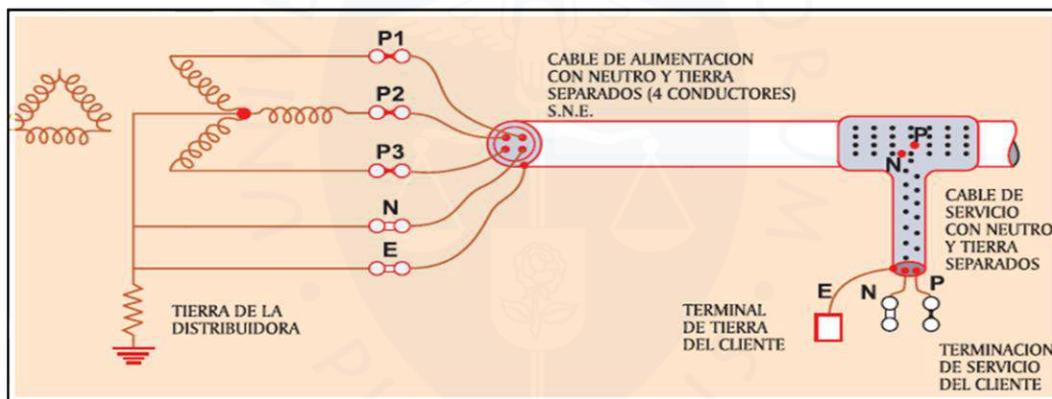


Figura 3. Sistema TN-S típico, fuente puesta a tierra en un único punto.

Fuente: Morales Osorio (1999b).

**1.7.3.2 TN-C-S.** En este tipo, el neutro de la alimentación se pone a tierra en varios puntos. El cable de alimentación tiene una pantalla metálica externa que combina neutro y tierra, con una cubierta de PVC (se denominan cables CNE). La pantalla que combina neutro y tierra es el conductor tierra de protección neutro (conductor PEN). El fabricante proporciona un terminal de tierra, que está conectado al neutro de la alimentación. La alimentación en el interior de la instalación del cliente debiera ser TN-S, es decir, el neutro y la tierra deben estar separados, conectados sólo en la posición de servicio.

Debido a que se permite al cliente usar el terminal de tierra, el proveedor debe asegurarse que todos los elementos metálicos internos, normalmente expuestos (tales como tuberías de agua, de gas, calefacción, etc.) se conecten juntos en la forma prescrita en las

normas. La figura 4 muestra la configuración TN-C-S. Nótese que el conductor de neutro y tierra son uno solo al partir desde la fuente y se separan en el extremo del usuario.

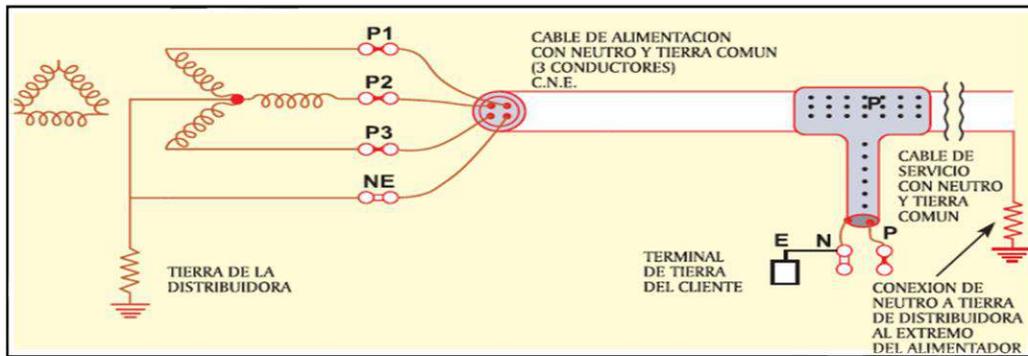


Figura 4. Sistema TN-C-S donde el neutro es puesto a tierra por el proveedor en múltiples ubicaciones. El usuario dispone de una tierra conectada al neutro de servicio.

Fuente: Morales Osorio (1999b).

**1.7.3.3 PNB.** Es un sistema donde se tiene una conexión a neutro de protección. Este es una variación del sistema TN-C-S en que el cliente dispone de un terminal de tierra conectado al neutro de la alimentación, pero el neutro se conecta a tierra en un único punto, normalmente cerca del punto de alimentación al cliente. Se reserva el uso de este arreglo cuando el cliente tiene un transformador particular. La figura 5, muestra las conexiones de un sistema PNB.

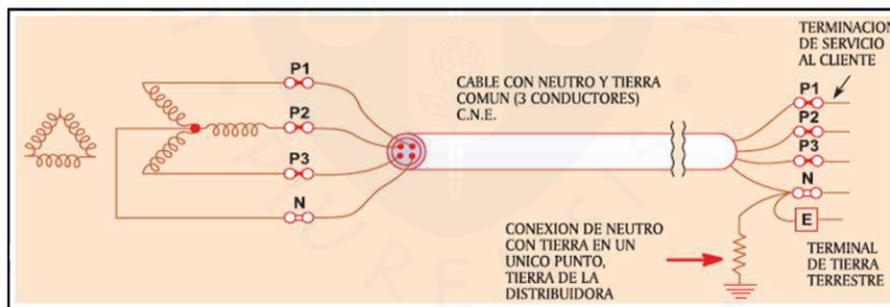


Figura 5. Sistema PNB donde el usuario tiene transformador propio, se usan cables CNE con tierra y neutro en un único punto.

Fuente: Morales Osorio (1999b).

**1.7.3.4 TT.** En este tipo de sistema la alimentación se pone a tierra en un único punto, pero la pantalla del cable y las partes metálicas expuestas de la instalación del cliente están conectadas a tierra vía un electrodo separado que es independiente del electrodo de alimentación.

La figura 6, esquematiza un sistema TT típico, el cual posee un cable de alimentación de cuatro conductores, con neutro y tierra separados y tanto la tierra del cliente como de la red también se encuentran sin ninguna conexión entre ellas.

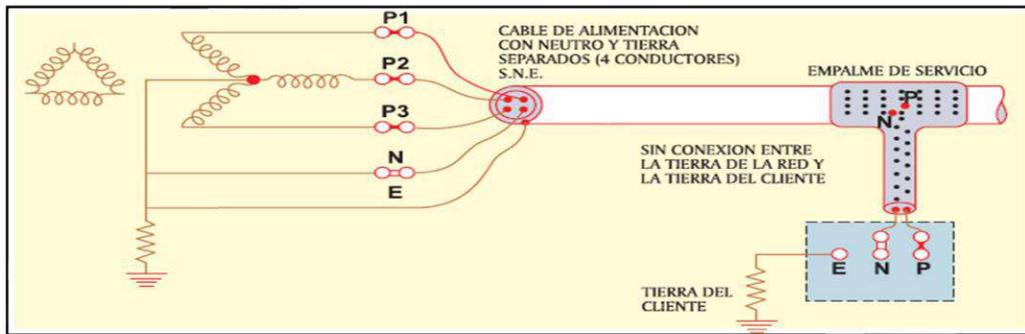


Figura 6. Sistema TT donde la fuente posee se pone a tierra en un único punto y el cliente instala su propia tierra, independiente de la alimentación.

Fuente: Morales Osorio (1999b).

**1.7.3.5 IT.** No tiene conexión directa entre partes vivas y tierra, pero con las partes conductivas expuestas de la instalación conectadas a tierra. Algunas veces se proporciona una conexión a tierra de alta impedancia para simplificar el esquema de protección requerido para detectar la primera falla a tierra. La figura 7 muestra un sistema IT típico.

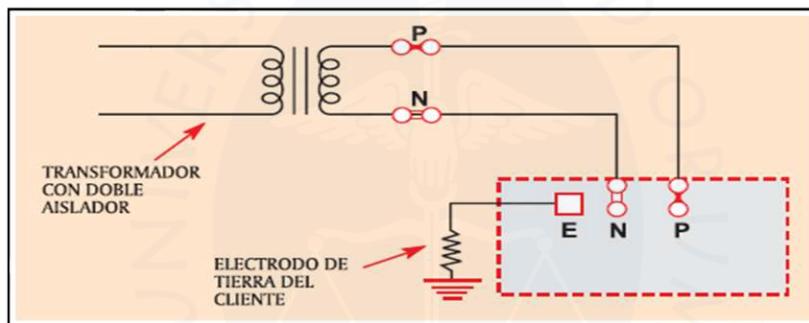


Figura 7. Sistema IT donde todas las partes conductivas de la instalación se colocan a tierra.

Fuente: Morales Osorio (1999b).

## 1.8 Conceptos complementarios

### 1.8.1 Normativas relacionadas a los sistemas de puesta a tierra

**1.8.1.1 Las normas técnicas peruanas.** INDECOPI, en su calidad de Organismo Peruano de Normalización, instaló el 08 de julio de 1998 el Comité Técnico Especializado de Seguridad Eléctrica - Sistema de Conexión a tierra, encargado de la elaboración de las Normas Técnicas Peruanas. Las normas fueron aprobadas en el Diario Oficial El Peruano el 11 y 13 de diciembre de 1999 según Resolución de la Comisión de Reglamentos Técnicos y Comerciales N° 0062 y 0064-1999/INDECOPI-CRT.

- NTP 370.052:1999 SEGURIDAD ELECTRICIA. Materiales que constituyen el pozo de puesta a tierra, 1ª Edición el 13 de diciembre de 1999.

- NTP 370.053:1999 SEGURIDAD ELECTRICA. Elección de los materiales eléctricos en las instalaciones interiores para puesta a tierra. Conductores de protección de cobre, 1ª Edición el 13 de diciembre de 1999.
- NTP 370.054:1999 SEGURIDAD ELECTRICA. Enchufes y tomacorrientes con protección a tierra para uso doméstico y uso general similar, 1ª Edición el 11 de diciembre de 1999.
- NTP 370.055:1999 SEGURIDAD ELECTRICA. Sistema de puesta a tierra. Glosario de términos, 1ª Edición el 13 de diciembre de 1999.
- NTP 370.056:1999 SEGURIDAD ELECTRICA. Electrodo de cobre para puesta a tierra, 1ª Edición el 13 de diciembre de 1999.

De manera adicional, la autoridad administrativa sectorial en el área eléctrica tiene a su cargo el Código Nacional de Electricidad como instrumento de Normativa Técnica, cuya aplicación de pautas y recomendaciones se considera para el otorgamiento de Licencias de Construcción por parte de las Municipalidades, con la participación de organismos especializados como el Colegio de Ingenieros del Perú (CIP).

**a) El Código Nacional de Electricidad.** Compendio de Normas, Recomendaciones y Procedimientos que permiten, entre otros, cautelar la seguridad de las personas contra el peligro del uso de la electricidad; la versión a mayo de 1,978 consta de cinco tomos, orientados a subsistemas, en ellos se privilegia la conexión a tierra; empezando por el Tomo I, Capítulo 3, Título 3.5.1, Inciso c) que considera requisito mínimo de seguridad contra accidentes eléctricos, la conexión a una toma de tierra de todas las masas de una misma instalación.

**b) Licencias de Construcción.** Mediante el Decreto Supremo N°25-94, emitido el 07 de diciembre de 1994, se encarga a las Municipalidades el otorgamiento de Licencias de Construcción, el control de estas y la Conformidad de Obra de toda Edificación dentro de la jurisdicción Municipal; proponiendo asimismo los organismos que intervienen en la aprobación y los documentos técnicos a ser examinados, entre los cuales se cuentan los planos de Instalaciones Eléctricas según prescripciones del Código Nacional de Electricidad.

**1.8.1.2 Disposiciones internacionales.** En el ámbito internacional, es muy conocido y empleado el grupo de estándares del Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos (IEEE - *Institute of Electrical an Electronics Engineers*). Las disposiciones internacionales se pueden dividir básicamente en tres tipos:

**a) Sistemas de puesta a tierra**

- ANSI / IEEE Std. 81: 1983, Guía para la medición de Resistencias de Tierra, Impedancias de Tierra y Potenciales de Superficie de Tierra en Sistemas de Aterramiento.

**b) Instalaciones domiciliarias, comerciales e industriales**

- ANSI C114.1-1973 / IEEE Standard 142-1972.
- IEEE Práctica Recomendada para Aterramientos de Sistemas de Potencia Industriales y Comerciales.

**c) Subestaciones eléctricas de media y alta tensión**

- ANSI / IEEE Standard 80-1986
- IEEE Guía para Seguridad en Aterramientos de subestaciones AC.

**1.8.2 Electropatología**

Esta disciplina estudia los efectos de corriente eléctrica potencialmente peligrosa que puede producir lesiones en el organismo, así como el tipo de accidentes que causa. Las consecuencias del paso de la corriente por el cuerpo humano pueden ocasionar desde una simple molestia hasta la muerte dependiendo del tipo de contacto, sin embargo, es bueno recordar que en general la muerte no es súbita. En las tablas 1 y 2, según los estudios de Daziel y Biegelmeier se pueden observar las percepciones y reacciones fisiológicas en el cuerpo humano según la energía específica, así como la tasa de personas que se protegen de acuerdo con la corriente de disparo de un equipo de protección de tipo diferencial. Entendiendo como corriente de disparo a la sensibilidad del equipo (Diferencial de corriente).

Tabla 1. Relación entre energía específica y reacciones fisiológicas

<b>Energía específica <math>A^2 \cdot s (10^{-8})</math></b>	<b>Percepciones y reacciones fisiológicas</b>
4 a 8	Sensaciones leves en dedos y tendones de los pies.
10 a 30	Rigidez muscular suave en dedos, muñecas y codos.
15 a 45	Rigidez muscular en dedos, muñecas, codos y hombros. Sensación en las piernas
40 a 80	Rigidez muscular y dolor en brazos y piernas
70 a 120	Rigidez muscular dolor y ardor en brazos hombros y piernas

Fuente: Casas (2010).

Elaboración propia.

La energía específica a la que hace referencia la primera columna de la tabla 1, se define como la cantidad de energía generada por una corriente de impulso en una resistencia de  $1 \Omega$ . Además de su aplicación en estudios de electropatología en el ser humano, su concepto también se emplea para determinar el calentamiento de los conductores sometidos a corrientes de impulso como un rayo.

Tabla 2. Porcentaje de personas que se protegen según la corriente de disparo

Entes	Corriente de disparo (Valor rms)			
	6 mA	10 mA	20 mA	30 mA
Hombres	100 %	98.5 %	7.5 %	0 %
Mujeres	99.5 %	60 %	0 %	0 %
Niños	92.5 %	7.5 %	0 %	0 %

Nota: La corriente de disparo corresponde al valor nominal de la sensibilidad del interruptor diferencial.

Fuente: Casas (2010).

Elaboración propia.

Los accidentes con origen eléctrico pueden ser producidos por contactos directos (bipolar o fase-fase, fase-neutro, fase-tierra), contactos indirectos (inducción, contacto con masa energizada, tensión de paso, tensión de contacto, tensión transferida), impactos de rayo, fulguración, explosiones, incendios, sobrecorrientes y sobretensiones.

Los seres humanos expuestos a riesgo eléctrico se clasifican en individuos tipo "A" y tipo "B".

Individuo tipo "A" toda persona que lleva conductores eléctricos que terminan en el corazón. Para este tipo de paciente, se considera que la corriente máxima segura es de 80 microamperios.

Individuo tipo "B" aquellos que están en contacto con equipos eléctricos y que no llevan conductores al corazón. Se estima como máxima corriente segura. 24 miliamperios para un tiempo prolongado. (Casas Ospina, 2010, págs. 47,48).

### **1.8.3 Efectos de la corriente en los seres humanos**

Los efectos de la corriente en los seres humanos varían mucho de acuerdo con una amplia y diversa gama de factores. Por mencionar algunos de ellos están: la naturaleza de la corriente es decir si es alterna o continua, la frecuencia, el valor de la corriente, el tiempo del contacto, el trayecto que realiza la corriente, y las condiciones físicas del contexto. Estas condiciones se refieren tanto al ambiente, humedad del aire, o si el individuo se encuentra sumergido, así también la humedad de la piel en el momento del contacto, entre otros factores como la impedancia del cuerpo humano. A pesar de ser varios los factores que influyen en los efectos del paso de corriente, según diversos estudios y normas, se encuentran los siguientes:

- La electrocución se produce cuando la persona fallece debido al paso de la corriente por el cuerpo. Existen dos causas básicas de electrocución, suspensión respiratoria y paralización del corazón.
- La fibrilación ventricular consiste en el movimiento anárquico del corazón el cual no sigue su ritmo normal y deja de enviar sangre a los distintos órganos.
- La tetanización muscular es la anulación de la capacidad del control muscular, la rigidez incontrolada de los músculos como consecuencia del paso de la energía eléctrica.
- El estado fisiopatológico de shock (que no debe traducirse como choque) presenta efectos circulatorios y respiratorios simultáneamente.
- La asfixia se produce cuando el paso de la corriente afecta al sistema nervioso que regula la función respiratoria ocasionando un paro respiratorio que casi siempre se produce por la contracción involuntaria del diafragma.
- Las quemaduras o necrosis eléctrica se producen por la energía liberada al paso de la corriente. Como se sabe todo paso de corriente, genera un calentamiento debido al efecto Joule. Las quemaduras profundas pueden llegar a ser mortales.
- El bloqueo renal o paralización de la acción metabólica de los riñones producido por los efectos tóxicos de las quemaduras o mioglobinuria.

Algunos efectos colaterales se pueden producir sin llegar a ser mortales como, por ejemplo: fracturas, conjuntivitis, contracciones, golpes, aumento de la presión sanguínea, arritmias, fallas en la respiración, dolores sordos, paro temporal del corazón entre otros. (Casas Ospina, 2010, pág. 49).

La figura 8 es una representación gráfica de la consecuencia del paso de corriente, solamente en la piel para distintos parámetros de densidad de corriente y duración del paso de esta. Se puede observar que para valores por encima de 10mA/m<sup>2</sup> y una duración de 5 segundos, comienzan los efectos visuales en la piel que pueden ir desde un enrojecimiento, a la carbonización.

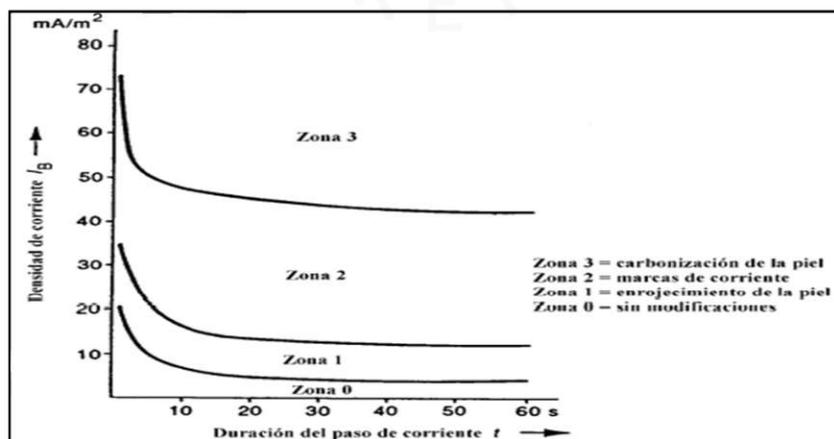


Figura 8. Modificaciones de la piel humana con la densidad de la corriente y la duración del paso de la corriente.

Fuente: Asociación Española de Normalización y Certificación (1997).

### 1.8.4 Impedancia eléctrica del cuerpo humano

Uno de los parámetros sin duda con mayor variación es la impedancia eléctrica del cuerpo humano, dado que depende de varios factores que hacen difícil su medición exacta.

La norma española UNE 20572-1 publicada en agosto de 1997 en su estudio “Efectos de la corriente sobre el hombre y los animales domésticos” se basó en experimentos en cadáveres, animales y algunos seres humanos para dar a conocer cómo se comporta una persona bajo distintos parámetros de corriente y extrapolándolos a escenarios más graves. Dicha norma, establece que el paso de la corriente por el ser humano se ve afectada no solamente por una parte resistiva, sino que también existe una parte capacitiva. Ambas partes formadas gracias a la combinación de los tejidos, órganos y piel.

Si bien esos estudios fueron realizados en corrientes de 50 y 60 Hz, los resultados según indica la norma, son aplicables a corrientes entre 15 y 100 Hz, ya que los valores de los umbrales cercanos a los extremos de ese intervalo son más altos que en las frecuencias 50 o 60 Hz.

Este capítulo indica los valores de la impedancia eléctrica del cuerpo humano en función de la tensión de contacto, de la frecuencia de la corriente, del estado de humedad de la piel, del trayecto de la corriente y de la superficie de la zona de contacto. La figura 9 es un diagrama simplificado de la impedancia que encuentra la corriente cuando pasa a través del ser humano, donde  $Z_{p1}$  y  $Z_{p2}$  son las impedancias de la piel,  $Z_i$  es la impedancia interna y  $Z_t$  es la impedancia total. (Asociación Española de Normalización y Certificación, 1997).

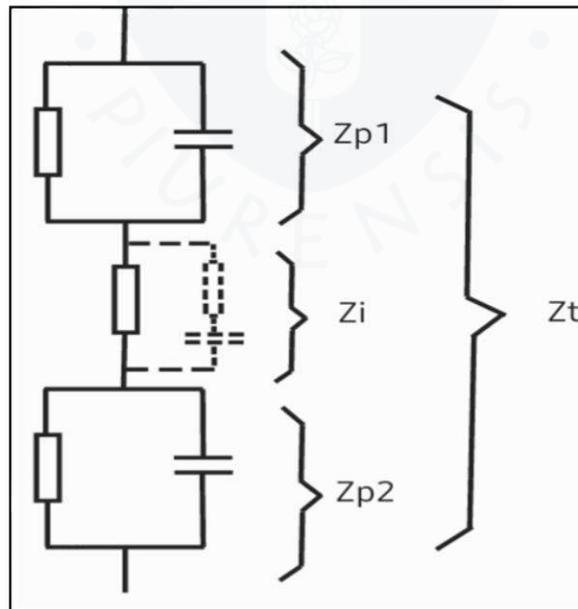


Figura 9. Circuito eléctrico de las impedancias del cuerpo humano.  
Fuente: Asociación Española de Normalización y Certificación (1997).  
Elaboración propia.

La impedancia en el ser humano se divide básicamente en la impedancia interna y la impedancia de la piel. En el diagrama de la figura 10, los números al lado de cada parte del cuerpo es el porcentaje que representa la impedancia total para un trayecto de corriente de mano a pie.

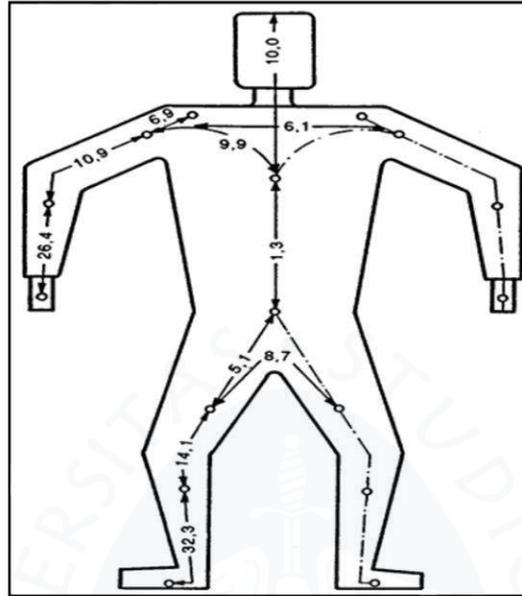


Figura 10. Distribución de las impedancias internas en el cuerpo.

Fuente: Asociación Española de Normalización y Certificación (1997).

En la figura 11, la impedancia total varía de acuerdo con la tensión de contacto aplicada con corrientes de 50/60 Hz. Los porcentajes señalados especifican el percentil de la población que no sobrepasa el valor indicado de impedancia.

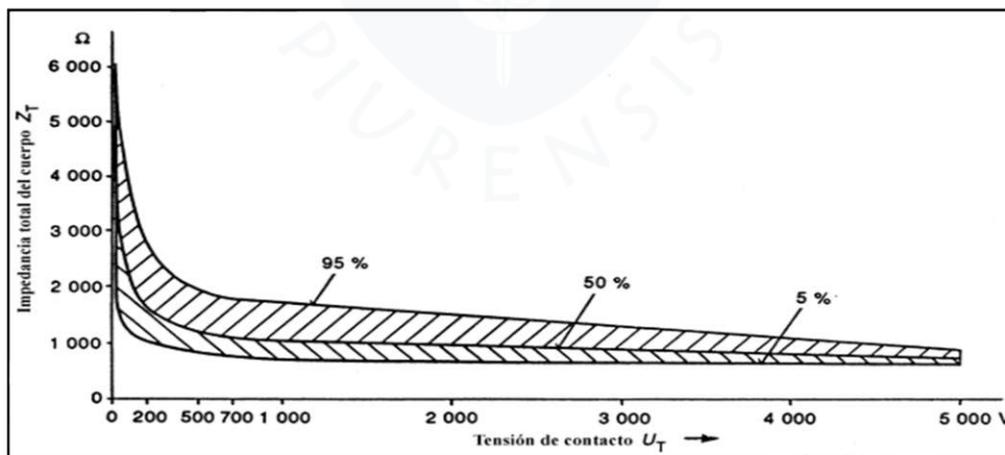


Figura 11. Valores estadísticos de las impedancias totales del cuerpo, válidos para sujetos humanos vivos para un trayecto de corriente de mano a mano o de mano a pie, para tensiones de contacto de hasta 5000 V en corriente alterna de 50/60 Hz.

Fuente: Asociación Española de Normalización y Certificación (1997).

A manera de ejemplo, para una tensión de contacto aproximada de 1100V, el 95% de la población, no sobrepasa un valor de 1850 ohmios de impedancia.

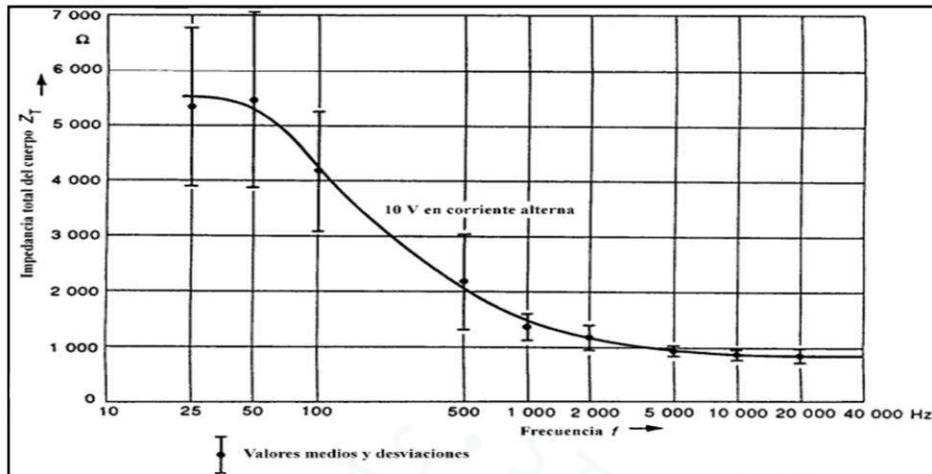


Figura 12. Valores de la impedancia total  $Z_T$ , medida sobre 10 sujetos humanos vivos. Fuente: Asociación Española de Normalización y Certificación (1997).

En la figura 12 se muestran valores reales de la impedancia total, medida en 10 sujetos humanos vivos, con un trayecto de corriente de mano a mano y con zonas de contacto considerables, para una tensión de contacto de 10 V y frecuencias de 25 Hz a 20 kHz.

En contraste a la figura anterior, donde las pruebas se realizaron a 10 V, en la siguiente figura, se muestra una prueba similar pero esta vez a 25 V y variando la frecuencia entre 25 Hz y 2 kHz. Se nota que, para tensiones de contacto menores, incluso de unos cuantos voltios, la impedancia muestra considerables disminuciones. Por ejemplo, para una frecuencia de 100 Hz en la figura 12, se obtiene un valor aproximado de 4100 ohmios, mientras que en la figura 13 se obtiene un valor de 2750 ohmios.

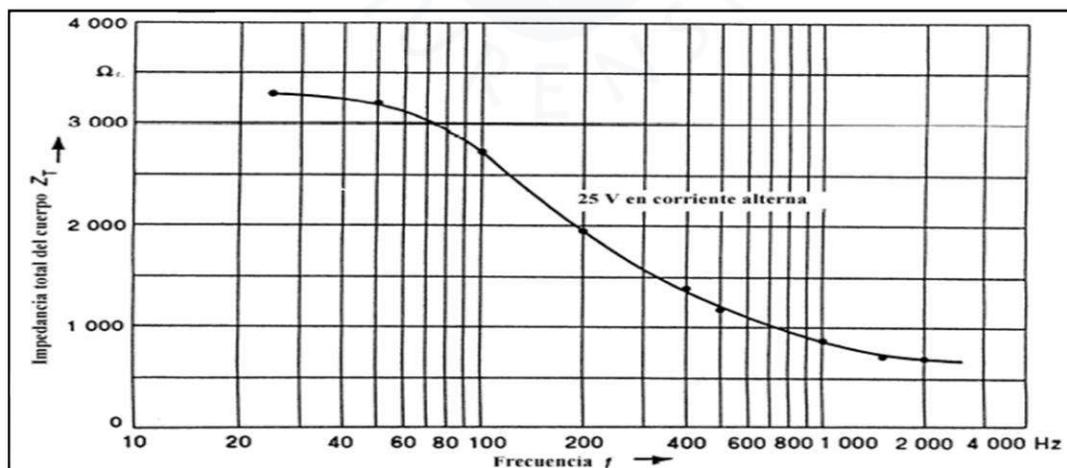


Figura 13. Valores de la impedancia total  $Z_T$ , medidas sobre un sujeto humano vivo, con un trayecto de corriente de mano a mano y con importante zona de contacto, para una tensión de 25 V y frecuencias entre 25 Hz a 2 kHz.

Fuente: Asociación Española de Normalización y Certificación (1997).

El área de contacto es importante en la variación de la impedancia, tal y como lo muestra la figura 14. Independientemente de la variación de la tensión de contacto, la tendencia muestra que, para mayores valores de área de contacto, el valor de la impedancia total es mayor.

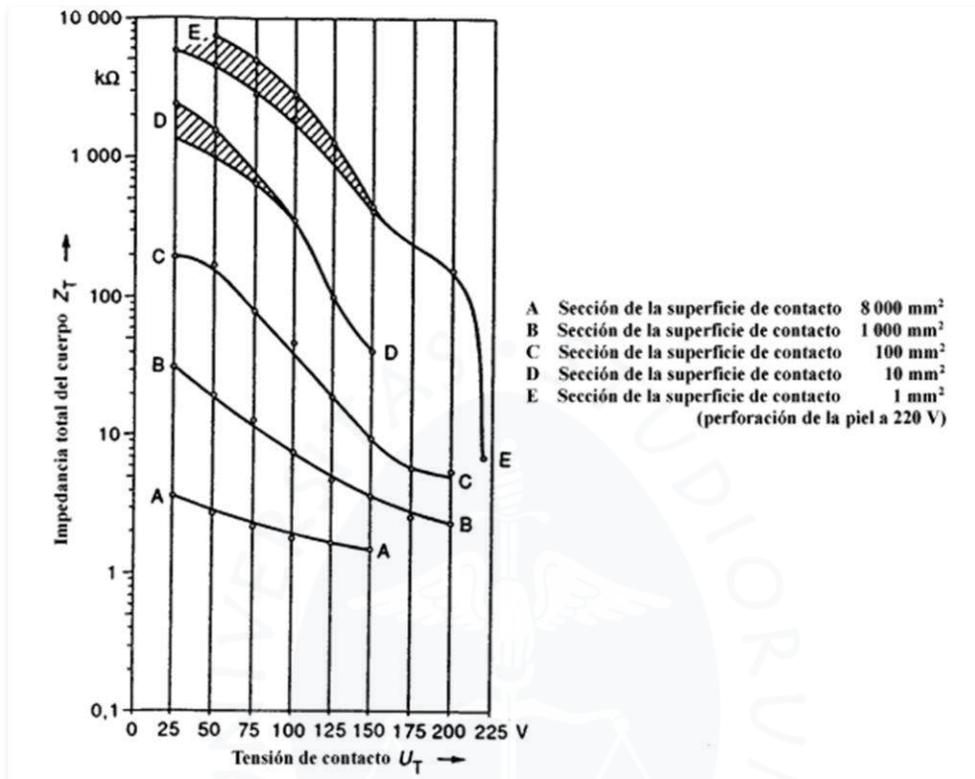


Figura 14. Relación entre la impedancia total del cuerpo humano con la superficie de contacto y la tensión de contacto a 50 Hz.

Fuente: Asociación Española de Normalización y Certificación (1997).

### 1.8.5 Umbrales de soportabilidad normalizados

Los umbrales o portabilidad normalizados son considerados en base al fenómeno de fibrilación, pero existen otros tipos de umbrales que son necesarios distinguir. Los cuales son los siguientes:

Umbral de percepción, este umbral se refiere a la cantidad mínima de corriente necesaria para que un ser humano la perciba o realice una reacción. Su valor aproximado se considera 0.5 mA.

Otro tipo de umbral es el de no soltar, considerado como la cantidad de corriente necesaria para producir una contracción muscular fuerte. Su valor aproximado es de 10 mA.

Por último, y como el más importante, dado que la mayoría de los estudios lo toman como referencia de seguridad, tenemos al umbral de fibrilación ventricular. Este umbral trata acerca de la cantidad de corriente necesaria para producir una contracción involuntaria del

corazón en muchos casos letal. La figura 15 se basa en los estudios de Daziel (IEEE), que dividió su análisis en seis zonas, que se describen en la parte inferior de esta.

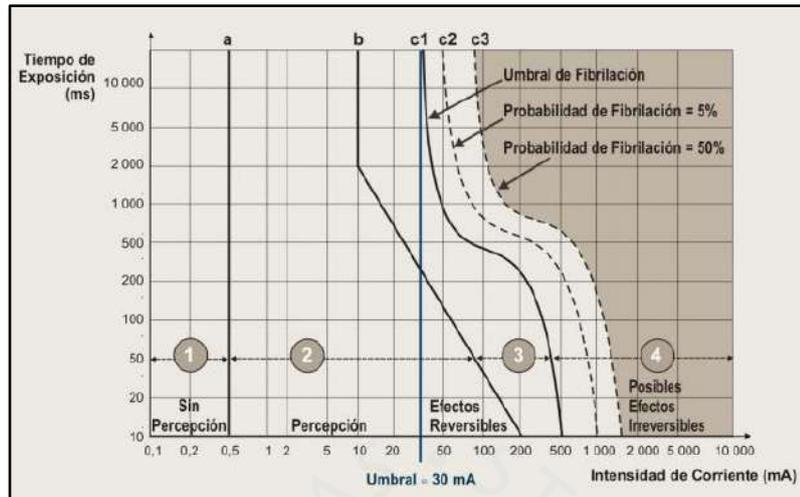


Figura 15. Umbrales de soportabilidad en función del tiempo de contacto y la corriente eléctrica de paso.

