



**UNIVERSIDAD CENTRAL "MARTA ABREU" DE LAS VILLAS**  
**VERITATE SOLA NOBIS IMPONETUR VIRILIS TOGA. 1948**

**Facultad de Ingeniería Eléctrica**

**Departamento de Electroenergética**

## **TRABAJO DE DIPLOMA**

### **Interpretación de Mediciones de Resistividad Aparente**

**Autor: Yeilán Cabrera Lorenzo.**

**Tutor: Dr Ángel Valcárcel Rojas.**

**Santa Clara**

**2009**

**"Año del 50 aniversario del triunfo de La Revolución."**



**Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas**

**Facultad de Ingeniería Eléctrica**

**Departamento de Electroenergética**



## **TRABAJO DE DIPLOMA**

### **Interpretación de Mediciones de Resistividad Aparente.**

**Autor: Yeilán Cabrera Lorenzo.**

**e-mail: [ycabrera@uclv.edu.cu](mailto:ycabrera@uclv.edu.cu)**

**Teléfono: 0141-66-3806**

**Tutor: Dr Ángel Valcárcel Rojas.**

**e-mail: [valca@uclv.edu.cu](mailto:valca@uclv.edu.cu)**

**Santa Clara**

**2009**

**"Año del 50 aniversario del triunfo de La Revolución."**

Hago constar que el presente trabajo de diploma fue realizado en la Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas como parte de la culminación de estudios de la especialidad de Ingeniería Eléctrica, autorizando a que el mismo sea utilizado por la Institución, para los fines que estime conveniente, tanto de forma parcial como total y que además no podrá ser presentado en eventos, ni publicados sin autorización de la Universidad.

---

Firma del Autor

Los abajo firmantes certificamos que el presente trabajo ha sido realizado según acuerdo de la dirección de nuestro centro y el mismo cumple con los requisitos que debe tener un trabajo de esta envergadura referido a la temática señalada.

---

Firma del Autor

---

Firma del Jefe de Departamento  
donde se defiende el trabajo

---

Firma del Responsable de  
Información Científico-Técnica

## **PENSAMIENTO**

**"La sabiduría consiste en saber cuál es el siguiente paso; la virtud, en llevarlo a cabo."**

**David Starr Jordan**

## DEDICATORIA

Dedico este triunfo a todas las personas que han hecho posible la realización de este trabajo, en especial a mi padre por ser mi guía durante toda una vida y en especial en estos cinco años que llevo en la universidad, a mi madre por esa persona que a todos nos hace falta cuando nadie más esta para darte un consejo o una ayuda que ella y solo ella puede darnos y junto a mi familia ayudarme en todo lo que ha podido hasta hoy espero algún día poder pagárselo con la misma gracia con que ella me ha ayudado, a mis hermanos por compartir conmigo cada momento de sus vidas donde yo he podido estar y ser de tanta ayuda para mí en especial los que más están lejos como Ray que aunque escogió su camino hace mucho tiempo nunca se olvida de nosotros y lo llevo en mi corazón a cada paso que doy por la vida, a mis abuelos que aunque conocí a dos de ellos nada mas por desgracia de la vida hoy puedo festejar con uno solo pero ella sabe bien que este regalo es de ella también por haber rezado por mí todos los días mientras vivió en esta vida, a Estela le doy las gracias por haber tenido a un abuela como ella y no por ultimo menos importante a una persona que a lo largo de los años se ha sabido ganar mi confianza cariño y por sobre todo mis respetos porque ha sabido ser el tío que dios no me dio, el primo que no tuve, el hermano que por desgracia no tuve en los momentos clave de mi vida para darme un consejo o compartir conmigo en ciertos momento de tristeza y de alegría y por quererme tanto como el hijo varón que todavía no ha tenido esa persona no lleva nombre porque todos saben bien de quien estoy hablando dame un abrazo que me lo merezco coño.

## **AGRADECIMIENTOS**

Agradezco este trabajo a mis padres, en especial a mi tutor Ángel Valcárcel Rojas y a la tropa.

## TAREA TÉCNICA

Para el desarrollo de este trabajo se plantearon las siguientes tareas:

- 1- Realizar una búsqueda bibliográfica acerca de la interpretación de curvas de mediciones de resistividad aparente.
  
- 2- Obtener una metodología de interpretación para terrenos formados por dos estratos.
  
- 3- Demostrar las ventajas del diseño de mallas de tierra considerando la estratificación del terreno.

---

Firma del Autor

---

Firma del Tutor

## RESUMEN

Los sistemas de puesta a tierra, contribuyen de forma importante a la protección y el buen funcionamiento de los sistemas de energía eléctrica. La red de puesta a tierra tiene la función de garantizar una referencia de potencial y permitir la circulación de corrientes no equilibradas. Prácticamente todos los equipos eléctricos y electrónicos necesitan estar conectados a una red de tierra.

La consideración de la no uniformidad de los terrenos en los que instalan los sistemas de puesta a tierra a la hora de hacer un diseño, garantizan un acercamiento a la realidad que garantiza un mayor exactitud en los cálculos y por lo tanto la posibilidad de hacer un diseño óptimo y absolutamente confiable.

Cuando se hacen mediciones de resistividad es posible obtener lo que se conoce como sondeo eléctrico, o sea un estudio en profundidad del terreno. Con una buena interpretación de esas mediciones se puede conocer la resistividad de los diferentes estratos y sus respectivos espesores.

En este trabajo se desarrollo una metodología de interpretación de curvas de resistividad, para terrenos de dos estratos.

Para la validación del trabajo se dispuso de cinco juegos de mediciones de resistividad aparente, obtenidos por los dos métodos más usados internacionalmente para la medición de resistividad, el método de Wenner y el de de Schlumberger.

## TABLA DE CONTENIDOS

PENSAMIENTO .....	i
DEDICATORIA .....	ii
AGRADECIMIENTOS .....	iii
TAREA TÉCNICA .....	iv
RESUMEN .....	v
INTRODUCCIÓN .....	1
ORGANIZACIÓN DEL INFORME .....	2
Capítulo 1: MEDICIÓN DE LA RESISTIVIDAD DE SUELOS .....	3
1.1    Definición de resistividad .....	3
1.2    Conducción eléctrica en suelos .....	3
1.2.1    Tipos de suelos .....	4
1.2.2    Influencia de la humedad de los suelos .....	5
1.2.3    Resistividad de las aguas naturales .....	9
1.2.4    Influencia de la temperatura de los suelos .....	9
1.2.5    Influencia de la compacidad de los suelos .....	10
1.3    Medición de la resistividad .....	11
1.3.1    Teoría general .....	12
1.3.2    Fuente de alimentación para la medición .....	15
1.3.3    Medición de la resistividad en terrenos no-homogéneos .....	16
1.3.4    Configuraciones de electrodos .....	17
1.3.4.1    Configuración de Wenner .....	17

1.3.4.2 Configuración de Schlumberger .....	18
1.3.4.3 Configuración azimutal .....	20
1.3.5 Comparación entre configuraciones .....	21
1.3.5.1 Características de la configuración de Wenner .....	22
1.3.5.2 Características de la configuración de Schlumberger.....	23
1.4 Formas de medición de la resistividad.....	23
1.4.1 Perfil eléctrico o calicata.....	23
1.4.2 Sondeo eléctrico.....	26
<b>CAPÍTULO 2. REALIZACIÓN DE LAS MEDICIONES .....</b>	<b>28</b>
2.1 Planificación de las mediciones.....	28
2.1.1 Programación del trabajo de terreno .....	30
2.1.1.1 Consideraciones sobre el circuito de corriente .....	30
2.1.1.2 Consideraciones sobre el circuito de potencial.....	33
2.1.1.3 Elección del lugar de medición.....	34
2.1.1.4 Pendientes del terreno.....	34
2.1.1.5 Mediciones de temperatura, humedad y acidez .....	36
2.1.1.6 Ubicación de los puntos de medición .....	37
2.1.2 Recomendaciones para la ejecución de la medición.....	38
2.1.3 Comprobaciones durante las mediciones.....	41
2.2 Interpretación de las medidas de resistividad .....	43
2.2.1 Métodos empíricos de interpretación.....	44
2.2.1.1 Método de la resistividad media .....	44
2.2.1.2 Método de los puntos de inflexión.....	45
2.2.2 Métodos científicos de interpretación de las mediciones .....	45

2.2.2.1 Aspectos básicos .....	46
2.2.2.2 Resistividad aparente .....	50
2.2.3 Interpretación mediante curvas patrón.....	52
2.2.3.1 Clasificación de las curvas patrón .....	53
2.2.3.3 Interpretación de estructuras de 2 capas. ....	54
2.2.4 Métodos cuantitativos de interpretación .....	56
CAPÍTULO 3. RESULTADOS .....	60
3.1 Ejemplos de mediciones realizadas con el método de Wenner. ....	60
3.2 Ejemplos de mediciones realizadas con el método de Schlumberger. ....	75
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	86
Conclusiones .....	86
Recomendaciones .....	86
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	87

## INTRODUCCIÓN

El conocimiento de las resistividades o resistencias específicas de un terreno es esencial en el proyecto y análisis de puestas a tierra, pues influye proporcionalmente en los valores de resistencia y en las solicitaciones de voltaje que pueden aparecer en una instalación. Otras características tales como sus propiedades magnéticas o dieléctricas pueden requerirse en situaciones particulares.

La resistividad de los suelos normales varía dentro de un amplio rango que puede alcanzar relaciones de 1 a 100 o incluso 1 a 1.000. Por tanto, es necesario conocer para cada situación particular el valor real de la resistividad del terreno que corresponde, de manera de no subdimensionar la puesta a tierra, con los consecuentes riesgos para las personas y equipos; o sobredimensionarla, con costos mayores que los necesarios.

Lo normal es que los terrenos estén configurados por diferentes estratos de minerales ubicados aproximadamente paralelos a la superficie del suelo. El objetivo de la medición de resistividad en la zona donde se construirá una puesta a tierra, es determinar esta propiedad para cada uno de los estratos presentes y su espesor medio, hasta una cierta profundidad de interés. Esta profundidad depende principalmente del tamaño de la puesta a tierra que se desea construir. Se utiliza para determinar estos parámetros, un tipo de medición en profundidad denominado *sondeo eléctrico*.

El sondeo es la forma más frecuentemente utilizada de medición de resistividad. Sin embargo, en algunos casos puede ser necesario, como un complemento al sondeo, realizar mediciones que persiguen determinar anomalías laterales de los terrenos y, por tanto, de la resistividad. Este tipo de medición se denomina *perfil eléctrico*. Una vez conocida la estructura del terreno: número de estratos, sus espesores y resistividades, se debe determinar, con algún criterio válido para fines prácticos, la o las resistividades equivalentes del conjunto según el modelo empleado.

La casi totalidad de los métodos utilizados en las mediciones de resistividad y en su interpretación, se fundamentan en las técnicas geofísicas de investigación de suelos desarrolladas para otros fines; en particular para prospección petrolera, detección de aguas subterráneas, minerales, carbón, etc. A diferencia de lo requerido en estos tipos de investigaciones, para los fines del proyecto de una puesta a tierra sólo se busca conocer los valores de resistividad de los estratos o anomalías, y su ubicación y espesor, sin que interese

en la mayoría de los casos, determinar el mineral de que se trata. Sin embargo, un conocimiento somero general de los tipos de minerales que conforman los suelos y de sus propiedades básicas, puede ser de utilidad para ayudar y mejorar la interpretación de las medidas y conocer su comportamiento ante las variaciones climáticas.

Las medidas de resistividad deben hacerse obviamente en sitio; de este modo es posible investigar en profundidad el terreno, sin alterar su condición natural: compactibilidad, humedad, etc. Sin embargo, si por otros motivos se dispone de datos de resistividad y espesores de los estratos, provenientes, por ejemplo, de sondeos mecánicos, éstos pueden ser útiles para complementar la interpretación. Sondeos mecánicos podrían ser la única forma para conocer las características eléctricas de un terreno. Tal es el caso de zonas donde lo reducido del espacio libre no permite la medición en suficiente profundidad, o donde la presencia de estructuras metálicas enterradas, impide las mediciones o las altera fuertemente.

## **ORGANIZACIÓN DEL INFORME**

Este trabajo consta con una introducción que trata sobre los métodos de interpretación de la resistividad, la configuración de los diferentes estratos y las formas de realizar las mediciones. Un primer capítulo que trata sobre las distintas configuraciones de electrodos para la medición de resistividad (Wenner, Schlumberger), los tipos de suelos y sus características eléctricas. El capítulo dos muestra la planificación y programación del trabajo, el análisis matemático para obtener las ecuaciones de las configuraciones. En el tercer capítulo aparecen los resultados obtenidos mediante el programa SistPETx.

## Capítulo 1: MEDICIÓN DE LA RESISTIVIDAD DE SUELOS

### 1.1 Definición de resistividad

La resistividad o resistencia específica de un material se define como la resistencia en corriente continúa entre las caras paralelas opuestas de una porción de éste, de longitud unitaria y sección unitaria uniforme, por ejemplo, un cubo de dimensión unitaria. En el sistema de unidades MKS, que es el usado en este manual y el utilizado actualmente en ciencia y tecnología, la resistividad se expresa dimensionalmente en forma simplificada en  $\text{ohm}\cdot\text{m}^2/\text{m}$ , lo que es equivalente a  $\text{ohm}\cdot\text{m}$  (ohm por metro u ohm metro). En la práctica, por razones de legibilidad se acostumbra insertar un guión entre las unidades, escribiendo la dimensión como  $\text{ohm}\cdot\text{m}$ , u  $\Omega\cdot\text{m}$ . En la literatura atinente, sobre todo la más antigua, puede encontrarse unidades de resistividad tales como  $\text{ohm}\cdot\text{cm}$ ,  $\text{ohm}\cdot\text{pulgada}$ , etc., las que son dimensionalmente correctas, pero que no corresponden al sistema MKS y han caído en desuso. También suele encontrarse, aunque afortunadamente cada vez menos, unidades tales como  $\text{ohm}/\text{m}$ ,  $\text{ohm}/\text{m}^3$  u ohm por  $\text{m}^3$ . Todas estas últimas son dimensionalmente incorrectas y no deben usarse.

La definición de resistividad se especifica para corriente continua; sin embargo, en la práctica, para la medición en sitio o en muestras en laboratorio, se utiliza normalmente corriente alterna o corriente continua conmutada, con el objeto de evitar problemas por polarización de los electrodos de medición, sobre todo con voltajes bajos. La medición con corriente alterna de hasta unos 100 Hz, no implica normalmente errores importantes en los valores obtenidos debido a efectos capacitivos en el terreno o muestra, o inductivos entre los circuitos de medición en campo. En la sección 1.3, al analizar los aspectos básicos de la medición de resistividades de suelos, se determinan los errores cometidos al utilizar corrientes alternas de diferentes frecuencias para las dos configuraciones de electrodos más empleadas.

### 1.2 Conducción eléctrica en suelos

La mayoría de los minerales que conforman los suelos (arenas, arcillas, rocas, etc.) son, de por sí solos, muy malos conductores de la electricidad. Sin embargo, cuando se les

adiciona agua, su resistividad disminuye considerablemente y pueden considerarse como conductores aceptables, aunque muy pobres en comparación con los conductores metálicos clásicos. Así por ejemplo, la resistividad del cobre es de aproximadamente  $1,6 \times 10^{-8}$  W-m, mientras que la resistividad media de un terreno normal es del orden de 100 W-m [2]. Esta fuerte influencia de la humedad en la resistividad de los minerales se debe a que, para la mayoría de ellos, la conducción eléctrica es mixta con enlaces covalentes e iónicos, siendo estos últimos los más importantes. El proceso de conducción eléctrica es, entonces, en mayor medida de carácter electroquímico, donde los portadores de las cargas eléctricas son los iones disueltos en el agua atrapada. En algunos pocos minerales la conducción se debe a su contenido de metales, siendo los electrones los portadores principales de las cargas eléctricas [3, 4]. De este modo, la resistividad de un suelo depende en gran medida de la cantidad de agua atrapada, de la resistividad de esta agua y de otras características particulares del suelo. Se consideran importantes en determinar la resistividad, las siguientes propiedades del suelo [2]:

- Tipos de minerales que lo conforman
- Contenido de humedad
- Composición química y concentración de las sales disueltas en el agua
- Temperatura
- Granulometría del material que lo conforma
- Compactibilidad

### **1.2.1 Tipos de suelos**

Es difícil hacer una clasificación rigurosa de los tipos de suelos, debido a la gran variedad de minerales que los forman. Así, dos suelos que presentan una apariencia muy similar, pueden tener resistividades muy diferentes. Es frecuente encontrar en la literatura, tablas que clasifican variedades de suelos y sus resistividades típicas, a modo sólo informativo. Es necesario tener presente que estas clasificaciones son un tanto arbitrarias y que los valores indicados están fuertemente influidos por las características geológicas particulares del país de donde proceden.

En una primera clasificación muy simple de los suelos, puede decirse que gran parte de éstos están formados por distintas mezclas de arenas, arcillas, gravas y rocas. Dependiendo

de la cantidad de agua contenida por los diferentes minerales y de las características de estas aguas, la resistividad del suelo puede variar dentro de rangos muy amplios. La Tabla 1.1, extraída de [2], indica rangos de resistividad para una clasificación gruesa de algunos tipos de suelos.

**Tabla 1.1 Valores de resistividad para una clasificación simple de suelos.**

Tipo de suelo	Resistividad ( $\Omega$ -m)
Barros, terrenos vegetales	5 - 50
Arcillas	8 - 50
Mezclas de arenas y arcillas	40 - 250
Mezclas de arenas y gravas	60 - 100
Pizarras, rocas areniscas	10 - 500
Rocas cristalinas	200 - 10.000

### 1.2.2 Influencia de la humedad de los suelos

Se ha mencionado antes que el contenido de agua en los minerales es el factor más importante en determinar la resistividad de los suelos. Para una cierta región geográfica, el contenido de humedad del suelo, depende de sus características climáticas. Si se trata de una zona desértica con precipitaciones escasas, el contenido de agua en los minerales es reducido y las resistividades muy altas, tanto en los estratos superiores como en el lecho de roca. Por otro lado, en zonas con precipitaciones anuales normales, la resistividad de los estratos inferiores es relativamente baja en promedio, manteniéndose dentro de un margen más o menos estrecho. Sin embargo, la resistividad de los estratos superiores suele variar mucho en las distintas estaciones del año, dependiendo del tipo de mineral predominante. Así por ejemplo, las arcillas tienen una mayor capacidad que las arenas y gravas para retener el agua, y su resistividad varía comparativamente menos en las distintas épocas del año.

Otro aspecto que influye en la variación estacional de los estratos superiores del terreno, es la presencia y altura de la napa de agua subterránea; si la napa es alta, la resistividad es menos variable. Esta variación estacional de los estratos superiores de los suelos tiene mayor importancia para puestas a tierra de pequeñas dimensiones, en las que la resistividad

equivalente está determinada, en mayor medida, por estos estratos. Para puestas a tierra de grandes dimensiones, su influencia es menor.

Albretch [6] ha propuesto una expresión empírica para determinar la resistividad de los suelos en función de su humedad y temperatura:

$$\rho = \frac{1,3 \cdot 10^4}{(0,73W^2 + 1)(1 + 0,03 T)}, \quad (1.1)$$

donde  $W$  es la humedad del suelo en % de peso y  $T$  es su temperatura en °C ( $T > 0^\circ\text{C}$ ).

La expresión anterior pretende ser general e independiente del tipo de mineral. Sin embargo se recomienda su utilización sólo para el cálculo comparativo de la influencia de la humedad y temperatura, en la resistividad de los terrenos. Por ejemplo, conocida una resistividad  $\rho_1$  de un terreno que posee una humedad  $W_1$  y temperatura  $T_1$ , es posible determinar en forma aproximada la resistividad  $\rho_2$  de este mismo terreno, para una humedad  $W_2$  y temperatura  $T_2$ .

Así:

$$\rho_2 = \frac{(0,73W_1^2 + 1)(1 + 0,03 T_1)}{(0,73W_2^2 + 1)(1 + 0,03 T_2)} \rho_1 \quad (1.2)$$

Como ejemplo, en la Figura 1.1 se comparan valores de resistividad en función de la humedad para algunos tipos de terrenos superficiales, según datos obtenidos de [2], con los calculados mediante la expresión de Albretch, para temperaturas de 10 y 40 °C. Se observa que para los suelos considerados, la expresión de Albretch indica valores inferiores de resistividad a los indicados por Tagg [2], con un efecto también mayor de la humedad.

La forma cómo influye la humedad en la conducción eléctrica de los minerales que componen un terreno, depende fundamentalmente de los siguientes parámetros:

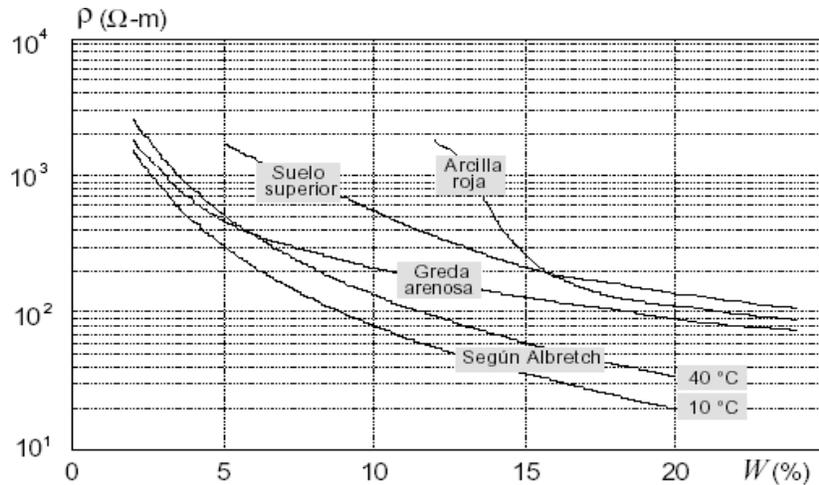
Volumen de los poros de los minerales que componen el terreno.

Disposición y distribución de los poros.

Fracción de los poros que está llena con agua.

Resistividad del agua que llena los poros, la cual depende, a su vez, de:

- la resistividad primaria, correspondiente al agua que ha penetrado en los poros.
- la resistividad secundaria, adquirida por disolución del mineral y que depende del estancamiento.



**Figura 1.1 Influencia de la humedad en la resistividad de suelos.**

Diferentes autores han propuesto expresiones empíricas para explicar cuantitativamente el efecto de la humedad de los suelos, en particular en rocas [3 - 5, 7]. Una de las más conocidas es la Ley de Archie y sus variantes. Así, la resistividad de una roca sin arcilla en sus poros, puede determinarse mediante:

$$\rho = IF \rho_{ag} \quad (1.3)$$

donde  $F = a P^{-m}$  es el factor de formación de Archie;  $I = S^{-n}$  es el índice de resistividad; y  $\rho_{ag}$  es la resistividad del agua contenida en la roca.

$P$  es la porosidad de la roca, esto es, la relación entre el volumen total de los poros y el volumen de la roca.

$S$  representa el grado de saturación de agua en la roca, es decir, la fracción del volumen total de los poros, que está llena con agua.

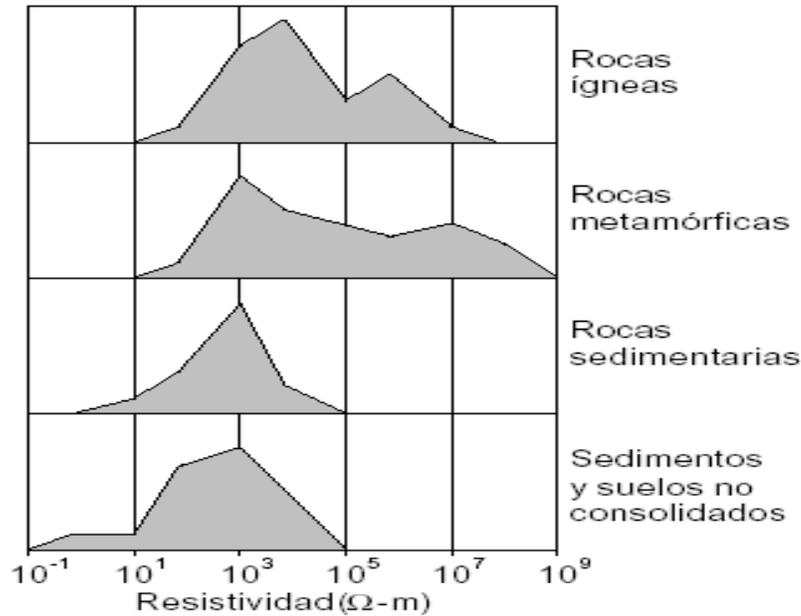
$a$ ,  $m$  y  $n$  son coeficientes empíricos que dependen del tipo de roca.

El coeficiente  $a$ , oscila entre 0,5 y 1,5 [5], dependiendo de la textura de la roca. El exponente  $m$  varía entre 1,3 y 2,3, con mayores valores para las rocas más porosas. El exponente  $n$  tiene valores entre 1,5 y 2,2 [7].

A continuación se indican algunos antecedentes adicionales generales sobre la resistividad de algunos de los minerales y rocas frecuentemente encontrados en los suelos.

La Figura 1.2, extraída de [3], quien a su vez la ha obtenido del "Handbook of Physical Constants", de Slichter y Telkes, muestra un histograma de resistividades para distintos

tipos de rocas y para terrenos no consolidados. En estos histogramas se observa que la resistividad de las rocas de tipo sedimentario y los terrenos consolidados, presentan resistividades menores a las de las rocas de tipo metamórfico. Esto se debe a su mayor porosidad y, por lo tanto, a la mayor posibilidad de atrapar agua.



**Figura 1.2 Histograma de resistividades de rocas y suelos.**

Para las rocas ígneas y metamórficas, las resistividades cubren un rango más amplio, debido a la mayor variación de la porosidad de estos tipos de rocas.

De [5] se ha extraído la Tabla 1.2, que indica rangos de porosidad para distintos tipos de minerales y rocas.

**Tabla 1.2 Porosidad intergranular de diversos minerales y rocas**

Tipo de mineral o roca	Porosidad (-)
Arcillas .....	0,20 - 0,50
Arenas gruesas .....	0,25 - 0,60
" finas.....	0,30 - 0,60
" de médanos.....	0,40
" de playa.....	0,30 - 0,85
Arenisca.....	0,20 - 0,35
Caliza.....	0,015 - 0,20
Cienos .....	0,80 - 0,85
Dolomía .....	0,03 - 0,20
Grava.....	0,20 - 0,40
Lavas.....	0,20 - 0,80
Margas .....	0,04 - 0,60
Rocas ígneas .....	0,003 - 0,05

### 1.2.3 Resistividad de las aguas naturales

El agua pura es mala conductora de la electricidad. Así, un agua tridestilada tiene una resistividad de aproximadamente 100.000  $\Omega\cdot\text{m}$  [5]. Sin embargo, las aguas presentes en la naturaleza tienen siempre algunas sales disueltas, dependiendo del mineral con el que han estado en contacto al escurrir por los suelos, lo que las hace relativamente buenas conductoras. Como información, en la Tabla 1.3 se resumen datos de resistividad, obtenidos de [5, 7], para algunas aguas naturales típicas.

**Tabla 1.3 Resistividades típicas de aguas naturales**

Tipos de aguas	Resistividad $\rho_{ag}$ ( $\Omega\cdot\text{m}$ )	
- Aguas de precipitaciones.....	30	- 1.000
Aguas superficiales de lagos y ríos		
- Aguas puras.....		3.000
- Aguas dulces.....	10	- 1.000
- Aguas salobres.....	2	- 10
- Aguas en zonas de rocas ígneas.....	30	- 500
- Aguas en zonas de rocas sedimentarias.....	10	- 100
- Aguas de lagos salados.....	0,1	- 1
Aguas de suelos		
- Promedio.....		100
- En suelos de rocas ígneas.....	30	- 150
- En suelos de rocas sedimentarias.....		1
- Aguas subterráneas.....	1	- 20
Aguas marinas		
- A 30 °C.....		0,2
- A 0 °C.....		0,4

### 1.2.4 Influencia de la temperatura de los suelos

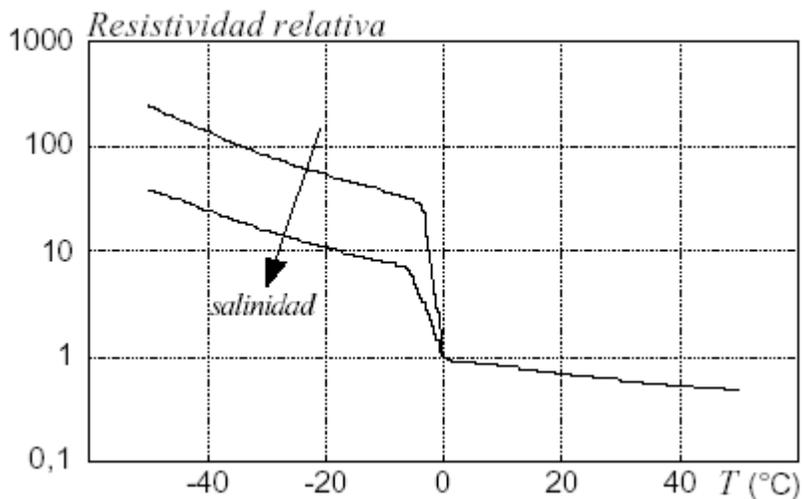
Para valores superiores al punto de congelamiento del agua e inferiores a 100 °C, la resistividad de los suelos disminuye al aumentar la temperatura, por la mayor movilidad de los iones disueltos en el agua. En introducción se indica una relación para determinar la influencia de la temperatura. Otra expresión aproximada [4, 5], es:

$$\rho_x = \frac{\rho_0}{1 + 0,022(T_x - T_0)} \quad (1.9)$$

donde  $\rho_x$  es la resistividad a la temperatura  $T_x$  y  $\rho_0$  es la resistividad a la temperatura de origen  $T_0$ , que es del orden de 18 °C.

Cuando la temperatura desciende por bajo los 0 °C, se produce un aumento rápido de la resistividad. Esto se debe a que el hielo es un aislante con resistividad del orden de 107  $\Omega\cdot\text{m}$ . Sin embargo, no toda el agua contenida se congela, ya que el aumento de volumen del hielo produce un aumento de la presión en los poros del mineral y de la salinidad del agua no congelada, con lo cual el punto de congelación disminuye sucesivamente.

La Figura 1.3 muestra, de manera sólo cualitativa, la forma como varía la resistividad de un suelo para temperaturas inferiores 0°C. La forma del gráfico por bajo los 0 °C, puede variar notablemente cuando existe una proporción importante de conducción electrónica por la presencia de inclusiones metálicas o semiconductoras [5].



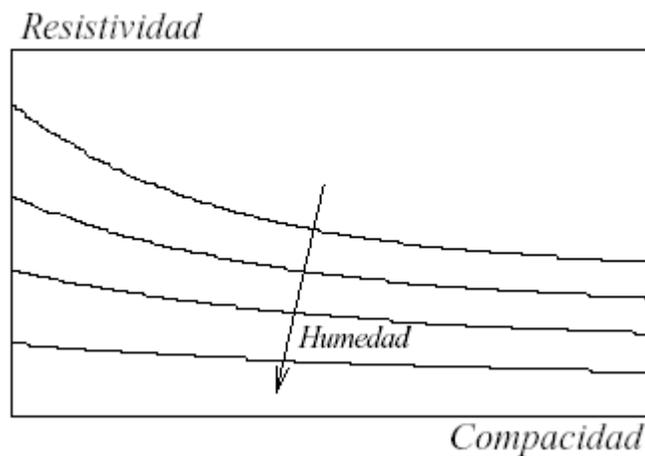
**Figura 1.3** Variación relativa de la resistividad con la temperatura.

### 1.2.5 Influencia de la compacidad de los suelos

El grado de compacidad de un terreno no consolidado refleja la proximidad entre las diferentes partículas de los minerales que lo forman. Si el terreno es poco compacto, y no se encuentra saturado con agua, los poros intergranulares están en mayor medida llenos de aire y el terreno tiene una resistividad relativa mayor. Si por el contrario, el mismo material es más compacto, la distancia entre las partículas se reduce; los espacios intergranulares son menores y eventualmente están llenos con agua, disminuyendo la resistividad.

La Figura 1.4 muestra, de manera sólo esquemática, la forma como varía la resistividad de un suelo no consolidado con la compacidad de éste. Para pequeños contenidos de humedad, el efecto de la compacidad es notorio, ya que el mejor contacto entre los granos favorece la conducción a través del agua que cubre cada partícula. Si la humedad es suficientemente alta, los espacios intergranulares están en mayor grado llenos con agua y la proximidad entre las partículas tiene menor efecto.

La influencia de la compacidad en la resistividad debe tenerse en cuenta al realizar mediciones de resistividad de terrenos sueltos mediante probetas de laboratorio. En la sección 2.4 se indican antecedentes adicionales sobre esta materia.



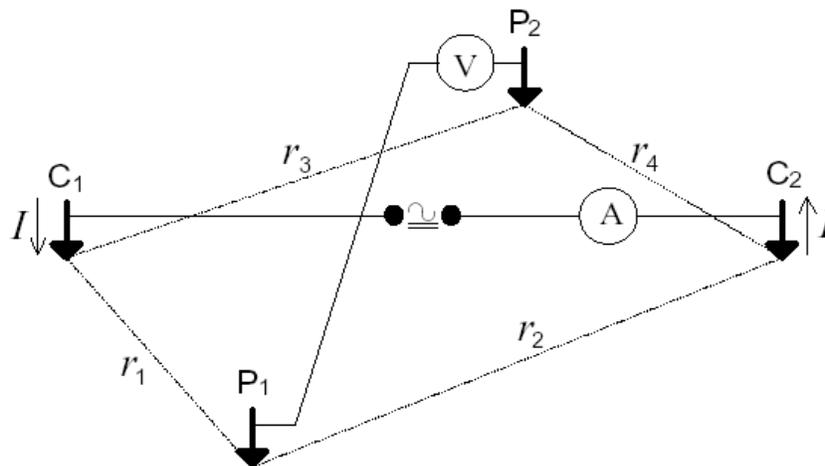
**Figura 1.4 Influencia de la compacidad en la resistividad.**

### 1.3 Medición de la resistividad

En la sección 1.1 se indica que el objetivo de las mediciones de resistividad de un terreno es determinar este parámetro único, para el caso de un terreno homogéneo, situación muy poco frecuente, o determinar las resistividades, ubicación y espesores de los diferentes estratos que forman el subsuelo, lo que es la situación normal. El método de medición de resistividad mediante 4 electrodos, en alguna de sus variantes, es el habitualmente utilizado para este propósito.

### 1.3.1 Teoría general

El método general de medición de la resistividad de un suelo mediante 4 electrodos consiste en inyectar al terreno una corriente, utilizando un par de ellos, y medir la diferencia de potencial que se produce entre los otros dos. En la Figura 1.5 se muestra el esquema general de medición mediante 4 electrodos.