Fuente: Casas (2010).

La tabla 3, sirve de complemento a la figura 15, dividiéndola en cuatro zonas. Se puede deducir que recién en la zona 3, se comienzan a observar efectos peligrosos.

Tabla 3. Clasificación de los efectos fisiológicos por zonas

Zonas	Efectos fisiológicos
Zona 1	Ninguna reacción.
Zona 2	Ningún efecto fisiológico peligroso.
Zona 3	Ningún daño orgánico, pero probabilidad de contracciones musculares y dificultad de respiración para corrientes mayores a dos segundos. Perturbaciones reversibles en la formación y propagación de impulsos en el corazón, incluida la fibrilación ventricular y paros cardiacos temporales sin fibrilación ventricular, aumentando con la magnitud de la corriente y el tiempo.
Zona 4	Al aumentar la corriente y el tiempo, además de los efectos de la Zona 3, pueden ocurrir efectos patológicos peligrosos, tales como paro cardiaco, paro respiratorio y quemaduras severas. La probabilidad de fibrilación ventricular que aumenta hasta aproximadamente el 5% bajo la curva c2, hasta aproximadamente el 50% bajo la curva c3 y encima del 50 % sobre la curva c3.

Fuente: Dirección General de Electricidad - Ministerio de Energía y Minas (2006).

Elaboración propia.

Resulta irónico pensar cómo una persona puede ser tan frágil y vulnerable ante una corriente relativamente pequeña en magnitud (aproximadamente 30 mA). Dentro de las fases del bombeo del corazón, hay un periodo, muy corto de tiempo, en el que el corazón es mucho

más vulnerable a una fibrilación ventricular, y si la electrocución ocurre en ese mismo periodo, los efectos serían mortales a pesar de un periodo muy corto de paso de la corriente.

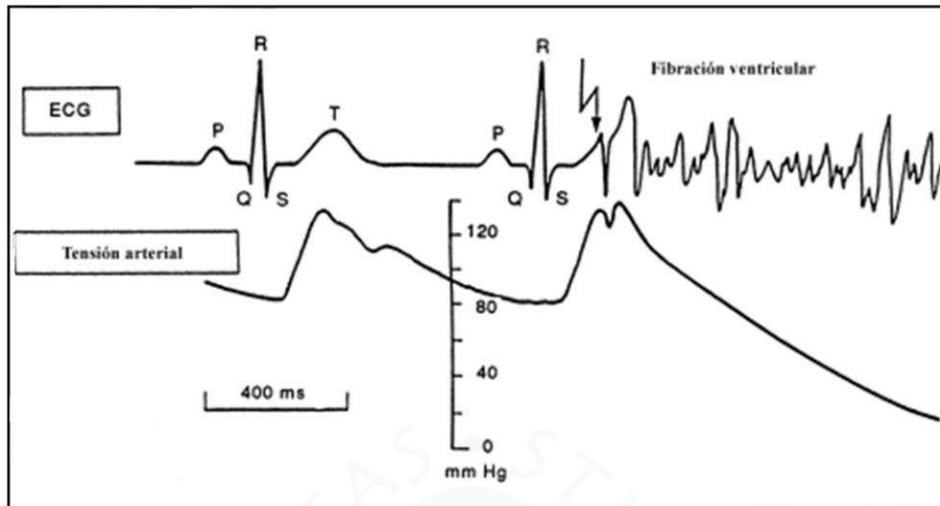


Figura 16. Desencadenamiento de la fibrilación ventricular en el periodo vulnerable y sus efectos en el electrocardiograma y tensión arterial.

Fuente: Asociación Española de Normalización y Certificación (1997).

En la figura 16, se muestra al periodo más vulnerable y pertenece a lo que se le conoce como onda T que se encuentra dentro de la repolarización en un diagrama de un electrocardiograma. Esta fase, también llamada eyección ventricular de fase lenta, es cuando el corazón está terminando de vaciar la sangre oxigenada, para ser bombeada a todo el cuerpo. Es una fase crítica, ya que se encuentra al final del ciclo cardiaco y por tanto una contracción involuntaria a causa del paso de corriente, interrumpiría el nuevo llenado.

### 1.8.6 Fallas de los aparatos eléctricos

Según el INEI en su estudio de casa segura, afirma que hoy en día los peruanos usan entre 8 a 10 veces más, la cantidad de energía eléctrica que se usaba hace 20 años.

Si la energía eléctrica es tan común en lo cotidiano, quiere decir que los accidentes en la casa son mucho más probables ahora que antes. Por mencionar un ejemplo, en el 2017 de los más de los 4435 incendios que se registraron, más de 3000 de ellos fueron de causas eléctricas. No solamente eso, sino que los accidentes eléctricos en los últimos años se han incrementado hasta en un 70%.

Por mencionar algunas de las causas de los principales accidentes cotidianos, es la falta de mantenimiento de los aparatos eléctricos, su uso inadecuado, empleo de conductores de mala calidad en la construcción de viviendas, falta de mecanismos de protección eléctricos, así como desconocimiento de las normas y negligencia tanto al construir cómo al comprar diversos productos relacionados con corriente eléctrica. (RPP Noticias, 2017).

El desconocimiento y las malas prácticas son los nutrientes seguros para crear un ambiente perfecto para los accidentes. Es por ello se debe tomar conciencia. Crear y extender una cultura eléctrica básica en los hogares, educando en el uso correcto de los aparatos eléctricos y en sus dispositivos de protección, es básico hoy en día. El conocimiento puede salvar muchas vidas.

### 1.8.7 Tensiones de seguridad

Dentro del estudio del riesgo eléctrico existen tres definiciones muy importantes relacionadas con el diseño de las puestas a tierra. Estas son tensión de paso, tensión de contacto y tensión transferida. Las dos primeras son tomadas como límites dentro de los estudios ligados a la seguridad eléctrica.

Cuando la corriente se disipa dentro del terreno se crean superficies equipotenciales cada una de ellas con un cierto voltaje. Con el terreno energizado, ya sea por una fuga eléctrica o por el impacto de un rayo, una persona inmóvil se encuentra dentro de una misma superficie equipotencial dado que sus dos pies se encuentran en el mismo punto y por lo tanto a la misma tensión. Basta que la persona dé un paso, para hacer circular por ella una corriente, producida por la diferencia de tensión sobre la que se encuentra un pie y otro. Cada uno de ellos se encontrarían en distintas superficies equipotenciales y por lo tanto en distintas tensiones. A esta diferencia de tensiones se le denomina tensión de paso.



Figura 17. Tensiones de seguridad.

Fuente: Casas (2010).

El segundo concepto importante es la tensión de contacto que, tal y como su nombre lo indica, es la tensión a la que se coloca una persona, cuando toca una superficie energizada, que puede pertenecer a una estructura o a la carcasa de un aparato eléctrico. La figura 17

ejemplifica la diferencia de poseer un sistema de protección, en este caso una malla de puesta a tierra.

Una situación particular es la tensión transferida, que aparece cuando la tensión dentro o fuera de la subestación, se transfiere por un medio físico o punto externo, pudiendo afectar la vida de las personas que de manera accidental reciban o se coloquen a dicha tensión. En la figura 18 por ejemplo, muestra la tensión transferida a causa del impacto de un rayo.

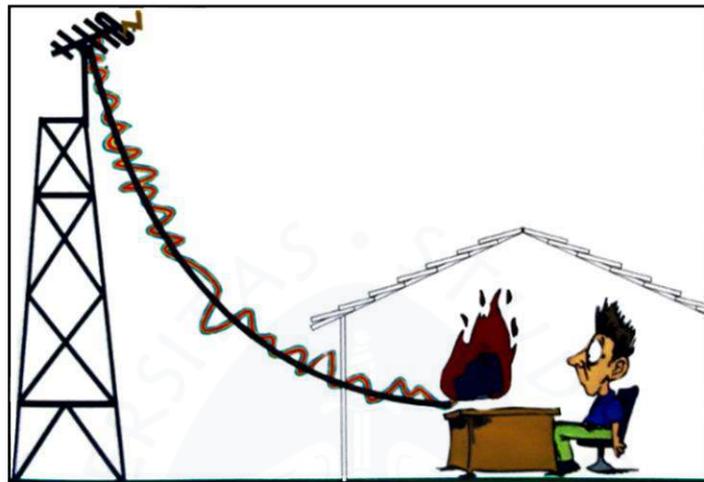


Figura 18. Tensión transferida.  
Fuente: Casas (2010).

La criticidad de la tensión de contacto está dada en función del tiempo de despeje de la falla hacia tierra, de la resistividad del terreno y de la magnitud de la corriente de falla. La figura 19, basada en la IEC 479 y en la IEEE 80, tomada del libro de Favio Casas Ospina, muestra los valores normalizados máximos de tensión de contacto.

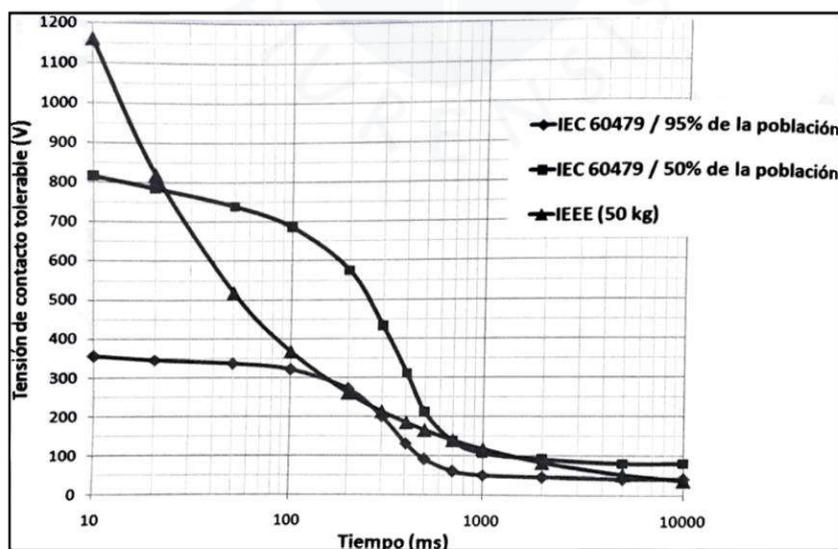


Figura 19. Valores máximos normalizados para la tensión de contacto.  
Fuente: Casas (2010).

### **1.8.8 Corrientes espurias**

Las corrientes espurias también llamadas errantes, parasitas o de fuga. Son corrientes permanentes en el terreno que se pueden presentar por diversas causas como por ejemplo transformadores desbalanceados, cercas eléctricas, cables rotos, aislamientos inadecuados, acción galvánica, protecciones galvánicas, circuitos de batería entre otros. Sus efectos pueden ser tan nocivos para los equipos como mortales para quien no sepa de las técnicas correctas de medición de una puesta tierra. (Casas Ospina, 2010).

### **1.8.9 Electricidad estática**

La electrostática es la ciencia encargada de estudiar las cargas eléctricas en reposo tomando como referencia un sistema inercial. Un cuerpo electrizado es aquel que por determinadas condiciones cedió o recibió carga eléctrica según la cantidad de electrones agregados o cedidos.

Diversos estudios han determinado que las chispas ocasionadas por electricidad estática pueden actuar como elementos de ignición, siendo capaces de generar incendios.

Los mecanismos para controlar la electricidad estática son básicamente los siguientes: mantener una humedad relativamente alta (entre 60 - 70%) en el ambiente, equipotencializar dos o más objetos conductores y, por último, conectar a tierra la superficie susceptible de acumular estática se considera también un mecanismo básico. (Casas Ospina, 2010).



## Capítulo 2

### Metodologías de medición de la resistividad del terreno

#### 2.1 Resistividad del terreno

Según Morales (1999b), la resistividad del terreno es uno de los parámetros más importantes dentro del diseño de las puestas a tierra. Esto se debe a que tiene una gran repercusión en el comportamiento de los electrodos de tierra. Afecta la impedancia de todo el sistema de puesta a tierra en gran manera. A pesar de ello en la mayoría de los casos prácticos, es uno de los factores que pasa más desapercibidos ya sea por falta de conocimiento o porque las mediciones resultan tediosas. Cualquiera sea el caso, para realizar un buen diseño, no puede dejarse de lado.

La resistividad del terreno es la impedancia del medio en el que se encuentran los electrodos. Puede ser medida en unidades como:  $\Omega \cdot m$ ,  $\Omega \cdot cm$  u  $\Omega \cdot mm$ . Idealmente, esta medida corresponde a la resistencia que presenta un cubo de 1 metro cúbico imaginario de suelo o agua, entre sus paredes laterales (caras) y se representa por la letra griega  $\rho$ .

Es válido decir que los términos resistividad y resistencia son diferentes y están relacionados matemáticamente por una expresión en la que la resistencia está en función de la resistividad. La resistencia está relacionada con otras propiedades geométricas como la longitud y sección del conductor mientras la resistividad es una propiedad más íntimamente ligada al material y es esta última la que tiende a variar con respecto a la temperatura, humedad y otras propiedades del medio por donde se transporta la corriente eléctrica.

Los estudios de la resistividad del terreno no están ligados exclusivamente al campo eléctrico y a los sistemas de puesta a tierra dentro de éste; sino que también posee íntimas relaciones con el contenido mineralógico del suelo, presencia o no de masas freáticas o subterráneas de agua, tipología del suelo, sales disueltas, características y edades cronológicas de las rocas, entre otras muchas menciones a estudios vinculados. Por este motivo, la resistividad aporta una gran información a los científicos de diversas ramas y su cuantificación es esencial.

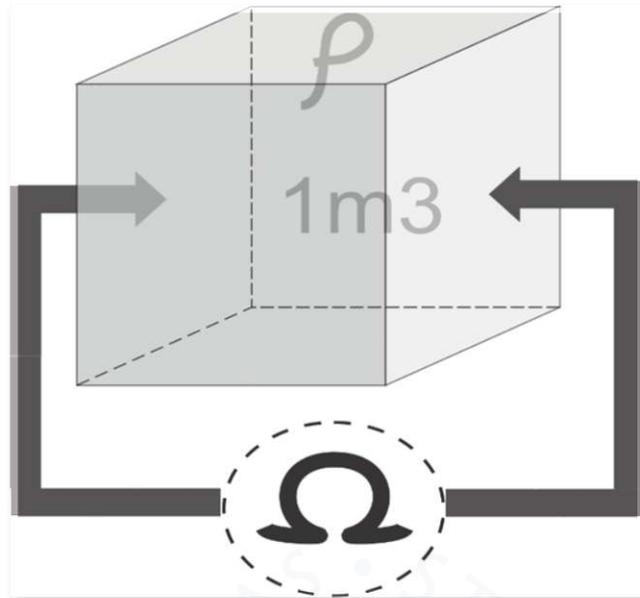


Figura 20. Resistividad de un cubo de determinado terreno de 1m de arista.  
Fuente: Elaboración propia.

En la figura 20 se ilustra una representación de la medida de la resistividad de cierta muestra, nótese que la medida se da entre paredes o caras opuestas del cubo. La medida de la resistividad del terreno es afectada por una gran cantidad de factores y condiciones, algunos con un mayor impacto que otros.

La resistividad toma sus unidades de la resistencia y las características geométricas del medio en el que se desea medir, como se demostrará a continuación:

$$R = \rho \frac{L}{S} \quad (2.1)$$

$$\rho = \frac{R \cdot S}{L} \quad (2.2)$$

$$\rightarrow \left( \frac{\Omega \cdot m^2}{m} \right) = \Omega \cdot m$$

Donde:

R = Resistencia ( $\Omega$ ).

$\rho$  = Resistividad ( $\Omega \cdot m$ ).

L = Longitud (m).

S = Sección ( $m^2$ ).

Una pregunta que puede surgir a partir de la ecuación (2.1) es ¿Por qué motivo emplear a la resistividad en lugar de la resistencia eléctrica —que es un parámetro mucho más utilizado en el ámbito eléctrico— para caracterizar el terreno como un buen conductor o no? La respuesta a esta interrogante yace en el concepto de cada una de las dos palabras. Mientras

la resistencia eléctrica es una propiedad que indica cuánta dificultad enfrenta el paso de electrones en su camino dentro de un conductor; la resistividad representa la resistencia eléctrica específica de un determinado material. Piénsese en dos materiales distintos sometidos a una misma temperatura. Se podría hacer equivalentes dichas resistencias eléctricas modificando parámetros como por ejemplo la sección y/o longitud del conductor (el material con menor resistencia se podría incrementar en su longitud de tal forma que las resistencias lleguen a ser iguales). Este juego de variables geométricas no es posible hacer con la resistividad, pues esta es exclusiva del material. Dichos cambios en la geometría de los conductores no alterarían el valor de su resistividad.

La resistividad tiene como inversa a la conductividad eléctrica; en tanto, la resistencia tiene a la conductancia como propiedad en el sentido inverso. En otros términos, la resistividad es una propiedad intrínseca del material y no depende de las características geométricas del medio conductor; aunque sí de otro factor como es la temperatura.

Se puede conocer mucho acerca del terreno en el cual se trabaja, con el solo hecho de conocer su resistividad. En las exploraciones petrolíferas, un valor pico de resistividad indica con una alta probabilidad, la presencia de una acumulación de petróleo en las profundidades. Este valor extremadamente elevado se explica por la bajísima conductividad de la corriente eléctrica del petróleo en sí. Como material, el petróleo posee una resistividad de  $10^{16} \Omega \cdot m$ . De manera análoga, una resistividad de unos cuantos ohmios sugeriría la presencia de aguas subterráneas que muy a menudo son ricas en sales disueltas.

La Tierra matemáticamente es modelada como un gran conductor eléctrico esférico, y se dice que puede recibir como también aportar carga de una manera indeterminada. Es gracias a esta característica en la que se basan todos sistemas de puesta a tierra.

## **2.2 Elementos que influyen en la resistividad del terreno**

Existen una gran cantidad de elementos que influyen en la resistividad del terreno, pero se describirá algunos de los más importantes.

### **2.2.1 Naturaleza de los suelos**

De acuerdo con la composición del suelo, éstos pueden tener cierta capacidad para conducir o no la electricidad. Conocer la naturaleza del suelo es el primer paso para formarse una idea de la resistividad que posee. Es importante tener en cuenta que las resistividades típicas que se encuentran en diversas literaturas deben ser usadas de manera referencial y no pensar que dichos valores son decisivos. Más adelante, en el apartado 2.3.2 se mostrará una clasificación sencilla de la conformación de las resistividades organizadas en una tabla.

### 2.2.2 La humedad

Uno de los factores más importantes en determinar la resistividad de los suelos es el contenido de agua presente. En las zonas geográficas donde no hay precipitaciones, la capacidad conductora es muy alta tanto en las capas superiores del suelo como también en las inferiores. Por lo contrario, en las zonas con precipitaciones normales las capas superiores poseen resistividades variables de acuerdo con el tipo del mineral constituyente, mientras que las inferiores presentan muy bajas resistividades. De acuerdo con Ortuondo (1997), esto se debe que dependiendo del tipo de material del que el suelo esté constituido por ejemplo las arcillas, se tendrá una mayor capacidad de retención del agua y por lo tanto una baja resistividad.

En 1965, H. J. Albrecht presentó la ecuación 2.3, que relaciona la resistividad del suelo, en función de la temperatura y humedad. El estudio presentado es una aproximación empírica, y a pesar de que se puede obtener de manera general con cierta independencia del tipo de mineral, es mejor emplearla para hacer comparaciones de como varía la resistividad con dichos parámetros.

$$\rho = \frac{1.3 * 10^4}{(0.73 * W^2 + 1)(1 + 0.03 * T)} \quad (2.3)$$

Donde:

$\rho$  = Resistividad ( $\Omega \cdot m$ ).

W = Humedad del suelo (% en peso)

T = Temperatura ( $^{\circ}C$  ;  $T > 0$ )

En la figura 21, se muestra la variación de la resistividad, en función de la humedad y temperatura del terreno.

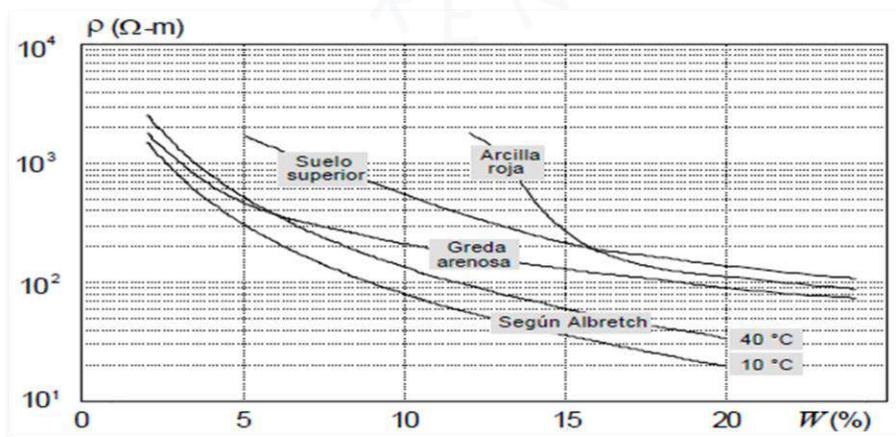


Figura 21. Variación de la resistividad en función de la humedad y dos temperaturas distintas según Albrecht.

Fuente: Ortuondo (1997).

### 2.2.3 La temperatura del terreno

Cuando el valor de la temperatura del suelo se encuentra por encima del punto de congelamiento y por debajo de los 100 grados Celsius, la agitación de las partículas, producida por el aumento de temperatura, dificulta la conducción de la electricidad y por ello aumenta la resistividad. En la figura 22, se muestra la variación de la resistividad del terreno, cuando varía la temperatura. Aparecen dos curvas distintas porque son creadas a partir de concentraciones de sales distintas.

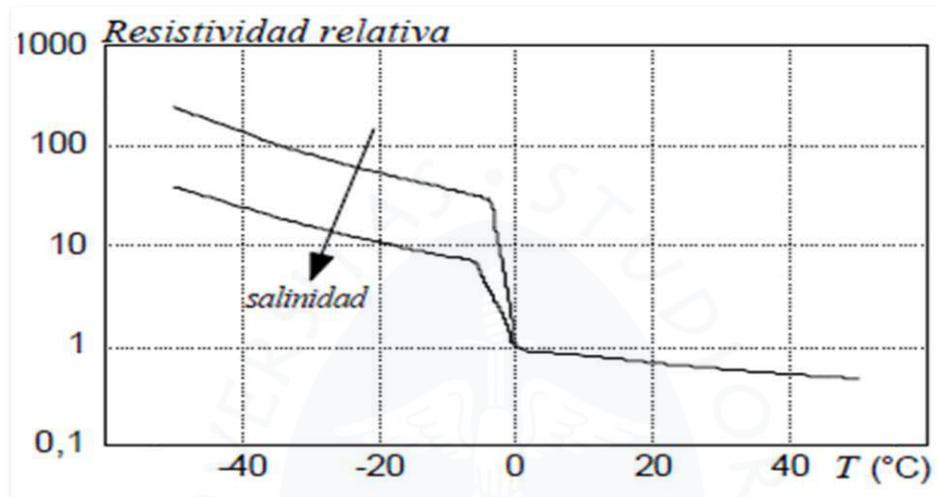


Figura 22. Resistividad relativa, según la variación de temperatura del terreno. Fuente: Ortuondo (1997).

### 2.2.4 La concentración de sales disueltas

La concentración de sales disueltas en el terreno posee una gran influencia en el valor de la resistividad del terreno, debido a la naturaleza conductiva de los iones que conforman dichas sales. Es así, que, dependiendo de la concentración de estas, la resistividad del terreno puede variar en amplios rangos de valores.

El agua pura posee una deficiente capacidad para conducir la electricidad. Esto ocurre porque no contiene iones que son los responsables de crear ese camino para que exista la conducción. Es por este motivo que el agua tridestilada posee una alta resistividad que puede llegar incluso a los  $100\ 000\ \Omega \cdot m$ . Las aguas encontradas normalmente en el terreno no se encuentran químicamente puras y por lo tanto poseen cierta composición de sales. Esto hace que las aguas subterráneas posean una baja resistividad.

La tabla 4 muestra diversos valores de resistividad de distintos tipos de aguas que se encuentran en la naturaleza, tanto superficiales como subterráneas. Se puede apreciar como los valores van desde décimas hasta miles de ohmios por metro.

Tabla 4. Resistividades de diversos tipos de aguas

Tipos de aguas	Resistividad ( $\Omega \cdot m$ )
Aguas de precipitaciones	30 - 1000
Aguas superficiales de lagos y ríos	
<i>Aguas puras</i>	3000
<i>Aguas dulces</i>	10 - 1000
<i>Aguas salobres</i>	2 - 10
<i>Aguas de rocas ígneas</i>	30 - 500
<i>Aguas de rocas sedimentarias</i>	10 - 100
Aguas de lagos salados	0.1 - 1
Aguas de los suelos	
<i>Promedio</i>	100
<i>En suelos de rocas ígneas</i>	30 - 150
<i>En suelos de rocas sedimentarias</i>	1
<i>Aguas subterráneas</i>	1 - 20
Agua marina a 30 grados Celsius	0.2

Fuente: Ortuondo (1997).

Elaboración propia.

### 2.2.5 La compactación del terreno

La compactación del terreno ofrece una idea que tan cercanas se encuentran las partículas una de otras. Cuanto mayor es el grado de la compactación, las partículas estarán más contiguas entre sí. Es de esta forma que, si el terreno se encuentra saturado con agua, y es poco compacto, los espacios entre gránulos son menores y estarán llenos de agua, permitiendo así una mejor conductividad y una baja resistencia. La figura 23 muestra el comportamiento de la resistividad con la compactación del terreno. Se puede observar que a medida que el grado de compactación aumenta, la resistividad disminuye.

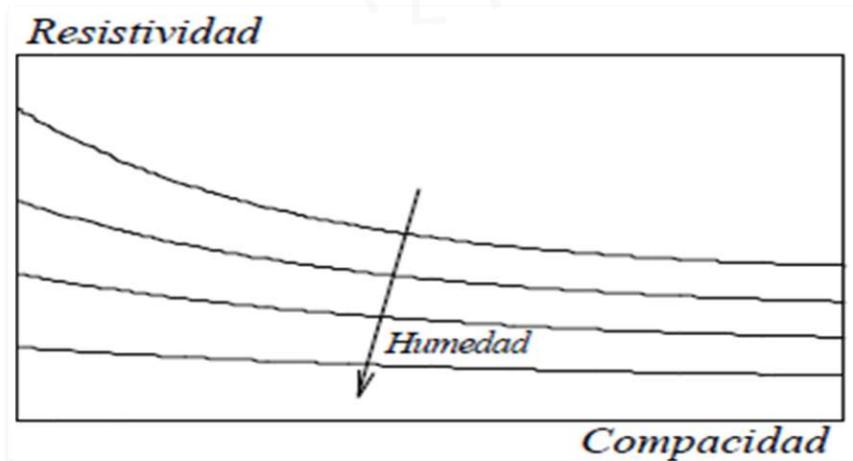


Figura 23. Variación de la resistividad con la compacidad del terreno.

Fuente: Ortuondo (1997).

### 2.2.6 Granulación de los suelos

La composición de un suelo en cuanto al tamaño de los granos es relevante en la resistividad y varía según las épocas del año. Esto se debe a que el agua producto de las lluvias estacionales, se acumula alrededor de los granos a causa de la tensión superficial. Esto significa que los suelos con granos pequeños tenderán a acumular una mayor cantidad de agua y facilitaría el paso de la corriente eléctrica. Un suelo de diferentes tamaños de granos hace que los espacios intergranulares disminuyan, minimizando también la resistividad del terreno.

### 2.2.7 La estratificación del terreno

Geológicamente, el suelo está formado por diferentes capas o estratos, que poseen a su vez, profundidades distintas. Estos estratos pueden estar formados por materiales diferentes y por tanto presentar distintas resistividades. Por este motivo, la corriente posee distintas maneras de dispersarse según las capas y la profundidad. La figura 24 ilustra cómo se dispersa la corriente en un suelo formado por dos capas.

### 2.2.8 Anisotropía de la resistividad

El término anisotropía significa que las propiedades no son uniformes en todas las direcciones. Por ello, en cierta dirección se obtendrá un valor que puede ser distinto en una dirección diferente. En referencia a la anisotropía de la resistividad, depende de la orientación en la que se encuentran los cristales como por ejemplo el grafito. Normalmente es un valor que tiene mucha implicancia porque para las mediciones la corriente se disipa por los caminos más fáciles.

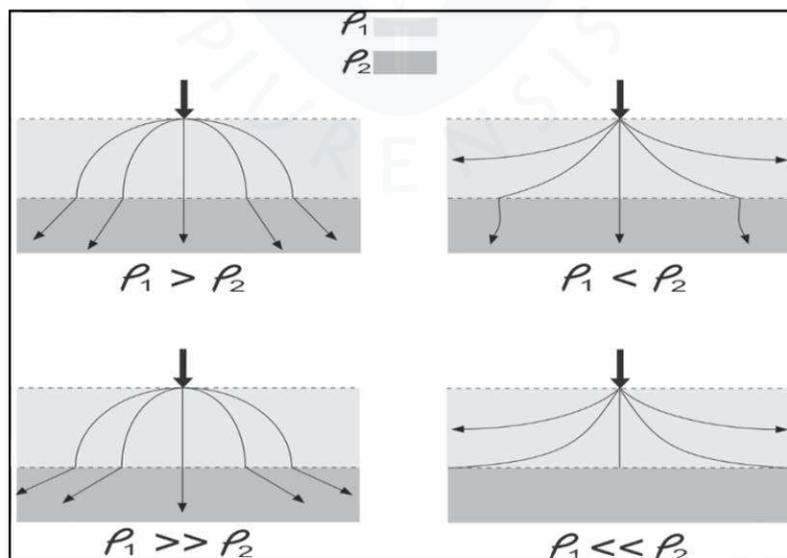


Figura 24. Influencia de la estratificación del terreno con dos capas en la resistividad.

Fuente: Osinergmin orienta (2014).

Elaboración propia.

## 2.3 Valores típicos de resistividad del terreno

No solamente la constitución del terreno tiene influencia en la resistividad. En los siguientes apartados (2.3.1 y 2.3.2), se mostrará que la resistividad está relacionada con la edad además de la constitución del terreno.

### 2.3.1 Resistividad por edad

Tabla 5. Resistividad el terreno según su antigüedad

Edad cronológica	Resistividad del terreno ( $\Omega \cdot m$ )				
	Arenas húmedas	Arcillas	Arenisca	Granitos	Calizas
Cuaternario y terciario	1 a 10	5 a 50	10 a 200	500 a 2000	50 a 5000
Mesozoico	5 a 20	25 a 100	20 a 500	500 a 2000	100 a 10000
Carbonífero	10 a 40	50 a 300	50 a 1000	1000 a 5000	200 a 100000
Paleozoico	40 a 200	100 a 500	100 a 2000	1000 a 5000	1000 a 100000
Precámbrico	100 a 2000	300 a 5000	200 a 5000	5000 a 20000	1000 a 100000

Fuente: Casas (2010).

Elaboración propia.

### 2.3.2 Resistividad por constitución

En la tabla 6, se muestra algunos valores característicos según la constitución del terreno, es decir de qué elementos esté compuesto el suelo.

Tabla 6. Resistividad por constitución

Clase de terreno	Resistividad ( $\Omega \cdot m$ )
Tierra pantanosa	50
Tierra arcillosa húmeda	100
Tierra arcillo-arenosa húmeda	200
Tierra arenosa seca	1000
Tierra de arenisca dura	2000
Suelo con estrato de roca	10000
Petróleo	$10^{16}$

Fuente: Casas (2010).

Elaboración propia.

Como se mencionó inicialmente en el capítulo, la resistividad eléctrica es una propiedad tan intrínseca al tipo de material y sus condiciones físicas, que pueden hacerla

variar. Por ello, sirve para una buena caracterización del suelo de acuerdo con los valores que se encuentren en los estudios del suelo.

## **2.4 Equipos de medición**

Osinergmin Orienta (2014), recomienda que los dispositivos de medición de las resistividades cumplan con ciertos requisitos y pruebas. Con dichos fines, en este apartado se enunciarán las características y condiciones que deben poseer los equipos, así como mencionar los escenarios no recomendados y las respectivas precauciones.

### **2.4.1 Componentes del instrumento**

Un dispositivo de medición está compuesto básicamente por dos elementos:

a) Fuente de potencia. Funcionan recomendablemente en corriente alterna o alterna pulsante, con una tensión que oscila entre los 50 y 500 V y frecuencias que varían entre 60 y 70 Hz. El uso de fuentes de potencia con corriente continua no es recomendado debido al riesgo de electrólisis. Cuando se emplean instrumentos con un acumulador eléctrico, deberá disponer de un rectificador estático DC/AC.

b) Sistema de medición. Se encuentran tres tipos de sistemas de medición, el sistema voltímetro o ohmimétrico, en el cual la resistencia de los electrodos de corriente no altera la lectura del aparato; el sistema comparador de resistencias, cuya ventaja es una mayor facilidad de lectura y por último el sistema de balance nulo que, usando electrodos de baja resistencia, no afecta la lectura. Existen también instrumentos que combinan dichos sistemas mejorando así la medición.

### **2.4.2 Requisitos básicos de los instrumentos**

Los requisitos actuales que deben cumplir los instrumentos son los siguientes:

- Buen almacenamiento de la información.
- Compactos
- Interfaz para conexión con PC
- Opción para medición con pinzas y estacas.
- Similar clase de precisión en transductores.
- Contar con certificaciones de ensayos tipo

### **2.4.3 Ensayos tipo**

Son ensayos empleados para que los instrumentos garanticen un correcto funcionamiento y arrojen medidas en las que se pueda confiar. Las certificaciones y regulaciones son las siguientes:

- Para el aislamiento, IEC 611000-4-2, IEC 61010-1.

- Para la compatibilidad electromagnética, IEC 1000-4-2, IEC 61326-1.
- Ensayos climáticos, DIN 40040.
- Ensayos mecánicos, IEC 529, DIN 40050.
- Precisión, +/- 2 %.
- Medición de RE, IEC 61557-5.
- Fabricación, DIN ISO 9001.

#### **2.4.4 Consideraciones generales para la medición**

Es importante discurrir en las siguientes consideraciones antes de efectuar una medición.

**2.4.1.1 Precauciones.** Llevar preparado y debidamente cargado el equipo de medición, verificando su estado y buen funcionamiento antes de su puesta en servicio.

Es recomendado tener una estrategia de medición preestablecida para evitar contratiempos. Dicha estrategia debe considerar el método o tipo de configuración a utilizar, en función al equipo, definir y anotar las direcciones en las que se tomaran las mediciones.

Se debe tener en cuenta factores que podrían influenciar las mediciones como, por ejemplo: estructuras metálicas en la zona como tuberías enterradas, otros sistemas de puesta a tierra. La medición debe estar acompañada con anotaciones de la temperatura y el clima, así como las últimas precipitaciones en la zona, ya que las condiciones climáticas pueden dar resultados distintos.

**2.4.1.2 Escenarios no recomendables.** Las mediciones con miras a la construcción de un sistema de puesta a tierra deben realizarse en la zona con acabados finales, es decir que, si se planean proyectos futuros, ya sea nivelaciones de terreno, terraplenes o cualquier otro motivo que altere las condiciones iniciales, las mediciones deberán esperar a que dichas obras finalicen.

No es recomendable hacer las mediciones con el terreno húmedo a causa de recientes precipitaciones, ya que como se vio en capítulos anteriores, la humedad del suelo es un factor muy importante para considerar.

En terrenos con muchos obstáculos donde no es posible realizar mediciones en toda el área, ya sea porque dichos obstáculos se encuentran enterrados o porque el área es muy restringida, es necesario realizar varias mediciones en diferentes direcciones. En este escenario, mientras mayor variación de la resistividad se encuentre, mayor cantidad de pruebas será necesaria.

## **2.5 Tipos de prospecciones para medición de resistividad**

### **2.5.1 Usando la información geológica y muestras de suelo**

A menudo, en el sitio donde se va a instalar un sistema de puesta a tierra, se deben realizar extensos trabajos de ingeniería civil. Este trabajo generalmente involucra prospecciones geológicas que resultan en una cantidad considerable de información sobre la naturaleza y configuración del sitio. Dichos datos podrían ser de gran ayuda para el ingeniero eléctrico que debería intentar obtener esta información.

La determinación de resistividad del terreno a partir de los valores de resistencia medidos entre caras opuestas de una muestra de suelo de dimensiones conocidas no se recomienda, ya que las resistencias interfaciales desconocidas de la muestra de suelo y los electrodos están incluidas en el valor medido. Una determinación es más precisa si se realiza una medición de resistencia de cuatro terminales de la muestra de suelo. Los terminales de potencial, encargados de medir el voltaje, deben ser pequeños, en relación con la sección transversal de la muestra, y deben estar lo suficientemente distantes de los terminales de corriente para asegurar una distribución de corriente casi uniforme en la muestra. Una distancia igual al ancho de la mayor sección transversal suele ser adecuada para el propósito de la determinación. Es difícil, y en algunos casos imposible, obtener una aproximación útil de la resistividad del suelo a partir de la resistividad medidas en muestras. Esto se debe a la dificultad de obtener muestras de suelo representativas y homogéneas, y que posean el mismo nivel de compactación del suelo original, junto con el contenido de humedad en la celda de prueba. (The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc, 1983)

### **2.5.2 Sondeo eléctrico vertical**

El sondeo eléctrico vertical es el tipo de método más empleado para medir resistividad del terreno e incluso aproximar el espesor de los estratos que conforman el suelo.

Mediante este tipo de medición, se elige un centro y una dirección de medición. Estas dos referencias se mantienen fijas hasta que la medición culmine. Mediante el equipo de medición, que puede ser un telurómetro, se colocan los electrodos tomando como referencia el centro y dirección previamente establecidas, a una distancia entre ellos. El principio general de funcionamiento de este método básicamente consiste en inyectar corriente entre dos electrodos y al dispersarse la corriente en el suelo, medir la diferencia de potencial entre los dos electrodos restantes.

Una vez se obtengan los valores de resistividad, a este valor se le denomina resistividad aparente. De manera usual, para una mejor visualización de los resultados, se obtienen gráficos como el que se muestra a continuación en la figura 25. Lo normal es dibujar estos gráficos utilizando escalas logarítmicas en ambas coordenadas, para poder interpretarlos mediante curvas patrón especialmente construidas para ello. Otros métodos de

interpretación, menos usuales, pueden requerir de gráficos con otros tipos de escalas. (Ortuondo, 1997).

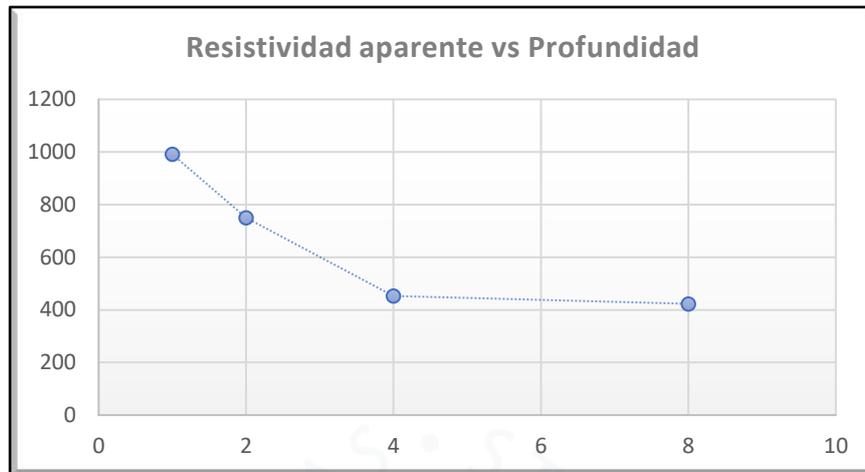


Figura 25. Resistividad aparente vs profundidad usando método de sondeo vertical con configuración de Wenner.

Fuente: Elaboración propia.

Este método puede poseer distintas configuraciones entre los electrodos, dependiendo de la distancia entre ellos. Dichas configuraciones, pueden ser de Wenner, Schlumberger o azimutal. Sin embargo, las dos primeras son las más empleadas.

La figura 26 muestra la correcta e incorrecta aplicación de la configuración de Wenner, como se aprecia en la figura, la parte derecha cambia el centro de referencia de cada medición, cuando lo correcto debe ser mantener una simetría respecto a un mismo eje (parte izquierda).

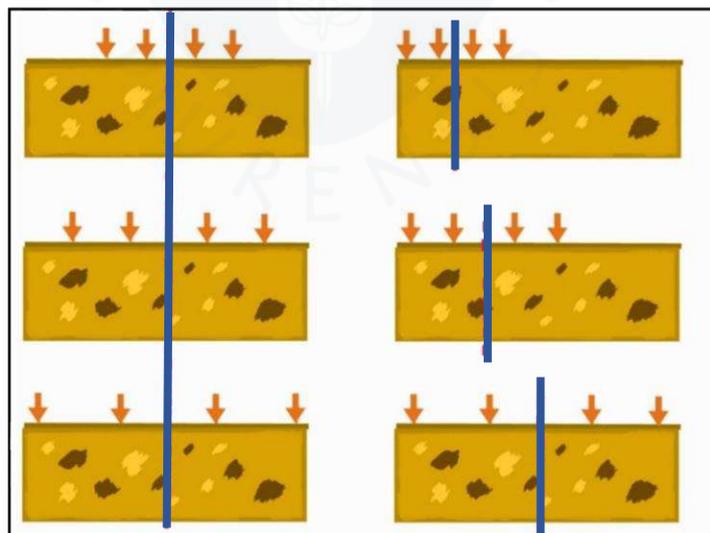


Figura 26. Aplicación correcta e incorrecta del método de Wenner.  
Fuente: Elaboración propia.

### 2.5.3 Calicatas eléctricas

Las calicatas eléctricas se emplean para averiguar la variación horizontal de la resistividad en el terreno. Estas variaciones laterales pueden ser por la presencia de acumulación de cierto material, diferente al del medio circundante. Permite detectar fallas geológicas. Entre otras aplicaciones, se encuentra su uso en la determinación de edificaciones y sitios arqueológicos enterrados. La figura 27 muestra las variaciones laterales típicas en el terreno y la forma en cómo se apreciarían haciendo un corte transversal.

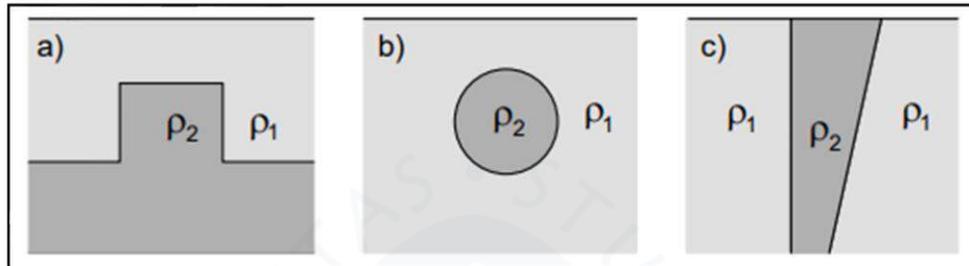


Figura 27. Variaciones laterales típicas en un terreno. a) Inclusión de un estrato en otro superior, b) acumulación de material diferente al alrededor, c) contactos de distintos materiales.

Fuente: Ortuondo (1997).

Entre las muchas configuraciones de colocar los electrodos en este método, se explica a continuación y de manera breve, una manera, la calicata de dispositivo simétrico. Esta forma se puede realizar con las configuraciones de Wenner o Schulumberger, variando la distancia de los electrodos acorde con la configuración, y se realiza una secuencia de medición cada intervalo de tiempo aproximadamente constante. Todos los electrodos se desplazan de manera horizontal (perpendicular a la línea de ubicación de los electrodos).

Este método carece de fundamento, si todos los estratos del suelo están ubicados de manera paralela entre sí, es decir si el suelo es perfectamente uniforme, debido a que todos los resultados medidos, serían iguales. No obstante, si el suelo presenta variaciones laterales, mientras más próximo está el conjunto de electrodos al punto de anomalía, más se modifica el valor de resistividad aparente medido. Al alejar los electrodos, disminuye el efecto de la anomalía horizontal y la resistividad aparente se acerca a la correspondiente a un suelo perfectamente estratificado. La figura 28, muestra la disposición de los electrodos en este método usando la configuración de Wenner.

Esta forma de medición no presta utilidad en la determinación de la composición de los suelos, si están formados por estratos idealmente paralelos a la superficie del terreno. Sin embargo, como en la realidad los estratos tienen siempre algún grado de inclinación, el perfil eléctrico puede ser útil para cuantificar esta variación lateral. Si el terreno presenta anomalías laterales importantes, el perfil eléctrico es recomendable como complemento al sondeo eléctrico. (Ortuondo, 1997).

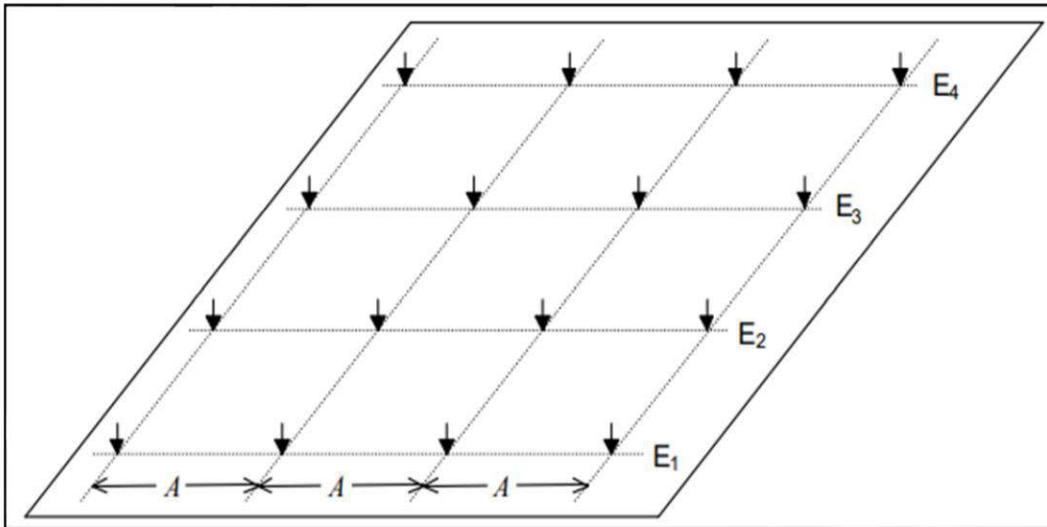


Figura 28. Calicata eléctrica usando la configuración de Wenner.  
Fuente: Ortuondo (1997).

#### 2.5.4 Tomografía eléctrica resistiva

El método de tomografía eléctrica resistiva nos permite investigar la variación de la resistividad del subsuelo a profundidad y lateralmente. Se inyecta corriente continua al terreno mediante electrodos y para conocer la diferencia de potencial contra otros electrodos. La relación entre estas nos proporciona una resistividad que nos permite identificar con gran exactitud el material en el subsuelo.

Para la obtención de las imágenes en 2D o 3D, por cada medición, una corriente eléctrica, DC, se inyecta en el suelo a través de dos electrodos (A y B). El potencial resultante se mide entre dos electrodos (M y N). Un valor de resistividad aparente se deriva de la corriente inyectada, voltaje medido y el factor geométrico. Los datos medidos se invierten para producir un modelo de la distribución de la resistividad eléctrica real del subsuelo (solución no-única). La distribución de la resistividad eléctrica se correlaciona con la geología del subsuelo o se interpreta en términos geológicos. La figura 29, ejemplifica una aplicación de la tomografía eléctrica resistiva y las gráficas que se generan en 2D.

La profundidad de sondeo usualmente es mayor a 100 metros y sus aplicaciones para los estudios de resistividad son:

- Exploración de minerales.
- Fugas de agua de todo tipo.
- Exploración de aguas subterráneas.
- Mapas litológicos.
- Detección de cuevas, cavidades, cenotes, hundimientos, fallas/fracturas.
- Caracterización geotécnica.
- Investigación arqueológica.

- Detección de productos libres de plumas contaminantes.
- Monitoreo de lapso para proceso de rehabilitación como inyección de vapor.
- Monitoreo de lapso de procesos de subsuelo tales como recarga de agua subterránea, infiltración, intrusión de agua salada, túneles y fugas en presas agua.
- Detección de Cavidades, Discontinuidades y Fallas.
- Exploración de Aguas Subterráneas.
- Arqueología.
- Detección de minerales en el subsuelo.
- Investigaciones Geotécnicas.
- Estudios Ambientales.
- Búsqueda selectiva de minerales. (Cartomex, 2015).

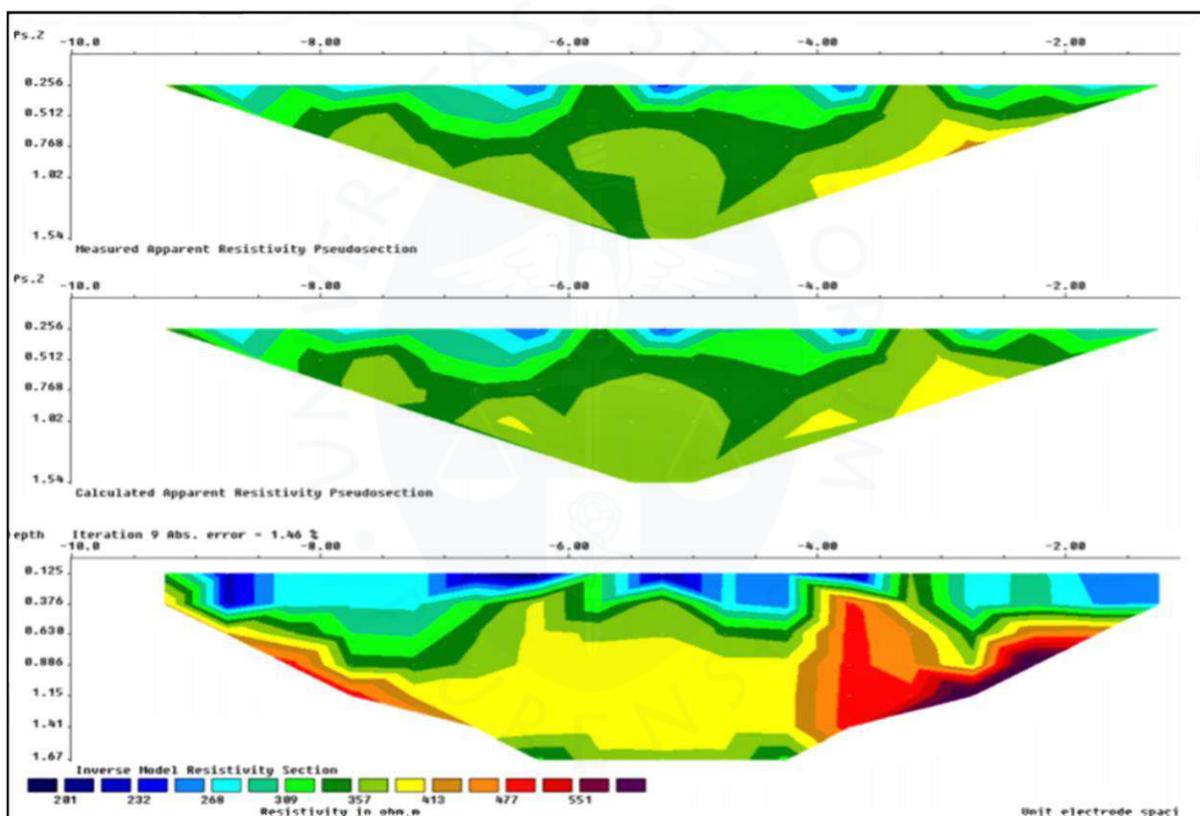


Figura 29. Ejemplo de tomografía eléctrica resistiva con las gráficas en 2D de resistividad eléctrica aparente medida, obtenidas con el software RES2DINV tomada en el estudio de "Utilización de la tomografía eléctrica resistiva para estimar el contenido de agua en el suelo en viña bajo diferentes sistemas de riego en España".

Fuente: Dafonte, y otros (2012).

## 2.6 Métodos de medición de la resistividad del terreno

En este apartado se verán los métodos de medición de la resistividad más usados y adaptados a los sistemas de puesta a tierra. Según la IEEE, en su estándar 81, considera básicamente cuatro tipos de métodos, siendo el último de ellos, el de especial interés en el

presente trabajo. Se puede afirmar, que los métodos a tratar en este apartado se basan en los principios aplicados en el sondeo eléctrico vertical y son los más relacionados cuando se tratan los diseños de puesta a tierra.

### **2.6.1 Método de la variación de la profundidad**

Este método, a veces llamado método de tres puntos, es una prueba de resistencia a tierra que se lleva a cabo varias veces, cada vez la profundidad de enterramiento del electrodo probado aumenta en un incremento dado y de ahí el nombre del método. El propósito de esto es forzar más corrientes de prueba a través de la profundidad del suelo. El valor de resistencia medido reflejará la variación de resistividad a un aumento profundidad. Por lo general, el electrodo probado es una varilla. Se prefieren las varillas a otros tipos de electrodos porque ofrecen dos ventajas importantes:

- El valor teórico de la resistencia de la varilla de tierra es simple de calcular con precisión adecuada, por lo tanto, los resultados son fáciles de interpretar.
- La inserción de una varilla es en frecuencia una operación fácil de realizar.

El método de variación de profundidad proporciona información útil sobre la naturaleza del suelo en las proximidades de la varilla (de 5 a 10 veces la longitud de la varilla). Si se debe investigar un gran volumen de suelo, es preferible utilizar el método de cuatro puntos, ya que la conducción de varillas largas no es práctica. (The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc, 1983).

### **2.6.2 Método de los dos puntos**

Se pueden realizar mediciones aproximadas de la resistividad de la tierra intacta en el campo con un resistímetro. El aparato consta de un electrodo de hierro pequeño y uno más pequeño, ambos unidos a una varilla aislante. El terminal positivo de una batería está conectado a través de un miliamperímetro al más pequeño electrodo y el terminal negativo al otro electrodo. El instrumento se puede calibrar para leer directamente en ohmios centímetros ( $\Omega \cdot \text{cm}$ ) al voltaje nominal de la batería. Este tipo de aparato es fácilmente portátil y con él se pueden tomar una serie de medidas en poco tiempo en pequeños volúmenes de suelo clavando los electrodos en el suelo o en las paredes o el fondo de excavaciones. Algunos de los aparatos más modernos pueden aceptar tanto el método de los dos puntos, como también el de tres o cuatro puntos. (The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc, 1983).

### **2.6.3 Método de los cuatro puntos**

El método más exacto en la práctica para medir la resistividad promedio de grandes volúmenes de tierra no perturbada es el método de cuatro puntos. Pequeños electrodos están enterrados en cuatro pequeños agujeros en la tierra, todos a la profundidad "b" y espaciados

en una línea recta a intervalos “a”. Se pasa una corriente de prueba I entre los dos electrodos externos y el potencial V entre los dos electrodos internos se mide con un potenciómetro o un voltímetro de alta impedancia. Entonces  $V / I$  da la resistencia R en ohmios. (The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc, 1983).

La mayoría de los dispositivos modernos, poseen de manera predefinida (usando una fórmula precargada al dispositivo, acorde con el método), la posibilidad de escoger las distancias de medición y con una profundidad de enterramiento ya estándar acorde con las varillas empleadas. El valor usual de dicha profundidad para las varillas es de 0.25 m.

Dentro del método existen tres tipos de configuraciones de los electrodos posibles.

**2.6.3.1 Configuración de Wenner.** En esta configuración los electrodos están igualmente espaciados. La distancia “a” es la distancia entre dos electrodos adyacentes tal y como se muestra en la figura 30.

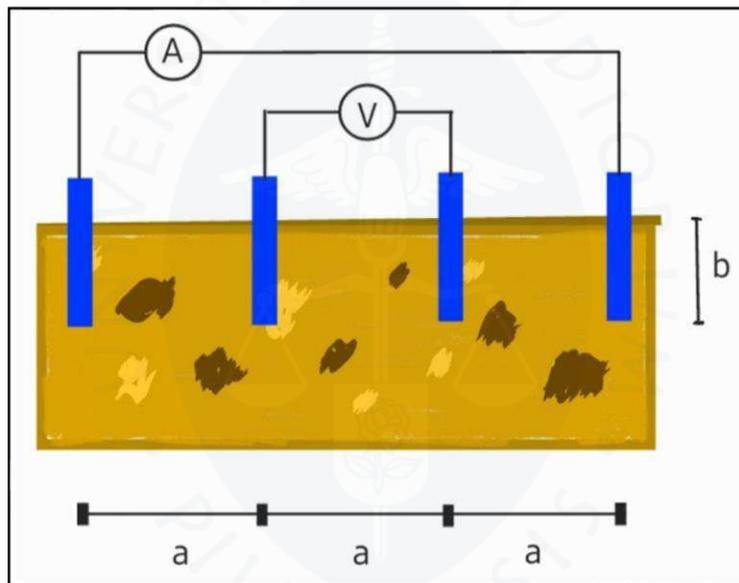


Figura 30. Configuración de Wenner.  
Fuente: Elaboración propia.

Dentro de esta configuración, se encuentran algunas variantes como por ejemplo Wenner alfa, Wenner beta o Wenner gamma. La variante más común es Wenner alfa. Las otras dos variantes se diferencian en el orden en el cual se colocan los electrodos de corriente y potencial. De acuerdo con dicho orden cada una de las variantes posee una fórmula distinta.

Aclarado lo anterior, la resistividad para Wenner alfa, en términos de las unidades en las que “a” y “b” están medidas es:

$$\rho = \frac{4\pi a R}{1 + \frac{2a}{\sqrt{a^2 + 4b^2}} - \frac{a}{\sqrt{a^2 + b^2}}} \quad (2.4)$$

Se debe recalcar que la fórmula expresada en la ecuación 2.4, no aplica a cualquier tipo de varilla ni a cualquier profundidad “b”, sino que aplica a pequeños electrodos, enterrados una profundidad “b”, con cables aislados. Sin embargo, cuando la profundidad es no mayor a  $0.1a$ , se puede asumir que la profundidad  $b=0$  y la fórmula se convierte en:

$$\rho = 2\pi aR \quad (2.5)$$

La ecuación 2.5, entrega como resultado, la resistividad del suelo aproximada a una profundidad “a”, cuando “b” es despreciable. (The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc, 1983).

**2.6.3.2 Configuración de Schlumberger.** Esta configuración también llamada de arreglo de Schlumberger-Palmer, arreglo desigualmente espaciado surgió gracias a una debilidad de la configuración de Wenner. La figura 31, muestra cómo se disponen los electrodos en esta configuración.

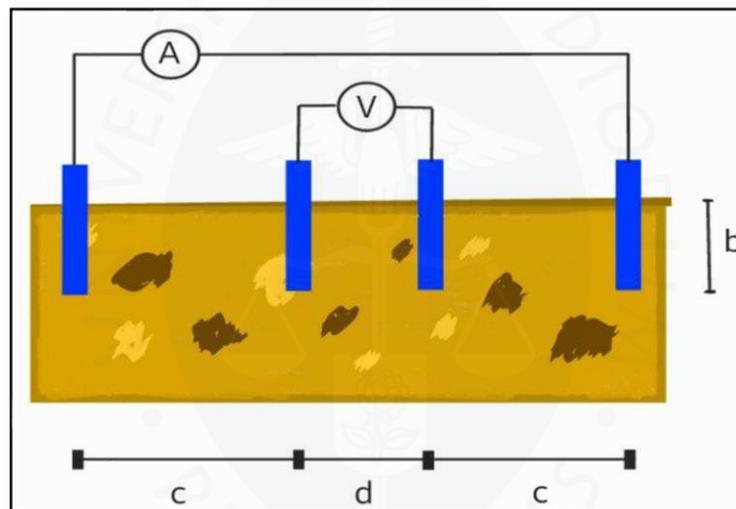


Figura 31. Configuración de Schlumberger.  
Fuente: Elaboración propia.

Uno de los defectos principales de la configuración de Wenner, es el abrupto decrecimiento en la magnitud del potencial entre los electrodos interiores, cuando su espaciamiento es incrementado a relativamente grandes valores. En ocasiones los instrumentos comerciales son inadecuados para medir un potencial tan bajo. Por este motivo, para medir resistividades con largos espaciamientos entre los electrodos de corriente se usa la configuración de Schlumberger con resultados satisfactorios. La fórmula usada en este caso puede ser fácilmente determinada.

En la mayoría de los casos, la profundidad de enterramiento de los electrodos suele ser aproximadamente 0.25 metros, la cual, para distancias muy grandes de medición, es pequeña en comparación a la separación de electrodos  $d$  y  $c$ .

En dicha situación, la resistividad puede ser calculada de una manera más rápida con la aplicación de la ecuación 2.6 que sigue a continuación:

$$\rho = \frac{\pi c(c+d)R}{d} \quad (2.6)$$

**2.6.3.3 Configuración azimutal.** Esta configuración es poco usada en la medición de resistividades de suelos para diseñar puestas a tierra. Se la utiliza mayormente en prospecciones geofísicas que requieren de grandes separaciones entre electrodos, ya que reduce el acoplamiento entre los conductores de corriente y potencial. La figura 32, muestra la disposición de los electrodos de corriente C1 y C2, así como los de potencial P1 y P2.

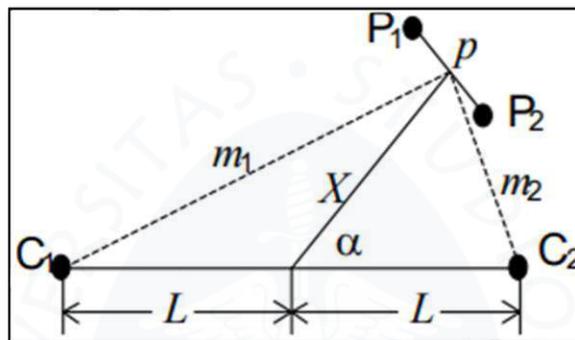


Figura 32. Configuración Azimutal.  
Fuente: Ortuondo (1997).

La ecuación 2.7, resulta en el valor de la resistividad aparente:

$$\rho = \frac{2\pi R}{pL \sin \alpha} \left[ \frac{1}{m_1^3} + \frac{1}{m_2^3} \right]^{-1} \quad (2.7)$$

Si el ángulo  $\alpha = 90^\circ$ , se obtiene una versión particular de esta configuración, denominada dipolar ecuatorial. De este modo, se obtiene la ecuación 2.8 que representa la resistividad aparente ecuatorial:

$$\rho_{ec} = \frac{\pi R}{p} \cdot \frac{(X^2 + L^2)^{3/2}}{L} \quad (2.8)$$

Para la aplicación de las configuraciones azimutal y ecuatorial, se requiere disponer de las curvas patrón correspondientes, de las que se encuentran pocas versiones en la literatura técnica accesible. (Ortuondo, 1997).

## 2.7 Interpretación gráfica de los resultados

### 2.7.1 Consideraciones preliminares

Las mediciones resultantes de resistividad aparente se pueden ordenar de manera gráfica, dibujando en el eje vertical el valor de resistividad en ohmios por metro, y en el eje horizontal la distancia entre los electrodos. Debido a que la corriente en el terreno se dispersa en todas las direcciones, formando superficies equipotenciales, la distancia entre los electrodos es también la profundidad de exploración (superficie semiesférica formada por la dispersión de la corriente en el terreno). En los siguientes apartados, se estudiará, las estructuras equivalentes del suelo.

### 2.7.2 Estructura equivalente del suelo

Según la forma de la curva de la resistividad, se puede obtener mucha información de la formación del suelo en cuanto se refiere a capas o estratos. Ya que cada capa posee su propio valor de resistividad, en la práctica, se debe observar el comportamiento general de la curva.

Ortuondo (1997), en su libro sobre manual para el proyecto y análisis de puestas a tierra, define básicamente cuatros tipos de suelo, según sus estratos y los valores de resistividad medidos.

**2.7.2.1 Suelo homogéneo.** La resistividad aparente medida en un suelo homogéneo, es decir compuesto por una sola capa, como el de la figura 33, coincide con su valor real de resistividad real y es independiente de la distancia de separación entre los electrodos. El valor de la relación  $R = V/I$ , disminuye en relación inversa con la separación entre electrodos. Este decremento de  $R$  al aumentar la separación entre electrodos ocurre en la mayoría de los casos, tanto en un medio homogéneo como en un medio idealmente estratificado.

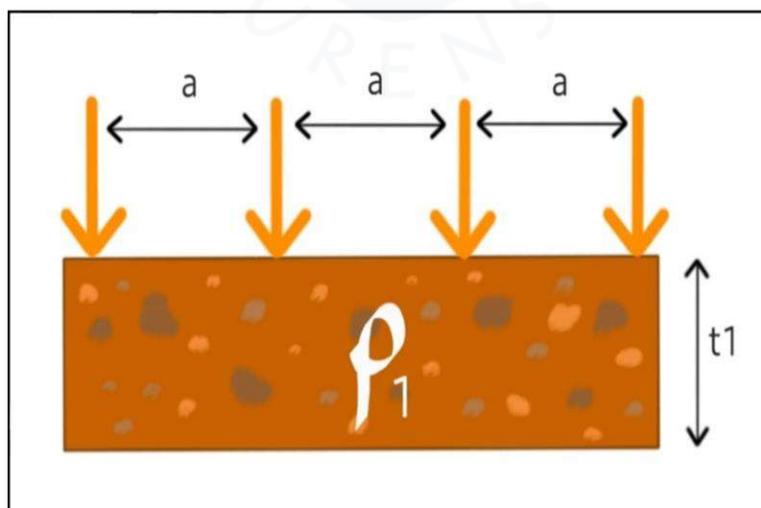


Figura 33. Representación gráfica de un suelo homogéneo.  
Fuente: Elaboración propia.

Solamente cuando se presentan alteraciones laterales de importancia como contactos geológicos (fallas), rocas enterradas aisladas, etc., puede darse, para puntos específicos de ubicación de los electrodos, un aumento de  $R$  al aumentar la separación entre éstos. (Ortuondo, 1997).

**2.7.2.2 Suelo estratificado de dos capas.** Una forma habitual de asimilar un suelo es considerarlo como si estuviera formado por dos estratos paralelos a la superficie del terreno. En este modelo, el estrato superior del terreno posee una resistividad  $\rho_1$  y un espesor  $t_1$ ; el estrato inferior mientras tanto tiene una resistividad  $\rho_2$  y un espesor  $t_2$  de magnitud infinita.

En la figura 34, se esquematiza la medición de resistividad en un terreno formado por 2 estratos, utilizando la configuración de Wenner. Para distancias “ $a$ ” entre los electrodos, tales que la relación  $a/t_1$  es pequeña, la corriente inyectada al terreno entre los electrodos de los extremos circula en su mayor parte por la capa superior de resistividad  $\rho_1$ ; por tanto, el valor medido de resistividad aparente es cercano a éste.

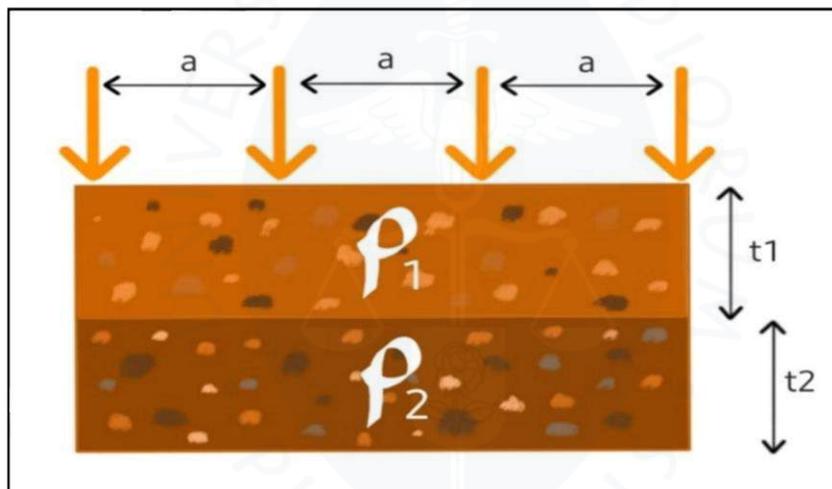


Figura 34. Representación gráfica de un suelo formado por dos capas.  
Fuente: Elaboración propia.

A medida que los electrodos se van separando, circula una parte cada vez mayor de la corriente por el estrato inferior; el valor de la resistividad aparente medido es una cierta combinación de  $\rho_1$  y  $\rho_2$ . Finalmente, para valores muy grandes de la relación  $a/t_1$ , la corriente inyectada circula en mayor proporción por el estrato inferior y el valor de la resistividad aparente tiende a  $\rho_2$ . En la figura 35, se muestran las curvas típicas de resistividad aparente en un terreno formado por 2 estratos paralelos a la superficie, para las configuraciones de Wenner y Schlumberger. Se observa que ambas curvas son muy similares si los estratos son ideales. Por supuesto, las curvas de campo se deben comparar con las curvas patrón correspondientes, dependiendo de la configuración utilizada.