**Figura 1.5** Esquema general de medición de resistividad mediante 4 electrodos.

En la Figura 1.5, C1 y C2 son dos electrodos a través de los cuales se hace circular una corriente  $I$  por el terreno, producida por una fuente de poder de corriente continua o de corriente alterna de baja frecuencia (hasta aproximadamente 100 Hz). Los electrodos C1 y C2 se designan como *electrodos de corriente*.

P1 y P2 son denominados *electrodos de potencial*, y entre ellos se mide la diferencia de potencial producida por la corriente  $I$  que circula por el terreno. Se supone que la impedancia interna del voltímetro es suficientemente alta como para que la corriente en el circuito de potencial sea prácticamente cero y, además, mucho mayor que la impedancia del resto de los elementos del circuito de potencial (electrodos y conductores), de modo que el error de lectura sea pequeño.

En términos generales, tal como se muestra en la Figura 1.5, no es requisito que los electrodos de corriente y potencial se ubiquen en una línea recta sobre la superficie del terreno. No obstante, las configuraciones más frecuentemente usadas los ubican de esta manera, con los electrodos de corriente en los extremos.

En lo que se determina a continuación, se supone que no existe un campo de potencial de origen externo que perturbe la medición, como podría ser el caso de una puesta a tierra cercana al lugar en que se mide la resistividad, y que estuviese conduciendo a tierra corrientes residuales permanentes. Estas corrientes pueden deberse a desequilibrios en las fases de transformadores conectados a tierra o acoplamientos electromagnéticos no simétricos sobre los cables de guarda que llegan a la instalación. Si el voltaje entre los electrodos de potencial, generado por este campo externo, es muy inferior al voltaje natural producido por la corriente de medición, su efecto puede ser reducido.

Si la profundidad de enterramiento de los electrodos de corriente es pequeña en comparación con la distancia a los electrodos de potencial, puede asumirse que se comportan como fuentes radiales de corriente en el punto de contacto. Así, en términos generales, el potencial producido en un punto sobre la superficie del terreno, ubicado a una distancia  $r$  de una fuente que inyecta una corriente  $I$ , es:

$$\phi(r) = \frac{I\rho}{2\pi r} \quad (1.10)$$

donde se supone, por el momento, que el terreno tiene una resistividad homogénea  $\rho$ .

Aplicando la expresión (1.10) al esquema de la Figura 1.5, el potencial inducido en el electrodo de potencial P1, por la corriente que fluye hacia el terreno en el electrodo C1, y por la corriente que fluye desde el terreno en el electrodo C2, son:

$$\begin{aligned} \phi_{P1} &= \phi_{P1(C1)} + \phi_{P1(C2)} = \frac{+I\rho}{2\pi r_1} + \frac{-I\rho}{2\pi r_2} \\ &= \frac{I\rho}{2\pi} \left( \frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) \end{aligned} \quad (1.11)$$

considerando que los potenciales son escalares y pueden sumarse algebraicamente.

En forma similar, el potencial en el electrodo P2, son:

$$\begin{aligned} \phi_{P2} &= \phi_{P2(C1)} + \phi_{P2(C2)} = \frac{+I\rho}{2\pi r_3} + \frac{-I\rho}{2\pi r_4} \\ &= \frac{I\rho}{2\pi} \left( \frac{1}{r_3} - \frac{1}{r_4} \right) \end{aligned} \quad (1.12)$$

La diferencia de potencial  $V$  medida por el voltímetro o considerada por el instrumento que determina directamente el cociente entre  $V$  y la corriente inyectada  $I$ , es:

$$V = \phi_{P1} - \phi_{P2} = \frac{I \rho}{2\pi} \left\{ \left( \frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) - \left( \frac{1}{r_3} - \frac{1}{r_4} \right) \right\} \quad (1.13)$$

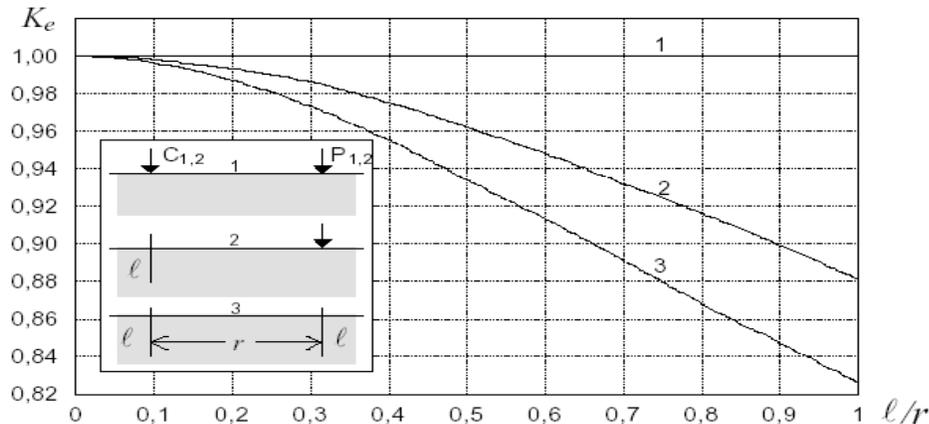
de donde se obtiene el valor de resistividad del terreno:

$$\rho = \frac{2\pi V}{I} \cdot \frac{1}{\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_4} - \frac{1}{r_2} - \frac{1}{r_3}} \quad (1.14)$$

La expresión (1.14) es la ecuación fundamental de medición de resistividad mediante 4 electrodos. Cualquier variante particular de medición se deduce a partir de esta expresión. En lo anterior se ha supuesto que los electrodos de corriente se comportan como fuentes radiales de corriente y que los electrodos de potencial lo hacen como receptores puntuales. En la práctica, se utilizan pequeñas barras como electrodos de corriente y barras o electrodos impolarizables como electrodos de potencial. Por tanto, para que sea válida la suposición anterior con aproximación aceptable, es necesario que la distancia entre los electrodos de corriente y los de potencial sea a lo menos 5 a 10 veces la profundidad de enterramiento de éstos. Así, para distancias  $r$  del orden de 1 m, la longitud de enterramiento de los electrodos no debería ser mayor de 0,1 a 0,2 m. Por un lado, longitudes demasiado pequeñas presentan dificultades de orden práctico, ya que es difícil que las barras se sostengan por sí solas, sobre todo en terrenos resacos en su superficie. Por otro lado, la mayoría de los instrumentos de medición de resistividad exigen un valor de impedancia del circuito de corriente, que no sobrepase un valor establecido por el fabricante. Esta impedancia depende en gran medida de la resistencia de puesta a tierra de los electrodos de corriente, la que a su vez depende de su longitud de enterramiento y de la resistividad del terreno que se mide. Por lo anterior, es posible que, para distancias pequeñas entre electrodos se deduzcan valores de resistividad inferiores a los reales, considerando que el valor de potencial efectivamente medido al utilizar barras es inferior al que se obtendría con electrodos puntuales, en un factor  $Ke$ , inferior a 1.

En la Figura 1.6 se indican los valores de  $Ke$  para las siguientes situaciones: 1) teórica, donde ambos electrodos son puntuales; 2) para el caso en que el electrodo de corriente es

una barra de longitud de enterramiento  $l$ , y el electrodo de potencial es puntual (por ej: electrodo impolarizable de  $\text{Cu}/\text{CuSO}_4$ ); y 3), la situación más frecuente en la práctica, utilizando barras para todos los electrodos. Los valores de  $K_e$  se han obtenido de comparar la expresión (1.10), para  $t = 0$ , y con  $D = r$ . Se observa que para relaciones  $l/r$  menores que 0,2, los errores son inferiores a 1 %. Tagg [2] ha propuesto otra forma de considerar el uso de barras en la medición.



**Figura 1.6 Factor de reducción del potencial inducido, 1) Situación teórica de referencia, 2) Barra de corriente a punto, 3) Barra a barra.**

### 1.3.2 Fuente de alimentación para la medición

El método de medición de resistividad de terrenos, tal como está concebido para prospección geofísica, utiliza fuentes de poder de corriente continua, como ser baterías o generadores rotatorios [4]. La corriente se inyecta mediante barras metálicas hincadas en el terreno, y la diferencia de potencial se mide utilizando electrodos impolarizables. En este tipo de investigaciones, las distancias entre electrodos alcanzan comúnmente varios miles de metros. Por tanto, es necesario evitar voltajes inducidos en el circuito de potencial, sobre todo considerando que los valores naturales de diferencia de potencial entre electrodos pueden ser sólo de algunos milivoltios. En esta situación es necesario utilizar corriente continua y electrodos impolarizables para eliminar errores que podrían producirse con electrodos metálicos, debido a diferentes valores de polarización de éstos en el terreno.

Sin embargo, en la medición práctica de la resistividad, para el objeto de diseñar una puesta a tierra, se prefiere utilizar instrumentos portátiles que incorporan una pequeña fuente de poder de corriente alterna o de corriente continua conmutada, salvo situaciones especiales

que justifiquen otros procedimientos adaptados a la situación existente. Es necesario tener presente que al utilizar corriente alterna, se produce un acoplamiento electromagnético por el paralelismo entre los circuitos de corriente y potencial. Esto significa que los valores leídos por el voltímetro incluyen, además de la diferencia de potencial natural entre los electrodos correspondientes, una componente de voltaje inducido; en consecuencia, la resistividad medida difiere de la real. El voltaje inducido depende en forma logarítmica de la separación entre circuitos; por lo tanto, no es posible reducirlo suficientemente con una mayor separación entre los conductores de corriente y potencial.

En el tipo de mediciones de resistividad que nos interesan, las separaciones entre electrodos alcanzan sólo hasta algunas decenas de metros y eventualmente, para mallas de tierra de grandes dimensiones, algunos centenares de metros. En esta situación, es posible aprovechar la facilidad que proporcionan los instrumentos compactos existentes, teniendo presente una valoración de los posibles errores de medición, función de la longitud del paralelismo entre los circuitos de corriente y potencial, y de la frecuencia de la fuente de poder. En el título 1.3.5 se indican antecedentes adicionales sobre este aspecto.

### **1.3.3 Medición de la resistividad en terrenos no homogéneos**

En la deducción de la ecuación fundamental (1.14) de medición de resistividad mediante 4 electrodos, se ha supuesto un terreno de resistividad homogénea  $\rho$ . Si la medición se realiza en un suelo con esa característica, entonces el valor de resistividad determinado corresponde a este valor único presente.

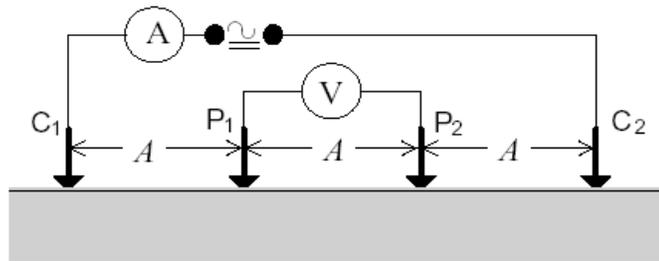
Si el terreno a medir no es homogéneo, el valor de  $\rho$  obtenido al aplicar la ecuación fundamental es ficticio y, en general, no corresponde a ninguna de las resistividades presentes en el terreno, sino a una cierta combinación de ellas, función de sus espesores y de la disposición de los electrodos y separación entre ellos. A este valor ficticio de resistividad se le denomina *resistividad aparente* y se escribe como  $\rho_a$ .

La forma como varía esta resistividad aparente al modificar la separación entre los electrodos es la pauta para interpretar las mediciones y determinar la constitución del terreno investigado. Evidentemente, en un terreno homogéneo la resistividad aparente determinada es igual a la resistividad real de éste y su valor es independiente de la disposición y separación de los electrodos.

### 1.3.4 Configuraciones de electrodos

Existen diferentes formas de ubicación relativa de los 4 electrodos, cada una de ellas con ventajas y desventajas con respecto a las otras. Las dos configuraciones clásicas más utilizadas son la configuración de Wenner, usada preferentemente en EE.UU y Gran Bretaña, y la configuración de Schlumberger, utilizada en Europa y la ex URSS. Estas dos configuraciones tienen en común que los cuatro electrodos se ubican en una línea recta sobre la superficie del terreno, con los electrodos de corriente en los puntos exteriores. Además de las configuraciones anteriores y sus variantes, todas ellas denominadas configuraciones lineales, existen numerosas configuraciones de electrodos que pueden tener ventajas en determinadas condiciones particulares y que se utilizan casi exclusivamente en prospección geofísica. De ellas, se menciona sólo brevemente la configuración azimutal [5].

#### 1.3.4.1 Configuración de Wenner



**Figura 1.7 Configuración de Wenner**

En esta configuración, los cuatro electrodos están ubicados en una línea recta y separados a igual distancia  $A$  entre ellos. Para este caso, en la Figura 1

$$r_1 = r_4 = A$$

$$r_2 = r_3 = 2A$$

Reemplazando los valores anteriores en la ecuación fundamental (1.14), se obtiene:

$$\rho_{a(w)} = \frac{2\pi V}{I} \cdot \frac{1}{\frac{1}{A} + \frac{1}{A} - \frac{1}{2A} - \frac{1}{2A}} = 2\pi R A \quad (1.15)$$

donde  $R = V/I$  es el cociente entre los valores medidos de diferencia de potencial y corriente, o el valor indicado directamente por el instrumento de medición de resistividad. Esta "resistencia"  $R$  no corresponde a algo identificable en el terreno, sino es simplemente el cociente mencionado.  $\rho_a(W)$  es la resistividad aparente correspondiente a esta configuración, función de la separación  $A$  entre electrodos.

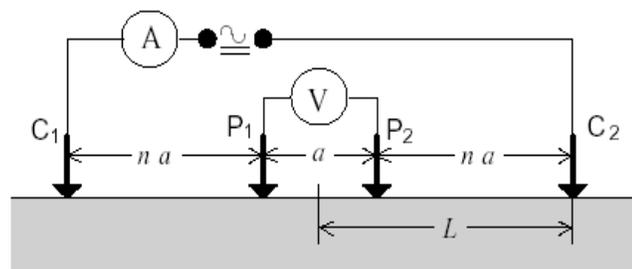
Existe una variante de la configuración de Wenner, que consiste en ubicar uno de los electrodos de corriente en un punto distante teóricamente al infinito del resto.

De este modo, si:  $r_1 = A$ ;  $r_2 \rightarrow \infty$ ;  $r_3 = 2A$ ;  $r_4 \rightarrow \infty$ .

$$\rho'_{a(W)} = 2\pi R \cdot \frac{1}{\frac{1}{A} - \frac{1}{2A}} = 4\pi R A = 2\rho_{a(W)} \quad (1.16)$$

Para una misma configuración del terreno, los valores obtenidos al emplear esta variante son el doble de los correspondientes a la configuración en su forma normal. Esta variante de la configuración de Wenner es poco utilizada; sin embargo, puede tener alguna aplicación para medir capas superficiales de alta resistividad con un instrumento que tiene un límite superior de  $R$  que ha sido sobrepasado, ya que el rango se duplica en relación a la forma normal.

### 1.3.4.2 Configuración de Schlumberger



**Figura 1.8 Configuración de Schlumberger.**

En esta configuración, los cuatro electrodos están ubicados en una línea recta. Los dos electrodos de potencial se disponen en forma simétrica con respecto al centro de medición elegido y a una distancia pequeña entre sí (1 a 3 m). Los electrodos de corriente se disponen también simétricamente con respecto al centro de medición.

Comparando las Figuras 1.5 y 1.8:

$$r_1 = r_4 = na \quad , \quad r_2 = r_3 = (n+1)a$$

Por tanto, de (7.14):

$$\rho_{a(S)} = \pi R a n(n+1) = 2\pi R a \frac{n(n+1)}{2} \quad (1.17)$$

Si, por ejemplo,  $a = 1$  m, el valor de  $n$  corresponde a la distancia en metros entre el electrodo de corriente y el de potencial adyacente.

En la configuración de Schlumberger, los gráficos de resistividad aparente se hacen normalmente en función de la distancia  $L$  entre el centro de medición y los electrodos de corriente. De este modo, de la Figura 1.8:

$$r_1 = r_4 = L - a/2 \quad , \quad r_2 = r_3 = L + a/2$$

y, por tanto:

$$\rho_{a(S)} = \pi R a \left\{ (L/a)^2 - 1/4 \right\} \quad (1.18)$$

expresión equivalente a (1.17).

Para valores pequeños de la separación  $a$  entre electrodos de potencial, se tiene que  $(L/a) \gg 1/4$ ; por tanto, la expresión (1.18) se puede escribir como:

$$\rho_{a(S)} = \frac{\pi L^2}{I} \cdot \frac{V}{a} = \frac{\pi L^2}{I} E \quad (1.19)$$

donde  $E$  es la magnitud del gradiente de potencial en el centro de medición, correspondiente al límite del cociente  $V/a$ , cuando  $a$  tiende a cero.

Las curvas patrón de resistividad aparente para la configuración de Schlumberger se construyen sobre la base de la expresión límite (1.19), para que sean independientes del valor de  $a$ . Sin embargo, en la práctica se utiliza la expresión (1.18) para determinar la resistividad aparente medida. El error que se comete por esto, según [5], es igual a  $100(a/2L)\%$ ; resultando inferior a 1,6% para  $a < L/4$ .

En las mediciones se usan distancias  $a$  de 0,5 a 1 m, para los valores inferiores de  $L$ . Al ir aumentando  $L$ , el voltaje entre los electrodos de potencial disminuye paulatinamente, pudiendo llegar a un valor que no es percibido por el instrumento, o para el cual las interferencias externas hacen poco confiable la medida. De ser así, debe aumentarse la separación entre electrodos de potencial a 3 o 5 m. Esto trae como consecuencia, en algunos casos, pequeños desplazamientos de la curva de resistividad aparente, como se explica en el subtítulo 2.2.3.2.