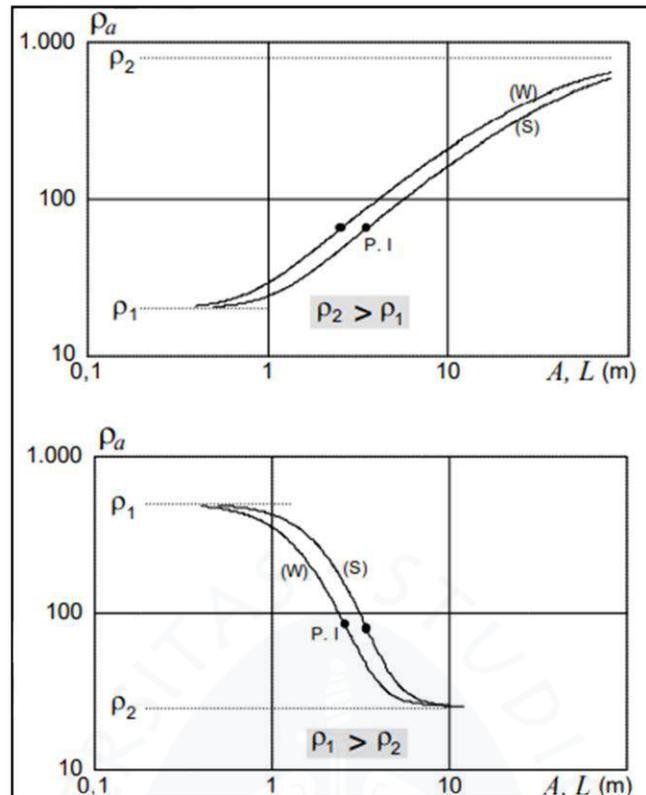


Figura 35. Curvas típicas de resistividad para dos suelos de dos capas.

Caso A.  $\rho_2 > \rho_1$  y caso B.  $\rho_1 > \rho_2$ .

Fuente: Ortuondo (1997).

Las características principales de los gráficos de resistividad aparente correspondientes a un terreno de dos capas, independientemente de la configuración utilizada, son:

- Tendencia asintótica al comienzo y fin de la curva. Para valores pequeños de la relación  $a/t_1$  o  $L/t_1$  (comienzo de la curva), hay una tendencia a  $\rho_1$ . Para valores grandes de esta relación, la curva tiende a  $\rho_2$ .

- La curva completa de un terreno de 2 estratos presenta un solo punto de inflexión; P. I. en el gráfico. (Ortuondo, 1997).

**2.7.2.3 Suelo estratificado de tres capas** En la figura 36, se muestra el modelo de un terreno formado por 3 estratos paralelos a la superficie. En forma similar al caso de 2 estratos, se puede concluir lo siguiente:

Para valores pequeños de  $a/t_1$ , la resistividad aparente es cercana a  $\rho_1$ . Al aumentar la separación entre electrodos, empieza a influir en mayor medida la resistividad  $\rho_2$  del estrato intermedio y en menor grado, la resistividad  $\rho_3$  del estrato inferior. Para valores mayores de "a", la influencia de  $\rho_3$  aumenta, empezando a disminuir la de  $\rho_1$  y  $\rho_2$ . Finalmente, para valores relativos grandes de "a", el valor de resistividad aparente tiende a  $\rho_3$ .

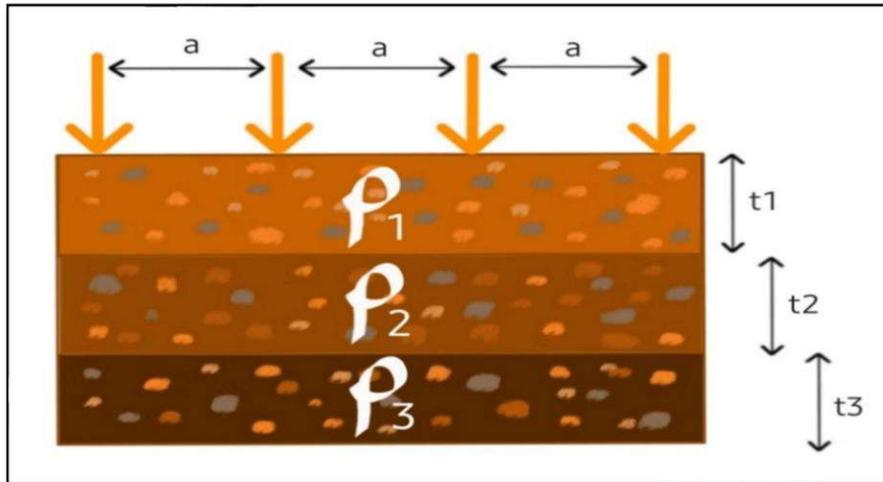


Figura 36. Representación gráfica de un suelo formado por tres capas.  
Fuente: Elaboración propia.

En la figura 37, se muestra la forma de la curva de resistividad aparente para 2 tipos de curvas de entre las 6 posibles combinaciones de resistividades relativas de los estratos. En la parte superior se tiene el gráfico correspondiente a un terreno formado por 3 estratos de resistividades  $\rho_1$ ,  $\rho_2$  y  $\rho_3$ , poseyendo una forma similar al de uno constituido por dos estratos de resistividades  $\rho_1$  y  $\rho_3$ . En casos como éste, la interpretación del terreno, asimilándolo a un menor número de capas, no significa errores de importancia para nuestros fines.

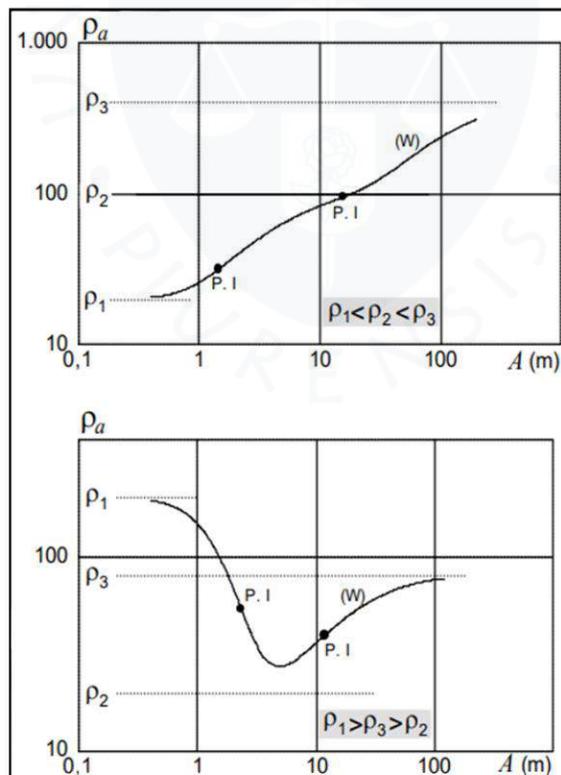


Figura 37. Dos de las seis combinaciones posibles de curvas típicas de resistividad para un suelo de tres capas.

Fuente: Ortuondo (1997).

Las características principales de las curvas correspondientes a un terreno formado por 3 estratos son:

- Tendencia asintótica al comienzo y fin de la curva. Para valores pequeños de la relación  $a/t_1$  o  $L/t_1$  (comienzo de la curva), hay una tendencia a  $\rho_1$ . Para valores grandes de la relación  $a/(t_1+t_2)$  o  $L/(t_1+t_2)$ , la curva tiende a  $\rho_3$ . Para valores intermedios de las relaciones indicadas, hay una tendencia incipiente hacia  $\rho_2$ , la que no se manifiesta por el efecto del estrato inferior.

- La curva completa correspondiente a un terreno de tres estratos, posee dos puntos de inflexión; P. I. en el gráfico. (Ortuondo, 1997).

**2.7.2.4 Suelo estratificado de n capas** Para un suelo con una cantidad mayor a 3 capas, el análisis de curvas de resistividad aparente se hace más complicado, ya que aumenta considerablemente el número de posibles combinaciones relativas de las resistividades de éstos (24 casos básicos posibles en un sistema de 4 capas). Sin embargo, siguen siendo válidas las consideraciones generales:

- Tendencia asintótica al valor  $\rho_1$  en el comienzo de la curva, y al valor  $\rho_n$  al final de la curva, para valores grandes de la relación  $a/(t_1+t_2+\dots+(t_n-1))$  o  $L/(t_1+t_2+\dots+(t_n-1))$ .

- La curva completa correspondiente a un terreno de n estratos posee n - 1 puntos de inflexión. (Ortuondo, 1997).

## 2.8 Interpretación de las mediciones de campo

Los tipos de interpretación siguientes se refieren al análisis posterior que debe seguir luego de haber realizado las mediciones de campo, para “convertir” la resistividad aparente originada del equipo de medición y una configuración implementada, para obtener un valor aproximado de resistividad del suelo, que se pueda emplear en un diseño de puesta a tierra.

Según Ortuondo (1997), en los inicios de la prospección geoelectrica existía una gama variada de métodos empíricos de interpretación de las mediciones de resistividad aparente, para deducir las características de los terrenos. Esta escuela empírica perduró un largo tiempo en países como EE.UU., Canadá e Inglaterra. La mayor parte de estos métodos empíricos se fundaban en la experiencia recogida durante muchos años de mediciones y no estaban sustentados científicamente. Sus posibilidades de interpretación eran restringidas ya que tenían esencialmente un carácter cualitativo, siendo aplicables con algún éxito, sólo en situaciones particulares tales como la ubicación de estratos o variaciones laterales importantes (depósitos aislados de un material diferente al resto circundante, fallas del terreno, etc.).

Estos métodos no permitían deducir los valores de resistividad de los estratos u otra conformación del terreno. Gracias a los aportes de S. Stefanescu, R. Maillet y los hermanos Schlumberger, publicados entre 1930 y 1932, se desarrollaron los métodos científicos de

interpretación, los que desplazaron rápidamente a los métodos empíricos en Europa. Recién a partir de la década de los 60 se comienzan a utilizar en EE.UU.

### **2.8.1 Métodos empíricos de interpretación**

Los métodos empíricos de interpretación de las mediciones de resistividad se encuentran actualmente obsoletos, sin embargo, es conveniente una revisión rápida de algunos de ellos. Es posible que al estudiar un proyecto realizado hace algunos años, aparezcan interpretaciones de mediciones que utilizan estos procedimientos.

**2.8.1.1 Método de la resistividad media.** Este criterio de interpretación, que se basa en la configuración de Wenner, asume que la mayor parte de la corriente inyectada al terreno penetra hasta una profundidad igual a la separación  $A$  entre electrodos. Por tanto, la resistividad aparente medida corresponde a una "resistividad media" hasta una profundidad igual a esa separación. El criterio anterior concluye que cuando se alcanza en profundidad un nuevo estrato del terreno, se produce un cambio en la curvatura del gráfico de resistividad aparente (Ortuondo, 1997).

Al margen de la vaguedad de lo que se quiere decir con "resistividad media" y por un "cambio en la curvatura" del gráfico de resistividad aparente, la penetración en el terreno de la corriente inyectada va mucho más allá de un valor igual a la separación  $A$  entre electrodos. Así, en un terreno hipotéticamente homogéneo, tan solo el 37% de la corriente total circula entre la superficie y una profundidad igual a la separación entre electrodos. En un terreno estratificado, la forma como se distribuye la corriente inyectada depende de las resistividades y espesores de los estratos; por lo tanto, no se puede asumir a priori una determinada distribución de ésta. Las variaciones en la curvatura a las que se refiere este método son suaves. No es posible, por lo tanto, identificar cambios de curvatura a no ser que aparezcan por incorrección en las medidas. (Ortuondo, 1997)

**2.8.1.2 Método de los puntos de inflexión.** En 2.7.2.4, Ortuondo (1997), establece que para un terreno formado por  $n$  estratos, la curva completa de resistividad aparente posee  $n - 1$  puntos de inflexión. Por tanto, el número de estos puntos en una curva de campo permite una primera identificación del tipo de estructura de que se trata, aunque no siempre es posible detectar su presencia.

En esos tiempos se usaban gráficos con eje vertical a la relación  $A/h$ , siendo  $A$  la distancia de separación entre electrodos y  $h$  la profundidad de capas, y en el eje horizontal a la relación de resistividades para un terreno de dos capas. Como no se conoce de antemano esta relación, no es posible emplear este método para determinar  $h$ . Sin embargo, puede ser de utilidad en algoritmos numéricos iterativos para la identificación de los parámetros de un terreno. (Ortuondo, 1997).

**2.8.1.3 Método acumulativo de Moore.** Ortuondo en 1997, afirma que este método empírico de interpretación propone la construcción de gráficos del valor acumulado de resistividad aparente, para medidas realizadas con separaciones de electrodos a igual intervalo, por ejemplo 1, 2, 3, 4 m, etc. En el gráfico del valor acumulado de la resistividad aparente, deben identificarse quiebres o cambios de tendencia. Para este fin, se traza la curva en papeles con diferentes tipos de escala (lineal-lineal, lineal-log, etc.), de modo de acentuar estos cambios.

Este método adolece de defectos, en el sentido que el gráfico de resistividad aparente de un terreno estratificado y de su valor acumulado, no tiene quiebres ni cambios de curvatura que puedan identificarse claramente, a excepción de los puntos de inflexión. Por tanto, no es útil para la interpretación de un terreno estratificado. (Ortuondo, 1997)

**2.8.1.4 Método de Barnes.** El método de Barnes postula que al incrementar la separación entre electrodos en un valor  $dA$ , se agrega a la medición una nueva capa de terreno de un espesor igual a ese incremento. Asumiendo que todas las capas de terreno, hasta una profundidad  $A_i$ , están eléctricamente en paralelo, la conductancia de la última capa agregada de acuerdo con Ortuondo (1997) es:

$$G_c = G_i - G_{i-1} \frac{2\pi A_i}{\rho_i} - \frac{2\pi A_{i-1}}{\rho_{i-1}} = 2\pi \frac{A_i \rho_{i-1} - A_{i-1} \rho_i}{\rho_i \rho_{i-1}} \quad (2.9)$$

La resistividad de la capa agregada sería:

$$\rho_c = 2\pi R_c dA = \frac{\rho_i \rho_{i-1}}{A_i \rho_{i-1} - A_{i-1} \rho_i} \quad (2.10)$$

Entre los métodos empíricos, el de Barnes se postula a ser el de mayor corte científico. Si se aplica este procedimiento, a manera de prueba, a una estructura conocida de 3 estratos, se concluye que es posible obtener una estimación gruesa de la resistividad del estrato intermedio. Sin embargo, no es posible deducir información sobre el espesor de los estratos. (Ortuondo, 1997).

## **2.8.2 Sobre los métodos científicos de interpretación de las mediciones**

La interpretación científica de las medidas de resistividad de un terreno admite básicamente dos procedimientos:

Un primer método directo, de tipo analítico-gráfico, permite concluir las características del terreno a través de una comparación de los valores medidos de resistividad aparente con curvas patrón o estándar, construidas ex profeso para distintas combinaciones de los parámetros de un suelo. Se han elaborado varias colecciones de curvas patrón, entre las cuales se han utilizado las correspondientes a Orellana y Mooney. Sin embargo, es claro que estas colecciones de curvas patrón no cubren todas las posibilidades que pueden darse en un

terreno. De ahí la conveniencia de contar con un procedimiento que permita obtener las curvas patrón de resistividad aparente para una combinación dada de los parámetros de un suelo. (Ortuondo, 1997).

El otro tipo de interpretación consiste en aplicar procedimientos de tipo analítico numéricos, haciendo un proceso de ingeniería inversa, es decir, a partir de las curvas ya existentes, iterar diversos valores característicos de las curvas, hasta encontrar el adecuado.

**2.8.2.1 Aspectos básicos.** En la figura 38 se esquematiza un terreno idealmente conformado por  $n$  estratos paralelos a la superficie del suelo, donde cada uno de ellos posee un espesor  $E_i$  y una resistividad homogénea " $\rho_i$ ". Se asume que el último estrato tiene un espesor infinito. Considerando que el método de prospección geoelectrica consiste en inyectar una corriente en el terreno y medir diferencias de potencial sobre la superficie, es necesario poder determinar el potencial que se produce en un punto de la superficie del terreno cuando se inyecta en él una corriente puntual de magnitud  $I$ . Dependiendo de la configuración de electrodos utilizada, la diferencia de potencial medida se obtiene por superposición de los efectos de las distintas fuentes o electrodos de corriente. (Ortuondo, 1997).

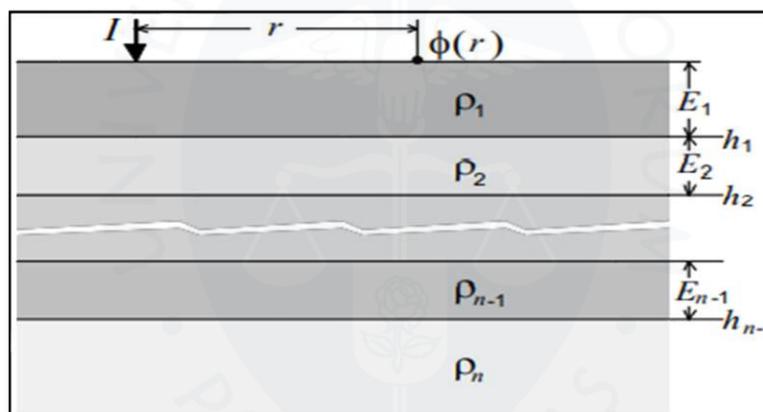


Figura 38. Estructura estratificada de un suelo.  
Fuente: Ortuondo (1997).

**2.8.2.2 Curvas de resistividad aparente y su obtención.** Los procedimientos numéricos y más cuantitativos se basan en básicamente en funciones características, entre las principales, la de Slitcher, King y Vanyan. Además, se emplean ciertos mecanismos de equivalencia como el de Zohdy, que permiten aproximar la estructura estratificada del terreno. En la práctica, el análisis de interpretación es sumamente necesario, ya que casi todos los suelos son multiestratificados.

El análisis de las capas o estratos carecería de sentido si existiera una sola capa en el suelo y de ser así, el valor medido por el equipo sería prácticamente el valor de resistividad real. (Orellana, 1972).

### 2.8.3 Interpretación mediante curvas patrón

**2.8.3.1 Clasificación de las curvas patrón.** El estudio de interpretación por curvas patrón data de 1933 cuando fueron publicadas 480 curvas por la *Compagnie Générale de Géophysique* mas no fueron publicadas hasta 1955. A partir de allí fueron publicándose las curvas de diversos autores como Kalenov (1957), Yakubosky y Liakhov (1964), Alpin (1966), Orellana y Mooney (1966), Flathe (1963), Mooney y Wetzel (1956), por citar a los más importantes. (Orellana, 1972).

Las curvas patrón para una estructura de tres capas de un terreno, se pueden resumir en los tipos H, A, Q, K tal y como muestra la figura 39. Cada tipo de curva se caracteriza por poseer un determinado comportamiento de las resistividades en cada capa.

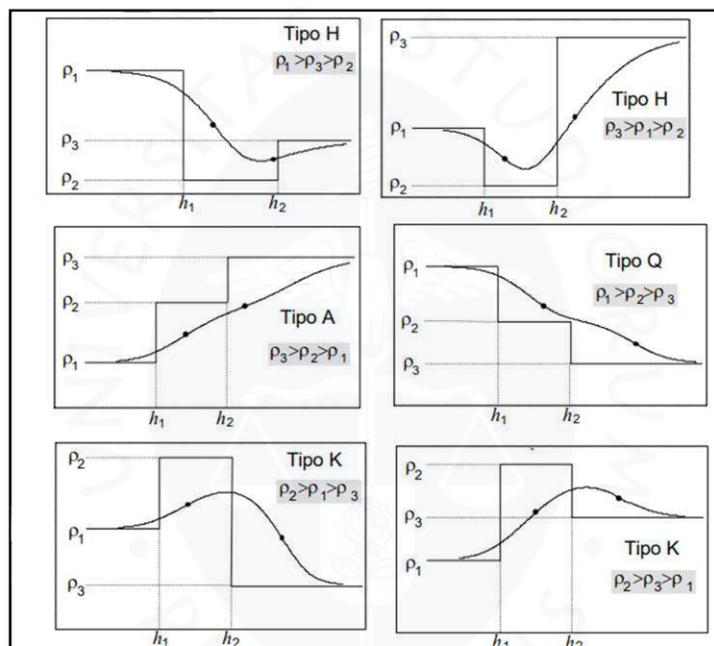


Figura 39. Tipos de curvas patrón.  
Fuente: Ortuondo (1997).

**2.8.3.2 Consideraciones generales en la interpretación.** La interpretación de una curva de campo puede tener más de una solución, es por lo que se puede tener un gráfico que puede tener una forma similar a una estructura de dos capas, pero que realmente, aunque no se conoce, la estructura puede estar formada por tres o más estratos. Esto es común en las conformaciones de tres estratos para las curvas tipo A y Q. Sin embargo, en la mayoría de los escenarios, una interpretación a dos capas y hasta tres, se adecua perfectamente sin sacrificar mucho en error. Es importante no descartar los signos que nos indiquen que la estructura esté formada por más de tres capas y analizarla como tal. (Ortuondo, 1997).

Los siguientes pasos de la interpretación gráfica, están descritos por Ortuondo (1997) y resume de manera concisa el proceso de interpretación de las curvas.

**2.8.3.3 Interpretación de medidas en suelo de dos capas.** Para un suelo de dos estratos, el procedimiento es el siguiente:

- Se trazan las curvas de resistividad aparente a partir de los datos obtenidos en las mediciones. Debe emplear un papel con escala logarítmica adecuada de igual dimensión o modulo que la curva patrón a utilizar.
- Se superponen las curvas, ya sea empleando papel transparente o usando una mesa con fondo luminoso.
- Se desliza la curva obtenida en campo hasta tener el calce más adecuado a la curva patrón. Los ejes de los gráficos deben de mantenerse paralelos, si es posible el calce de toda la curva, quiere decir que el terreno está formado por dos estratos.
- Se hace una marca del origen (1,1) en los ejes del papel donde está la curva patrón en la hoja de la curva de campo, como se aprecia en la figura 40.
- La abscisa y ordenada del punto antes marcado correspondería al espesor y resistividad de la capa 1.
- Se lee el valor de las relaciones de las resistividades  $\rho_2/\rho_1$  o el valor de K. En caso el parámetro de las curvas patrón es K, la resistividad de la capa dos se obtiene con la ecuación siguiente:

$$\rho_2 = \frac{1 + K}{1 - K} \rho_1 \quad (2.20)$$

- En caso de que la parte superior de la curva como en la figura 40, no calce perfectamente, se puede emplear una interpolación simple.

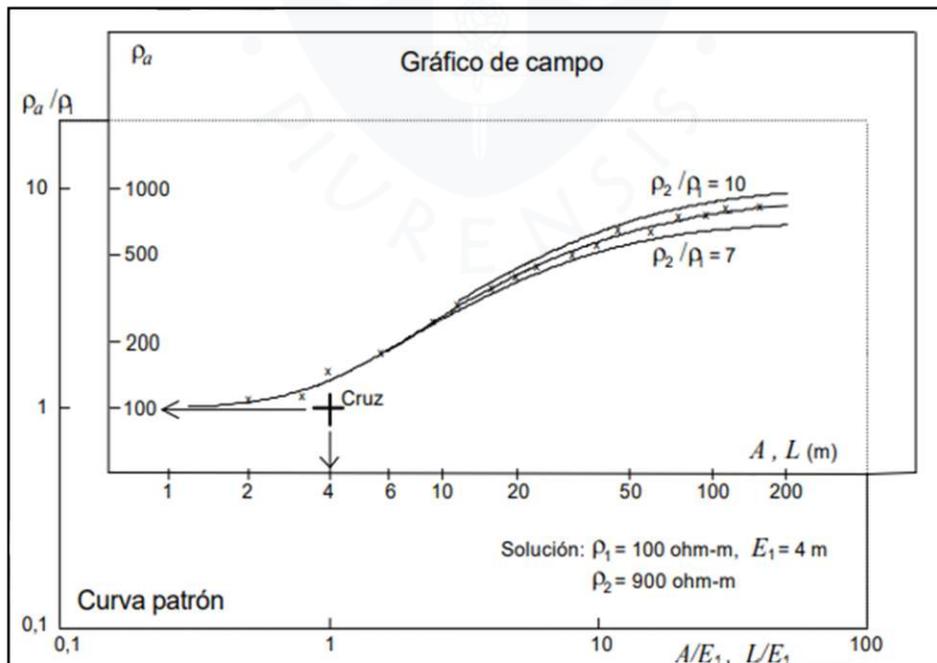


Figura 40. Procedimiento de interpretación para suelo de dos capas.  
 Fuente: Ortuondo (1997).

**2.8.3.4 Interpretación de medidas en suelo de tres capas.** Para un suelo de tres estratos, el procedimiento es el que sigue:

- Se determina por inspección el tipo de curva, H, K, A o Q.
- Se procede a realizar los pasos b y c descritos en 2.8.3.3.
- Se hace que ambos ejes tanto vertical como horizontal coincidan en ambos papeles y una vez allí, se marca el origen (1,1) o también llamado cruz de campo en el papel logarítmico.
- Se proyectan la cruz al eje horizontal y vertical, obteniéndose un espesor y una resistividad auxiliares respectivamente. Cada curva de tres capas posee 4 factores característicos y en su nombre es posible ver tres números “a-b-c” por ejemplo, la curva K-10 posee 1-5-0.65 y un valor “n” propio (para la curva K-10, el valor de n es 3).
- Finalmente, los valores a, b y c son los factores multiplicativos de la resistividad auxiliar 1, 2 y 3 respectivamente. Luego, el espesor de la capa uno es igual al valor del espesor auxiliar, el espesor de la capa dos es “n” multiplicado por el espesor auxiliar y por último el espesor tres, es infinito.

En la figura 41, se puede observar un resumen del proceso de interpretación para tres capas mostrado de una manera gráfica.

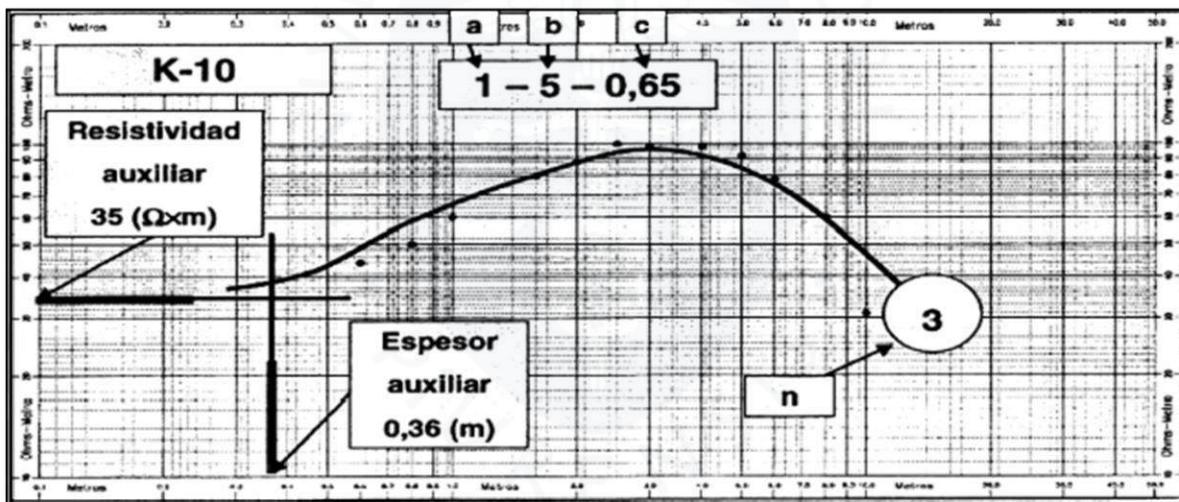


Figura 41. Interpretación para suelo de tres capas.

Fuente: Henriquez Santana (2010).

**2.8.3.5 Interpretación de medidas en suelo de n capas.** El proceso de interpretación de hasta 4 capas, se puede seguir siguiendo un procedimiento similar al de tres capas, sin embargo, en este escenario es importante notar que, en lugar de 4 valores característicos del caso de tres capas, se tendrían 6 valores característicos. Cuatro valores para encontrar resistividades y dos valores para relacionar espesores.

En caso la estructura equivalente requiriese una mayor cantidad de capas, es más recomendable el uso de un método del tipo cuantitativo- numérico o el uso de un software auxiliar.

#### **2.8.4 Métodos cuantitativos de interpretación**

Consiste en evaluar la profundidad, espesor, resistividad y polarización verdaderos para cada estrato interpretando mediante la técnica del filtrado, desarrollada principalmente por D. Gosh (1971), y O. Koefoed (1979).

Un corte geoeléctrico está compuesto por pares formados de espesor y resistividades características o verdaderas; tantos pares como estratos; la última capa, solamente se representa por su resistividad característica; la profundidad se extiende más allá de la apertura de electrodos máxima que puede ser "AB/2" o "nx", ya que en este intervalo no hubo un contraste de resistividades o polarización que marque el espesor.

Axel Zodhy, entre 1974 y 1975, hizo la optimización de la interpretación de los sondeos formulando el proceso, que involucra dos pasos para cada espaciamento de electrodos AB/2, nx, etc. Luego de ello, se convolucionan la función Kernel obtenida con el filtro de Gosh. (Manilla Aceves, 2003).

Una mayor información acerca de los métodos de Koefoed, y sobre los métodos cuantitativos de interpretación se puede encontrar en (Orellana, 1972).

#### **2.9 Normativa aplicada a la medición de la resistividad del terreno**

Además de las normativas mencionadas en el marco teórico del capítulo uno, hay algunas normativas que tratan más explícitamente sobre la medición y los métodos de interpretar las mediciones. Se puede mencionar a las siguientes:

- *AIEE 81 Measuring Ground Resistance and Potential Gradients in the Earth (1962).*
- *ANSI C2 National Electric Safety Code (NESC) (2000).*
- *ANSI/IEEE 81 Guide for Measuring Earth Resistivity, Ground Impedance (1983).*
- *ASTM G57 Standard Test Method for Measurement Soil Resistivity (1995).*
- *IEC 60479-1 Effects of current on human beings. Part 1 General Aspects (2005).*
- *IEC 61557-1/9 Electrical Safety in low Voltage Distribution Systems up to 1000 V AC (Alternating current) and 1500 V DC (Direct Current) Equipment for Testing, Measuring of Protective Measures.*
- *NFPA 70 National Electrical Code (NEC) (2008).*



## **Capítulo 3**

### **Comparativa de métodos de medición de la resistividad del terreno**

#### **3.1 Introducción**

El estudio de la resistividad del terreno y su medición posee muchos tipos de métodos descritos en el capítulo anterior tanto para medir como para analizar los resultados. Es por este motivo, que la existencia del presente capítulo, es esencial para aclarar y justificar, los métodos empleados en el estudio de campo. Se abarca el estudio comparativo de los métodos de medición de resistividad del terreno, así como los métodos relativos al análisis posterior a la toma de mediciones o, en otras palabras, los llamados métodos de interpretación de la resistividad, todo ello dentro de un análisis sintético y conciso.

Al terminar las comparaciones basadas en ventajas y desventajas de cada método, así como aplicaciones particulares sobre dónde se prefiere el uso de uno sobre otro, se realizará la elección y justificación de los métodos a utilizar en la parte práctica, tanto para medir como para interpretar. Se presentará información sobre el equipo utilizado en las mediciones, su modo de uso y otras características esenciales. Una vez elegido el método de interpretación de las medidas, se presentará un software para el uso en el análisis posterior interpretativo de la resistividad aparente con su respectiva guía rápida de uso y aplicación práctica.

#### **3.2 Síntesis de los métodos de medición de la resistividad del terreno**

Cada método anteriormente visto, presenta ventajas y desventajas, y unos puede ser más efectivos que otros en aplicaciones específicas. Si bien la mayoría de los métodos de medición de resistividad se encuentran vigentes hoy en día, hay algunos más empleados cuando de sistemas de puesta a tierra se refiere.

En el esquema de la figura 42, se muestra cómo se distribuyen las variedades de los métodos de medición de la resistividad en un terreno.

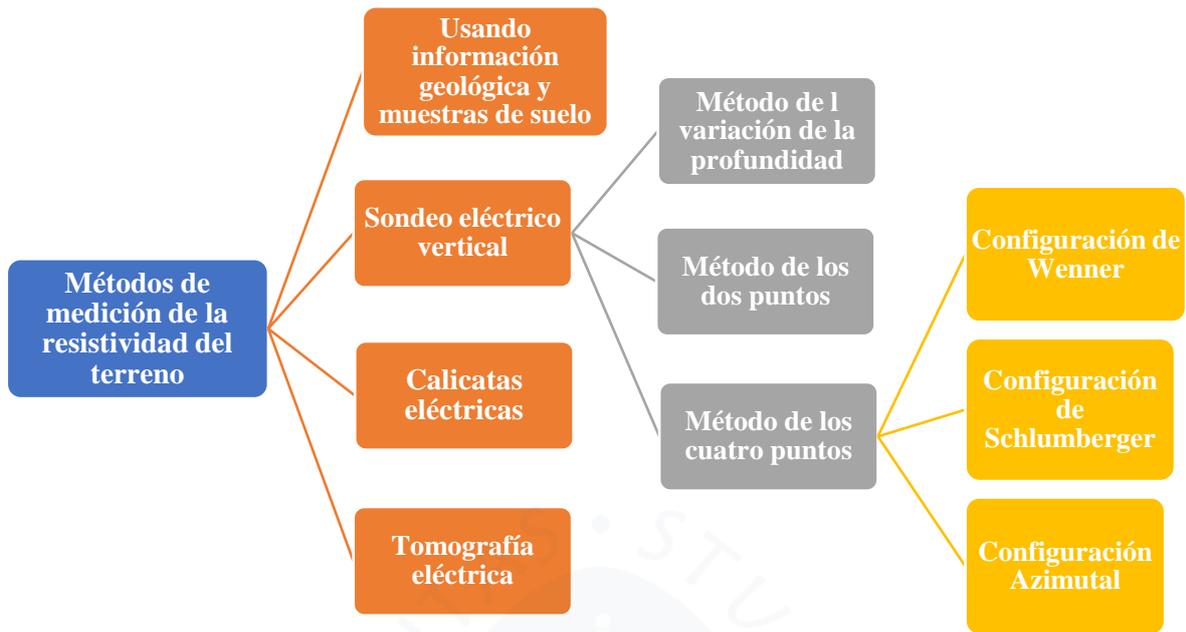


Figura 42. Esquema de resumen gráfico sobre los métodos de medición de resistividad del terreno.

Fuente: Elaboración propia.

En la tabla 7, se presenta una síntesis breve de cada método y configuración al momento de realizar las mediciones, abarcando una corta descripción con sus principales ventajas y desventajas.

Tabla 7. Síntesis de los métodos de medición de la resistividad

Método	Síntesis genérica	Ventajas	Desventajas	Ejemplos de aplicación
Usando información geológica y muestras de suelo.	Aprovecha los estudios de suelo, cuando se realizan trabajos extensos de ingeniería civil. Consiste en extraer una muestra de suelo y medir la resistividad conectando electrodos en las caras opuestas del material.	Los estudios de suelos realizados por ingenieros civiles acerca de la composición del suelo, puede ser complementarios a la medida de resistividad de la muestra y dar una mejor idea de las capas del terreno.	Debido a que la resistividad varía de acuerdo con una amplia variedad de factores como humedad, temperatura y compactación por nombrar algunas de ellas, la muestra a analizar muchas veces no cumple las mismas condiciones iniciales que cuando fue extraída. Esto puede generar errores en la medición.	No posee una aplicación como tal, en la medida de la resistividad de un terreno, sin embargo, puede proveer gran información acerca de la composición geológica del mismo.

<p>Sondeo eléctrico vertical: Método de la variación de la profundidad</p>	<p>También llamado método de los tres puntos.</p> <p>Consiste en realizar una serie de medidas cambiando la profundidad del electrodo (generalmente de tipo varilla) y evaluar como varia su resistencia, en cada prueba.</p>	<p>El valor de la resistencia de una varilla es de fácil cálculo y debido a ello se prefiere su uso.</p> <p>La inserción de una varilla en el terreno es una operación fácil de realizar.</p>	<p>Es ineficiente cuando se desea evaluar un volumen grande de terreno, ya que la profundidad máxima de estudio en este método suelo ser de 5 a 10 veces la longitud de la varilla.</p>	<p>Estudio de resistividad en una porción pequeña de suelo y cuando no se requiere profundidades grandes.</p>
<p>Sondeo eléctrico vertical: Método de los dos puntos</p>	<p>Usado con dos tamaños distintos de electrodo unidos por una varilla aislante. El terminal positivo de una batería se conecta a un miliamperímetro y el negativo al otro electrodo.</p>	<p>Aparato de funcionamiento sencillo, portátil y rápido al medir pequeños volúmenes de suelo.</p>	<p>El aparato empleado, al poseer electrodos de hierro, es más susceptible a la corrosión.</p> <p>No se recomienda cuando el volumen de suelo a medir es considerable.</p>	<p>Uso en las paredes o en el fondo de excavaciones.</p>
<p>Sondeo eléctrico vertical: Método de los cuatro puntos (Configuración de Wenner)</p>	<p>Consiste en inyectar corriente por un par de electrodos y medir el potencial entre otros dos como consecuencia del paso de corriente en el terreno. En esta configuración, los electrodos se encuentran igualmente espaciados.</p>	<p>Exactitud de cálculo.</p> <p>La mayoría de los equipos modernos, traen la fórmula precargada, por lo que, según el aparato a usar, se puede obtener la resistividad aparente tan sólo colocando la distancia de separación de los electrodos.</p>	<p>Todos los electrodos clavados, deben moverse en cada medición, por lo que puede resultar en una demora en comparación a la configuración de Schlumberger cuando se requieren varias mediciones.</p>	<p>Estudios de resistividad de suelo tanto en distancias cortas como largas. Es el principio básico empleado en las tomografías eléctricas resistivas.</p>

<p>Sondeo eléctrico vertical: Método de los cuatro puntos (Configuración de Schlumberger)</p>	<p>En esta configuración, la inyección de corriente y medida de potencial funciona igual que en Wenner, pero la disposición de las distancias entre electrodos ya no es igual.</p>	<p>Debido a que los electrodos del centro quedan fijos, cuando se realizan varias mediciones, puede generar un ahorro de tiempo.</p>	<p>Los equipos que funcionan con esta configuración requieren de una mayor sensibilidad.</p>	<p>Es más usada cuando se aprecia en el terreno, variaciones laterales importantes, ya que es menos susceptible a las mismas, al no desplazar los electrodos de potencial.</p>
<p>Sondeo eléctrico vertical: Método de los cuatro puntos (Configuración azimutal)</p>	<p>Esta configuración posee una distribución trapezoidal de los electrodos.</p>	<p>Funciona bien en distancias muy largas, pero con aplicaciones más relacionadas a la geología.</p>	<p>Se encuentran pocas versiones en la literatura técnica, acerca de curvas patrón para esta configuración.</p>	<p>Empleado en prospecciones geofísicas de grandes extensiones de terreno, mas no es común en aplicaciones de sistemas de puesta a tierra.</p>
<p>Calicatas eléctricas</p>	<p>También llamado perfil eléctrico, emplea varios electrodos ubicados en líneas paralelas, lo que permite encontrar con facilidad variaciones laterales de terreno.</p>	<p>Es empleado en suelos donde la estratificación es muy variada, ya sea de capas u obstáculos enterrados. Es recomendado como un complemento al sondeo eléctrico vertical.</p>	<p>Requiere una gran cantidad de electrodos y un equipo capaz de realizar mediciones constantes cada cierto periodo de tiempo.</p>	<p>Se emplea en la ubicación de edificios enterrados y en la arqueología. Sirve también en geología, para detectar fallas geológicas. (Ortuondo, 1997).</p>
<p>Tomografía eléctrica resistiva</p>	<p>Usada en distancias que pueden medir kilómetros, crea un perfil en 2D o 3D del terreno, con diferentes colores, cada uno de los cuales supone un valor de resistividad.</p>	<p>Los resultados se muestran en forma gráfica, muy fácil de interpretar, resaltando muy bien las áreas con mayor (aplicaciones petroleras) y menor (aplicaciones acuíferas) resistividad.</p>	<p>Es costoso en términos del equipo, ya que requiere una cantidad grande de varillas (mayor a 100) y debe ser capaz de realizar mediciones coordinadas entre cierto grupo de electrodos. Normalmente en grupos de cuatro.</p>	<p>Es ideal en exploración de cúmulos de petróleo o gas o acuíferos subterráneos. Es empleada también en el riego tecnificado para verificar la distribución de la humedad en el suelo.</p>

Fuente: Elaboración propia.

### 3.3 Síntesis de los métodos de interpretación de la resistividad del terreno

Dada la variedad de métodos de interpretación, la figura 43 muestra una síntesis de los métodos tratados en el capítulo 2, con su principal cualidad.

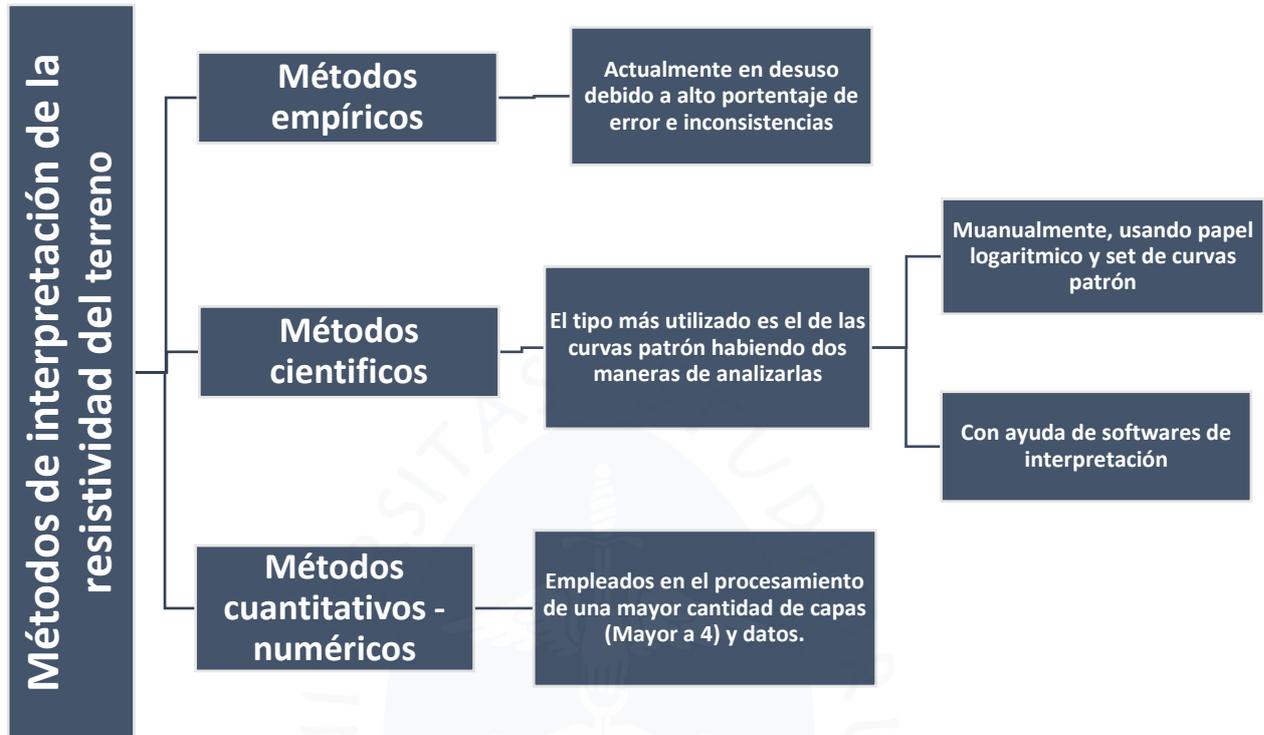


Figura 43. Esquema sintético sobre los métodos de interpretación de los resultados.

Fuente: Elaboración propia.

### 3.4 Elección y justificación de los métodos a ensayar

Antes de justificar el método a emplear, es conveniente mencionar dos maneras de usar las curvas patrón para encontrar la resistividad y espesor de las capas en un terreno.

Como se revisó en las secciones anteriores, las curvas patrón, es uno de los métodos de interpretación más usados desde que fueron postuladas por Orellana y Mooney (1966), así como otros autores posteriores como Keller y Frischknecht (1966), Bhattacharya Y Patra (1968), entre otros. Luego de obtener la gráfica simple de resistividad aparente versus distancia/profundidad de exploración, dichas resistividades no sirven como tal en el diseño de los sistemas de puestas a tierra. Es por lo que se debe realizar un análisis posterior, para obtener la resistividad aproximada real con el espesor de cada capa de la que el suelo en estudio estaría compuesto.

#### 3.4.1 Manera tradicional de aplicar la comparación de las curvas patrón

Para que el suelo se encuentre completamente definido, se debe conocer el espesor y resistividad de cada capa. A ese tipo de especificación, se le conoce con el nombre de corte

geoelectrico. Un corte geoelectrico compuesto por "n" capas, requiere para su especificación el conocimiento de "n" resistividades y "n-1" espesores, ya que siempre se supone la última capa, también llamada sustrato, de espesor infinito. Todo el análisis, supondría un total de "2n-1" parámetros. (Orellana, 1972).

La manera tradicional de analizar las curvas patrón o curvas SEV (curvas de sondeo eléctrico vertical), consistía en la impresión de todas las curvas a escala, y el uso de papel milimétrico a escala logarítmica donde se colocaban los puntos de la curva de resistividad aparente versus la distancia o profundidad de exploración. Luego se comparaban las curvas unas sobre otras hasta encontrar la que se adecue mejor.

Dada la cantidad de curvas SEV que existen, es un procedimiento bastante tedioso incluso cuando se realiza con plantillas de Microsoft Excel. En este caso, resulta más sencillo un software con las curvas precargadas y con la posibilidad de un ingreso de datos más rápido y eficiente como se verá en la siguiente sección.

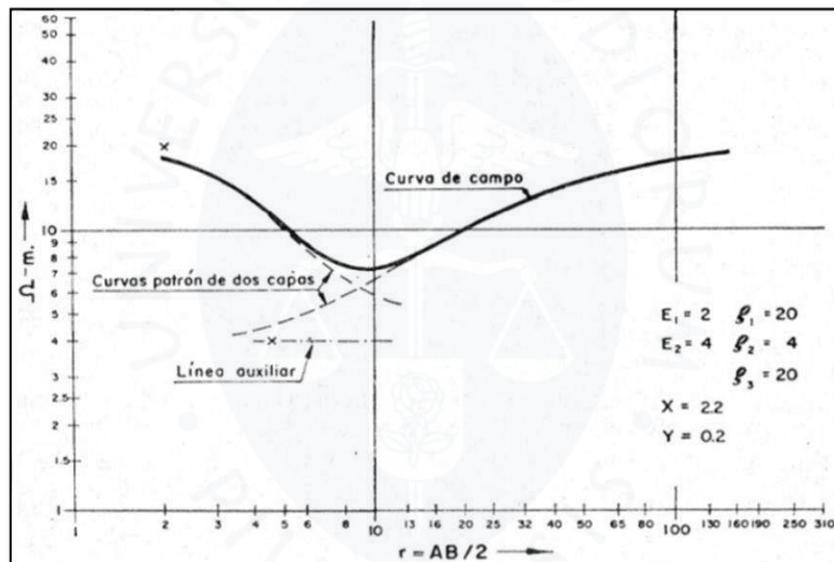


Figura 44. Ejemplo de ajuste de curvas tipos H o A siguiendo el método de Orellana.

Fuente: Orellana (1972).

### 3.4.2 Uso de software para el procesamiento comparativo de curvas patrón

Dado que el proceso comparativo de las curvas patrón es bastante tedioso debido a la gran cantidad de curvas patrón existentes, en el año 2000, se publicó la primera versión del software "IPI2Win" como parte de diversas investigaciones en geofísica, de la Universidad Estatal de Moscú, Facultad de Geología, Departamento de Geofísica.

El software cuenta con una licencia de uso libre, para que sea empleada por cualquier persona o institución de la comunidad académica. La última versión publicada del software es la versión 3.0.1, dada a conocer al público en el año 2003 en la página web oficial del

Departamento de Geofísica de la antes mencionada Universidad (<http://geophys.geol.msu.ru/ipi2win.htm>).

Entre las grandes ventajas del software, se encuentran: su capacidad comparativa instantánea entre cientos de curvas patrón, permite usar una amplia gama de configuraciones, desde las más comunes como Wenner o Schlumberger, hasta las de uso en aplicaciones de geofísica como dipolo - dipolo.

Luego de adaptada la curva, el software permite visualizar la curva original patrón con la curva del propio usuario. Además de mostrar el espesor de cada capa y la resistividad de cada una éstas, el software entrega el porcentaje de error del proceso comparativo. Esto, es de gran utilidad cuando se aplicarán las medidas correctivas en el diseño y planeamiento de los sistemas de puesta a tierra.

En comparación con la manera manual o tradicional de comparar las curvas, el uso del software permite un gran ahorro de tiempo en el análisis posterior de la resistividad aparente. Mientras el proceso tradicional de comparación es al tanteo, ya que en un archivo Excel, se precargan las curvas y luego mediante macros, el usuario coloca al tanteo valores de resistividad hasta llegar a una aproximación adecuada entre las curvas. Este proceso que es del tipo ingeniería inversa es bastante ingenioso, mas no permite obtener un calce tan adecuado de las curvas, ni tampoco permite mostrar o saber el porcentaje de error.

Al ser un software de tipo libre, la instalación no requiere de ningún tipo de clave o paso adicional para ser usado. Simplemente se debe de ejecutar el instalador y esperar a que el programa se instale. En la figura 45, se muestra la ventana inicial que aparece al iniciar el software. Como se puede apreciar, el software está disponible en español.

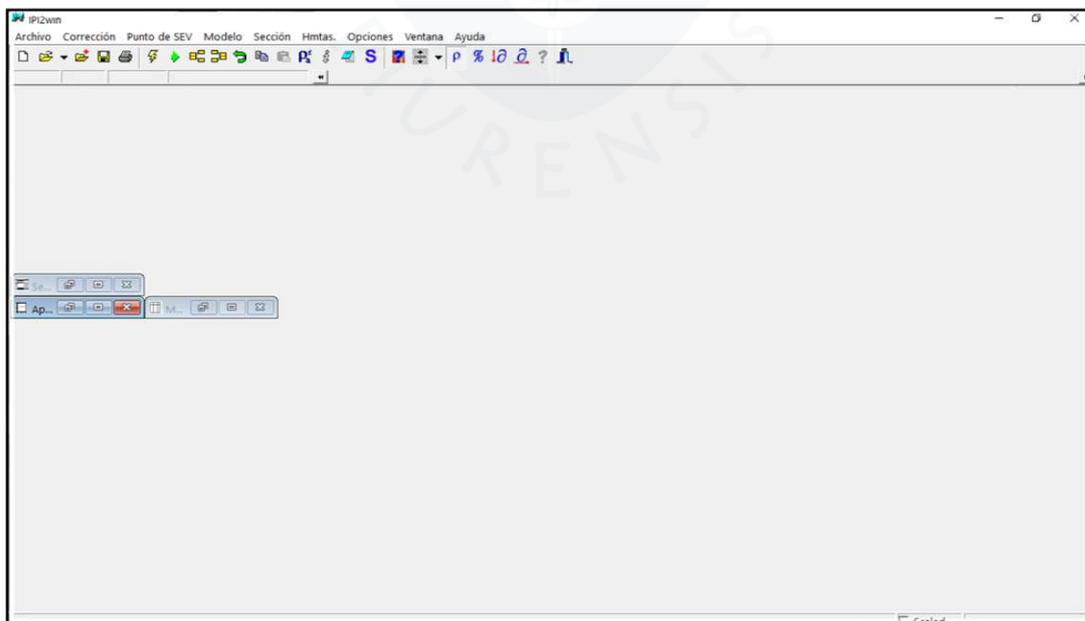


Figura 45. Vista inicial cuando se ejecuta el software.

Fuente: Elaboración propia.

Con fines complementarios a entender el funcionamiento del software, las siguientes ilustraciones se han realizado usando datos ficticios meramente ilustrativos.

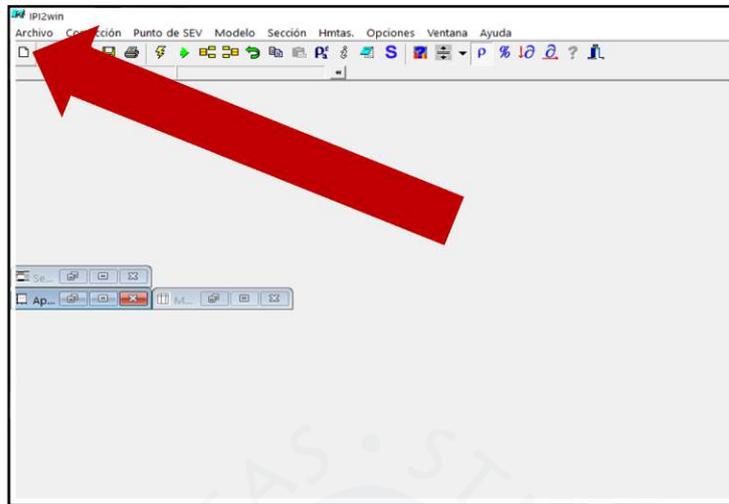


Figura 46. Creación de nuevo archivo.  
Fuente: Elaboración propia.

Se crea un nuevo archivo dando clic en el icono de la esquina superior izquierda, tal y como se señala en la figura 46. A continuación, se abre una ventana como la que aparece en la figura 47 y en el recuadro de las configuraciones a realizar, se escoge Wenner Alpha. La diferencia entre Wenner alfa y beta reside en la disposición de los electrodos de potencial y corriente. En la mayoría de los casos la variante más utilizada es la alfa.

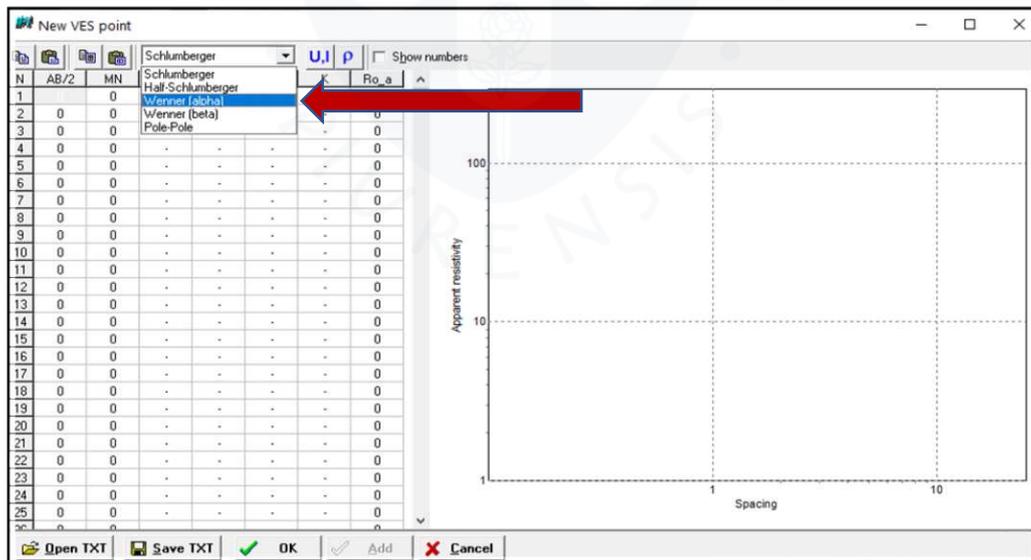


Figura 47. Elección de configuración de los electrodos.  
Fuente: Elaboración propia.

Una vez aquí, se procede a rellenar las celdas con los respectivos valores de “a” y “RO\_a” siendo esta ultima la resistividad aparente medida por cualquier dispositivo empleado.

En este caso se han rellenado valores aleatorios de resistividad tal y como se aprecia en la figura 48 solamente para fines ilustrativos.

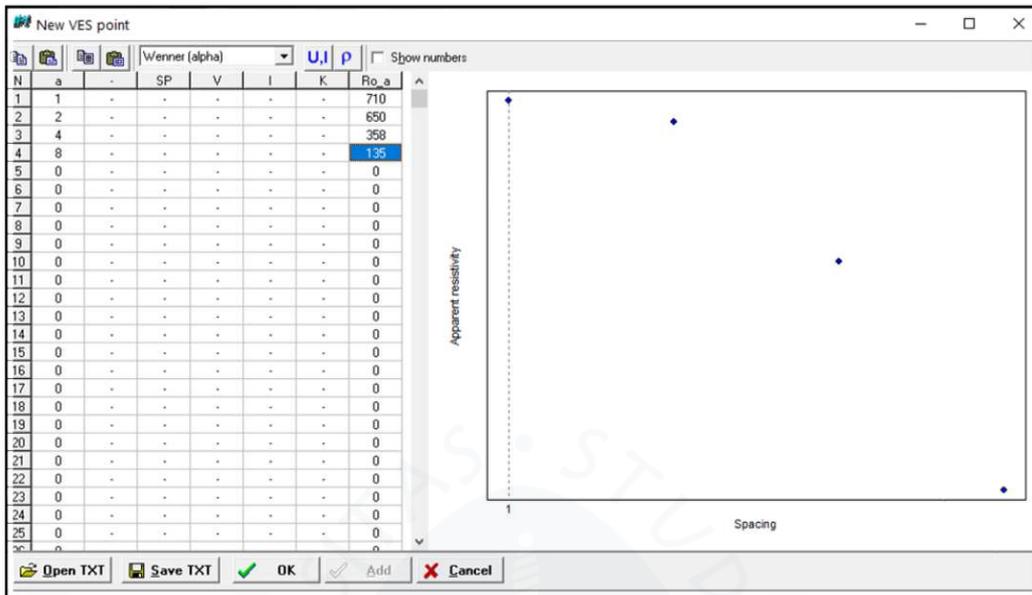


Figura 48. Entrada de valores de prueba.  
Fuente: Elaboración propia.

El archivo se debe guardar con el nombre genérico que el programa propone y sin cambiar ninguna letra, con esto se evita cualquier tipo de error en la ejecución. Luego se hace clic en guardar y posterior a ello, clic en “OK” tal como la figura 49 muestra.

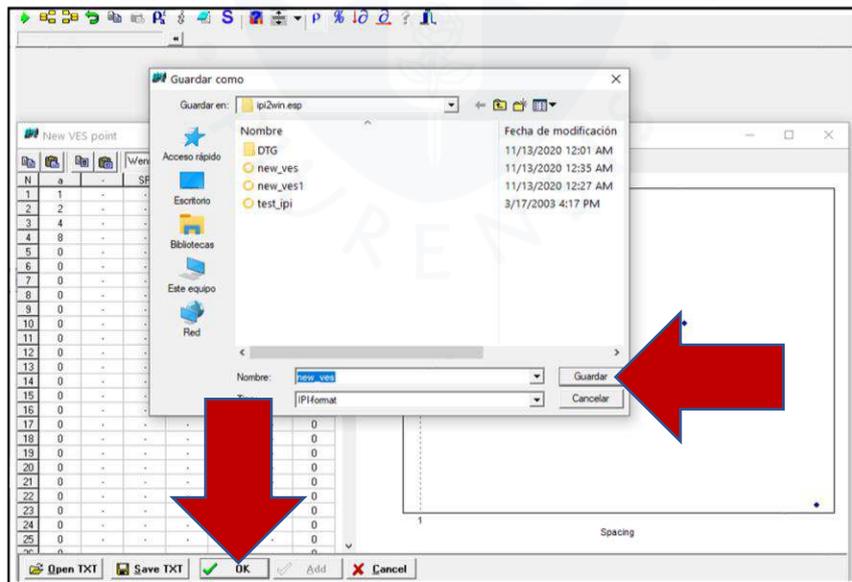


Figura 49. Guardado del archivo para la simulación.  
Fuente: Elaboración propia.

La figura 50, muestra el resultado de la ejecución, en la segunda ventana del lado derecho, se puede observar que el error es de 61.4%, para corregir dicho error muy alto, se

debe dirigir al icono del rayo que se muestra en la figura 51. La línea color negro, representa los valores medidos manualmente por el dispositivo empleado, mientras tanto, la línea color rojo, representa parte de la curva SEV más cercana o aproximada.

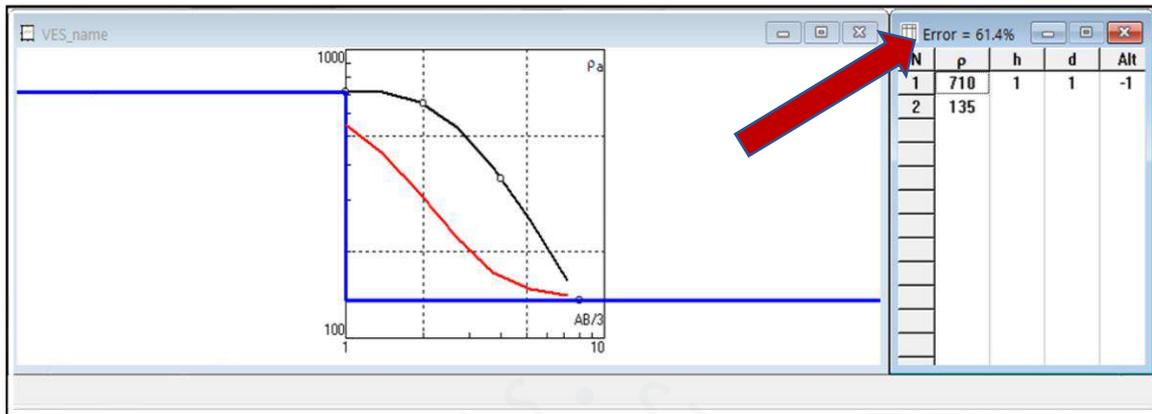


Figura 50. Simulación sin aplicar la autocorrección.

Fuente: Elaboración propia.

El software luego de presionado el botón de ajuste automático del paso anterior (el icono del rayo), realiza una nueva iteración y entrega los nuevos valores ya ajustados. Ahora como se aprecia en la figura 51, las líneas color rojo y negro son prácticamente coincidentes y el error que se muestra en el recuadro derecho de la imagen es solamente del 1.8%.

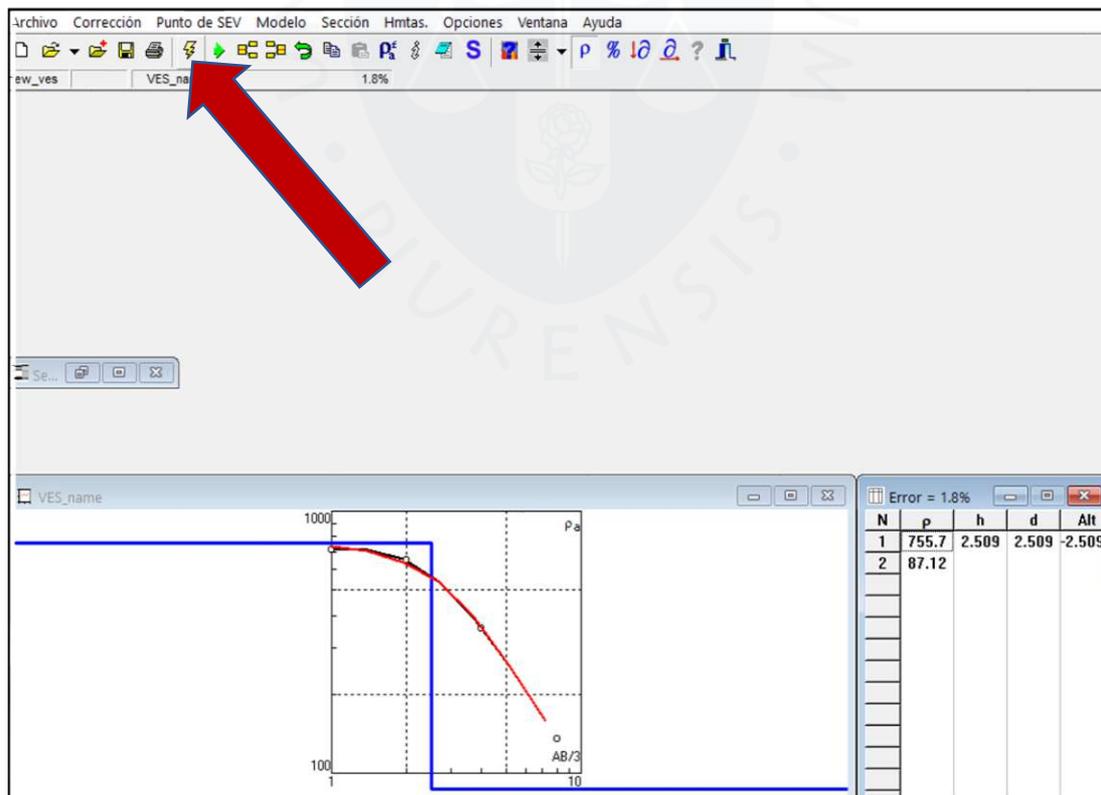
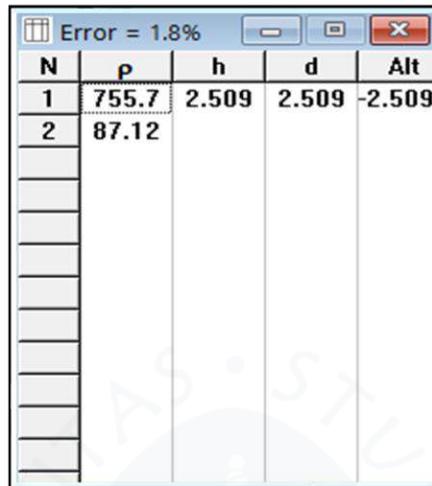


Figura 51. Resultado aplicando una autocorrección.

Fuente: Elaboración propia.

La figura 52, que es un acercamiento al recuadro de los resultados, muestra además del error, la resistividad y espesor de cada capa. En este caso, la estratificación se ha aproximado a una estructura formada por dos capas, siendo el espesor de la última capa infinito.



N	$\rho$	h	d	Alt
1	755.7	2.509	2.509	-2.509
2	87.12			

Figura 52. Cuadro de resultados.  
Fuente: Elaboración propia.

### 3.4.3 Elección y justificación

Para las aplicaciones en el presente trabajo, se empleará la configuración de Wenner en las mediciones, ya que es un tipo de medición robusta, común a muchos equipos de medición (entre ellos el equipo a utilizar en campo). El método de Wenner es el elegido, puesto que es uno de los métodos más comunes, del que se posee una buena cantidad de curvas patrón e información en general, ayudando a realizar una óptima medición.

Acercado del modo de interpretación de los resultados, se va a usar el método de interpretación por curvas patrón asistido por el software del que se ha hablado en la sección anterior y del que ya se ha comentado todas las ventajas que puede ofrecer al interpretar y comparar las curvas patrón.

### 3.5 Elección y especificación de los equipos a utilizar

El telurómetro empleado en las mediciones pertenece al laboratorio de electrotecnia del Departamento de Ingeniería Mecánica – Eléctrica de la Universidad de Piura. Se eligió este equipo, por su alta portabilidad y amplio rango de medición de resistividades. El equipo cuenta con 4 jabalinas compuestas por un alma de acero y recubiertas en cobre, una batería interna de litio, fuente de alimentación, cable de datos tipo USB, carretes de cables de distinta longitud (dos carretes de 5 metros, dos de 20 metros y uno de 40 metros), y una bolsa para su transporte. La elección del equipo se basó en su alta portabilidad, amplio rango de medición

de resistividades, fácil operación, disponibilidad, batería de larga duración y buena precisión en las medidas.

### **3.5.1 Descripción**

El equipo empleado se puede apreciar en la figura 53 y es el modelo EM-4058 de marca Megabras Ind. Electrónica Ltda. Es un instrumento digital controlado por microprocesador que sirve para obtener la resistencia de puesta a tierra y la resistividad del terreno, empleando la configuración de Wenner. Es capaz de medir SPT en subestaciones, industrias, redes de distribución de energía, etc. Funciona acorde con la IEC 61557-5. Para la optimización de proyectos de SPT, es capaz de medir la resistividad del terreno.

Funciona con 5 frecuencias para generar la corriente de ensayo (270 Hz, 570 Hz, 870 Hz, 1170 Hz o 1470 Hz). De manera general, la frecuencia más baja sirve para analizar corriente de falla de naturaleza industrial, mientras que la frecuencia más alta, es empleada en mecanismos de defensa contra descargas atmosféricas, como son los sistemas de pararrayos. La medición de la resistividad se da de manera estándar a una frecuencia de 270 Hz. El EM-4058 posee la función SCAN que ejecuta un barrido de medición de resistencia del suelo utilizando las cinco frecuencias y exhibe el promedio simple obtenido, además de los resultados para cada frecuencia. (Megabras Ind. Electrónica Ltda., 2020).