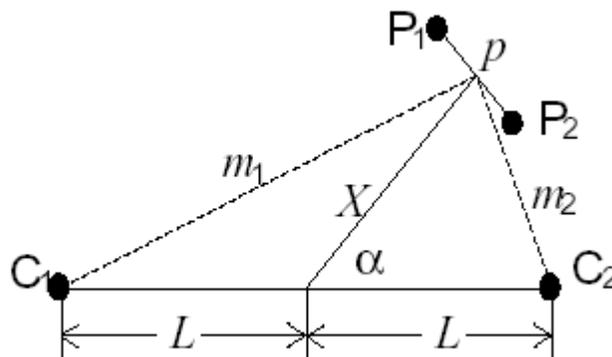
Teniendo presente la condición necesaria,  $L \gg a$ , que impone la configuración de Schlumberger, es opinión del autor que no son válidas algunas variantes de esta configuración que utilizan valores de  $a$  para las que no se respeta esta consideración; a menos que las mediciones se comparen con gráficos patrón de resistividad aparente construidos para esa situación particular.

Para la configuración de Schlumberger existe también una variante en forma similar a la de Wenner, con uno de los electrodos de corriente ubicado a una distancia muy grande de los otros tres electrodos. En esta configuración, los valores de resistividad son también el doble de los de la configuración normal.

$$\rho'_{a(S)} = 2 \pi R a n(n+1) = 2 \rho_{a(S)}$$

o bien: 
$$\rho'_{a(S)} = 2 \pi R a \left\{ (L/a)^2 - 1/4 \right\} = 2 \rho_{a(S)} \quad (1.20)$$

### 1.3.4.3 Configuración azimuthal



**Figura 1.9 Configuración azimuthal**

A modo ilustrativo se muestra en la figura 1.9 la configuración denominada azimuthal. 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 [10].

Para esta configuración:

$$\rho_{a(Az)} = \frac{2\pi R}{p L \sin\alpha} \left[ \frac{1}{m_1^3} + \frac{1}{m_2^3} \right]^{-1} \quad (1.21)$$

Si el ángulo  $\alpha = 90^\circ$ , se obtiene una versión particular de esta configuración, denominada dipolar ecuatorial. De este modo:

$$\rho_{a(Ec)} = \frac{\pi R}{p} \cdot \frac{(X^2 + L^2)^{3/2}}{L} \quad (1.22)$$

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.

### 1.3.5 Comparación entre configuraciones

Las configuraciones más utilizadas para la medición de resistividad mediante 4 electrodos, son las de Wenner y Schlumberger, para las cuales se dispone de abundantes familias de curvas patrón [10], o pueden construirse utilizando el procedimiento descrito en 2.2.2.3.

Uno de los aspectos que puede considerarse en la elección del tipo de configuración a utilizar, es el máximo valor de  $A$  o  $L$  que es aceptable al usar corriente alterna en la medición, para no sobrepasar un determinado error de medición por acoplamiento electromagnético entre los circuitos de corriente y potencial, de acuerdo con lo indicado en 1.3.5. Otro aspecto es la sensibilidad de los instrumentos requeridos para la medición y el efecto que tienen en la medición posibles campos de potencial externos. En este sentido, es posible hacer una estimación gruesa de la diferencia de potencial natural que se produce con ambas configuraciones entre los electrodos P1 y P2, considerando que el voltímetro o el circuito de potencial del instrumento tienen una impedancia interna infinita y que la corriente inyectada depende sólo de la resistencia de los electrodos correspondientes. Para cada una de estas configuraciones:

$$V_{(W)} \approx \frac{V_F}{\ln(2\ell/r_b)} \cdot \frac{\ell}{A} \quad , \quad V_{(S)} \approx \frac{V_F}{\ln(2\ell/r_b)} \cdot \frac{\ell a}{L^2}$$

donde  $V_F$  es el voltaje de la fuente de poder externa o del instrumento de medición de resistividad;  $\ell$  y  $r_b$  son la longitud de enterramiento y radio las barras usadas como electrodos de corriente (supuestos de igual longitud). Si por ejemplo,  $V_F = 50$  V (valor típico de instrumentos),  $\ell = 0,50$  m,  $r_b = 0,008$  m, se tiene:

$$V_{(W)} \approx 5,2 \cdot \frac{1}{A} \quad , \quad V_{(S)} \approx 5,2 \cdot \frac{a}{L^2}$$

Así, para separaciones  $A = L = 50$  m y  $a = 1$  m, los valores a medir entre los electrodos de potencial son:

$$V_{(W)} \approx 100 \text{ mV} \quad , \quad V_{(S)} \approx 2 \text{ mV}$$

Lo normal es que el circuito de corriente de los instrumentos portátiles, posea una impedancia interna que contribuye a limitar la corriente inyectada. Por tanto, los valores de voltajes son aún inferiores a los antes indicados, para los mismos valores considerados.

Se observa que el voltaje natural medido con la configuración de Schlumberger es muy inferior al medido con Wenner, lo que se acentúa mientras mayores son las separaciones  $A$ ,  $L$ . Lo anterior pone de manifiesto que pequeñas diferencias de potencial de origen externo a la medición, del orden de 1 mV o menos, producen un efecto muy importante en los valores determinados con la configuración de Schlumberger.

Se resumen a continuación las características principales y ventajas que presenta cada una de las configuraciones de Wenner y Schlumberger.

### 1.3.5.1 Características de la configuración de Wenner

La interpretación de los valores medidos de  $R$ , en términos de resistividad, es más directa, ya que hay una relación lineal entre ambos. Esto permite observar más fácilmente la tendencia de la curva de resistividad aparente, lo que es importante para decidir el continuar o no con las mediciones.

Los instrumentos utilizados con la configuración de Wenner exigen una menor sensibilidad que los empleados con la configuración de Schlumberger. Las diferencias de

potencial medidas son mayores, ya que al ir separando los electrodos de corriente, también lo hacen los de potencial. Por tanto, es menor el efecto relativo de campos de potencial externos a la medición.

### **1.3.5.2 Características de la configuración de Schlumberger**

La configuración de Schlumberger es menos sensible a las variaciones laterales del terreno o al buzamiento de los estratos, debido a que no se mueven los electrodos de potencial. La medición de resistividad corresponde a una sección más reducida del terreno.

La ejecución de las mediciones es más rápida, ya que sólo se desplazan los electrodos de corriente. Por lo mismo, es también menor la probabilidad de error en la ubicación correcta de los electrodos.

La configuración de Schlumberger se adecúa mejor a las técnicas de inversión para la interpretación de las mediciones.

La configuración de Schlumberger es mucho más sensible a la presencia de campos externos de potencial, aún de pequeña magnitud. Por tanto, si no se adoptan acciones correctivas, los valores determinados pueden resultar muy distintos a los reales.

## **1.4 Formas de medición de la resistividad**

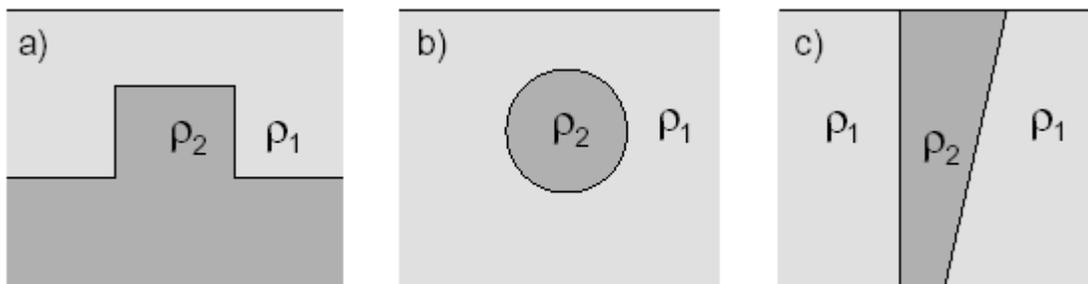
Existen dos formas básicas de realizar las mediciones de resistividad de un terreno: el *perfil eléctrico* o calicata y el *sondeo eléctrico*. Ambas formas de medición pueden ser efectuadas con cualquiera de las configuraciones posibles de electrodos.

Dependiendo de lo que se persigue determinar, se utiliza una u otra forma de medición. En situaciones especiales, una forma puede complementar a la otra.

### **1.4.1 Perfil eléctrico o calicata**

El perfil eléctrico es un método de investigación de la variación horizontal de la resistividad del terreno. Es apropiado para detectar variaciones laterales del terreno, como puede ser la presencia de bolsones de un material o elemento distinto al resto del medio circundante. Permite, además, detectar contactos geológicos verticales o inclinados de diferentes materiales (fallas geológicas), como se ejemplifica en la Figura 1.11. En un campo distinto

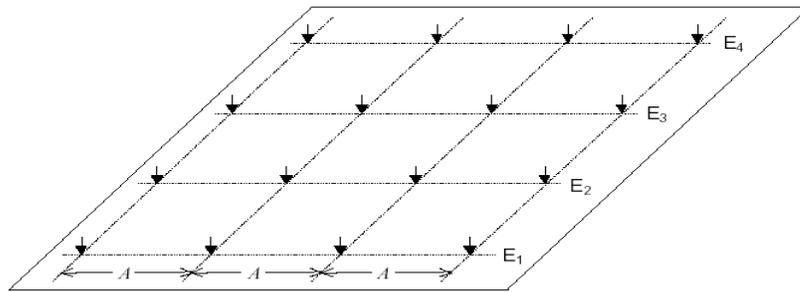
al de la investigación del suelo propiamente tal, se han utilizado también calicatas eléctricas para la ubicación precisa de edificios y objetos arqueológicos enterrados [2, 5].



**Figura 1.11 Variaciones laterales típicas pronunciadas de un terreno, a) inclusión de un estrato en otro superior, b) bolsón de distinto material, c) contactos de distintos materiales.**

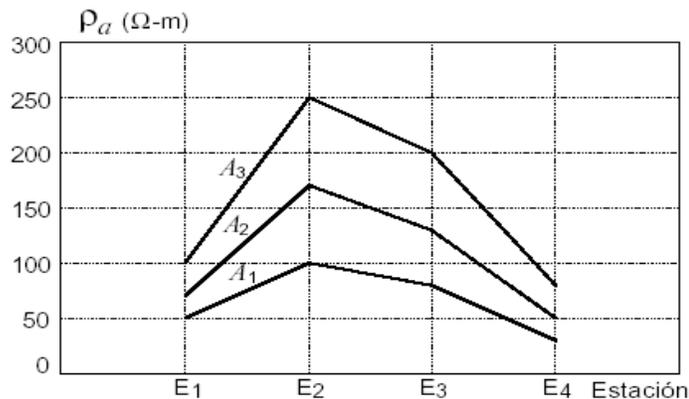
Existe una gran variedad de formas de disponer los electrodos para determinar variaciones laterales de los terrenos [5]. Se describe aquí, sólo en forma muy breve, la calicata de dispositivo simétrico, la que realiza una penetración de investigación aproximadamente constante dentro de cada secuencia de mediciones. En esta forma de investigación de la resistividad del terreno, que se puede realizar con las configuraciones de Wenner o Schlumberger, se mantienen constantes las separaciones entre electrodos -elegidas con algún criterio específico-, para una cierta secuencia de mediciones. El conjunto de electrodos se traslada en forma perpendicular a la línea de ubicación de los electrodos. Esta secuencia de mediciones puede repetirse para otros valores de separación entre electrodos. En la Figura 1.12 se esquematiza una secuencia de mediciones, utilizando la configuración de Wenner, para 4 estaciones.

Si el suelo que se está investigando es idealmente estratificado, esto es, con todos sus estratos perfectamente paralelos a la superficie del terreno, esta medición carece de razón, ya que los resultados de cada secuencia son idénticos. Sin embargo, si el suelo presenta variaciones horizontales, mientras más próximo está el conjunto de electrodos al punto de anomalía, más se modifica el valor de resistividad aparente medido. Al alejarse los electrodos, disminuye el efecto de la anomalía horizontal y la resistividad aparente se acerca a la correspondiente a un suelo perfectamente estratificado.



**Figura 1.12 Calicata eléctrica utilizando la configuración de Wenner.**

La Figura 1.13 muestra lo que podría ser el resultado de las mediciones realizadas con la calicata indicada en la Figura 1.12 para 3 separaciones  $A_1 < A_2 < A_3$  entre electrodos. Estos resultados se obtendrían para una situación similar a la indicada en la Figura 1.11a) con  $\rho_2 > \rho_1$ .



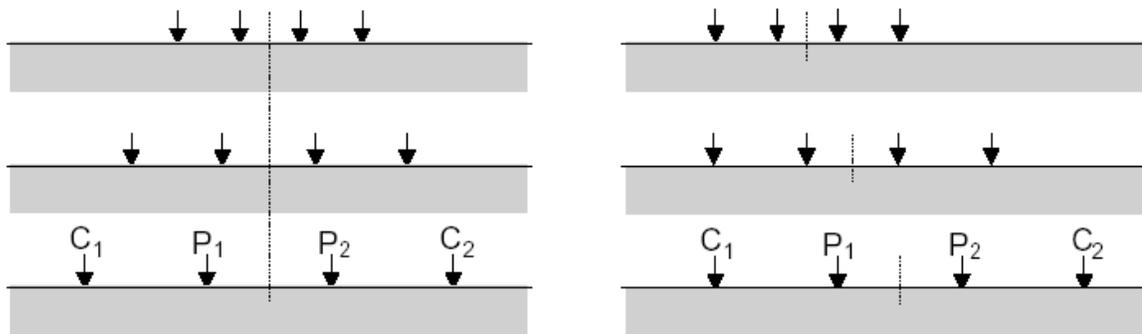
**Figura 1.13 Resultados de una calicata para una situación similar al caso de la Figura 1.11a).**

Como se ha mencionado antes, 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.

### 1.4.2 Sondeo eléctrico

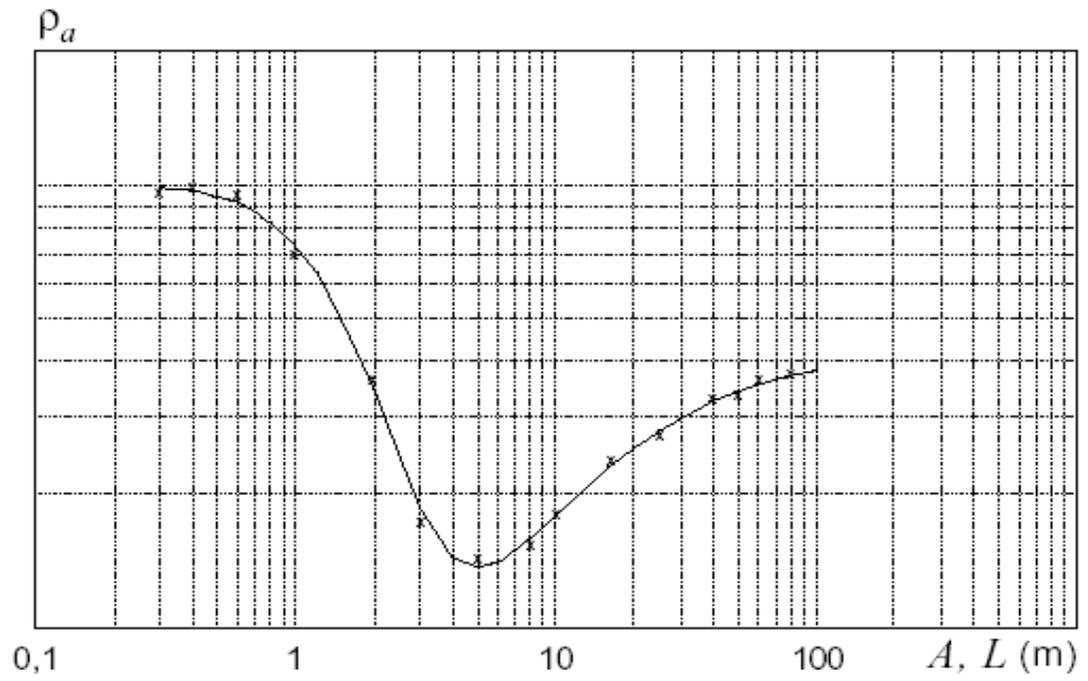
El sondeo eléctrico es la forma de medición utilizada para determinar la resistividad y espesor de los diversos estratos que conforman un suelo. En esta forma de investigación del terreno, se elige un centro y una dirección de medición, los que se mantienen fijos durante todo el proceso y se varía la separación entre electrodos, cualquiera sea la configuración empleada. Con la configuración de Wenner, se desplazan tanto los electrodos de corriente como los de potencial. En la configuración de Schlumberger, se mueven sólo los electrodos de corriente, en el entendido que los valores de potencial medidos no son demasiado pequeños para la sensibilidad y precisión del instrumento empleado. De ser así, debe aumentarse la separación entre los electrodos de potencial.

Una manera errada, y a veces frecuente, de realizar esta medición con la configuración de Wenner, es dejar inmóvil uno de los electrodos, normalmente uno de corriente, y desplazar los otros tres electrodos, como se indica en la Figura 1.14b. Al proceder de esta manera, no se mantiene fijo el centro de medición y si el terreno tiene variaciones laterales, lo que es habitual, la interpretación de las medidas está más expuesta a errores.



**Figura 1.14 Forma correcta e incorrecta de desplazar los electrodos con la configuración de Wenner.**

Con los valores de resistividad aparente obtenidos del sondeo eléctrico, se construyen gráficos como el indicado en la Figura 1.15. Lo normal es dibujar estos gráficos utilizando escalas logarítmicas en ambas coordenadas, para poder interpretarlos mediante curvas patrón especialmente construido para ello. Otros métodos de interpretación, menos usuales, pueden requerir de gráficos con otros tipos de escalas.