Figura 53. Equipo empleado en las mediciones en campo. Megabras EM-4058. Fuente: Megabras Ind. Electrónica Ltda. (2020).

### 3.5.2 Especificaciones técnicas

La siguiente información ha sido extraída del manual del fabricante. En la lista siguiente, se muestra cada característica con su respectiva especificación.

- Frecuencias de operación
  - 270 Hz (medición de resistencia o resistividad) 570 Hz, 870 Hz, 1170 Hz o 1.470 Hz (medición de resistencia). Con error máx. De  $\pm 1$  Hz en ambos casos.
- Voltímetro
  - En la función voltímetro el equipo opera como un voltímetro convencional de corriente alternada, haciendo posible la medición de tensiones espurias provocadas por corrientes parásitas.
- Rangos de medición
  - Resistencia: 0-20  $\Omega$ ; 0-200  $\Omega$ ; 0-2000  $\Omega$  y 0-20 k $\Omega$  (auto rango).
  - Resistividad: 0-50 k $\Omega$ ·m (auto rango)
  - El instrumento encuentra automáticamente el mejor rango para la medición seleccionada.
  - Tensión: 0-60 V $\sim$
- Exactitud
  - Medición de resistencia y resistividad:  $r \leq 2$  k $\Omega$ :  $\pm$  (2% del valor medido  $\pm$  2 dígitos)  $r > 2$  k $\Omega$ :  $\pm$  (5% del valor medido  $\pm$  2 dígitos)
  - Medición de tensión:  $\pm$  (3% del valor medido  $\pm$  2 dígitos)
- Resolución de lectura
  - 0,01  $\Omega$  en la medición de resistencia
  - 0,01  $\Omega$ ·m en la medición de resistividad
  - 0,1 V $\sim$  en la medición de tensión
- Corriente de salida
  - La corriente de cortocircuito está limitada a menos que 20 mA rms
- Máxima tensión en abierto
  - 50 V
- Inmunidad respecto a la interferencia de tensiones espurias
  - En la medición de la resistencia R admite la presencia de tensiones espurias provocadas por corrientes parásitas con error inferior a 10% para tensiones inferiores a 7 V $\sim$  para  $0 < R < 20$  k $\Omega$ .
- Resistencias de tierra de las jabalinas auxiliares
  - En la medición de r admite  $R_{aux} = 100R$  hasta  $R_{aux} \leq 50$  k $\Omega$  con error  $< 30\%$ .
- Funciones avanzadas
  - Detecta automáticamente anomalías que impiden efectuar la medición con errores tolerables (alto ruido de interferencia, resistencias de electrodos auxiliares muy altas, etc.).

- Cálculo de resistividad del terreno
  - Durante la medición de resistividad, permite que el operador pueda introducir la distancia entre las jabalinas auxiliares al EM-4058 para mostrar la pantalla directamente el valor de resistividad expresado en  $\Omega \cdot m$ .
- Salida de datos
  - USB.
- Impresora incorporada
  - Permite imprimir los resultados para ser registrados como documento.
- Alimentación
  - Batería recargable interna lfp (LiFePo4 12 v - 3000 mAh)
- Cargador de batería
  - Fuente de alimentación de 12 V - 2,0 A
- Seguridad
  - De acuerdo con IEC 61010-1.
- Compatibilidad electromagnética (E.M.C.)
  - De acuerdo con IEC 61326-1.
- Inmunidad electrostática
  - De acuerdo con IEC 61000-4-2.
- Inmunidad contra radiación electromagnética
  - De acuerdo con IEC 61000-4-3.
- Clase de protección ambiental
  - Ip54 con gabinete cerrado.
- Temperatura de operación
  - $-10^{\circ}c$  a  $50^{\circ}c$ .
- Temperatura de almacenamiento
  - $-25^{\circ}c$  a  $65^{\circ}c$ .
- Humedad relativa ambiente
  - 95% hr (sin condensación).
- Peso del equipo
  - Aprox. 3 kg.
- Dimensiones
  - 274 x 250 x 124 mm. (Megabras Ind. Eletrônica Ltda., 2015)

### **3.5.3 Panel de control**

Todos los botones, teclas, bornes y conexiones en el equipo son de fácil uso y están a la vista y alcance del operador. En las siguientes figuras, tomadas del manual del fabricante Megabras, se explica el uso y las partes del dispositivo.

**3.5.3.1 Partes del panel de control.** En la figura 54, se muestra una vista de planta con las partes del panel de control, extraída del manual del fabricante.

Donde:

1. Borne E
2. Borne ES
3. Borne S
4. Borne H
5. Pantalla alfanumérica
6. Teclado
7. Puerto de comunicación USB
8. Entrada de alimentación
9. Impresora
10. Tecla de encendido y apagado

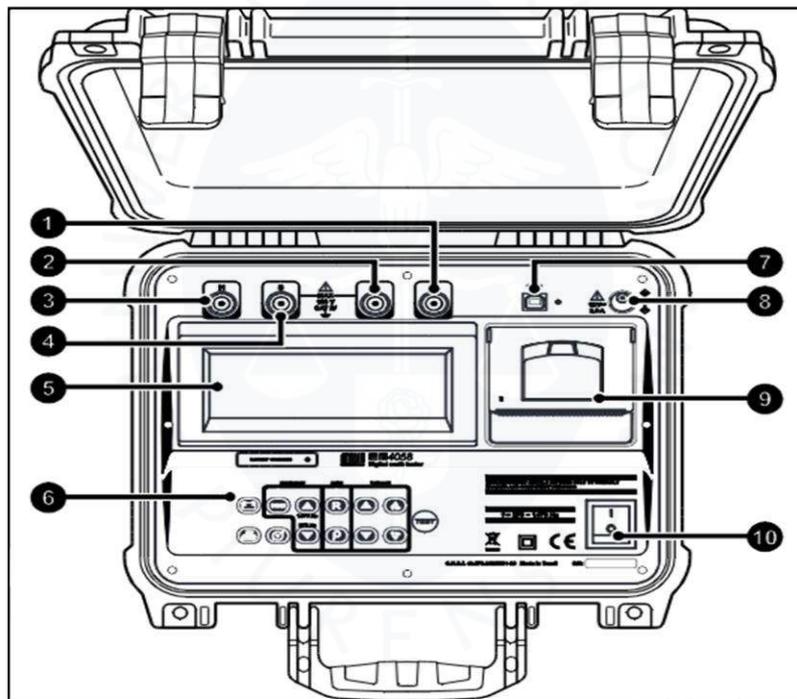


Figura 54. Vista de planta enfocando el panel de control del equipo.  
Fuente: Megabras Ind. Eletrônica Ltda. (2015).

**3.5.3.2 Teclado.** Para la fácil operación, el equipo posee un teclado con símbolos bastantes intuitivos. En la figura 55, se señala cada símbolo con un número, cuya lista de significados se encuentra en la parte inferior. Es importante conocer el significado de cada símbolo para una correcta operación del equipo.

Donde:

1. Muestra el estado de la batería en la pantalla.
2. Botón de encendido y apagado.

3. Botón para imprimir
4. Función de voltímetro
5. Función para escanear
6. Función para comenzar la prueba
7. Aumentar la frecuencia
8. Disminuir la frecuencia
9. Modo resistencia
10. Modo resistividad
11. Aumenta la distancia entre electrodos en valores fijos de 1, 2, 4, 8, 16 y 32 metros.
12. Disminuye la distancia entre electrodos 1, 2, 4, 8, 16 y 32 metros.
13. Aumenta la distancia entre electrodos en un metro
14. Disminuye la distancia entre electrodos en un metro

Los botones 11 y 12, son usados también para acceder al modo Rx, en el cual se tiene una resistencia patrón y sirve para calibrar el dispositivo. Normalmente y dependiendo del uso, las calibraciones se dan en intervalos de 6 y 12 meses, es decir una o dos veces por año.

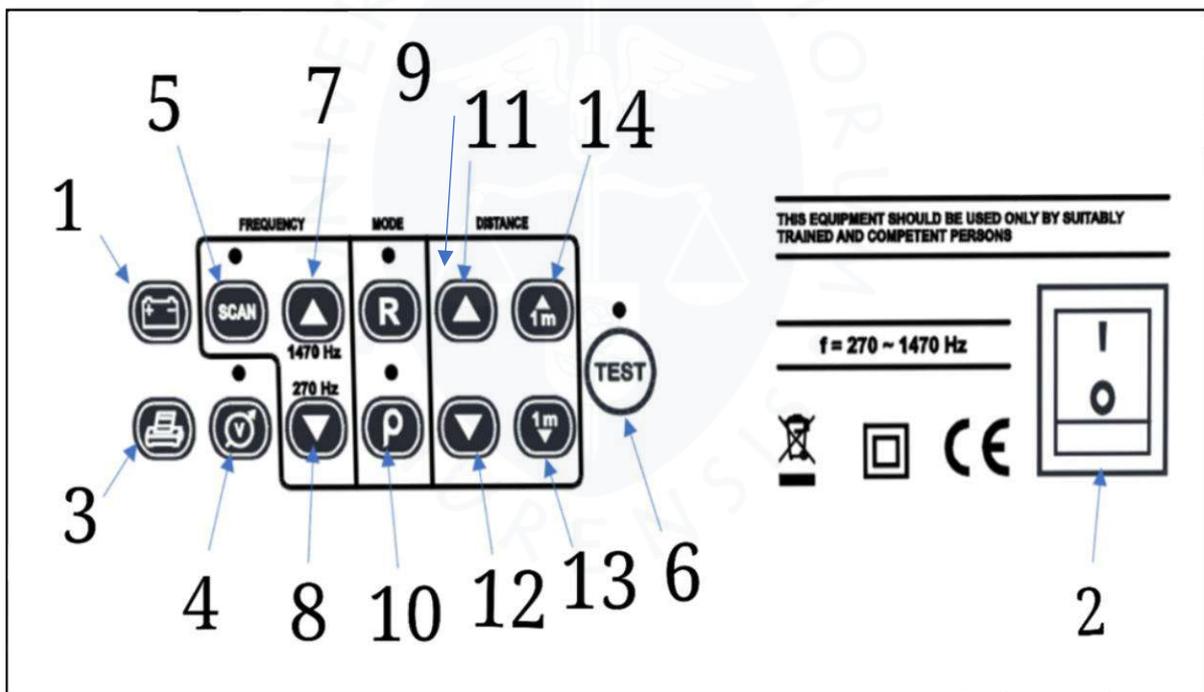


Figura 55. Guía de teclas para operar equipo.  
Fuente: Megabras Ind. Eletrônica Ltda. (2015).

### 3.5.4 Rango de medidas

El equipo es capaz de medir resistencias entre  $0.01 \Omega$  y  $20 \Omega$  para valores de resistencia y  $0.01 \Omega \cdot m$  a  $50 \text{ k}\Omega \cdot m$  para valores de resistividad. El rango para las tensiones puede fluctuar entre 0 y 60 V cuando se emplea con la función voltímetro para la búsqueda de corrientes espurias, sin embargo, para las pruebas de medición en general, el equipo usa 60 V.

### 3.5.5 Batería y carga

El equipo usa una batería que funciona a 12 V y provee 3 Ah de duración. Cuando la batería se encuentra lo suficientemente baja, aparecerá un aviso de baja batería en la pantalla, tal como se aprecia en la figura 56.



Figura 56. Aviso de batería baja en pantalla.  
Fuente: Megabras Ind. Eletrônica Ltda. (2015).

En funcionamiento normal, con el equipo encendido, se puede presionar el botón 1 para mostrar el estado de la batería en cualquier momento. Se mostrará una cierta cantidad de barras en la pantalla, acorde con el nivel de batería.

### 3.5.6 Pasos para la medición de la resistividad aparente del terreno

En la figura 57, se muestra la disposición general de los electrodos y el modo de conexión de estos al equipo. El equipo calcula la resistividad con la ecuación 2.13, vista en la sección 2.7.3.1. El equipo asigna automáticamente un valor de “b” igual a 0.25 m, por lo que al realizar el clavado de las jabalinas, se debe tener en cuenta que estén bien enterrados, de forma colineal y perpendicular a la superficie.

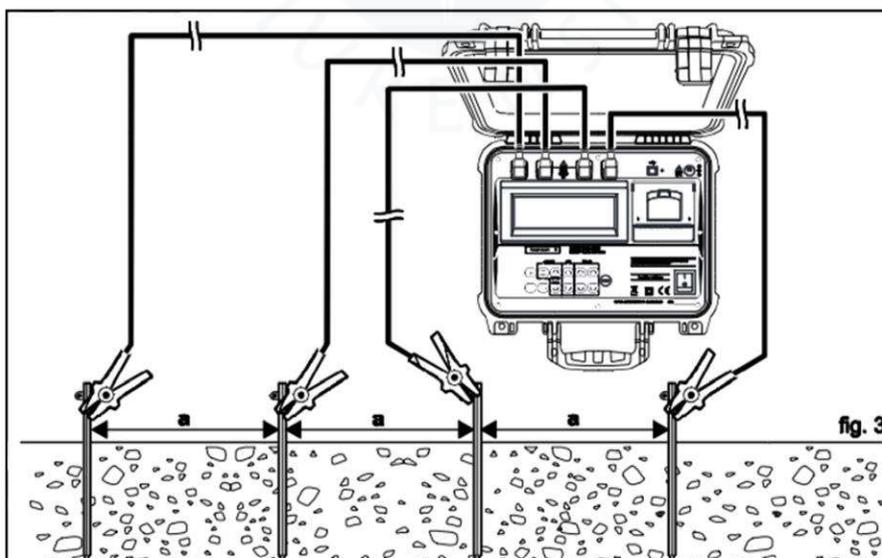


Figura 57. Conexiones del equipo con las jabalinas o electrodos.  
Fuente: Megabras Ind. Eletrônica Ltda. (2015).

En la figura 58, se muestra el proceso instructivo para realizar una medición con el equipo. Se debe tener en cuenta cada paso, para obtener una buena medición.

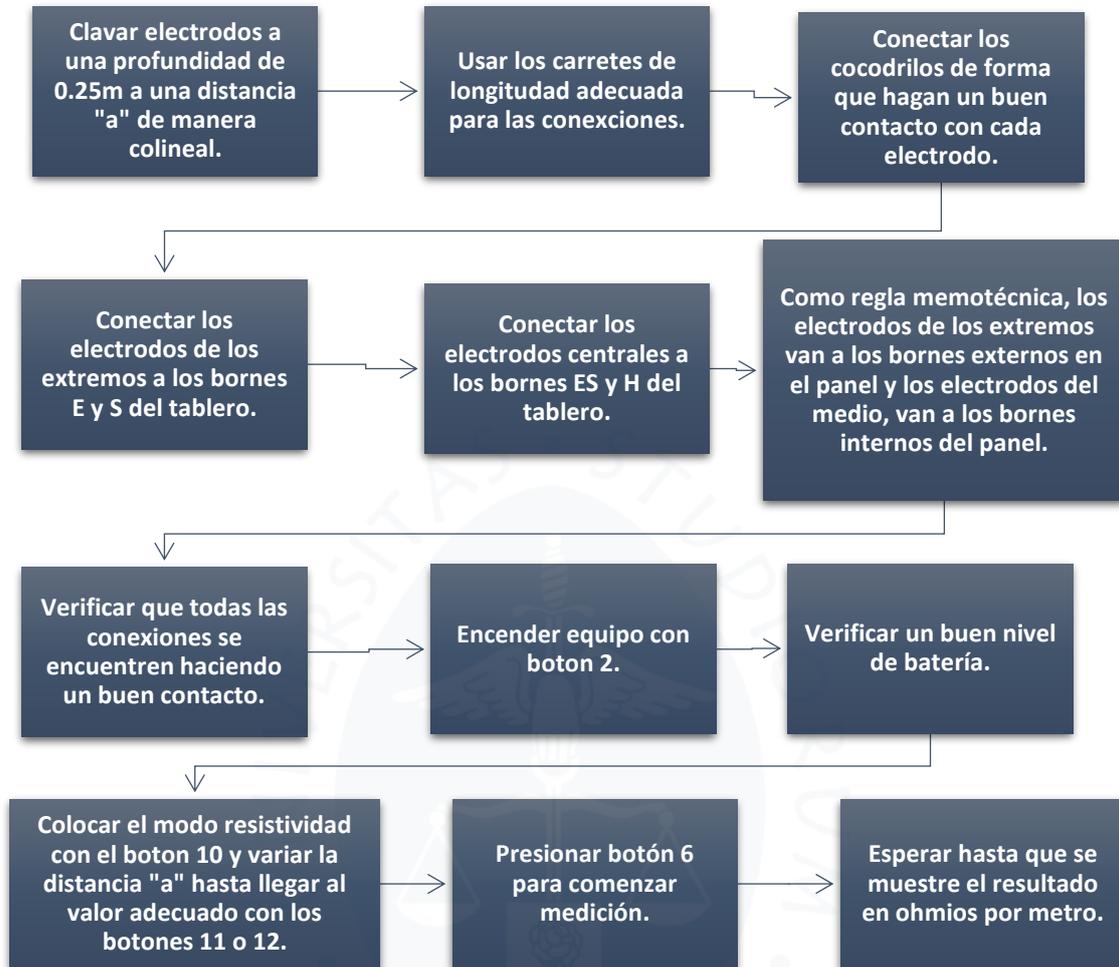


Figura 58. Procedimiento para realizar una medición de resistividad del terreno con el equipo. Fuente: Elaboración propia.

En la figura 59, se plasma lo que aparecería en la pantalla justo antes de presionar el botón 6. Muestra un resumen de la configuración de la prueba a realizar, en este caso, en el modo de resistividad del terreno, método de los cuatro puntos, distancia entre electrodos "a" igual a 2 m y la respectiva fecha y hora de la realización de la prueba.

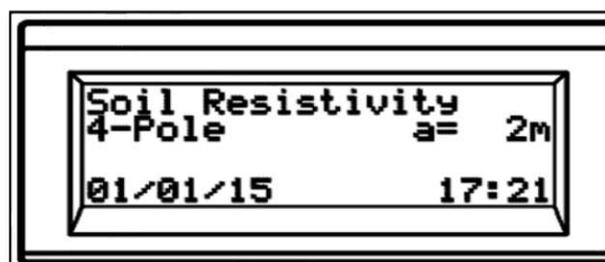


Figura 59. Ejemplo de ejecución de medición a una distancia de 2 metros entre electrodos.

Fuente: Megabras Ind. Eletrônica Ltda. (2015).

Finalmente, la figura 60, muestra el resultado de la medida en ohmios por metro.

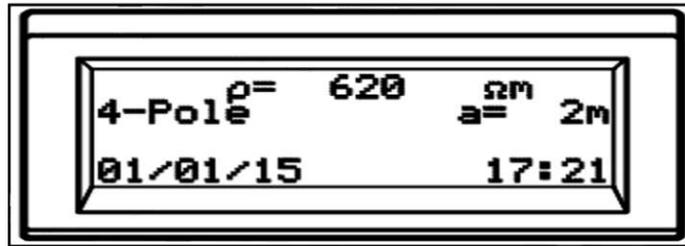


Figura 60. Resultados de medición de resistividad.

Fuente: Megabras Ind. Eletrônica Ltda. (2015).

### 3.5.7 Anormalidades

De vez en cuando, en la pantalla del equipo puede aparecer cierto aviso de error. Las figuras a continuación muestran los errores más comunes que pueden aparecer en la práctica. Las figuras han sido extraídas del manual del fabricante.

La figura 61, muestra la advertencia para chequear cierto polo o electrodo. Esta advertencia es la más común y suele suceder cuando no hay un buen contacto entre la pinza cocodrilo y la jabalina, para ello es conveniente revisar no solo el electrodo del aviso sino todos los demás. Suele suceder también cuando la resistencia de difusión es excesiva y puede solucionarse humedeciendo ligeramente la jabalina y volviéndola a enterrar.



Figura 61. Error sobre revisar un conector.

Fuente: Megabras Ind. Eletrônica Ltda. (2015).

Cuando las elecciones espurias son muy altas y sobrepasan los 7 voltios, puede comprometer seriamente la precisión de las mediciones y por lo tanto la pantalla mostrará un aviso muy parecido al de la figura 62.

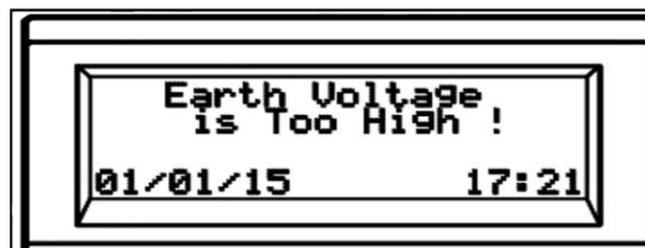


Figura 62. Advertencia sobre corrientes espurias altas.

Fuente: Megabras Ind. Eletrônica Ltda. (2015).

Cuando la resistencia medida el sistema de puesta a tierra es superior a la del rango de medición del equipo, en la pantalla del dispositivo aparecerá un aviso como la figura 63.

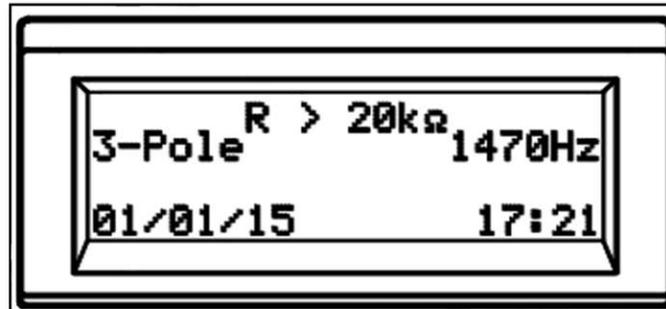


Figura 63. Resistencia de SPT muy alta.  
Fuente: Megabras Ind. Eletrônica Ltda. (2015).

Este error sucede cuando la resistividad del terreno es extremadamente alta y su valor se fija por encima del rango medido del equipo. Cuando esto sucede la pantalla del dispositivo aparecerá como se muestra en la figura 64.

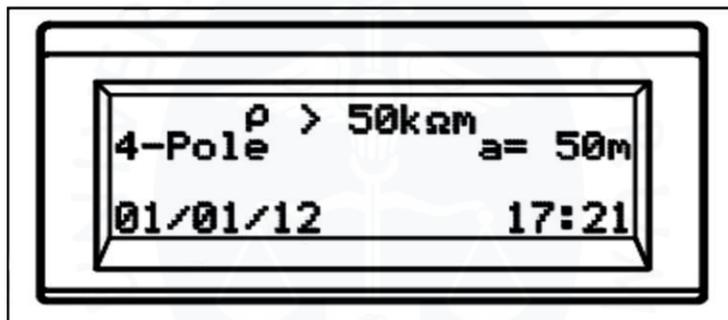


Figura 64. Resistividad del terreno fuera del rango.  
Fuente: Megabras Ind. Eletrônica Ltda. (2015).

### 3.5.8 Comunicación con PC y descarga de información

Para descargar los datos del equipo se precisan la instalación de 3 tipos de archivos. Estos archivos se encuentran disponibles para su descarga en la página web del fabricante megabras.com Siendo el único requisito para descargar los drivers USB tú código que se encuentra en el CD que viene con el equipo.

La instalación general es bastante sencilla se comienzan con el software megalogg2 y una vez descargado de la página, se ejecuta como administrador y se abre una ventana como la aparece en la figura 65. Se aceptan los términos y condiciones, se coloca la clave que viene en el CD y se procede a instalar.

Luego se prosigue a instalar los drivers y controladores como se verifica en la figura 66. Es también una instalación sencilla y que no tarda mucho tiempo en finalizar, basta con dar clic en siguiente, esperar un momento y dar clic en finalizar la instalación.

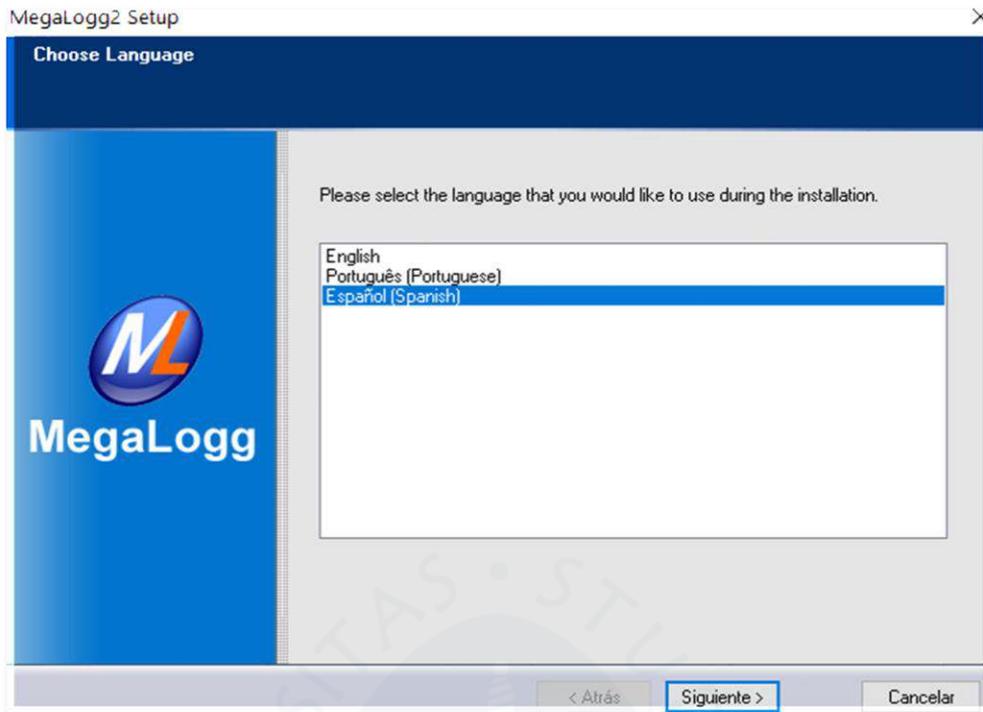


Figura 65. Instalación de software principal.  
Fuente: Elaboración propia.

Una vez instalados los controladores USB y los drivers están instalados, el equipo está listo para ser conectado vía USB.

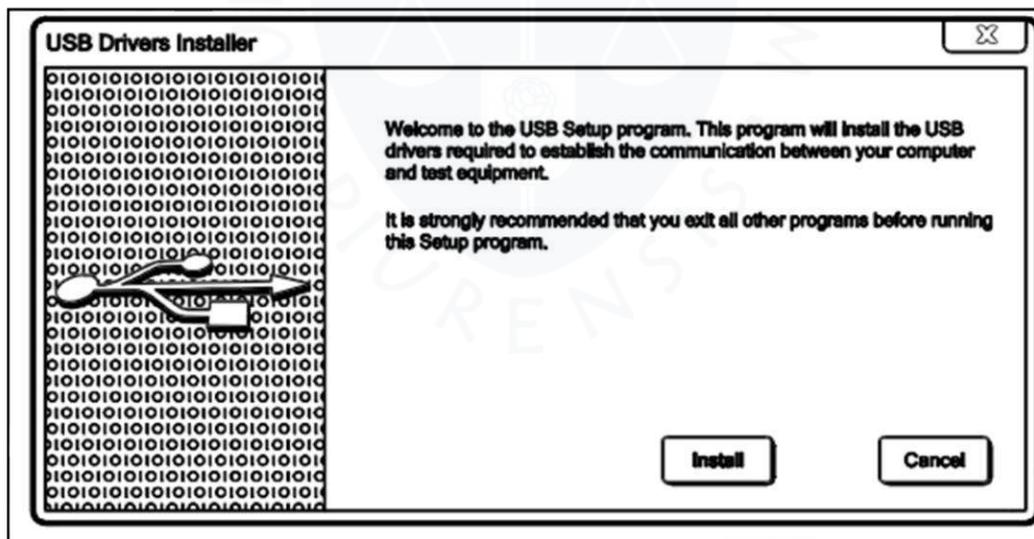


Figura 66. Instalación de drivers.  
Fuente: Megabras Ind. Eletrônica Ltda. (2015).

Finalmente, abriendo el software Megalogg2 se puede exportar en un archivo Excel los datos de la memoria tal y como se muestra en la figura 67. El archivo generado, diferencia entre el número de prueba, fecha, tipo, cantidad de electrodos de prueba, resultado, distancia entre electrodos y la(s) frecuencia(s) de la prueba.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
1	Test #	Date	Type	Poles	Result	Distance	Frequency	270 Hz	570 Hz	870 Hz	1170 Hz	1470 Hz
2	87	11/12/17 15:55	Soil resistivity	4-Pole	487 Ω	0 m	270 Hz					
3	89	11/12/17 15:56	Soil resistivity	4-Pole	12.33 kΩ.m	4 m	270 Hz					
4	90	11/12/17 16:01	Earth resistance	3-Pole	9.96 Ω	-	SCAN	9.94 Ω	9.96 Ω	9.97 Ω	9.96 Ω	9.96 Ω
5	91	11/12/17 16:04	Earth resistance	3-Pole	17.97 Ω	-	SCAN	17.95 Ω	17.98 Ω	17.98 Ω	17.97 Ω	17.98 Ω
6	92	11/12/17 16:06	Earth resistance	3-Pole	99.9 Ω	-	SCAN	99.8 Ω	99.9 Ω	99.8 Ω	99.9 Ω	99.9 Ω
7	93	11/12/17 16:08	Earth resistance	3-Pole	179.7 Ω	-	SCAN	179.6 Ω	179.8 Ω	179.7 Ω	179.8 Ω	179.8 Ω
8	94	11/12/17 16:09	Earth resistance	3-Pole	997 Ω	-	SCAN	998 Ω	997 Ω	997 Ω	996 Ω	997 Ω
9	95	11/12/17 16:11	Earth resistance	3-Pole	1786 Ω	-	SCAN	1788 Ω	1783 Ω	1781 Ω	1783 Ω	1792 Ω
10	96	11/12/17 16:13	Earth resistance	3-Pole	10.03 kΩ	-	SCAN	10.00 kΩ	10.03 kΩ	10.03 kΩ	10.03 kΩ	10.03 kΩ
11	97	11/12/17 16:14	Earth resistance	3-Pole	17.64 kΩ	-	SCAN	17.86 kΩ	17.74 kΩ	17.62 kΩ	17.52 kΩ	17.46 kΩ
12	101	28/12/17 09:19	Earth resistance	3-Pole	0.10 Ω	-	270 Hz					
13	102	28/12/17 09:19	Earth resistance	3-Pole	10.07 Ω	-	270 Hz					
14	103	28/12/17 09:20	Earth resistance	3-Pole	10.07 Ω	-	1470 Hz					
15	104	28/12/17 09:20	Earth resistance	3-Pole	10.07 Ω	-	270 Hz					
16	105	28/12/17 09:21	Earth resistance	3-Pole	15.09 Ω	-	270 Hz					
17	106	28/12/17 09:21	Earth resistance	3-Pole	10.07 Ω	-	270 Hz					
18	107	28/12/17 09:21	Earth resistance	3-Pole	5.11 Ω	-	270 Hz					
19	108	28/12/17 09:23	Earth resistance	3-Pole	50.0 Ω	-	270 Hz					
20	109	28/12/17 09:23	Earth resistance	3-Pole	149.7 Ω	-	270 Hz					
21	110	28/12/17 09:23	Earth resistance	3-Pole	99.8 Ω	-	270 Hz					

Figura 67. Archivo exportado contenedor de historial de mediciones.

Fuente: Elaboración propia.

Es importante mencionar que el último número de test indicado en la primera columna de la figura 67, coincide con el número que marca el equipo en su pantalla al haber realizado el último test y coincide también con el papel impreso del resultado. Esta correlación de números continúa de manera indefinida a menos que el equipo se restablezca a sus valores de fábrica o se reestablezca la memoria interna.

## Capítulo 4

### Propuesta de protocolo de medición de la resistividad del terreno

#### 4.1 Introducción

El siguiente protocolo ha surgido a partir de la necesidad de llevar un correcto procedimiento de medición y a su vez ilustrarlo y practicar lo propuesto en campo. El protocolo abarca desde la planificación de las mediciones, la evaluación del área a medir, constatación de condiciones externas, ya sean climáticas y estado del suelo, descripción de las áreas aledañas y otros tipos de estructuras que puedan alterar los parámetros de medición.

Los siguientes apartados que conforman el protocolo han sido fruto de comparar diversas fuentes bibliográficas como (Orellana, 1972), (Ortuondo, 1997), (Ramírez Castaño & Cano Plata, 2010), (Morales Osorio, 1999b), (Rojas, 2007), entre otras; agregando la solución a los inconvenientes y observaciones surgidas en la misma experiencia de la medición en campo y tratando de minimizar los errores para tener una proyección más clara de lo que se desea hacer con los datos, en este caso, un proyecto de puesta a tierra.

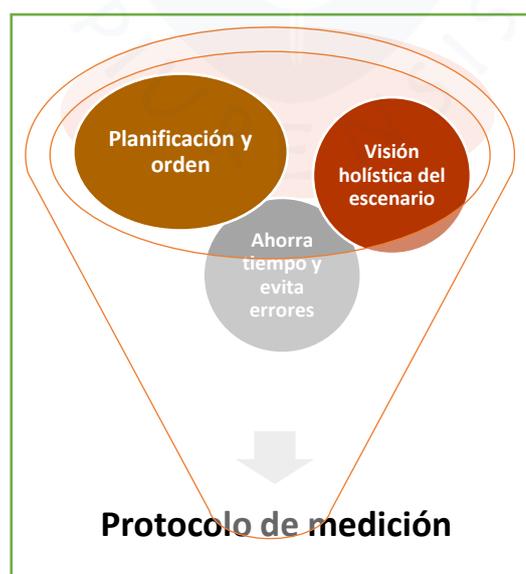


Figura 68. Ventajas obtenidas cuando se cuenta con un protocolo de medición.

Fuente: Elaboración propia.

La figura 69, muestra un esquema a modo de resumen de todo lo que abarca un protocolo de medición de resistividad del terreno, brindando una visión global y práctica.



Figura 69. Representación gráfica de los pasos que componen un protocolo de medición.  
Fuente: Elaboración propia.

## 4.2 Planificación de las mediciones

La planificación de las mediciones es una etapa necesaria en la aplicación en campo, ya que permite tener una mejor descripción del área a medir, así como también genera datos adicionales que puedan afectar algún parámetro.

La presente guía, es una combinación de las medidas realizadas en un área especializada para pruebas, de la Universidad de Piura y fueron realizadas entre noviembre y diciembre del año 2018, con fines para la presente investigación y de manera adicional servir para el entrenamiento de diversos alumnos del curso de Sistemas de utilización y distribución (SUD) dictados por el Dr. Ing. Justo Oqueli y el Mgtr. Ing. Hugo Fiestas en el periodo 2018-II de la Facultad de Ingeniería, como parte de los laboratorios en este curso.