**Figura 1.15** Gráfico de campo de la resistividad aparente.

## **CAPÍTULO 2. REALIZACIÓN DE LAS MEDICIONES**

Para la realización de las mediciones es necesario hacer una planificación y programación del trabajo en el terreno que garantice óptimos resultados, para esto se realizan consideraciones en el circuito de corriente y de tensión. En este capítulo se hacen recomendaciones para la ejecución de las mediciones y sus comprobaciones. Además se explican diferentes métodos de interpretación de los resultados.

### **2.1 Planificación de las mediciones**

La realización de mediciones de resistividad de un terreno, requiere de una planificación adecuada con el objeto de obtener la información necesaria y suficiente para el futuro proyecto. En primer lugar, es necesario conocer el objetivo de las mediciones, esto es, saber el tipo y características de la instalación para la que se proyectará la puesta a tierra o se realizará la ampliación o modificación. No es lo mismo realizar una medición de resistividad para el proyecto de una sencilla puesta a tierra, como puede ser la de una subestación aérea de distribución; para las estructuras de una línea de transmisión; para la malla de tierra de una subestación de grandes dimensiones; o para el proyecto de puesta a tierra de una central generadora, especialmente si se trata de una central hidroeléctrica, por la gran cantidad y variedad de instalaciones a considerar y la amplitud del área en que se encuentran dispersas.

En el primer caso, para una instalación pequeña, es necesario realizar mediciones en un área reducida del terreno y sólo en poca profundidad. Sin embargo, es importante conocer la variación de la resistividad en las diferentes épocas del año, lo que significa repetir las medidas en distintas condiciones, o hacer un análisis valedero del rango posible de variación.

Para el proyecto de puesta a tierra de las estructuras de una línea de transmisión, es conveniente hacer una clasificación previa de los tipos de terrenos que cruza la línea, para así programar en cada uno de estos, una o más medidas. En este sentido es necesario tomar contacto con especialistas en mecánica de suelos y con los proyectistas de las fundaciones de las estructuras de la línea, para quienes es imprescindible una clasificación de los suelos.

Eventualmente, puede ser útil la opinión de algún especialista en geología, si está disponible para el proyecto, que pueda aportar antecedentes para clasificar los suelos desde el punto de vista de su resistividad.

Si se trata del proyecto de una malla de tierra para una subestación de gran tamaño, las mediciones de resistividad quedan circunscritas a un área determinada; sin embargo, es necesario realizar mediciones que permitan conocer las características del terreno hasta una suficiente profundidad. Por otro lado, es conveniente realizar las mediciones en diferentes puntos del área en cuestión, para determinar inclinaciones de los estratos u otras posibles variaciones laterales del terreno.

Las mediciones de resistividad para el proyecto del sistema de puesta a tierra de una central generadora son más laboriosas y requieren de un mayor apoyo del equipo proyectista, y probablemente de nuevas mediciones como consecuencia de las adaptaciones del proyecto de puesta a tierra. Partiendo de un proyecto tentativo, se definen las áreas que es necesario inicialmente medir. Sin embargo, considerando la gama grande de tipos de terrenos presentes, sobre todo para centrales hidroeléctricas, es posible que el proyecto original de la puesta a tierra sea modificado, para lo cual pueden ser necesarias mediciones adicionales.

Es necesario insistir en la importancia de una adecuada coordinación entre el equipo que realiza el proyecto de puesta a tierra y el equipo que realiza las mediciones de resistividad. Corresponde al primero requerir del jefe del proyecto general, antecedentes lo más completos posibles sobre la instalación que se desea proteger con la puesta a tierra. A su vez, el proyectista del sistema de puesta a tierra debe indicar al equipo encargado de las mediciones de resistividad, las zonas del terreno a investigar y las correspondientes profundidades de interés, más otros antecedentes disponibles y elementos de juicio que le orienten en su tarea y en la toma de decisiones ante situaciones imprevistas durante las mediciones.

Otro aspecto a mencionar, es la conveniencia de realizar una o más inspecciones a la zona que se desea medir, previo a las mediciones propiamente tales. Estas visitas al terreno tienen por objeto detectar las condiciones del lugar: características generales de la superficie del suelo, presencia de cercos y otro tipo de divisiones de predios, espacios disponibles, pendientes del terreno, cursos de agua, posibles estructuras metálicas enterradas, etc. Estos antecedentes permiten planificar en mejor forma las medidas,

determinando las direcciones de medición y los elementos especiales que pudieran requerirse.

Si la zona donde se realizarán las mediciones de resistividad corresponde o está próxima a una instalación de alta tensión o industrial, es conveniente realizar durante esta visita inspectiva, algunas mediciones simples para detectar la posible presencia de campos de potencial. Una forma es medir diferencias de potencial entre dos electrodos auxiliares separados 1 o 5 m entre sí, con un milivoltímetro de buena sensibilidad, y repetir las mediciones con los electrodos desplazados en un ángulo de  $90^\circ$ . Estas mediciones son un antecedente para decidir sobre la configuración (ver subtítulo 1.3.5) y el equipamiento a utilizar.

### 2.1.1 Programación del trabajo de terreno

Para la ejecución correcta de las mediciones de resistividad de un terreno, es conveniente tener presente algunas consideraciones generales. Las indicaciones básicas siguientes no cubren toda la gama de situaciones especiales o problemas particulares que pueden presentarse en una medición. En ciertos casos, sólo la experiencia personal de quien realiza las medidas le permite solucionar las posibles dificultades.

Un aspecto importante a considerar es el relativo a los circuitos de medición propiamente tales: circuito de corriente y circuito de potencial.

#### 2.1.1.1 Consideraciones sobre el circuito de corriente

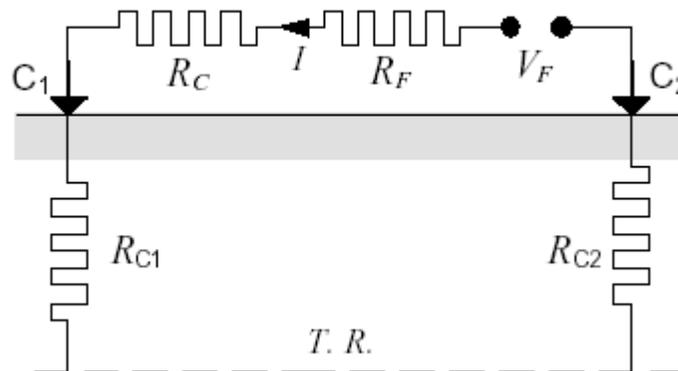


Figura 2.1 circuito de corriente.

En la Figura 2.1 se muestra el circuito de corriente y sus parámetros más importantes.  $V_F$  y  $R_F$  son el voltaje y resistencia interna de la fuente de poder, incluyendo el amperímetro, o su equivalente en el caso de instrumentos de medición directa.  $R_C$  es la resistencia de los cables de conexión a los electrodos de corriente.  $R_{C1}$  y  $R_{C2}$  son las resistencias a tierra de los electrodos de corriente  $C1$  y  $C2$ .  $T. R.$  es la tierra remota.

Con frecuencia se utilizan para la medición de resistividad, instrumentos portátiles que incluyen una fuente de poder y circuitos eléctricos o electrónicos para la determinación directa del cociente entre el voltaje medido y la corriente inyectada. En estos casos, la fuente de poder es un pequeño generador rotatorio impulsado manualmente, o un pequeño generador electrónico alimentado con baterías secas recargables. Las tensiones de salida de estas fuentes de poder son del orden de 50 a 100 voltios, y su resistencia (o impedancia) interna  $R_F$  contribuye a limitar la corriente del circuito de alimentación. Los fabricantes de los instrumentos portátiles para medir resistividad suelen indicar en su manual de uso, ya sea la corriente mínima de medición o la resistencia máxima de los electrodos de corriente. Si la corriente que circula por el terreno es inferior al valor establecido, el instrumento no opera, o los valores medidos poseen un error apreciable. Por otro lado, para corrientes inyectadas muy pequeñas, la presencia de campos de potencial de origen externo, puede dar lugar a errores importantes en los valores determinados de resistividad.

En terrenos de alta resistividad o en zonas que presentan campos externos de potencial de valores tales que afectan la medición usando corrientes reducidas, puede no ser posible emplear con buen resultado los instrumentos portátiles habituales y debe recurrirse a una fuente de poder que consiste en un grupo generador portátil de 220 V o de mayor tensión, e instrumentos (voltímetro y amperímetro) separados. En este caso, la corriente  $I$  que es posible inyectar en el terreno depende principalmente de la resistencia  $R_C$  de los cables de conexión a los electrodos de corriente, y de las resistencias  $R_{C1}$  y  $R_{C2}$  de éstos. Así:

$$I = \frac{V_F}{R_F + R_C + R_{C1} + R_{C2}} \approx \frac{V_F}{R_C + R_{C1} + R_{C2}} \quad (2.1)$$

La resistencia unitaria de los cables de conexión es 8,6 y 21,7  $\Omega/\text{Km}$ , respectivamente para los conductores #14 y #18 AWG, usados comúnmente. Para estos conductores de sección reducida, se puede despreciar la reactancia propia en comparación con su resistencia propia. Así, la resistencia de cada barreno de diámetro 5/8", enterrado 0,5 m en un terreno de

100  $\Omega$ -m, es de aproximadamente 150  $\Omega$ . Esta resistencia aumenta proporcionalmente con la resistividad del terreno, principalmente la del estrato superior; por tanto, en terrenos de alta resistividad, éste es el parámetro que en mayor medida limita el valor de la corriente inyectada.

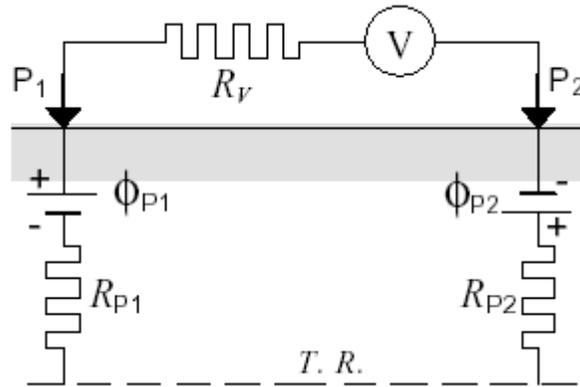
En terrenos de muy alta resistividad (sobre 100  $K\Omega$ -m), como los que existen en las zonas altas del norte de Chile, es prácticamente obligado el uso de generadores. Para lograr una corriente inyectada de suficiente magnitud, deben reducirse los valores de resistencia  $RC1$  y  $RC2$  empleando electrodos de corriente de mayor longitud que lo habitual, utilizando, por ejemplo, perfiles L de acero de 50x50 mm. Si se requiere, se riega el contorno de los electrodos con suficiente agua para disminuir la resistividad del terreno próximo a éstos. También puede adicionarse abundante sal común al agua.

Una alternativa de fuente de poder para la medición en terrenos de muy alta resistividad, practicable sólo muy raramente, es utilizar la tensión de distribución domiciliaria de 220/380 V, a través de un transformador de aislamiento de relación 1/1 u otra, con su secundario desconectado de toda puesta a tierra.

En los casos en que se usan fuentes de poder de voltaje elevado, es necesario tomar precauciones de seguridad en el contorno de los electrodos de corriente  $C1$  y  $C2$ , tanto para las personas que realizan la medición como para personas ajenas que pudieran aproximarse a ellos. Considerando que la mayor parte del voltaje aplicado al circuito de corriente, decae en las proximidades de los electrodos de corriente, pueden producirse solicitaciones peligrosas entre pies en su proximidad, aún cuando no se tome contacto directo con éstos. Por este motivo puede ser necesario disponer de una vía de comunicación (por ejemplo, transceptor portátil) entre el jefe de medición y los ayudantes que trasladan los electrodos de corriente.

Otro aspecto a considerar en el circuito de corriente, es que en terrenos rocosos o muy duros, donde no es posible hincar los barrenos tradicionales, debe recurrirse a otras formas de contacto que proporcionen valores de resistencia  $RC1$  y  $RC2$  suficientemente bajos. Una posibilidad, es utilizar láminas metálicas (por ejemplo, papel de estaño) que hagan contacto con el suelo o roca a través de una esponja impregnada con un electrolito, o simplemente, mediante una capa de barro húmedo.

### 2.1.1.2 Consideraciones sobre el circuito de potencial



**Figura 2.2 Circuito de potencial.**

La Figura 2.2 muestra el circuito de medición de la diferencia de potencial entre los electrodos P1 y P2. V representa el voltímetro o el circuito de medición de potencial, para el caso de un instrumento de medición directa de  $V/I$ .  $R_V$  es la resistencia interna de este elemento o circuito.  $\phi_{P1}$  y  $\phi_{P2}$  son los potenciales en los puntos de ubicación de los electrodos de potencial P1 y P2, establecidos por la corriente inyectada.  $R_{P1}$  y  $R_{P2}$  son las respectivas resistencias de los electrodos a la tierra remota  $T. R.$

Una parte de la diferencia de potencial  $V = \phi_{P1} - \phi_{P2}$ , cae en las resistencias  $R_{P1}$  y  $R_{P2}$  de los electrodos de potencial. Por tanto, el voltímetro o el circuito de potencial del medidor de resistividad, captan un valor  $V'$  inferior al real:

$$V' = V \cdot \frac{R_V}{R_V + R_{P1} + R_{P2}} \quad (2.2)$$

Por razones prácticas, no es posible reducir los valores de  $R_{P1}$  y  $R_{P2}$ ; entonces, la forma habitual de disminuir el error en la medición del voltaje, es aumentar lo mayor posible el valor de  $R_V$ . Hoy en día se dispone de voltímetros electrónicos de muy alta impedancia de entrada (1 a 100  $M\Omega$ ), a un costo moderado, con lo que el error puede reducirse a valores muy bajos. Sin embargo, el uso de los clásicos instrumentos electromagnéticos puede conducir a errores inaceptables, ya que los voltajes a medir son normalmente inferiores a 1 voltio para voltajes de alimentación de 100 voltios y separaciones entre electrodos  $A, L$  mayores que 5 m.

Una fuente importante de error en la medición de la diferencia de potencial, puede ser la presencia en el terreno de corrientes perturbadoras de origen industrial de 50/60 Hz y sus armónicas, y corrientes de fuga de tracción eléctrica. Los instrumentos portátiles de medición directa de resistividad poseen fuentes internas de poder que operan a frecuencias diferentes a las industriales y sus armónicas. No obstante estas precauciones, pueden presentarse errores importantes.

Además de las corrientes externas causadas por instalaciones industriales o ferroviarias, existe otro tipo de perturbación que puede tener importancia en la medición de terrenos de alta resistividad. Normalmente circulan por el terreno corrientes de relativamente pequeña magnitud y frecuencia, debidas a fenómenos naturales. Estas corrientes, denominadas *corrientes telúricas* tienen diferentes orígenes, tanto internos como externos al terreno.

### **2.1.1.3 Elección del lugar de medición.**

En lo posible, es conveniente realizar las mediciones de resistividad directamente en el lugar donde se construirá la puesta a tierra; de preferencia después de las faenas de movimientos de tierra, una vez que el terreno ha sido despejado y esté en su condición definitiva.

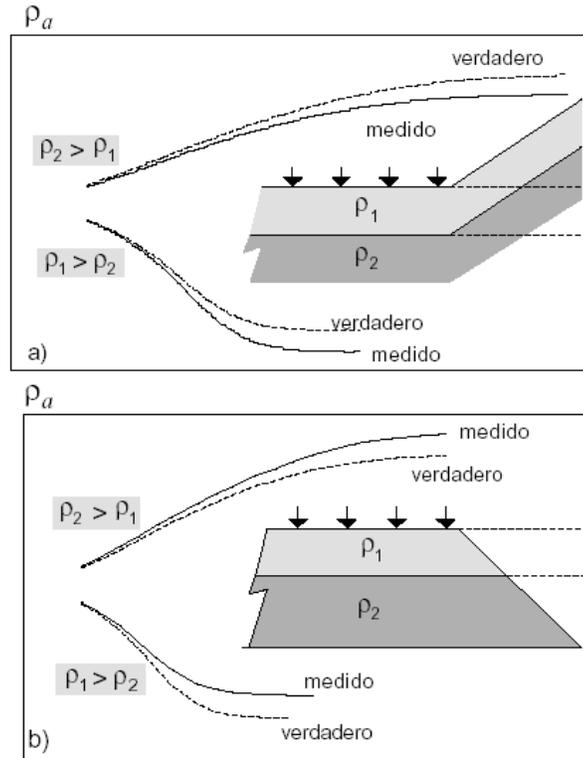
Cuando no es posible efectuar las mediciones directamente en el lugar donde se construirá la puesta a tierra, conviene elegir una zona plana o aproximadamente plana, que sea representativa del terreno que se desea investigar. En este sentido es útil observar cortes del terreno o pozos de sondeo mecánico hechos para otros propósitos, que permitan comparar ambos lugares.

Si por razones de tiempo y coordinación con otros proyectos y faenas, no es posible realizar las mediciones después de estar el terreno en su condición definitiva, es necesario obtener información de la porción de éste que se eliminará o rellenará. Esto con el objeto de conocer la configuración definitiva del terreno (espesores y resistividades de los estratos).

### **2.1.1.4 Pendientes del terreno**

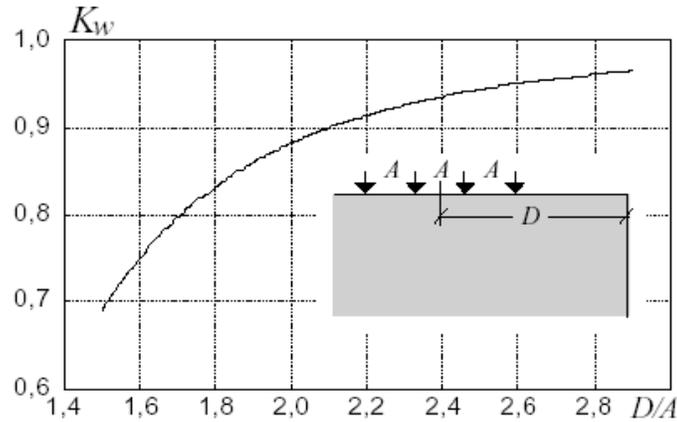
Teniendo presente las recomendaciones de 2.2.3, es conveniente que el lugar de medición esté alejado de zonas con pendientes pronunciadas. Una solución que aminora su efecto, es elegir líneas de medida que no enfrenten pendientes o que enfrenten las de menor

magnitud. Si esto no es posible, debe tenerse presente esta situación en el análisis de las mediciones y aplicar a los valores medidos algún criterio correctivo conservativo.



**Figura 2.4 Efecto de pendientes pronunciadas cercanas a la zona de medición.**

En la Figura 2.4 se muestra el efecto aproximado de pendientes muy cercanas al lugar en que se mide, en los valores de resistividad aparente de un terreno formados por 2 estratos. Para pendientes positivas (a), los valores medidos de resistividad son inferiores a los que correspondería si el suelo fuese horizontal en mayor extensión. Esto se debe a que parte de la corriente circula por una porción del terreno que reemplaza al aire (de resistividad infinita aprox.). Lo inverso acontece en el caso de pendientes negativas (b), próximas al punto de medición. Los valores medidos de resistividad son superiores a los reales, ya que parte del terreno por el que debería circular la corriente de medida, es reemplazada por aire.



**Figura 2.5 Factor  $K_w$  de corrección de los valores medidos de resistividad aparente.**

La diferencia observada en la Figura 2.4, entre los valores verdaderos y los valores medidos, depende de la distancia desde el centro de medición a la pendiente. Para ilustrar la influencia que tiene en las medidas la presencia de pendientes importantes cercanas al lugar de medición, en la Figura 2.5 se indica, para un terreno homogéneo con pendiente negativa infinita, el valor del coeficiente  $K_w$  por el que debe multiplicarse el valor medido de resistividad para obtener el valor real.

De este modo, para una distancia  $D = 20$  m, entre el centro de medición y el borde del corte del terreno, y una separación  $A = 10$  m, el valor medido debe multiplicarse por 0,88 para obtener el valor correcto.

No es fácil obtener soluciones similares a lo indicado en la Figura 2.5, para otras pendientes, sobre todo si son positivas. Se complica aún más la determinación de los valores de  $K_w$  si se trata de terrenos estratificados. Sin embargo, intuitivamente puede estimarse que para pendientes positivas, el efecto contrario al deducido para una pendiente negativa, como la de la Figura 2.5, no es tan pronunciado. Este aspecto debe ser tratado, por el momento, casi exclusivamente en forma empírica.

### **2.1.1.5 Mediciones de temperatura, humedad y acidez**

En ciertas zonas y circunstancias particulares es conveniente realizar mediciones de temperatura, humedad y acidez (pH) del terreno donde se construirá la puesta a tierra.

La medición de humedad puede ser importante en el caso de puestas a tierra de pequeñas dimensiones, cuya resistencia es fuertemente afectada por la resistividad de la capa estacional. Si la medición de resistividad se realiza en una época extrema (fuerte sequedad

o humedad), los valores obtenidos para las capas superiores no son válidos en las épocas contrarias. El conocer la humedad durante la medición, permite referir aproximadamente los valores de resistividad a otras condiciones climatológicas, por ejemplo, mediante la expresión (1.2). Otra forma de solución es realizar las mediciones de resistividad en diferentes épocas del año, para conocer la forma como varía ésta.

En determinadas circunstancias, es recomendable el uso de materiales férreos (hierro de construcción, flejes de acero galvanizado, etc.) en la construcción de una puesta a tierra. Esto como solución a posibles problemas de corrosión galvánica, que podría producir el uso de cobre, en piezas metálicas críticas, como ser en las barras de anclaje de una estructura de línea atirantada. En estos casos, es conveniente conocer, además de la resistividad del terreno, la acidez (pH), para determinar su corrosividad sobre los elementos férreos utilizados, aplicando alguno de los criterios semiempíricos existentes [14].

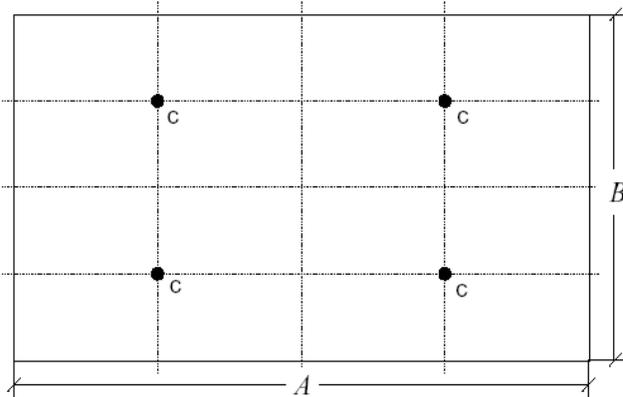
#### **2.1.1.6 Ubicación de los puntos de medición**

En el caso de puestas a tierra de pequeñas dimensiones, por ejemplo: para una subestación de distribución, aérea o en cubículo, para estructuras de líneas de transmisión, etc. Lo normal es que baste con una o dos secuencias de medición (ortogonales entre sí) en el lugar específico donde se construirá la puesta a tierra.

Para puestas a tierra de grandes dimensiones, como pueden ser las que se construyen para subestaciones de transmisión en los mayores voltajes, es conveniente realizar secuencias de medición de resistividad en distintos puntos del área que abarcará la puesta a tierra. De la correlación entre los resultados de las distintas secuencias, se pueden concluir posibles variaciones laterales de importancia o inclinación de los estratos. Es posible deducir, también, valores medios de los espesores de los diferentes estratos. La cantidad, ubicación y dirección de las secuencias a realizar, depende de cada situación particular y de la experiencia del ejecutante de las medidas. A modo ilustrativo y sin pretender que sea una recomendación general, en la Figura.2.6 se indica una posible combinación de 8 secuencias de medición, para una malla de tierra rectangular de dimensiones  $A \times B$ . Suponiendo que de cada secuencia de mediciones se deduce una configuración del terreno biestratificada o asimilable a ésta, con valores aproximadamente iguales para las resistividades superior e inferior, pero con valores diferentes para el espesor  $E_1$  del estrato superior, para el cálculo de la puesta a tierra se puede estimar un valor global de espesor, igual al promedio de los

obtenidos en las 8 secuencias, ya que los centros están distribuidos en forma regular y simétrica dentro de la superficie de la puesta a tierra.

En forma similar a lo anterior, puede actuarse para el sistema de puesta a tierra de una central generadora, en cada área específica donde se construirá una puesta a tierra individual.



**Figura 2.6** Posible secuencia de mediciones para una malla de grandes dimensiones que cubre un área específica.

### 2.1.2 Recomendaciones para la ejecución de la medición

A continuación, se indican algunas recomendaciones que es conveniente tener presente para la ejecución de la medición de resistividad de un terreno.

a) Es recomendable contar con formularios de formato estándar, para tomar nota de las mediciones de corriente y voltajes. Además de los datos propios de la medición, es conveniente consignar en este formulario otros antecedentes tales como:

- Fechas y horas de las mediciones.
- Nombre del proyecto de que se trata.
- Ubicación o designación del lugar de medición.
- Altura de la zona de medición (m.s.n.m.).
- Orientación geográfica de la línea de medición.
- Nombres del encargado de la medición y ayudantes.
- Identificación codificada de la medición.
- Configuración de electrodos utilizada.

- Marca y tipo de los instrumentos utilizados.
- Tipo de medición de resistividad (sondeo o perfil).
- Características generales del terreno, indicando todas las que permitan una mejor identificación.
- Condiciones climáticas durante la medición.
- Tiempo transcurrido desde la última lluvia en la zona.

b) Al margen de haber definido una dirección de medición en la preparación o programación de ésta, es conveniente elegir la línea o eje de medida de un trazado tal, que no interfieran obstáculos importantes en el desplazamiento y ubicación de los electrodos. Estos obstáculos pueden ser rocas aisladas, árboles, matorrales, acequias, edificios, etc.

c) Es conveniente establecer, mediante una estaca de madera, un centro de la medición como punto de referencia para la actual secuencia y para diferentes secuencias de medidas. En este centro puede instalarse, además, un electrodo auxiliar de potencial para utilizar el método de partición de Lee que se menciona en el título 1.5.5.

d) Si la interpretación de las mediciones se realizará utilizando curvas patrón, es necesario construir los gráficos de campo en escalas logarítmicas. La secuencia siguiente de  $A$  o  $L$  proporciona puntos de aproximadamente igual separación en el gráfico de campo:

								0,5	0,6	0,8
1,0	1,2	1,6	2,0	2,5	3,0	4,0	5,0	6,0	8,0	
10	12	16	20	25	30	40	50	60	80	
100	120	160	200	250	etc.					

Es conveniente empezar la medición con separaciones pequeñas entre electrodos; por ejemplo  $A = 0,5$  m, para la configuración de Wenner; y  $L = 1$  m (para  $a = 1$  m), con la configuración de Schlumberger.

e) Un aspecto difícil de decidir a priori, antes de conocer las características del terreno, es la separación máxima  $A$  o  $L$ , hasta la que deben hacerse las mediciones de resistividad aparente, para poder interpretarlas correctamente. Si las resistividades de los estratos 2 a  $n$ , son inferiores a la resistividad del estrato 1, las medidas deben efectuarse hasta separaciones de 5 a 8 veces la profundidad que se desea investigar. Así, por ejemplo, si el terreno está formado por 2 estratos, con  $\rho_1 > \rho_2$ , y el superior tiene un espesor de 5 m, las mediciones deben realizarse hasta separaciones de a lo menos 25 m. Si las resistividades más profundas, son superiores a la del primer estrato, las medidas deben hacerse hasta

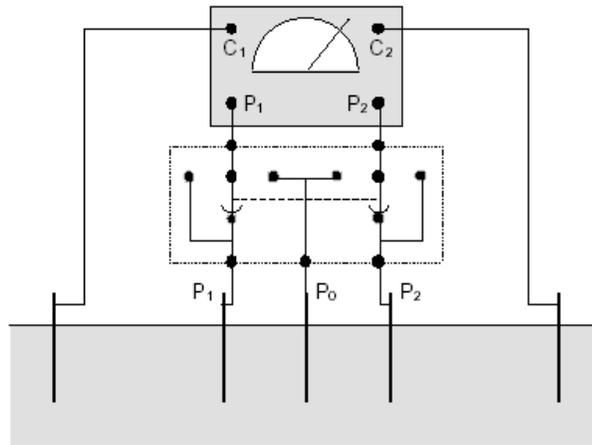
separaciones mucho mayores, ya que la tendencia tarda más en manifestarse, según Figura 1.17. Una práctica útil, es construir el gráfico de campo al ir efectuando las medidas, con el objeto de observar su tendencia. Si este gráfico muestra una tendencia asintótica que persiste al incrementar la separación entre electrodos, no es necesario continuar con separaciones mayores.

f) Los electrodos deben enterrarse poco profundos en las primeras mediciones, para valores pequeños de  $A$  o  $L$ . Se recomienda una profundidad igual o inferior a 10% de la separación, o en su defecto, aplicar algún factor de corrección como el indicado en 1.3.1. Para separaciones mayores, los electrodos se entierran entre 0,30 y 0,50 m, salvo situaciones especiales.

g) En terrenos muy secos es recomendable verter un poco de agua en el contorno mismo de los electrodos, especialmente los de corriente. Debe evitarse hacer charcos grandes, en particular para pequeñas separaciones, pues esto modifica la resistividad natural del terreno y falsea los resultados. La mayoría de las veces basta con mojar los electrodos antes de hincarlos. Además de lo anterior, es recomendable apisonar con un martillo la tierra alrededor de los electrodos.

h) Para la medición de la separación entre electrodos, debe evitarse utilizar huinchas de medir hechas de metal, prefiriéndose las de tela o materiales plásticos. En caso de usar huinchas metálicas, deben levantarse del suelo durante la medición, lo que resulta incómodo.

i) El método de partición de Lee, utilizado en mayor medida con la configuración de Wenner, es una forma de comprobar los resultados de la medición y permite detectar posibles variaciones laterales del terreno.



**Figura 2.7 Sistema de conmutación para la lectura con el método de Lee.**

Si el instrumento utilizado no dispone de un borne de conexión para el electrodo central P0, puede instalarse un sencillo conmutador externo de los potenciales entre los distintos electrodos de potencial. Figura 2.7. Por otro lado, el método de Lee permite aumentar aproximadamente al doble el rango máximo de medición del instrumento. Si al utilizar la disposición normal, se excede la capacidad del instrumento, se puede medir en Lee y sumar ambos valores.

j) Para la ejecución de las mediciones, debe considerarse un equipo de personal mínimo compuesto de 1 operador y 2 ayudantes. La situación ideal y que se justifica al realizar un gran número de mediciones, cubriendo grandes superficies, es disponer de un equipo consistente en 1 operador, 1 calculista y 2 o 4 ayudantes, dependiendo si se utiliza la configuración de Schlumberger o Wenner.

### 2.1.3 Comprobaciones durante las mediciones

Durante las mediciones, es conveniente efectuar algunas comprobaciones para asegurarse que los valores obtenidos no estén afectados a errores gruesos. Además, pueden presentarse algunas anomalías que deben identificarse y subsanarse directamente en el terreno mismo.

a) Si se tienen dudas sobre el estado del instrumento de medición directa de la resistividad, éste puede comprobarse midiendo pequeñas resistencias de valores de 10, 100, 1.000  $\Omega$ , que es conveniente formen parte de los accesorios de medición. Para medir estas resistencias deben unirse los bornes C1 con P1 y C2 con P2, y conectar entre éstos la

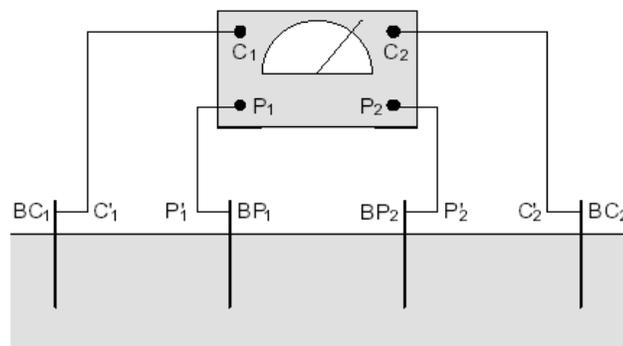
resistencia a medir. Es recomendable realizar en gabinete, antes de las mediciones, una calibración del instrumento utilizando resistencias de precisión 1%.

b) Durante las mediciones es conveniente verificar, cada cierto número de lecturas y cuando sea posible, los valores de resistividad a lo menos en dos escalas distintas del instrumento. Si los valores resultan muy diferentes, es posible un mal contacto de uno o varios electrodos con el terreno (ver 2.1.3g). Esta situación puede presentarse, también, si las baterías del instrumento se encuentran agotadas. Otra forma de comprobación, cuando el valor leído puede parecer dudoso, es medir en Lee y verificar si los resultados son aproximadamente iguales, y si la suma corresponde al valor leído en forma normal. Si una de las mediciones en Lee, resulta varias veces menor o mayor que la otra, es probable un mal contacto del electrodo o falla en las conexiones o cables de potencial correspondientes.

c) Si al realizar una medición, el instrumento de indicación directa o de balance, permanece en una posición cualquiera, indiferente a la manipulación de los controles, la causa más probable es una interrupción en el circuito de corriente. Esta falla puede deberse a:

- Electrodo de corriente hacen mal contacto con el terreno.
- Cables interrumpidos en el circuito de corriente.
- Baterías del instrumento descargadas.
- Falla del instrumento.

Una falla en el circuito de corriente puede dar origen, también, a valores cambiantes, o hacer que el instrumento de medición directa, sea poco sensible a la acción sobre los controles. La siguiente secuencia de comprobaciones, basada en la Figura 2.8, ayuda a identificar el lugar de la falla en el circuito de corriente:



**Figura 2.8 Verificación de los circuitos de corriente y potencial.**

Retirar la conexión de C1 a BC1 y unir C1 con P1. Si el instrumento indica ahora un valor grande y es sensible a las manipulaciones de los controles, la falla está en el electrodo BC1 o en el contacto a éste.

Si la anomalía persiste, unir directamente C1 con P1. Si el instrumento indica ahora un valor grande y es sensible a las manipulaciones de los controles, la falla está en el cable entre C1 y C1.

Si no se ubica la falla en el lado 1, repetir lo anterior en el lado 2.

Si no se ubica la falla en las barras ni en los cables, comprobar las baterías del instrumento, reemplazándolas.

Si persiste el problema, verificar el instrumento mediante resistencias de prueba externas.

d) Si el instrumento indica un valor cero, lo más probable es una interrupción del circuito de potencial. La verificación de este circuito es similar a lo indicado en c), levantando la conexión de P1 a BP1 o de P2 a BP2.

e) Para detectar la posible presencia de un campo de potencial externo, que pudiera estar afectando las medidas de resistividad, es recomendable hacer lecturas periódicas del voltaje entre los electrodos de potencial, desconectando el circuito de medida. Para esto, es necesario un milivoltímetro de suficiente sensibilidad, dependiendo de la configuración empleada.

## 2.2 Interpretación de las medidas de resistividad

Los métodos de interpretación de las medidas de resistividad aparente de un terreno se basan en las técnicas desarrolladas en geofísica [3 - 5, 7]. El proyectista de puestas a tierra utiliza estas técnicas de interpretación con el fin de concluir los parámetros del terreno que requiere para el proyecto de una puesta a tierra.