### 4.2.1 Elección del área a medir

La Universidad de Piura posee un área dedicada a proyectos de investigación y de experimentación cercana al Radar UDEP y a la estación meteorológica. Esta área es llamada la zona experimental, su ubicación aproximada en el sistema de coordenadas decimales es de -

5.1706953, -80.6379630. Dentro, se encuentran actualmente proyectos como el biodigestor y el gasificador. En las figuras 70 y 71, se aprecian vistas satelitales del área.



Figura 70. Zona experimental reservada a pruebas – UDEP.  
Fuente: Elaboración propia.



Figura 71. Vista general satelital del área en estudio.  
Fuente: Elaboración propia.

Debido a que las mediciones de la resistividad del terreno podrían verse influenciadas por la presencia de edificaciones aledañas, las medidas se realizaron cerca de la esquina superior izquierda del rectángulo rojo, más específicamente en una subzona denominada “zona de trabajo abierta”. En la figura 72, se muestra la ubicación aproximada, resaltada en el rectángulo de más pequeño.



Figura 72. Zona de trabajo abierta dentro de la zona experimental.  
Fuente: Elaboración propia.

#### 4.2.2 Croquis informativo

El croquis de la figura 73 fue elaborado por la Arq. Luiva Preciado Cortijo, como plan de la ubicación de los futuros proyectos de investigación que tiene la universidad. Las medidas de resistividad tomadas podrían ser usadas en caso se desee implementar sistemas de puesta a tierra en las futuras edificaciones que se construyan en el área.

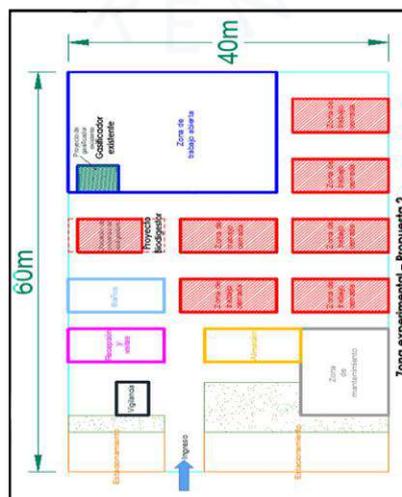


Figura 73. Plano de distribución de zona experimental.  
Fuente: Preciado Cortijo (2016).

#### 4.2.3 Definición de las direcciones de medida sobre el terreno

Muchos autores como Ortuondo (1997), Ospina (2010) e incluso el mismo fabricante del equipo, Megabras, sostienen que para realizar una mejor prospección eléctrica y obtener una mejor información de la estratificación del terreno, las mediciones deben obedecer a ciertas direcciones en el terreno. Esto se refiere a que la línea que se forma con los electrodos como puntos, deben variar de dirección entre una y otra medición. La figura 74 y 75, muestran un ejemplo de diversificar las direcciones en la toma de medidas.

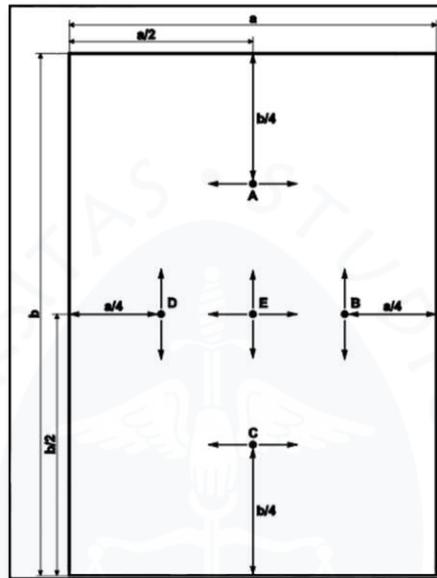


Figura 74. Direcciones para caracterizar un terreno.  
Fuente: Megabras Ind. Eletrônica Ltda. (2015).

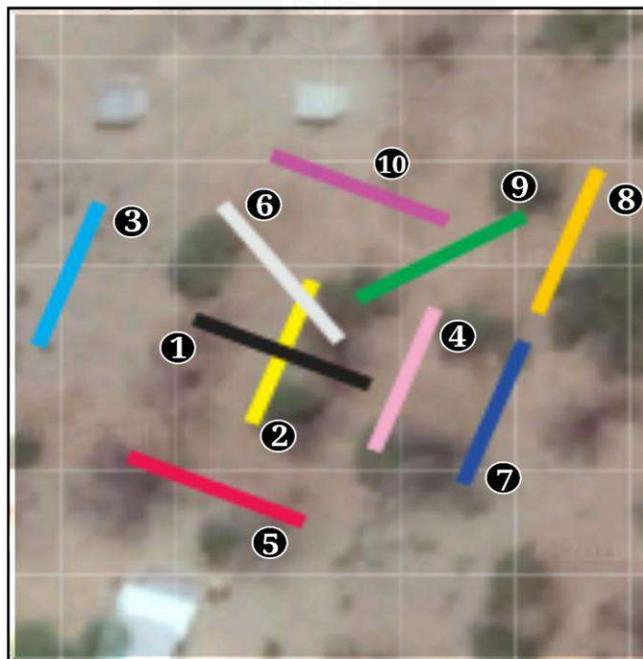


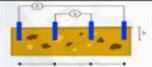
Figura 75. Direcciones de las diversas mediciones realizadas.  
Fuente: Elaboración propia.

Para las mediciones de resistividad en el presente trabajo, se establecieron las siguientes direcciones, cada una resaltada con un color diferente y con un número en caso la diferenciación por colores no se note a causa de una impresión a escala de grises. En la figura 75, cada línea representa un grupo de mediciones a diversas distancias (mediciones con “a” igual a 1 m, 2 m, 4 m y 8 m), empleando el método de los cuatro puntos con configuración de Wenner, 40 mediciones en total considerando que son 4 mediciones por cada dirección. El proceso de la interpretación posterior se realiza por cada línea de dirección, es decir, cada interpretación posee 4 datos de entrada de resistividad aparente, tomados a distintas distancias.

#### 4.2.4 Propuesta de formatos de recopilación de la información

Para las mediciones en campo, es buena práctica realizarlas, plasmando los resultados en una determinada plantilla, que considere como mínimo, las condiciones generales en las que se realiza la medición, datos climáticos y características visuales del terreno. Deberá poseer un espacio reservado para colocar los resultados de las mediciones, con la respectiva distancia entre electrodos y la dirección en la que se realiza la medición.

En el apéndice A-1, se propone un formato para la recopilación de toda la información. En la figura 76, se muestra este mismo formato en forma de miniatura, con fines simplemente informativos y demostrativos.

Formato de recopilación de información			
Título:	Medición de resistividad en zona experimental - UDEP	Código del formato:	RT-CP-000xx
Datos generales		Características del suelo	
Fecha de medición:	Forma / Color de terreno:	Flora/edificios aledaños:	
Hora:	Último día de lluvia:	Temperatura:	
Empresa:	Humedad:	PH:	
Ubicación:			
Localidad:			
Información del equipo de medición		Accesorios de medición	
Marca y modelo:		Electrodos/Cables:	
Frecuencia de medida:		Otros:	
Configuración:			
Datos adicionales / Observaciones		Referencia	
			
Sentido/Dirección de la medición	Separación "a" entre los electrodos (m)	Resistividad aparente (Ω m)	
Sentido/Dirección de la medición	Separación "a" entre los electrodos (m)	Resistividad aparente (Ω m)	

Facultad de Ingeniería      Universidad de Piura

Figura 76. Formato de recopilación de información.  
Fuente Elaboración propia.

#### 4.2.5 Programación del trabajo de medición

Una vez conocida el área donde se realizarán las mediciones, es conveniente, de acuerdo con la disponibilidad del equipo programar adecuadamente las mediciones. En el caso práctico de la actual investigación se tuvo la suerte de contar con un equipo prácticamente 100% disponible. Pero en la realidad a veces es más complicado si no se cuenta con un equipo propio. De ser éste el caso, para garantizar bien el aprovechamiento del tiempo con el equipo y así evitar tiempos muertos innecesarios, la programación de las mediciones es esencialmente más importante.

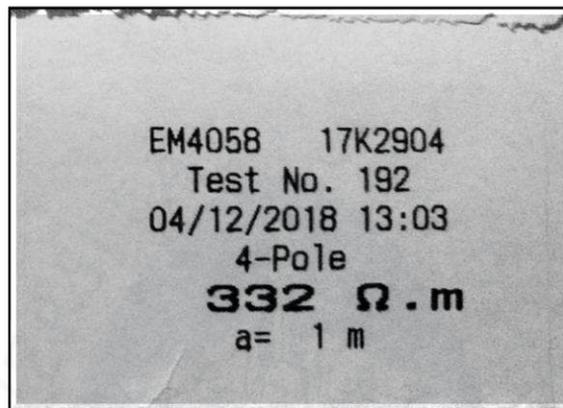


Figura 77. Ejemplo de resultado impreso de una medición.  
 Fuente: Elaboración propia.

Las mediciones aquí realizadas, fueron distribuidas en 5 días. Cada día subdividido en dos turnos. En cada turno se realizaba un grupo de 4 mediciones a 1, 2, 4 y 8 m. Dicho grupo de 4 mediciones, conforma una línea de dirección en el terreno, marcada con un color y número determinado, como se vio en la figura 75 del apartado 4.2.3.

Para un correcto y óptimo uso del tiempo, las direcciones ya se encontraban previamente establecidas. A manera de ejemplo, en la figura 77, se muestra un resultado impreso correspondiente a una medición de prueba. Se puede apreciar algunas partes básicas del resultado que entrega el equipo. En la parte superior se aprecia el modelo y serie del equipo, seguido por el número de prueba, fecha y hora y finalmente en negrita, el resultado de resistividad y la distancia de medición.

#### 4.3 Consideraciones generales sobre el circuito de medición

A manera de hincapié, se debe tener muy en cuenta que dentro de la configuración de Wenner (distancias iguales de separación entre electrodos), hay algunas maneras distintas de colocar las conexiones de los electrodos con el equipo, por lo que debemos cerciorarnos de emplear la variante de Wenner alfa. Existen básicamente tres tipos de variantes dentro de la misma configuración de Wenner, variante alfa, beta y gamma. Cada una se diferencia básicamente en la manera de colocar los electrodos de corriente y de potencial.

En la figura 78, se muestran las variantes principales dentro de la configuración de Wenner. Cada una posee un factor geométrico distinto y por tanto una fórmula distinta para calcular la resistividad aparente. Las letras C hacen referencia a los electrodos que inyectan corriente y la letra P, a los electrodos que miden voltaje o potencial.

En todas las mediciones se empleó la variante alfa, ya que es la misma que usa el equipo EM-4058 al momento de mostrar la resistividad en su pantalla.

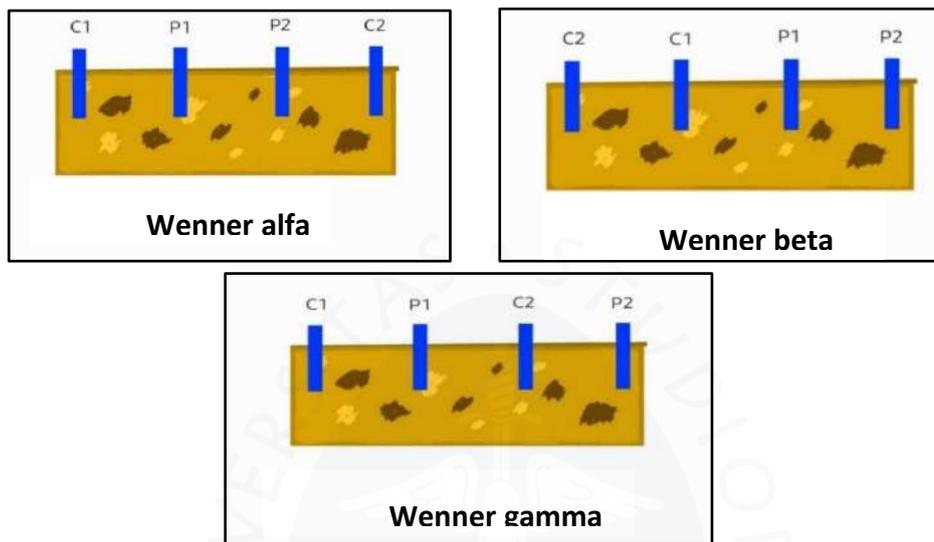


Figura 78. Variaciones en la configuración de Wenner.  
Fuente: Elaboración propia.

#### 4.4 Efecto de las pendientes en el terreno

Siempre se debe realizar las mediciones procurando no caer en inclinaciones del terreno. Si en la práctica, por algún motivo, es imposible evitarlas, hay básicamente dos maneras de realizar la interpretación.

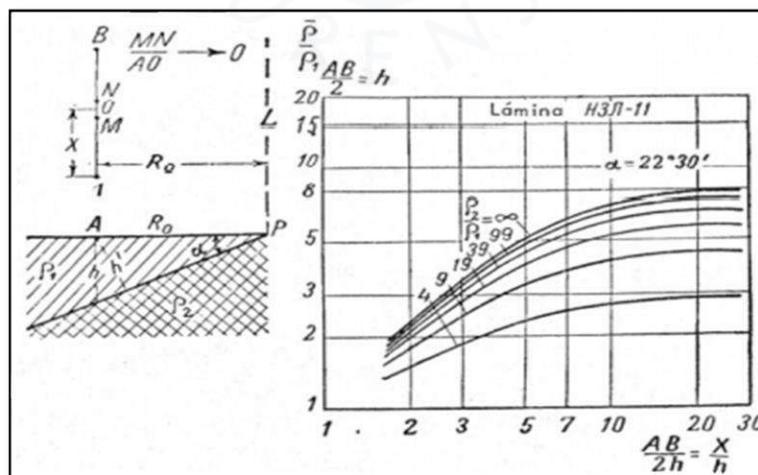


Figura 79. Ejemplo de familia de curvas patrón para contacto inclinado de la colección de Alpin (según Kalenov).

Fuente: Orellana (1972).

La primera, es la que recomienda Orellana (1972), que afirma que, si la pendiente en el terreno no excede inclinaciones de 30 grados, el error que se comete empleando curvas SEV correspondientes a estratos horizontales, es menor al 20%. En cualquier caso, (Orellana, 1972) expone sobre el uso de las curvas de Alpin, publicadas en 1940. Fueron un total de 16 familias de curvas, con ángulos de inclinación de 0, 22.5, 30, 45, 60 y 90 grados. La tendencia asintótica al valor de resistividad de la segunda capa, en un terreno de dos estratos, ya no se manifiesta para terrenos inclinados, sino que dicha tendencia, difiere de  $\rho_2$  y se asemeja más a  $\rho_1$ , tanto mayor sea la inclinación. En la figura 79, se muestra un ejemplo de curvas patrón para terrenos con inclinación.

La segunda manera de interpretar las mediciones consiste, según Ortuondo (1997), en aplicar un factor de corrección ( $K_w$ ), por el que debe multiplicarse el valor medido de resistividad. En la figura 80, el valor  $K_w$ , se obtiene entrando en el eje horizontal con la relación  $D/A$ , siendo  $D$ , la distancia de separación desde el centro de las mediciones hasta el borde de corte del terreno y  $A$ , la separación entre los electrodos. La curva mostrada corresponde a una inclinación con pendiente negativa infinita, es decir con una caída vertical a 90 grados y un terreno homogéneo.

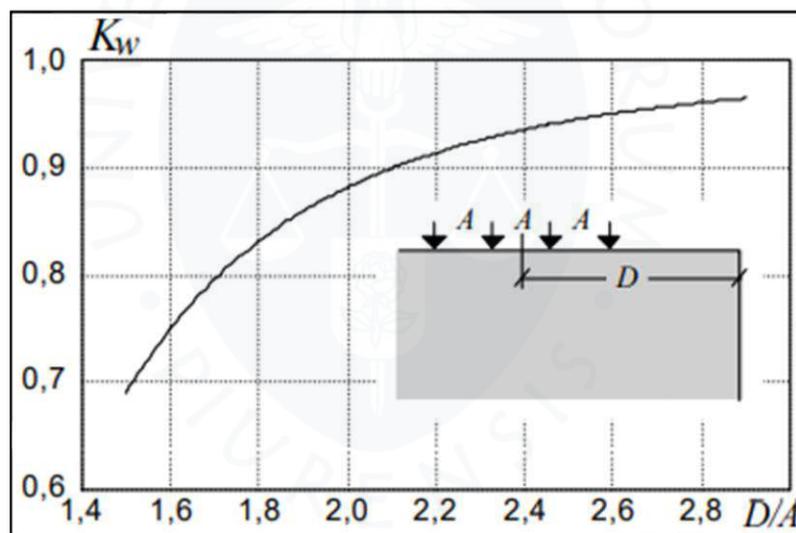


Figura 80. Factor de corrección  $K_w$ , de los valores de resistividad aparente medidos.

Fuente: Ortuondo (1997).

#### 4.5 Efecto de estructuras aledañas a la zona de medición

Ortuondo (1997) afirma que en el lugar de medición no deben existir objetos metálicos enterrados que abarquen zonas relativamente extensas, y que pudieran alterar en forma importante el campo natural de potencial que establecería la corriente que circula por el terreno. Los objetos pueden ser del tipo tuberías metálicas desnudas, rieles ferroviarios, mallas de tierra, etc. Las medidas también se ven alteradas por partes metálicas que hacen contacto con el terreno, pero que se encuentran en lugares distintos. Si existe una sola tubería

o riel metálico enterrado en la zona que se desea medir, el efecto de éste se puede reducir realizando la medición sobre una línea perpendicular a su dirección y, en lo posible, ubicando el centro de medición sobre él. De este modo se altera en menor grado el campo natural de potencial.

Si son varios los elementos enterrados y con diferentes trazados, debe elegirse una dirección y centro de medición tales que se minimice el efecto perturbador. Es importante obtener información a manera de antecedentes, ya sea por parte del propietario o por otro tipo de estudios, para elegir una zona de medición lejana a objetos que puedan alterarla.

#### **4.6 Recomendaciones generales en la ejecución de la medición**

Se recomienda cerciorarse que todas las jabalinas se encuentren enterradas bajo la misma profundidad. La linealidad de los cuatro puntos que forman los cuatro electrodos o jabalinas debe ser garantizada, puesto que, de no ser así, las mediciones son susceptibles a errores.

Dentro del formato donde se recopila la información, es importante tener en cuenta las condiciones ambientales, como temperatura humedad, último día de lluvia, así como también inspeccionar visualmente el terreno en búsqueda de cualquier tipo de condición que pueda afectar las mediciones. Se debe tener muy en cuenta la compactación del terreno, ya que un suelo compactado, retiene una mayor cantidad de humedad por mayor tiempo, y si a ese efecto se le añade una reciente precipitación, las condiciones en las que se estarían haciendo las medidas, no serían las normales. Por este motivo se tendría un problema, ya que siempre se debe evaluar el peor escenario, aquel donde se obtengan los valores más altos de resistividad. Cuando ha habido precipitaciones, es recomendable realizar las mediciones esperando entre tres a cuatro días (dependiendo del clima) para que las condiciones vuelvan a la normalidad.

Es posible que, según la disponibilidad del equipo por parte de la empresa, se cuente con un modelo de equipo distinto al cual el usuario está acostumbrado a trabajar. En ese caso, es de vital importancia hacer un estudio exhaustivo del manual, no solamente para conocer cómo se opera el equipo, sino porque en dichos manuales, el fabricante menciona todas las condiciones ideales en las que el equipo debería trabajar, así como fallas comunes.

De manera adicional, algunos equipos aplican directamente la fórmula, acorde con la configuración con la que trabaje. Por ejemplo, el equipo Megabras EM-4058, calcula la resistividad con la configuración de Wenner alfa (Wenner clásica), y el resultado que entrega es la resistividad aparente en ohmios por metro. Sin embargo, hay equipos como el Megabras modelo MTD-20KWe, que entrega como resultado la resistencia en ohmios, con la cual el usuario debe realizar un cálculo independiente para obtener, de acuerdo con los parámetros de longitud y profundidad, el valor de resistividad en ohmios por metro.

#### **4.7 Comprobación en el transcurso de la medición**

Muchos de los equipos poseen en sus manuales una sección que se refiere al tipo de anomalías que pueden aparecer al momento de realizar las mediciones. Algunas de las más comunes fueron vistas en el apartado 3.5.7 del capítulo tres. Es necesario tenerlas en cuenta, ya que saber qué hacer en cada caso, puede generar mayor precisión de las mediciones, como, por el contrario, el no conocerlas puede llevar a datos erróneos.

En la parte experimental de la presente investigación, en dos ocasiones apareció el error de valor de resistividad demasiado alto, no obstante, fue solucionado humedeciendo la varilla antes de enterrarla. Otro error común fue un mal contacto de las pinzas cocodrilos con los electrodos o jabalinas.

#### **4.8 Análisis posterior**

La toma de las mediciones para la obtención de las curvas de resistividad aparente no culmina la prospección. Es por lo que tal como se ha visto en el capítulo dos, el análisis posterior es sumamente necesario para obtener la resistividad de cada capa, y su respectivo espesor. Estos valores son muy importantes porque con ellos se obtiene la resistencia equivalente, que es un parámetro esencial para el diseño de un sistema de puesta a tierra.

En los apéndices A-2 a A-6, se aprecian los datos medidos en cinco días distintos, en el mismo terreno de estudio. Cada día, fue dividido en dos grupos de mediciones a 1, 2, 4 y 8 metros. Por cada grupo de mediciones, se obtendría una dirección en el terreno y por tanto una curva de resistividad.

En la siguiente sección de los resultados, se muestra de manera más específica, la aplicación del software para la comparación de las curvas patrón en los diez grupos de mediciones realizados. Cada curva aparente, ha sido ingresada al software y comparada con su curva SEV más cercana.

Como un punto adicional, se creyó conveniente el uso de un código QR, mostrado en el apéndice A-8, con el cual se puede descargar y tener acceso a la plantilla de recopilación de la información de las medidas, en caso alguna institución, profesional o estudiante requiera su uso.



## Resultados

Los resultados que a continuación se presentan, han sido tomados según la ubicación, direcciones y configuración descritas en el capítulo 4 y 3 respectivamente. Los apéndices de A-2 a A-6 sirven para plasmar las mediciones, así como las condiciones del suelo y datos sobre el equipo usado. Cada figura está dividida en dos partes. La parte gráfica, que es la comparación que hace el software con la curva patrón que más se asemeje a la curva de resistividad mostrando el resultado de manera gráfica y la segunda parte donde se muestra una tabla con el espesor de cada capa y su resistividad.

Se realizaron un total de 10 grupos de mediciones, cada grupo con mediciones a 1, 2, 4 y 8 metros y con una dirección preestablecida, un total de 40 valores de resistividad aparente obtenidos en las mediciones. Todas las direcciones discutidas, se refieren a la figura 75.

Las mediciones de los dos primeros días fueron obtenidas con un mayor porcentaje de error en comparación con las mediciones que se realizaron a partir del tercer día. Si bien se conocía el procedimiento teórico y el funcionamiento del equipo, algunos detalles como por ejemplo el humedecer el electrodo cuando la resistividad que marca el equipo es demasiado alta no se conocía del todo. Estos días en realidad, se podría considerar como una adaptación al correcto uso del equipo y el error relativamente alto es reflejo de ello.

A partir del tercer día, como se muestra en la figura 81, las mediciones toman mejor forma, el error es mucho más bajo y se puede notar que en el terreno, existe una capa superior (muy árida, arena fina, color pardo claro y muy poco compactada), que posee una resistividad aparente bastante alta y presenta un espesor o altura de capa de aproximadamente 0.5 m.

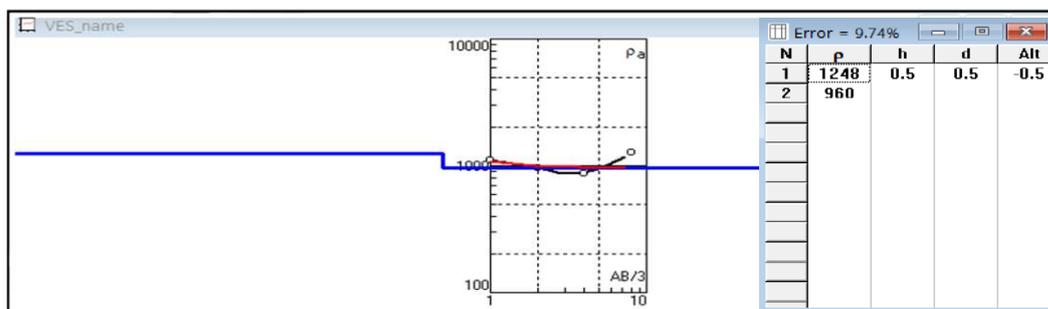


Figura 81. Medición tomada en el tercer día de trabajo de campo, dirección 5.

Fuente: Elaboración propia.

Las figuras 82 y 83, son correspondientes al día 4. Se puede notar que mantienen la tendencia vista líneas arriba, una capa superior delgada, de alta resistividad (en promedio), obteniéndose también espesores de capa bastante parecidos y con errores aceptables.

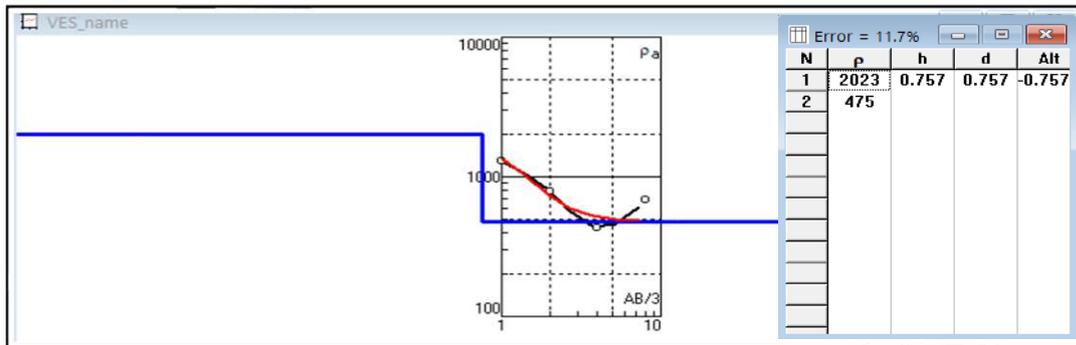


Figura 82. Interpretación de medición del día 4, dirección 7.

Fuente: Elaboración propia.

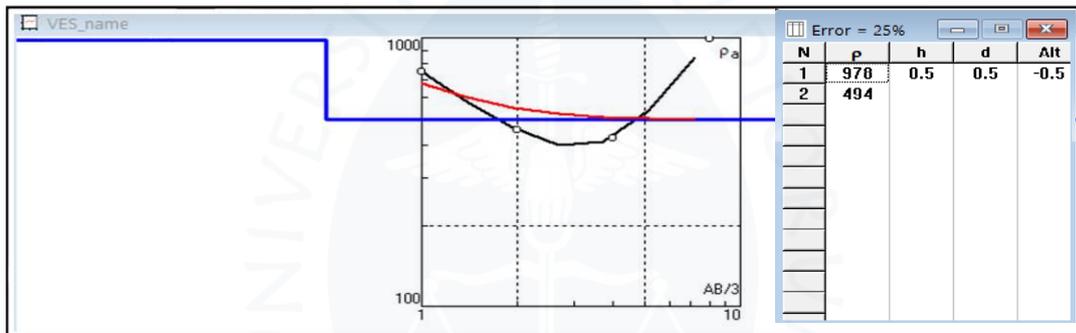


Figura 83. Interpretación de medición en día 4, dirección 8.

Fuente: Elaboración propia.

La figura 84 corresponde a la interpretación de la curva de resistividad aparente medida el día 5, en este caso la capa superior de manera similar a los días anteriores posee una resistividad alta. La diferencia está en la profundidad o altura de la capa uno, es considerablemente mayor.

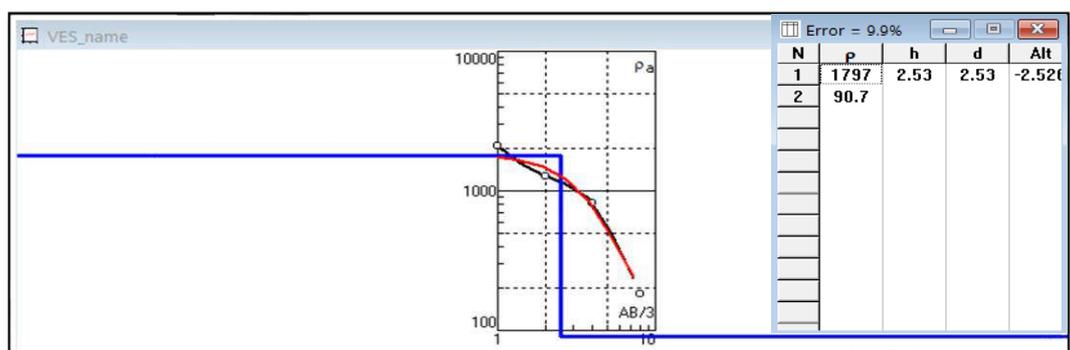


Figura 84. Interpretación día 5, dirección 9.

Fuente: Elaboración propia.

Dados los resultados anteriores y sus variaciones en especial a la altura de las capas, se creyó conveniente hacer una comparativa de los resultados aproximándolos a un suelo de tres estratos. Las figuras a continuación son análogas en día, a las figuras 82, 83 y 84 respectivamente.

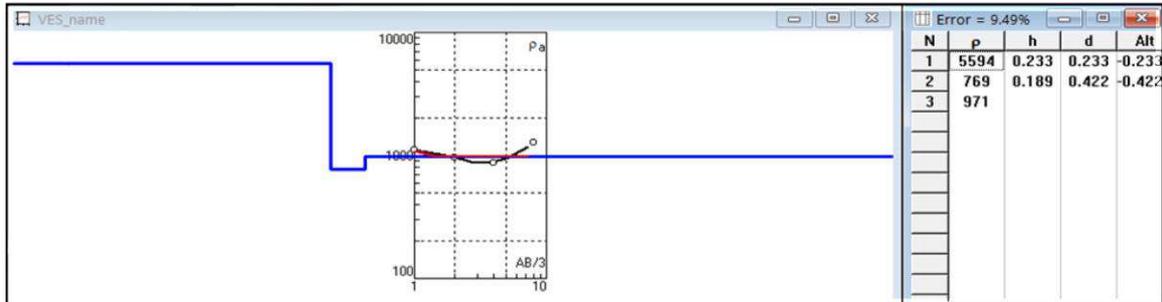


Figura 85. Equivalencia a tres estratos, día 3, dirección 5.  
Fuente: Elaboración propia.

En promedio, la capa superior simulando la estructura del suelo con tres capas, es de resistividad muy alta, de espesor aproximado a 0.4 metros. Posee concordancia con la estructura equivalente de dos capas, puesto que la capa superior donde se realizaron las medidas se mostró bastante árida y muy poco compactada (a menor compactación, hay menor contacto entre los granos de área, y más aire de por medio), el aire, al poseer propiedades dieléctricas y los granos estar en menor contacto unos con otros, aumenta en general la resistividad de dicha capa ya que la corriente encuentra un camino más difícil de seguir al dispersarse.

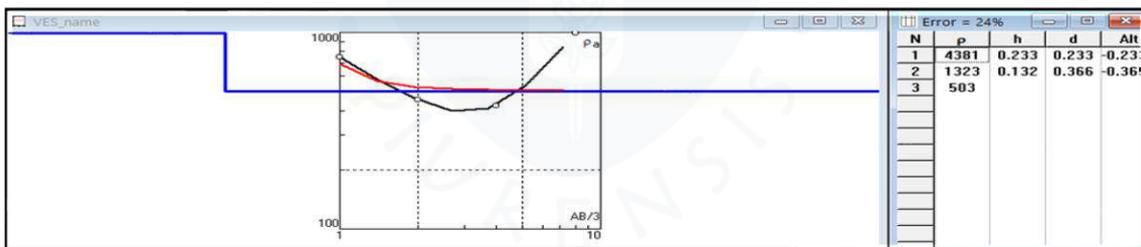


Figura 86. Equivalencia a tres estratos, día 4 en dirección 8.  
Fuente: Elaboración propia.

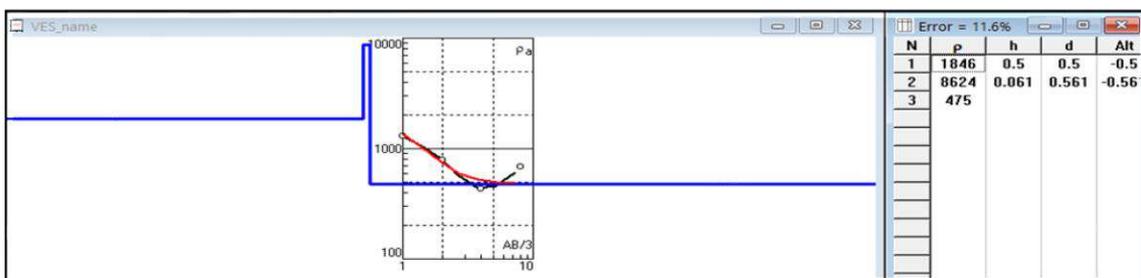


Figura 87. Equivalencia a tres estratos día 4, dirección 7.  
Fuente: Elaboración propia.

En la figura 86, hay un resultado que mirándose de cerca podría ser bastante alarmante. En la capa dos, el valor de resistividad es bastante alto, sin embargo, el espesor de dicha capa es muy delgado, aproximadamente 6 centímetros. Dado que este espesor es casi insignificante, este valor de resistividad puede tomarse como un caso aislado de la simulación.

En la estructura equivalente de tres capas, las figuras 86, 87 y 88, realizadas a partir de los datos de las últimas mediciones, coinciden en que la resistividad más baja se encuentra en el tercer estrato, a una profundidad no mayor a 1 metro.

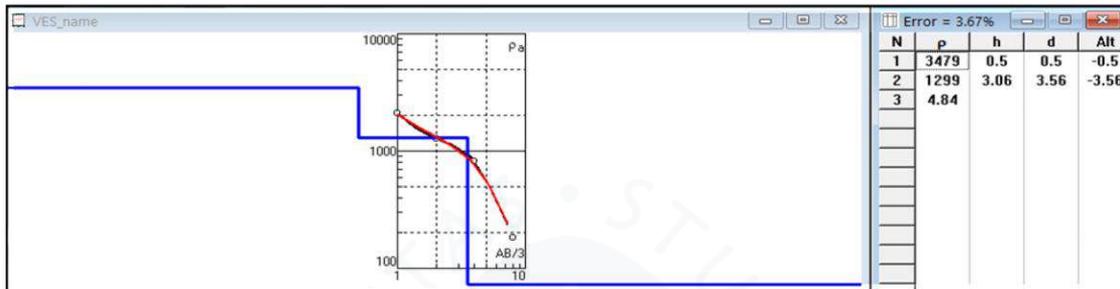


Figura 88. Equivalencia a tres estratos día 5, dirección 9.  
Fuente: Elaboración propia.