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 [2, 5, 11, 15]. 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 [16, 17], 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.

### **2.2.1 Métodos empíricos de interpretación**

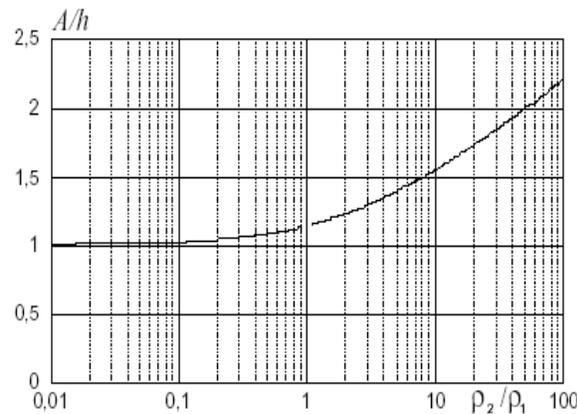
No obstante estar obsoletos los métodos empíricos de interpretación de las mediciones de resistividad, es conveniente una revisión rápida de algunos de éstos. Es posible que al estudiar un proyecto realizado hace algunos años, aparezcan interpretaciones de mediciones que utilizan estos procedimientos.

#### **2.2.1.1 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 [2].

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 [2, 4]. 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. Por otro lado, los gráficos de resistividad aparente de un terreno estratificado presentan sólo variaciones suaves de su curvatura como

se ha visto en 7.5. No es posible, por lo tanto, identificar cambios de curvatura a no ser que aparezcan por incorrección en las medidas.



**Figura 2.9 Ubicación de los puntos de inflexión en un terreno formado por 2 estratos.**

### 2.2.1.2 Método de los puntos de inflexión

En la Figura 2.9 se traza la relación  $A/h$  a la cual se producen los puntos de inflexión en un terreno de 2 estratos, para diferentes valores de  $\rho_2/\rho_1$ . Se observa que el valor de  $A/h$  no es constante sino que varía entre 1 y aproximadamente 2, dependiendo de la relación de resistividades. 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.

### 2.2.2 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. Para este objeto, se han elaborado varias colecciones de curvas patrón, de las cuales el autor ha utilizado las correspondientes a Orellana y Mooney [10]. 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.

Otro método de interpretación de las mediciones de resistividad aparente, es aplicar un procedimiento de tipo analítico-numérico, el que consiste básicamente en invertir las expresiones matemáticas que establecen la forma teórica de los gráficos de resistividad aparente.

A continuación se mencionan brevemente los fundamentos de la teoría en que se basa la interpretación científica de las medidas de resistividad de un terreno. No es imprescindible conocer estos fundamentos para aplicar la metodología práctica de interpretación que se describe más adelante en 2.2.3; por tanto, puede obviarse sin mayor problema. Sin embargo, esta parte puede ser de utilidad, como introducción, para quienes quieran adentrarse un poco en el tema, ya sea para construir sus propias curvas patrón de resistividad aparente, aplicar alguna metodología de interpretación directa aprovechando las capacidades gráficas de un computador personal o, eventualmente, intentar la aplicación o el desarrollo de algún método de interpretación mediante la inversión de los valores medidos. Sobre esta materia existen muy buenos textos [1 a 5] y abundantes publicaciones para ser consultadas, de las cuales algunas pueden considerarse clásicas [16 a 22].

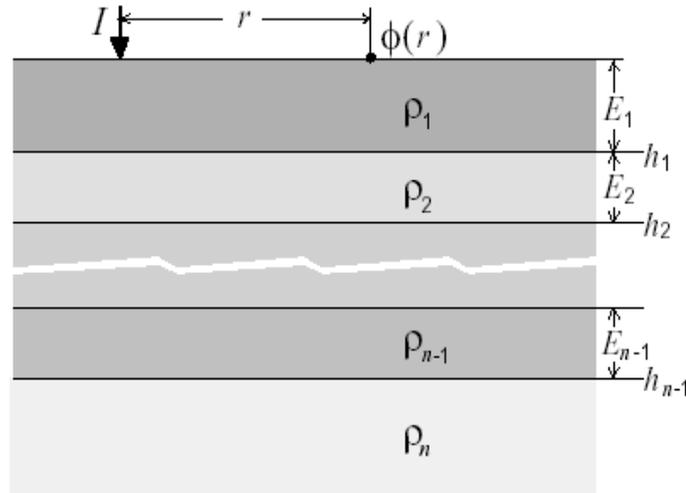
### 2.2.2.1 Aspectos básicos

En la Figura 2.10 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.

Para la solución del problema fundamental se han aplicado básicamente dos procedimientos. El primero de ellos consiste en utilizar el método de imágenes,

desarrollado por Maxwell [4]. Este método es de fácil aplicación al caso de un terreno formado por sólo 2 estratos. Sin embargo, se torna más complejo su uso para un número mayor de estratos. No obstante, se encuentran en la literatura ejemplos de aplicación para 3 y 4 capas [18, 21].



**Figura 2.10 Parámetros de un terreno estratificado.**

El segundo método, utilizado con preferencia, consiste en la integración de la ecuación de Laplace, sujeta a las condiciones de contorno presentes en un sistema estratificado como el descrito. Este método fue aplicado por primera vez por S. Stefanescu y los hermanos C. y M. Schlumberger en 1930 [16]. De acuerdo a este método, la solución general del potencial en un punto ubicado a una distancia radial  $r$  de una fuente puntual de corriente  $I$ , es:

$$\phi(r) = \frac{\rho_1 I}{2\pi} \left[ \frac{1}{r} + 2 \int_0^{\infty} \theta_{1,n}(K, E, \lambda) J_0(r\lambda) d\lambda \right] \quad (2.3)$$

donde:

$\theta_{1,n}(K, E, \lambda)$  es la función kernel o función característica de Stefanescu, determinada por las condiciones de borde en las interfases entre los distintos  $n$  estratos que conforman el terreno. El primer subíndice se refiere al primer estrato. En lo sucesivo se suprime este subíndice, ya que para las mediciones de resistividad sólo interesa el potencial en la interfase aire-superficie del terreno.

$J_0(r\lambda)$  es la función de Bessel de primera especie y orden cero.

$\lambda$  es la variable de integración.

$\rho_1$  es la resistividad del estrato superior del terreno.

$I$  es la corriente inyectada en el origen O.

La función kernel  $\theta_n(K, E, \lambda)$  es función de la variable de integración  $\lambda$ , de los coeficientes de reflexión en las interfaces entre estratos:

$$K_i = \frac{\rho_{i+1} - \rho_i}{\rho_{i+1} + \rho_i} \quad (2.4)$$

y de los espesores  $E_i$  de los estratos ( $1 \leq i \leq n$ ); y se puede expresar como:

$$\theta_n = \frac{P_n(u)}{H_n(u) - P_n(u)} \quad (2.5)$$

donde:  $u = e^{-2\lambda}$

A su vez,  $P_n$  y  $H_n$  son polinomios en  $u$ , que pueden obtenerse aplicando las expresiones recursivas siguientes:

$$\begin{aligned} P_{i+1} &= P_i(u) + H_i(u^{-1}) K_i u^{h_i} \\ H_{i+1} &= H_i(u) + P_i(u^{-1}) K_i u^{h_i} \end{aligned} \quad (2.6)$$

con  $P_1 = 0$ ,  $H_1 = 1$

Por otro lado:  $h_i = E_1 + \dots + E_i$ , es la profundidad hasta el final del estrato  $i$ .

De este modo, para una estructura formada por 2 estratos:

$$\begin{aligned} P_2 &= P_1 + H_1 K_1 e^{-2\lambda E_1} = K_1 e^{-2\lambda E_1} \\ H_2 &= H_1 + P_1 K_1 e^{-2\lambda E_1} = 1 \end{aligned}$$

Por tanto, para este caso, la función característica de Stefanescu es:

$$\theta_2 = \frac{P_2}{H_2 - P_2} = \frac{K_1 e^{-2\lambda E_1}}{1 - K_1 e^{-2\lambda E_1}} \quad (2.7)$$

En forma similar, para una estructura formada por 3 estratos, se obtiene:

$$\theta_3 = \frac{K_1 e^{-2\lambda E_1} + K_2 e^{-2\lambda(E_1+E_2)}}{1 - K_1 e^{-2\lambda E_1} - K_2 e^{-2\lambda(E_1+E_2)} + K_1 K_2 e^{-2\lambda E_2}} \quad (2.8)$$

La expresión general (2.3), consta de una primera parte, correspondiente a la solución del problema en un medio homogéneo: término  $1/r$  dentro del paréntesis cuadrado, más un efecto perturbador, por el hecho que no se trata de un medio homogéneo, representado por la integral de Hankel del lado derecho de (2.3).

De acuerdo a la identidad siguiente [24]:

$$\begin{aligned} \int_0^{\infty} \lambda^m e^{-z\lambda} J_0(r\lambda) d\lambda &= (z^2 + r^2)^{-1/2}, \text{ para } m = 0 \\ &= r(z^2 + r^2)^{-3/2}, \text{ para } m = 1 \end{aligned} \quad (2.9)$$

el término  $1/r$  de la expresión (2.3) puede escribirse como:

$$\frac{1}{r} = \int_0^{\infty} J_0(r\lambda) d\lambda \quad (2.10)$$

Reemplazando (2.10) en (2.3), se obtiene otra forma de la expresión general:

$$\phi(r) = \frac{\rho_1 I}{2\pi} \int_0^{\infty} [1 + 2\theta_n] J_0(r\lambda) d\lambda = \frac{\rho_1 I}{2\pi} \int_0^{\infty} N_n J_0(r\lambda) d\lambda \quad (2.11)$$

donde  $N_n = 1 + 2\theta_n$ , es la denominada función kernel o función característica de Slichter, la que incluye la solución fundamental del problema. Esta forma de expresar la solución directa, tiene ventaja en la obtención de la solución inversa; esto es, partiendo de valores medidos de resistividad aparente de un terreno, determinar la función característica  $N_n(\lambda)$  y, de ésta, obtener la función de resistividad  $\rho(z)$ .

A modo de ejemplo, la función característica de Slichter para una estructura de 2 capas es:

$$N_2 = 1 + 2\theta_2 = 1 + 2 \frac{K_1 e^{-2\lambda E_1}}{1 - K_1 e^{-2\lambda E_1}} = \frac{1 + K_1 e^{-2\lambda E_1}}{1 - K_1 e^{-2\lambda E_1}} \quad (2.12)$$

Para una estructura de  $n$  capas, la función característica de Slichter puede calcularse también mediante un algoritmo propuesto por Sunde [1].

El caso particular de un sistema de 2 capas, puede resolverse desarrollando en serie la expresión (2.7). Simplificando la notación a:  $\theta_2 = \theta$ ,  $K_1 = K$ ,  $E_1 = h_1 = h$ :

$$\theta = \frac{K e^{-2\lambda h}}{1 - K e^{-2\lambda h}} = K e^{-2\lambda h} + K^2 e^{-4\lambda h} + K^3 e^{-6\lambda h} + \dots = \sum_{n=1}^{\infty} K^n e^{-2n\lambda h} \quad (2.13)$$

Utilizando la identidad (2.9), la integral de Hankel contenida en la expresión (2.3), resulta:

$$\int_0^{\infty} \theta J_0(r\lambda) d\lambda = \int_0^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} K^n e^{-2n\lambda h} J_0(r\lambda) d\lambda = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{K^n}{\sqrt{r^2 + (2nh)^2}} \quad (2.14)$$

Por tanto:

$$\phi(r) = \frac{\rho_1 I}{2\pi} \left[ \frac{1}{r} + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{K^n}{\sqrt{r^2 + (2nh)^2}} \right] \quad (2.15)$$

Una solución similar a (2.15) se obtiene aplicando el método de las imágenes a un sistema de 2 capas. En [4] se realiza un desarrollo detallado de aplicación del método de las imágenes para una estructura de 2 capas.

### 2.2.2.2 Resistividad aparente

Sobre la base de la expresión (2.3), que establece el potencial producido por una fuente puntual de corriente en un punto sobre la superficie del terreno, es posible determinar expresiones generales que permiten calcular los valores de resistividad aparente que deberían obtenerse al realizar mediciones en una estructura determinada.

#### Configuración de Wenner

En términos generales, para la configuración de Wenner, la resistividad aparente teórica que debería obtenerse de las mediciones es:

$$\rho_{a(w)} = \frac{2\pi A}{I} (\phi_{P1} - \phi_{P2}) = \frac{2\pi A}{I} 2[\phi(r=A) - \phi(r=2A)] \quad (2.16)$$

Por lo tanto, reemplazando (2.3) en (2.15), se obtiene:

$$(\rho_a / \rho_1)_{(w)} = 1 + 4A \int_0^{\infty} \theta_n(K, E, \lambda) [J_0(A\lambda) - J_0(2A\lambda)] d\lambda \quad (2.17)$$

Si se conocen las características de la estructura de un terreno: número de estratos, sus resistividades y espesores, la expresión general anterior permite determinar los valores de

resistividad aparente en relación con la resistividad del estrato superior, en función de la separación  $A$  entre electrodos.

Si se trata de una estructura formada por 2 estratos, procediendo en forma similar a lo anterior, pero utilizando (2.15) en lugar de (2.3), se obtiene la siguiente expresión para la resistividad aparente:

$$(\rho_a / \rho_1)_{(w)} = 1 + 4 \sum_{n=1}^{\infty} \left[ \frac{K^n}{\sqrt{1 + (2nh / A)^2}} - \frac{K^n}{\sqrt{4 + (2nh / A)^2}} \right] \quad (2.18)$$

### Configuración de Schlumberger

Si se supone una separación pequeña entre los electrodos de potencial, la resistividad aparente teórica, según lo indicado en 1.3.4.2, es:

$$\rho_{a(s)} = \frac{\pi L^2}{I} E \quad (2.19)$$

donde:

$$E = -2(\partial\phi / \partial r)_{r=L} \quad (2.20)$$

es el campo eléctrico en el centro de medición. El factor 2 representa el efecto de ambas fuentes de corriente (electrodos C1 y C2).

Introduciendo (2.3) y (2.20) en (2.19):

$$\rho_{a(s)} = -\rho_1 L^2 \left[ -\frac{1}{r^2} + 2 \int_0^{\infty} \theta_n(\lambda) \frac{\partial J_0(r\lambda)}{\partial r} d\lambda \right]_{r=L} \quad (2.21)$$

donde:

$$\frac{\partial J_0(r\lambda)}{\partial r} = -\lambda J_1(r\lambda)$$

Por tanto, para la configuración de Schlumberger, la resistividad aparente en relación con la del primer estrato, en función de la distancia  $L$  al centro de medición, es:

$$(\rho_a / \rho_1)_{(s)} = 1 + 2L^2 \int_0^{\infty} \lambda \theta_n(\lambda) J_1(L\lambda) d\lambda \quad (2.22)$$

donde  $J_1(L\lambda)$  es la función de Bessel de primera especie y orden 1.

Para el caso particular de una estructura formada por 2 estratos, sustituyendo (2.13) en (2.22) y aplicando (2.10):

$$(\rho_a / \rho_1)_{(S)} = 1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \left[ \frac{K^n}{(1 + (2nh / L)^2)^{3/2}} \right] \quad (2.23)$$

En ciertas situaciones, al utilizar la configuración de Schlumberger, es posible que no se pueda cumplir con la condición de utilizar una separación  $a$  que sea pequeña en comparación con  $L$ . Para estos casos, los valores teóricos de resistividad aparente se determinan con (1.18), donde la diferencia de potencial  $V=2[\phi(r=\tilde{L} a/2) - \phi(r=L a/2)]$  se obtiene con (2.3) para la situación general, o con (2.15) para un sistema de 2 estratos.

En [4] se analiza la diferencia entre los valores de resistividad aparente determinados con valores de  $a$  que no son suficientemente pequeños en comparación con  $L$ , y los valores límite teóricos dados por las expresiones (2.22) y (2.23) y con los cuales se construyen los gráficos patrón. Sobre esta base, es posible realizar una corrección aproximada de los valores medidos de resistividad aparente para la configuración de Schlumberger, para valores pequeños de  $L$ :

$$\rho_{a(S)corregido} = \rho_{a(S)medido} \frac{4}{4 - (a / L)^2}$$

### 2.2.3 Interpretación mediante curvas patrón

El método de interpretación mediante curvas patrón, consiste en comparar los gráficos de campo de resistividad aparente, con curvas patrón o estándar especialmente elaboradas para este fin. Estas curvas patrón se construyen para distintas combinaciones de los parámetros de la estructura de un terreno, de manera que sean representativas de una gama grande de posibilidades. La mayor parte de las curvas patrón disponible, asumen que los diferentes estratos del terreno son paralelos a la superficie. Si se obtiene un calce aceptable entre la curva de campo y la curva patrón, se supone que la estructura del terreno es muy cercana a la teórica, con aproximadamente iguales resistividades y espesores de los estratos.

Las curvas patrón se construyen normalmente en forma adimensional, así por ejemplo, para un sistema de 2 capas, se trazan los valores de  $\rho_a / \rho_1$  en función de  $A/E_1$  o  $L/E_1$ , para

distintos valores del factor de reflexión  $K$  o de la relación  $\rho_a / \rho_1$ , utilizando las expresiones (2.18) o (2.23). Para una estructura formada por 3 capas, se acostumbra construir cada familia de curvas patrón para una determinada relación de resistividades, por ejemplo,  $\rho_1 - \rho_2 - \rho_3 = 1 - 5 - 0,25$ , llevando como parámetro la relación  $E_2 / E_1$ .