Debido a que la cantidad de mediciones y sus interpretaciones fue considerable, para un mejor análisis, sólo las interpretaciones que generaban más información de la estructura del suelo fueron mostradas, sin embargo, la tabla 7 muestra todos los resultados de las interpretaciones.

Tabla 8. Comparativa de estructuras equivalentes

Resultados de la interpretación de las medidas									
Día de medición	Línea de dirección N°	Estructura a dos capas			Estructura a tres capas				
		ρ1 (Ω·m)	ρ2 (Ω·m)	h1 (m)	ρ1 (Ω·m)	ρ2 (Ω·m)	ρ3 (Ω·m)	h1 (m)	h2 (m)
1	1	487	5005	3.34	285	267	1253	0.546	0.095
	2	3618	831	0.5	4189	7245	840	0.399	0.04
2	3	836	1365	1.35	2139	40.2	1494	0.5	0.055
	4	7106	64.5	0.623	6765	8136	64.8	0.301	0.287
3	5	1248	960	0.5	5594	769	971	0.233	0.189
	6	332	1410	0.5	286	314	1406	0.209	0.237
4	7	2023	475	0.757	1846	8624	475	0.5	0.061
	8	978	494	0.5	4381	1323	503	0.233	0.132
5	9	1797	90.7	2.53	3479	1299	4.84	0.5	3.06
	10	7929	932.5	0.5	8601	10016	950.4	0.2	0.249

Fuente: Elaboración propia.

La mejor aproximación según el software es con una estructura de tres estratos. En promedio las dos primeras capas muestran un comportamiento elevado de resistividad, propio de la naturaleza del terreno, mientras la última capa se muestra como la más conveniente para diseñar un sistema de puesta a tierra.

Se puede deducir que la mejor ubicación para colocar un sistema de puesta a tierra, ya que contaría con las resistividades más bajas de toda el área analizada, es en torno a las direcciones de las líneas 4, 7, 8 y 9 como muestra la figura 89. Esta deducción surge a partir de comprobarse que las capas superiores 1 y 2 se caracterizan por ser de compacidad muy baja y árida. Estas características se reflejan en el alto valor de la resistividad de las capas superficiales, en especial dentro de los primeros 0.5 metros de profundidad. A medida que se aleja de dicha profundidad se encuentran capas con mejores propiedades eléctricas para un mejor diseño de un sistema de puesta a tierra. Es por este motivo que, además del área predilecta para el sistema de puesta a tierra, una buena profundidad para realizar la instalación debe ser mayor a 0.65 metros, resultado de promediar la suma de los espesores  $h_1$  y  $h_2$  de las líneas de dirección con resistividades más bajas (líneas 4,7,8 y 9).

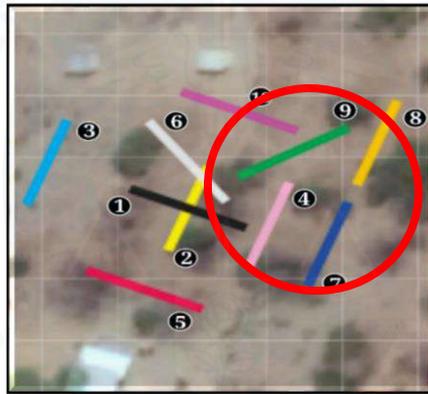


Figura 89. Área con más baja resistividad de terreno.  
Fuente: Elaboración propia.

Finalmente, la figura 90 concluye con las coordenadas en el sistema decimal del centro de una circunferencia de radio aproximado de 8 metros  $-5.170634^\circ$ ,  $-80.637830^\circ$  y que encierra el área con mejores valores de resistividad de toda la zona evaluada.



Figura 90. Área propuesta para SPT con circunferencia de radio 8 m.  
Fuente: Elaboración propia.

La hipótesis anterior que afirma que la mejor zona para realizar el sistema de puesta a tierra se encuentra en el área encerrada por el círculo rojo de la figura 89, se puede comprobar mediante el criterio de Burgsdorf-Yakobs. Este método modela un terreno multiestratificado

en uno homogéneo, es decir en un terreno con una única resistividad equivalente, considerando todos los parámetros de cada estrato y además considerando que el sistema de puesta a tierra a construir es de tipo malla. (Jakobs, 1970).

Se dividirá el área de la figura 89 en dos partes: el área de la parte interior al círculo rojo o zona predilecta y el área exterior o zona de descarte. En la tabla 9, los valores de resistividad y espesor de cada estrato se han considerado como el promedio de los valores pertenecientes a la interpretación del suelo como una estructura de tres estratos. (Columnas de la parte derecha en la tabla 8).

Tabla 9. Resistividad equivalente según criterio de Burgsdorf-Yakobs

	Línea de dirección N°	Parámetros promedio					Resistividad equivalente según criterio de Burgsdorf-Yakobs ( $\Omega \cdot m$ )
		$\rho_1$ ( $\Omega \cdot m$ )	$\rho_2$ ( $\Omega \cdot m$ )	$\rho_3$ ( $\Omega \cdot m$ )	h1 (m)	h2 (m)	
Zona predilecta	4	4118	4846	262	0.38	0.89	407.6
	7						
	8						
	9						
Zona de descarte	1	3516	3109	1152	0.35	0.14	1284.6
	2						
	3						
	5						
	6						
	10						

Fuente: Elaboración propia.

Para finalizar, en la segunda parte de la tabla 9, se muestra la resistencia equivalente por cada zona y se puede observar que la resistencia de la zona predilecta es sustancialmente menor a la zona de descarte, comprobando que a igualdad de condiciones geométricas de la malla (8 m<sup>2</sup>) y a una misma profundidad a la que estaría enterrada (1.5 m), la resistividad es mucho mejor. Para un mayor detalle, los datos de entrada, las fórmulas de Burgsdorf-Yakobs y su aplicación en la comprobación anterior, se encuentran en el apéndice A-7.

## Conclusiones

Un protocolo de medición de resistividad del terreno, más que un conjunto de reglas estrictas debe ser versátil ante escenarios no ideales surgidos en la práctica. Es en realidad una estrategia, y como toda estrategia, su fin es realizar algo de la mejor forma posible, basado en las buenas prácticas de normas nacionales como internacionales. El resultado de poseer un buen protocolo de medición posee un impacto positivo en la eficacia, eficiencia y confiabilidad de las medidas. Permite no sólo ahorrar tiempo y hacer una correcta interpretación de los resultados, sino también realizar los trabajos de manera segura, sin poner en riesgo a ninguna entidad ya sean personas o equipos.

La resistividad eléctrica del terreno es un parámetro que varía con una gran cantidad de factores como la concentración de sales, humedad, temperatura, compactación, tipo de sustancias presentes y en general de la composición del terreno. Esta amplia gama de factores que la alteran hace posible que sus valores se puedan usar para identificar la estructura presente en el suelo y así determinar el tipo de mineral del que está compuesto. Posee gran cantidad de aplicaciones no solamente en el desarrollo y proyectos de sistemas de puesta a tierra, sino que también es una propiedad clave en la exploración minera, petrolera y masas de agua subterráneas. Actualmente su uso se ha expandido incluso en determinar la eficiencia del riego tecnificado en cuanto a la retención de humedad se refiere.

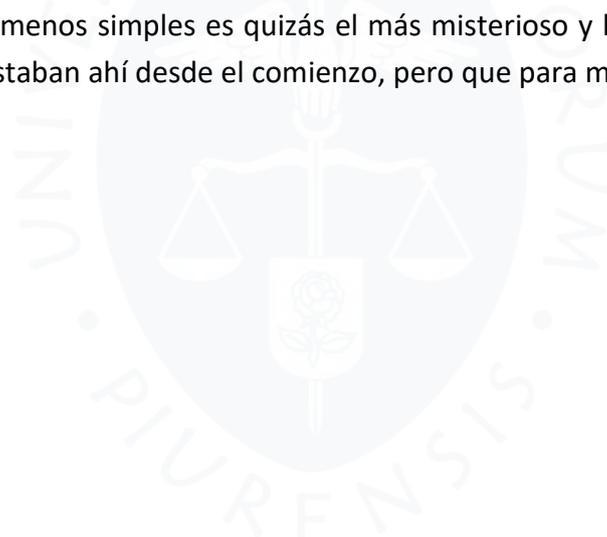
Cada fabricante de un equipo posee una serie de recomendaciones que no deben de pasar de irrelevantes al momento de realizar las mediciones. Cada uno de ellos, posee una configuración y modo de operación diferente, inclusive entre modelos distintos del mismo fabricante. Algunos entregan el valor de resistividad directamente (habiendo colocado previamente la distancia entre electrodos), más otros entregan solo el valor de resistencia, por lo que posterior a la medición, se precisa de un preanálisis para aplicar una fórmula matemática, acorde con la configuración que el fabricante emplee en su manual de usuario, para luego de ello encontrar la resistividad.

Los métodos tanto para medir la resistividad como para su posterior interpretación son muy variados en su forma. Elegir el adecuado y entender sus alcances y limitaciones es necesario para una buena aproximación. Si algo es seguro, el desarrollo del método de

interpretación por curvas patrón, revolucionó el análisis de como ver la estructura equivalente del terreno, en cuanto a estratos y constitución de este se refiere. Lo novedoso de ello fue crear a partir de métodos matemáticos, curvas adimensionales que aproximarán de buena manera el terreno. El desarrollo de los computadores no redujo el uso de las curvas patrón, sino que lo ponderó.

Durante el ejercicio de campo, se dio cuenta de cuán importante es la practica en un ingeniero como complemento del entendimiento de los principios físicos, uno no reemplaza al otro y esto lleva a la importancia de vivir con un buen balance teórico practico. En la experiencia vivida en campo realizando las mediciones, se aprenden y refuerzan los conocimientos obtenidos en el aula. Además, se lleva a la conclusión de que en cuanto al conocimiento se refiere, no sirve de nada el acumularlo si no se comparte con los demás.

Cuando se piensa en la manera en que la corriente se transmite y dispersa por el terreno, resulta imposible no cuestionarse sobre el tan efectivo método que posee la naturaleza para balancear la energía. Gracias a dicho principio es que han surgido tantos científicos que motivados por la increíble curiosidad que este fenómeno genera, los estudios acerca de la dispersión de la corriente no se han detenido desde sus inicios en el siglo pasado. El estudio de los fenómenos simples es quizás el más misterioso y bonito, porque nos hace descubrir cosas que estaban ahí desde el comienzo, pero que para muy pocos descollaron.



## Recomendaciones

Se recomienda que, para caracterizar un terreno, no basta con realizar un par de mediciones de dirección perpendicular entre ellas. En la práctica, el exceso de confianza en un ingeniero el deseo de ahorrar tiempo al medir puede ocasionar que, a causa de valores relativamente bajos de resistividad, no se realicen direcciones complementarias para caracterizar el terreno verdaderamente. Las mediciones en direcciones auxiliares son necesarias para descartar posibles variaciones laterales que podrían pasar desapercibidas con un solo par de mediciones.

Cada configuración y método posee una serie de ventajas y desventajas, y conocerlas es esencial para decidir qué tipo usar en una u otra aplicación. Sin embargo, la configuración de Wenner sigue siendo la favorita de aplicar tanto por fabricantes de equipos de medición, como ingenieros para la elaboración de proyectos relativos a sistemas de puesta a tierra. Es importante también que dentro de la configuración de Wenner existen variantes importantes sobre cómo y dónde colocar los electrodos de potencial y corriente, y que dichas variantes poseen su propia fórmula de obtención de la resistividad aparente.

El ser humano es un ente tan frágil, que resulta casi imposible pensar que con una corriente tan pequeña como 30 mA podría hacerlo fallecer a causa de una fibrilación ventricular del corazón. Esta fragilidad debería reflejar una mayor consciencia sobre el uso de dispositivos de protección en el hogar. En el Perú, la baja importancia que las personas le dan a sistemas como los de puesta a tierra, a interruptores diferenciales y termomagnéticos, hace que las tasas de accidentes e incendios mortales sean particularmente altas. Con decir simplemente que el potencial eléctrico en la carcasa de un electrodoméstico común puede matar, debería generar alarma suficiente en el público para invertir más en los sistemas de protección eléctricos y más aún, en una correcta implementación de estos.

La resistividad eléctrica es una propiedad o parámetro que es intrínseco a la materia que compone un determinado material y a las condiciones que este posea en un espacio físico. Muchas veces es confundida con la resistencia eléctrica y la principal diferencia entre ambas, es que la última, depende de las características geométricas y no solamente del material en sí. Esta diferencia es muy importante, ya que algunos equipos al momento de realizar las

mediciones pueden entregar valores de resistencia o resistividad de acuerdo con su propia configuración y modelo.

La resistividad del terreno es un valor básico en el diseño de un sistema de puesta a tierra, y su valor tiene profundas implicancias en su diseño. Es por este motivo que las mediciones deben realizarse de la mejor manera posible, siguiendo protocolos claros que comprendan desde la recolección de datos preliminares, planificación de las mediciones, ejecución y análisis posterior de las mismas. El protocolo debe estar tan preparado como para surtir soluciones a problemas relativos al proceso de medición, y debe contemplar no solamente un correcto uso del equipo, sino también reunir tanta información como se pueda acerca de diversas propiedades del terreno a evaluar como temperatura humedad, potencial de hidrogeno, compactación e incluso el último día de lluvia en la zona.



## Referencias bibliográficas

- ABB. (2011). *Sistemas de distribución y protección contra contactos indirectos y defectos a tierra*. Barcelona: ABB. Recuperado el 8 de Marzo de 2020, de <https://search.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID=1TXA007102G0701&LanguageCode=es&DocumentPartId=&Action=Launch>
- Asociación Española de Normalización y Certificación. (1997). *Efectos de la corriente sobre el hombre y los animales domésticos* (Vol. 1). Madrid, España: AENOR. Recuperado el 02 de Octubre de 2020, de <http://umh2223.edu.umh.es/wp-content/uploads/sites/188/2013/02/NORMA-UNE-EFECTOS-CORRIENTE1.pdf>
- Cartomex. (2015). *Cartomex, Soluciones geográficas para decisiones inteligentes*. Recuperado el 17 de Septiembre de 2020, de <https://www.cartomex.com/tomografia-electrica-resistiva.html>
- Casas Ospina, F. (2010). *Tierras, Soporte de la seguridad eléctrica* (Quinta ed.). (S. E. Ltda., Ed.) Bogotá D.C., Colombia: ICONTEC.
- Comisión de Reglamentos Técnicos y Comerciales-INDECOPI. (1999). *Norma Técnica Peruana*. Lima: INDECOPI.
- Dafonte, J., Raposo, J., Valcárcel, M., Fandiño, M., Martínez, E., Rey, B., & Cancela, J. (23 de Julio de 2012). *Utilización de la tomografía eléctrica resistiva para estimar el contenido de agua en el suelo en viña bajo diferentes sistemas de riego*. Recuperado el 15 de Septiembre de 2020, de [http://zonanosaturada.com/zns13/publications\\_files/1.10.pdf](http://zonanosaturada.com/zns13/publications_files/1.10.pdf)
- Dirección General de Electricidad - Ministerio de Energía y Minas. (2001). *Código Nacional de Electricidad Suministro 2001*. Lima: Ministerio de Energía y Minas.
- Dirección General de Electricidad - Ministerio de Energía y Minas. (2006). *Código Nacional de Electricidad - Utilización* (Vol. V). Lima: Ministerio de Energía y Minas.
- Dobrin, M. B. (1975). *Introducción a la prospección geofísica*. Barcelona: Omega S.A.
- García Márquez, R. (1999). *Puesta a tierra de instalaciones eléctricas*. México, D. F. : Alfaomega

- Halliday, D., Resnick, R., & S. Krane, K. (1994). *Física* (Tercera ed., Vol. II). Ciudad de México: Compañía Editorial Continental, S.A. de C.V.
- Henriquez Santana, D. (2010). *Estudio y diseño de malla a tierra BT y MT*. Santiago de Chile: Dhs Ingeniería.
- Hernández Lucendo, M. (1984). *Interpretación automática de sondeos eléctricos verticales*. Madrid: María del Carmen Hernández Lucendo. Recuperado el 19 de Mayo de 2020, de <https://eprints.ucm.es/53079/1/5309866057.pdf>
- Jakobs, A. I. (1970). *Reduction of Multi-layer Electric Estructures of Earth to Two layer Structure Equivalent in Designing Complex Earthing Systems*. Moscú: All-Union Research Institute of Agricultural Electrification.
- Keith Switzer, W. (1999). *Practical guide to electrical grounding*. Solon: Erico Inc. Obtenido de <https://es.scribd.com/document/19065235/Practical-Guide-to-Electrical-Grounding-1st-Edition-1999>
- Lorena Orrego, K., & Tabares Sanchez, L. M. (2007). *Análisis de la metodología box cox para medir la resistividad del terreno*. Pereira: Universidad Tecnológica de Pereira.
- Manilla Aceves, A. (2003). *Geofísica aplicada en los proyectos básicos de ingeniería civil*. Sanfandila: Instituto Mexicano del Transporte. Recuperado el 16 de Julio de 2020, de <https://www.imt.mx/archivos/Publicaciones/PublicacionTecnica/pt229.pdf>
- Martínez Lozano, M. (2012). *Metodología basada en redes neurales para interpretación de la resistividad del suelo en zonas urbanas*. Caracas: Miguel Martínez Lozano.
- Megabras Ind. Eletrônica Ltda. (2015). *EM4058 Terrômetro digital microprocessado Manual de uso*. São Paulo: Megabras. Recuperado el 11 de Noviembre de 2020, de [https://drive.google.com/drive/folders/12QCXP6SNC7ae8-zlZFxcw82iDWJCZPb\\_?usp=sharing](https://drive.google.com/drive/folders/12QCXP6SNC7ae8-zlZFxcw82iDWJCZPb_?usp=sharing)
- Megabras Ind. Eletrônica Ltda. (10 de Marzo de 2020). *Megabras*. Recuperado el 18 de Abril de 2020, de <https://www.megabras.com/es/get.php?file=EM4058.pdf>
- Megger. (2005). *Getting Down to earth*. Dallas: Megger. Obtenido de <https://es.scribd.com/doc/40504111/Earth-Resistance-Testing>
- Morales Osorio, N. (1999a). *Mallas de tierra*. Santiago de Chile: Procobre. Recuperado el 22 de Marzo de 2020, de [Academia.edu: https://www.academia.edu/25780493/MALLAS\\_DEE\\_TIERRA](https://www.academia.edu/25780493/MALLAS_DEE_TIERRA)
- Morales Osorio, N. (1999b). *Sistemas de puesta a tierra* (Primera ed.). Santiago de Chile, Chile: ProCobre. Recuperado el 27 de Agosto de 2018, de <https://www.yumpu.com/es/document/view/14851259/puesta-a-tierra-procobre>
- Moscow State University. (2000). *IPI2Win Guía de usuario*. Moscú: Geoscan-M Ltd.

- Orellana, E. (1972). *Prospección Geoeléctrica en corriente continua*. Madrid: Paraninfo S.A.
- Ortuondo, P. (1997). *Manual para el proyecto y análisis de puestas a tierra*. Santiago de Chile, Chile: Imprenta América. Obtenido de <https://www.scribd.com/document/74622061/Manual-Resistividad-Cap7>
- Osinergmin Orienta. (11 de Diciembre de 2014). *Resistividad del terreno*. Recuperado el 30 de Octubre de 2018, de Osinergmin Orienta: <http://www.osinergminorienta.gob.pe/documents/54705/340006/capitulo+7.pdf>
- Paniukov, P. N. (1981). *Geología aplicada a la ingeniería*. Moscú: MIR.
- Preciado Cortijo, L. (21 de Noviembre de 2016). Zona experimental Universidad de Piura - Campus Piura. Piura, Piura, Perú. Recuperado el 21 de Noviembre de 2020, de [https://drive.google.com/file/d/1iBiKAJHfzRj6sYxrQBhIMsh8DghA\\_S8y/view?usp=sharing](https://drive.google.com/file/d/1iBiKAJHfzRj6sYxrQBhIMsh8DghA_S8y/view?usp=sharing)
- Ramírez Castaño, J. S., & Cano Plata, E. A. (2010). *Sistemas de Puesta a Tierra: Diseñado con IEEE-80 y evaluado con MEF*. Manizales: Blanecolor Ltda.
- Rojas, G. (2007). *Manual de sistemas de puesta a tierra*. Caracas: Gedisa. Recuperado el 5 de septiembre de 2018, de [http://www.gedisa.com.ve/recientes\\_aun/catalogos/electricos/libreria\\_gediweld/libreria/00%20MANUAL%20GEDIWELD%202007%20COMPLETO%20B.pdf](http://www.gedisa.com.ve/recientes_aun/catalogos/electricos/libreria_gediweld/libreria/00%20MANUAL%20GEDIWELD%202007%20COMPLETO%20B.pdf)
- RPP Noticias. (11 de octubre de 2017). *RPP*. Recuperado el 10 de septiembre de 2020, de <https://rpp.pe/seamos-peruanos-de-calidad/cuales-son-las-principales-causas-de-fallas-electricas-en-el-hogar-es-posible-reducir-la-posibilidad-de-accidentes-noticia-1081978>
- Sunde, E. (1949). *Earth Conduction Effects In Transmission Systems*. New York: Dover Publications, Inc. Recuperado el 5 de Agosto de 2020, de <https://es.scribd.com/document/362238104/Earth-Conduction-Effects-in-Transmission-Systems-Sunde>
- Sweet Stein, F. J. (2015). *Software para la determinación de configuración geoeléctrica y análisis de mallas de tierra en terrenos estratificados*. Santiago de Chile: Universidad de Chile. Recuperado el 20 de Noviembre de 2020, de <http://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/132648/Software-para-la-determinacion-de-configuracion-geolectrica-y-analisis....pdf;sequence=1>
- The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc. (1983). *IEEE Guide for measuring earth resistivity, ground impedance and earth surface potentials of a ground system*. New York: IEEE. Recuperado el 12 de agosto de 2018, de [http://ground.co.kr/board/downfile.php?board\\_id=pds\\_tec&sfloat=7300&PHPSESSID=319e3bad60ada4a34a9e0db3f180b192](http://ground.co.kr/board/downfile.php?board_id=pds_tec&sfloat=7300&PHPSESSID=319e3bad60ada4a34a9e0db3f180b192)



## Apéndices







## Apéndice A-2

Título:	Medición de resistividad en zona experimental - UDEP	Código del formato:	RT-CP-00001
Datos generales		Características del suelo	
<b>Fecha de medición:</b> 21/11/2018 <b>Hora:</b> 8 am <b>Empresa:</b> - <b>Ubicación:</b> -5.1706953, -80.6379630 <b>Localidad:</b> Piura-Piura-Piura-Perú		<b>Forma / Color de terreno:</b> Plana/Pardo claro <b>Flora/edificios aledaños:</b> Sí, no abundante/Sí (a 20 m) <b>Último día de lluvia:</b> 16/11/2018 <b>Temperatura:</b> 23.5°C <b>Humedad:</b> 68%	
Información del equipo de medición		Accesorios de medición	
<b>Marca y modelo:</b> Megabras EM-4058 <b>Frecuencia de medida:</b> 270 Hz <b>Configuración:</b> Cuatro puntos, Wenner Alfa.		<b>Electrodos/Cables:</b> 4 electrodos alma de acero recubiertos con cobre, dos cables de 5m y dos de 20m <b>Otros:</b> Cinta metrica 50 m, comba de goma	
Datos adicionales / Observaciones		Referencia	
<p>Los dos grupos de mediciones de la presente ficha, corresponden a las líneas 1 y 2, planteadas en el apartado 4.2.3 (Definición de las direcciones de medición).</p>			
Sentido/Dirección de la medición	Separación "a" entre los electrodos (m)	Resistividad aparente ( $\Omega \cdot m$ )	
N 68° W	1	386	
	2	714	
	4	678	
	8	2150	
Sentido/Dirección de la medición	Separación "a" entre los electrodos (m)	Resistividad aparente ( $\Omega \cdot m$ )	
N 21° E	1	1587	
	2	1018	
	4	478	
	8	3260	

## Apéndice A-3

<b>Título:</b>	<b>Medición de resistividad en zona experimental - UDEP</b>	<b>Código del formato:</b>	<b>RT-CP-00002</b>
<b>Datos generales</b>		<b>Características del suelo</b>	
<b>Fecha de medición:</b> 21/11/2018 <b>Hora:</b> 8 am <b>Empresa:</b> - <b>Ubicación:</b> -5.1706953, -80.6379630 <b>Localidad:</b> Piura-Piura-Piura-Perú		<b>Forma / Color de terreno:</b> Plana/Pardo claro <b>Flora/edificios aledaños:</b> Sí, no abundante/Sí (a 20 m) <b>Último día de lluvia:</b> 16/11/2018 <b>Temperatura:</b> 23.7°C <b>Humedad:</b> 66%	
<b>Información del equipo de medición</b>		<b>Accesorios de medición</b>	
<b>Marca y modelo:</b> Megabras EM-4058 <b>Frecuencia de medida:</b> 270 Hz <b>Configuración:</b> Cuatro puntos, Wenner Alfa.		<b>Electrodos/Cables:</b> 4 electrodos alma de acero recubiertos con cobre, dos cables de 5m y dos de 20m <b>Otros:</b> Cinta metrica 50 m, comba de goma	

<b>Datos adicionales / Observaciones</b>	<b>Referencia</b>
Los dos grupos de mediciones de la presente ficha, corresponden a las líneas 3 y 4, planteadas en el apartado 4.2.3 (Definición de las direcciones de medición).	

Sentido/Dirección de la medición	Separación "a" entre los electrodos (m)	Resistividad aparente ( $\Omega \cdot m$ )
N 21° E	1	1074
	2	723
	4	1857
	8	645

Sentido/Dirección de la medición	Separación "a" entre los electrodos (m)	Resistividad aparente ( $\Omega \cdot m$ )
N 21° E	1	1616
	2	681
	4	18.01
	8	1100

## Apéndice A-4

<b>Título:</b>	<b>Medición de resistividad en zona experimental - UDEP</b>	<b>Código del formato:</b>	<b>RT-CP-00003</b>
<b>Datos generales</b>		<b>Características del suelo</b>	
<b>Fecha de medición:</b> 21/11/2018 <b>Hora:</b> 8 am <b>Empresa:</b> - <b>Ubicación:</b> -5.1706953, -80.6379630 <b>Localidad:</b> Piura-Piura-Piura-Perú		<b>Forma / Color de terreno:</b> Plana/Pardo claro <b>Flora/edificios aledaños:</b> Sí, no abundante/Sí (a 20 m) <b>Último día de lluvia:</b> 16/11/2018 <b>Temperatura:</b> 23.6°C <b>Humedad:</b> 68%	
<b>Información del equipo de medición</b>		<b>Accesorios de medición</b>	
<b>Marca y modelo:</b> Megabras EM-4058 <b>Frecuencia de medida:</b> 270 Hz <b>Configuración:</b> Cuatro puntos, Wenner Alfa.		<b>Electrodos/Cables:</b> 4 electrodos alma de acero recubiertos con cobre, dos cables de 5m y dos de 20m <b>Otros:</b> Cinta metrica 50 m, comba de goma	

<b>Datos adicionales / Observaciones</b>	<b>Referencia</b>
<p>Los dos grupos de mediciones de la presente ficha, corresponden a las líneas 5 y 6, planteadas en el apartado 4.2.3 (Definición de las direcciones de medición).</p>	

Sentido/Dirección de la medición	Separación "a" entre los electrodos (m)	Resistividad aparente ( $\Omega \cdot m$ )
N 68° W	1	1116
	2	964
	4	877
	8	1277

Sentido/Dirección de la medición	Separación "a" entre los electrodos (m)	Resistividad aparente ( $\Omega \cdot m$ )
N 38° W	1	621
	2	842
	4	1262
	8	1092

## Apéndice A-5

<b>Título:</b>	<b>Medición de resistividad en zona experimental - UDEP</b>	<b>Código del formato:</b>	<b>RT-CP-00004</b>
<b>Datos generales</b>		<b>Características del suelo</b>	
<b>Fecha de medición:</b> 21/11/2018 <b>Hora:</b> 8 am <b>Empresa:</b> - <b>Ubicación:</b> -5.1706953, -80.6379630 <b>Localidad:</b> Piura-Piura-Piura-Perú		<b>Forma / Color de terreno:</b> Plana/Pardo claro <b>Flora/edificios aledaños:</b> Sí, no abundante/Sí (a 20 m) <b>Último día de lluvia:</b> 16/11/2018 <b>Temperatura:</b> 23.1°C <b>Humedad:</b> 69%	
<b>Información del equipo de medición</b>		<b>Accesorios de medición</b>	
<b>Marca y modelo:</b> Megabras EM-4058 <b>Frecuencia de medida:</b> 270 Hz <b>Configuración:</b> Cuatro puntos, Wenner Alfa.		<b>Electrodos/Cables:</b> 4 electrodos alma de acero recubiertos con cobre, dos cables de 5m y dos de 20m <b>Otros:</b> Cinta metrica 50 m, comba de goma	

<b>Datos adicionales / Observaciones</b>	<b>Referencia</b>
Los dos grupos de mediciones de la presente ficha, corresponden a las líneas 7 y 8, planteadas en el apartado 4.2.3 (Definición de las direcciones de medición).	

Sentido/Dirección de la medición	Separación "a" entre los electrodos (m)	Resistividad aparente ( $\Omega \cdot m$ )
N 21° E	1	1300
	2	792
	4	431
	8	680

Sentido/Dirección de la medición	Separación "a" entre los electrodos (m)	Resistividad aparente ( $\Omega \cdot m$ )
N 21° E	1	747
	2	452
	4	423
	8	991

## Apéndice A-6

<b>Título:</b>	<b>Medición de resistividad en zona experimental - UDEP</b>	<b>Código del formato:</b>	<b>RT-CP-00005</b>
<b>Datos generales</b>		<b>Características del suelo</b>	
<b>Fecha de medición:</b> 21/11/2018 <b>Hora:</b> 8 am <b>Empresa:</b> - <b>Ubicación:</b> -5.1706953, -80.6379630 <b>Localidad:</b> Piura-Piura-Piura-Perú		<b>Forma / Color de terreno:</b> Plana/Pardo claro <b>Flora/edificios aledaños:</b> Sí, no abundante/Sí (a 20 m) <b>Último día de lluvia:</b> 16/11/2018 <b>Temperatura:</b> 22.2°C <b>Humedad:</b> 74%	
<b>Información del equipo de medición</b>		<b>Accesorios de medición</b>	
<b>Marca y modelo:</b> Megabras EM-4058 <b>Frecuencia de medida:</b> 270 Hz <b>Configuración:</b> Cuatro puntos, Wenner Alfa.		<b>Electrodos/Cables:</b> 4 electrodos alma de acero recubiertos con cobre, dos cables de 5m y dos de 20m <b>Otros:</b> Cinta metrica 50 m, comba de goma	

<b>Datos adicionales / Observaciones</b>	<b>Referencia</b>
Los dos grupos de mediciones de la presente ficha, corresponden a las líneas 9 y 10, planteadas en el apartado 4.2.3 (Definición de las direcciones de medición).	

Sentido/Dirección de la medición	Separación "a" entre los electrodos (m)	Resistividad aparente ( $\Omega \cdot m$ )
N 58° E	1	2090
	2	1267
	4	814
	8	180.8

Sentido/Dirección de la medición	Separación "a" entre los electrodos (m)	Resistividad aparente ( $\Omega \cdot m$ )
N 68° W	1	2860
	2	1153
	4	1001
	8	-

**Apéndice A-7**

*Fórmulas de Burgsdorf -Yakobs:*

$$r = \sqrt{\frac{S}{\pi}}$$

$$r_0 = \sqrt{r^2 - h_e^2}$$

$$q = \sqrt{2 * r * (r + h_e^2)}$$

$$v_i = \sqrt{0.5 * [q^2 + h_i^2 + r_0^2 - \sqrt{(q^2 + h_i^2 + r_0^2)^2 - (4 * q^2 * r_0^2)}]}$$

$$F_i = \sqrt{1 - \left(\frac{v_i}{r_0}\right)^2}$$

$$\rho_{eq \ 3 \ capas} = \frac{F_3}{\frac{F_1 - F_0}{\rho_1} + \frac{F_2 - F_1}{\rho_2} + \frac{F_3 - F_2}{\rho_3}}$$

$$F_0 = 0$$

Donde:

- r = Variable auxiliar, adimensional
- S = Superficie de malla (m<sup>2</sup>)
- r<sub>0</sub> = Variable auxiliar adimensional
- h<sub>e</sub> = Profundidad de enterramiento de puesta a tierra
- q = Variable auxiliar adimensional
- h<sub>i</sub> = Profundidad de capa i (m); no confundir con espesor de capa
- v<sub>i</sub> = Variable auxiliar adimensional
- F<sub>i</sub> = Variables auxiliares adimensionales
- F<sub>0</sub> = Variable auxiliar de valor 0.
- ρ<sub>1</sub>, ρ<sub>2</sub>, ρ<sub>3</sub> = Resistividades de cada estrato
- ρ<sub>eq 3 capas</sub> = Resistividad equivalente para suelo de 3 capas

**Aplicación:**

Parámetros para cálculo ρ eq según Burgsdorf-Yakobs											
Región	S	r	he	r0	q	v1	v2	v3	F1	F2	F3
1	8.00	1.60	1.50	0.54	3.14	0.54	0.50	0.00	0.12	0.38	1.00
2	8.00	1.60	1.50	0.54	3.14	0.54	0.54	0.00	0.11	0.16	1.00

Expresiones									
h'1	h'2	h'3	qh'1r0	qh'2r0	qh'3r0	qh'1r0	qh'2r0	qh'3r0	4*q2*r02
0.38	1.27	1E+18	10.32	11.79	1E+36	106.53	139.00	1E+72	11.72
0.35	0.49	1E+18	10.30	10.42	1E+36	106.07	108.51	1E+72	11.72

v1)2	v2)2	v3)2
0.2921	0.254	0
0.2927	0.289	0

F1- F0/P1	F2- F1/P2	F3- F2/P3	SUMA FS
3E-05	5E-05	0.002	0.0025
3E-05	1E-05	7E-04	0.0008

ρ eq (Ω·m)
407.6
1285

ρ1	ρ2	ρ3
4118	4846	262
3516	3109	1152

Apéndice A-8



SCAN ME