Como estos valores se trazan en escalas logarítmicas, las coordenadas de un punto de una curva corresponden a  $\log(\rho_a) - \log(\rho_1) = \log(\rho_a / \rho_1)$  y a  $\log(A) - \log(E_1) = \log(A / E_1)$  o  $\log(L) - \log(E_1) = \log(L / E_1)$ . Esto permite representar un mayor rango de variables en un solo gráfico, ya que la curva correspondiente a un determinado valor de  $\rho_1$  o de  $E_1$ , se obtiene de la patrón, por un desplazamiento en magnitudes  $\log(\rho_1)$  y  $\log(E_1)$ , manteniéndose la forma de las curvas. La preservación de la forma de la curva, al utilizar coordenadas logarítmicas, es la base del método de interpretación mediante la comparación de gráficos [4].

Para hacer posible una comparación por superposición de las curvas de campo con las curvas patrón, es necesario que ambas estén construidas en un mismo tipo de papel. Para la representación de las curvas patrón se ha hecho estándar el papel log-log de 62,5 mm por década [10].

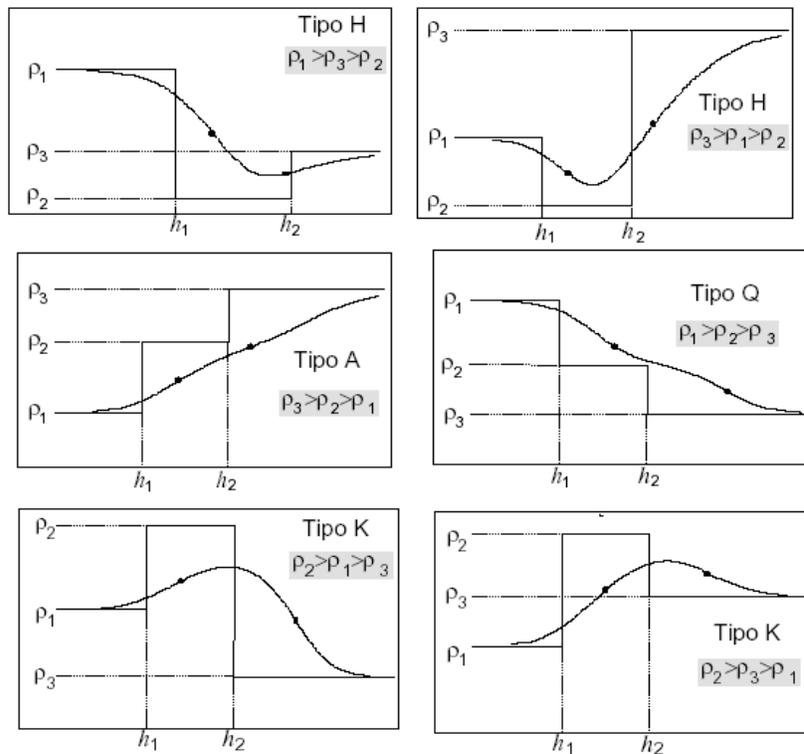
### 2.2.3.1 Clasificación de las curvas patrón

De acuerdo a las posibles combinaciones de los diferentes estratos de un terreno, las curvas patrón pueden agruparse en varios tipos.

Para una estructura de 2 capas, existen sólo 2 tipos de curvas:  $\rho_1 > \rho_2$  y  $\rho_1 < \rho_2$ , según la Figura 1.17. Para una estructura formada por 3 estratos, existen 6 posibles combinaciones de los valores relativos de resistividad, agrupados en 4 tipos de curvas. Para la designación de los tipos de curvas se suele usar la nomenclatura europea siguiente:

- Tipo H:  $\rho_1 > \rho_2 < \rho_3$ ,      subtipos:  $\rho_1 > \rho_3 > \rho_2$       y       $\rho_3 > \rho_1 > \rho_2$
- Tipo K:  $\rho_1 < \rho_2 > \rho_3$ ,      subtipos:  $\rho_2 > \rho_1 > \rho_3$       y       $\rho_2 > \rho_3 > \rho_1$
- Tipo A:  $\rho_1 < \rho_2 < \rho_3$
- Tipo Q:  $\rho_1 > \rho_2 > \rho_3$

En la Figura 2.11 se muestran los 4 tipos de curvas para un terreno formado por 3 estratos.



**Figura 2.11 Tipos posibles de curvas de resistividad aparente para una estructura formada por 3 estratos.**

Para una estructura constituida por 4 estratos existen 24 posibles combinaciones de las resistividades, agrupados en 8 tipos de curvas:

- Tipo HK:  $\rho_1 > \rho_2 < \rho_3 > \rho_4$ , con 5 subtipos
- Tipo HA:  $\rho_1 > \rho_2 < \rho_3 < \rho_4$ , con 3 subtipos.
- Tipo KH:  $\rho_1 < \rho_2 > \rho_3 < \rho_4$ , con 5 subtipos.
- Tipo KQ:  $\rho_1 < \rho_2 > \rho_3 > \rho_4$ , con 3 subtipos.
- Tipo AA:  $\rho_1 < \rho_2 < \rho_3 < \rho_4$ , con 1 subtipo.
- Tipo AK:  $\rho_1 < \rho_2 < \rho_3 > \rho_4$ , con 3 subtipos.
- Tipo QH:  $\rho_1 > \rho_2 > \rho_3 < \rho_4$ , con 3 subtipos.
- Tipo QQ:  $\rho_1 > \rho_2 > \rho_3 > \rho_4$ , con 1 subtipo.

### 2.2.3.3 Interpretación de estructuras de 2 capas.

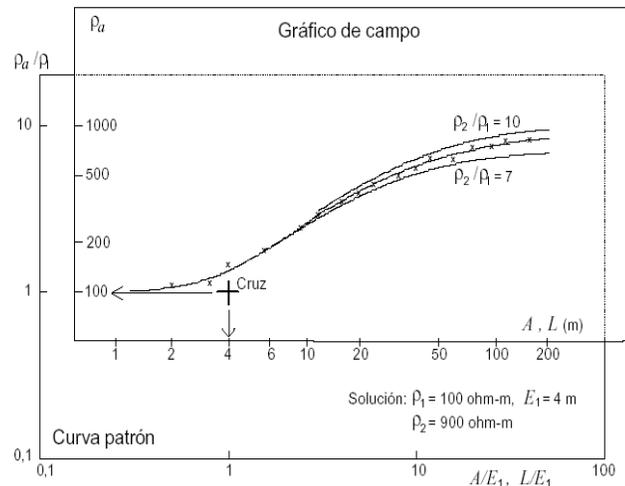
El procedimiento de interpretación de las medidas de resistividad de un terreno, mediante curvas patrón de 2 capas, es el siguiente:

- a) Trazar las curvas de resistividad aparente con los datos obtenidos en terreno, en función de la separación  $A$  entre electrodos, para la configuración de Wenner, o en función de  $L = (n+0,5) a$ , para la configuración de Schlumberger. La curva de campo debe dibujarse en un papel log-log transparente de igual dimensión de década que la curva patrón a utilizar. El trazado de la curva de campo puede hacerse uniendo los puntos medidos mediante trazos rectos, o haciendo pasar por ellos una curva que sea una buena aproximación a éstos, alisando los saltos que están siempre presentes.
- b) Superponer el gráfico que contiene la curva de campo, sobre el gráfico o curva patrón. Para ello, conviene utilizar una ventana o una mesa luminosa.
- c) Deslizar el gráfico de campo sobre el gráfico patrón hasta obtener un calce lo más perfecto posible entre la curva de campo y una de las curvas patrón. Durante este proceso, deben mantenerse paralelos los ejes de ambos gráficos. Si es posible un calce en sólo una parte de la curva de campo, significa que la estructura del terreno está formada por más de 2 estratos.
- d) Marcar en el gráfico de campo, una cruz correspondiente al origen (1,1) del gráfico patrón.
- e) Leer en el eje vertical del gráfico de campo, la ordenada de la cruz marcada. Este valor corresponde a la resistividad de la capa superior  $\rho_1$ .
- f) Leer en el eje horizontal del gráfico de campo, la abscisa de la cruz marcada. Este valor indica el espesor  $E_1$  de la capa superior.
- g) Leer el valor de  $K$  o directamente  $\rho_2 / \rho_1$  de la curva patrón que calza con la de campo. Si el parámetro de las curvas patrón es  $K$ , entonces el valor de  $\rho_2$  se obtiene de:

$$\rho_2 = \frac{1 + K}{1 - K} \rho_1 \quad (2.24)$$

Nota: Es posible interpolar entre diferentes curvas patrón de un mismo número de capas e igual tipo.

En la Figura 2.13 se ilustra el procedimiento gráfico de interpretación descrito anteriormente, en un terreno formado por 2 estratos.



**Figura 2.13 Ejemplo de interpretación de un terreno de 2 estratos, mediante curvas patrón.**

En la Figura 2.13 se observa que ha sido necesario realizar mediciones de resistividad aparente hasta separaciones  $A, L$  de aproximadamente 200 m, con el objeto de identificar el tipo de estructura. La curva de campo, en su parte final, no coincide con una de las curvas patrón disponibles en el gráfico correspondiente de Orellana y Mooney [10]; por tanto, el valor de resistividad del estrato inferior se obtiene por interpolación entre dos curvas.

#### 2.2.4 Métodos cuantitativos de interpretación

Hasta la llegada masiva de las computadoras, particularmente las de tipo personal, a bajo costo, la casi única alternativa de interpretación de las mediciones de resistividad aparente era la comparación de los gráficos de campo con curvas patrón. Sin embargo, en el área de la prospección para usos geofísicos, se habían venido desarrollando, ya desde los años 30, numerosas técnicas numéricas para una interpretación cuantitativa de las mediciones y obtener los parámetros de la estructura investigada [22, 25 - 29].

Entre estas técnicas de interpretación, una de las más sencillas es aplicar el método de los mínimos cuadrados al conjunto de mediciones de campo de resistividad aparente. Partiendo de una estimación inicial de los parámetros del terreno, el procedimiento consiste en ir modificando adecuadamente éstos, hasta que los valores de resistividad aparente calculados se ajusten lo mejor posible a los valores medidos.

Otros procedimientos más avanzados, aplican el método de los mínimos cuadrados a la función característica de Slichter, descrita en 2.2.2.1, en lugar de los valores de resistividad

aparente. La función característica se obtiene mediante una transformación numérica de las medidas de resistividad aparente.

A continuación se muestra la aplicación del método de los cuadrados mínimos en el caso sencillo, pero práctico para nuestros propósitos, de una estructura formada por 2 estratos.

$\rho_{med}(A_1), \rho_{med}(A_2), \dots, \rho_{med}(A_N)$  es un conjunto de  $N$  mediciones de campo de resistividad aparente. La estructura de terreno se supone constituida por dos estratos. Por tanto, se requiere determinar los parámetros  $\rho_1, \rho_2$  y  $E_1 = h$ , que correspondan a la mejor aproximación de las  $N$  mediciones.

Para cada medición  $m$  se define una función de error  $F_m$ , igual a la diferencia entre el logaritmo del valor calculado  $\rho_{cal}$  y el logaritmo del valor medido  $\rho_{med}$ , para un determinado valor de la separación  $A_m$  entre electrodos. La ponderación logarítmica de las magnitudes y parámetros proporciona una mejor solución del problema [22, 27, 29]. De este modo:

$$\begin{aligned} F_1 &= \text{Ln} \rho_{cal}(A_1) - \text{Ln} \rho_{med}(A_1) \\ F_2 &= \text{Ln} \rho_{cal}(A_2) - \text{Ln} \rho_{med}(A_2) \\ &\cdot \quad \cdot \quad \cdot \quad \cdot \quad \cdot \\ &\cdot \quad \cdot \quad \cdot \quad \cdot \quad \cdot \\ F_N &= \text{Ln} \rho_{cal}(A_N) - \text{Ln} \rho_{med}(A_N) \end{aligned} \quad (2.25)$$

Se desea determinar los parámetros  $\rho_1, \rho_2$  y  $h$ , que minimicen la función:

$$U(Y) = \sum_{m=1}^N [F_m]^2 = \sum_{m=1}^N [\text{Ln} \rho_{cal}(A_m) - \text{Ln} \rho_{med}(A_m)]^2 \quad (2.26)$$

Si en las mediciones de resistividad aparente se utiliza la configuración de Wenner, entonces, de acuerdo a (2.18):

$$\rho_{cal} = \rho_1 \left[ 1 + 4 \sum_{n=1}^{\infty} K^n \left( \frac{1}{\sqrt{\alpha}} - \frac{1}{\sqrt{\beta}} \right) \right] \quad (2.27)$$

donde:

$$\alpha = 1 + (2nh / A_m)^2 \tag{2.28}$$

$$\beta = 4 + (2nh / A_m)^2 \tag{2.29}$$

$$K = (\rho_2 - \rho_1) / (\rho_2 + \rho_1) \tag{2.30}$$

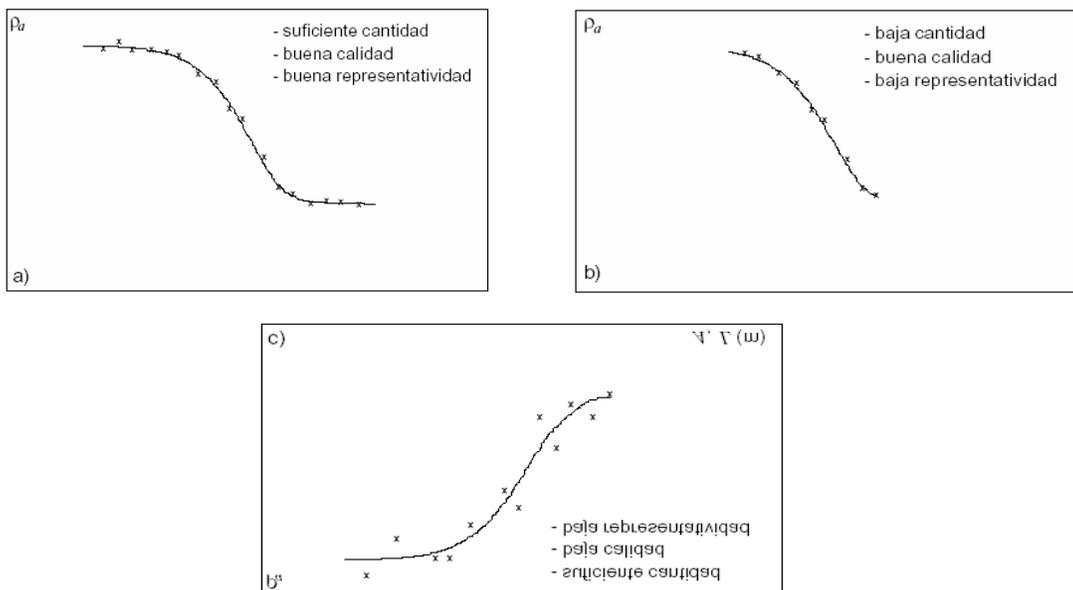
Si en las mediciones de resistividad aparente se utiliza la configuración de Schlumberger, entonces, de acuerdo a (2.23):

$$\rho_{cal} = \rho_1 \left\{ 1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} K^n \frac{1}{\sqrt{\gamma^3}} \right\} \tag{2.31}$$

donde:  $\gamma = 1 + (2nh / L_m)^2$  (2.32)

A partir de las expresiones anteriores es posible obtener iterativamente los parámetros  $\rho_1$ ,  $\rho_2$  y  $h$  de una estructura que se supone formada por 2 estratos.

La convergencia del método es buena y el número de iteraciones requerido para obtener una solución aceptable depende levemente de la estimación inicial de los parámetros del terreno, aunque esto no significa mayor problema considerando lo relativamente simple y rápido del proceso de cálculo.



**Figura 2.15 Cantidad, calidad y representatividad de las mediciones de resistividad aparente.**

Otro aspecto importante a tener presente y que influye en la veracidad de la interpretación y en la convergencia a una solución, es la bondad de las mediciones. Para que el conjunto de mediciones pueda considerarse aceptable, debe disponerse de un número suficiente de puntos de medición. Estos puntos deben representar en buena forma las características básicas del gráfico de resistividad aparente (asíntotas al comienzo y final). Finalmente, las mediciones deben tener una calidad o exactitud aceptable, sin desviaciones importantes con respecto a una tendencia definida.

Si la bondad de las mediciones no es adecuada, la interpretación de éstas puede admitir diversas soluciones que dependen de la estimación inicial de los parámetros. En la Figura 2.15 se muestran tres casos de medición que ejemplifican lo anterior.

En a), el conjunto de mediciones es adecuado.

En b), la cantidad de puntos medidos no es suficiente como para obtener una solución única, independiente de los parámetros iniciales.

En c), existe una cantidad de puntos de medición que puede considerarse

Adecuada; sin embargo, la calidad de la medición no es aceptable y, por tanto, su representatividad también es baja.

En [31] se describe un procedimiento similar al indicado anteriormente, de interpretación cuantitativa de una estructura de 2 estratos. Para mejorar la convergencia a una solución, al igual que en [26, 27], en este trabajo se utiliza una ponderación de los valores  $Fm$  que es inversamente proporcional a la desviación estándar del valor medido  $m$ , con respecto al valor esperado para esa lectura. Además, se estiman los errores de los parámetros determinados, para un cierto nivel de confianza.

La metodología antes descrita fue implementada en MatLab, formando parte del programa para el proyecto y análisis de sistemas de puesta a tierra SistPTEx

## CAPÍTULO 3. RESULTADOS

Para la validación de la metodología de interpretación de mediciones de resistividad aparente desarrollada, se dispuso de cinco juegos de mediciones reales de resistividad, tres realizadas con el método de Wenner y dos con el método de Schlumberger. Para facilitar la validación e interpretación de los resultados se realizará el análisis por separado de cada uno de los juegos de datos.

### 3.1 Ejemplos de mediciones realizadas con el método de Wenner.

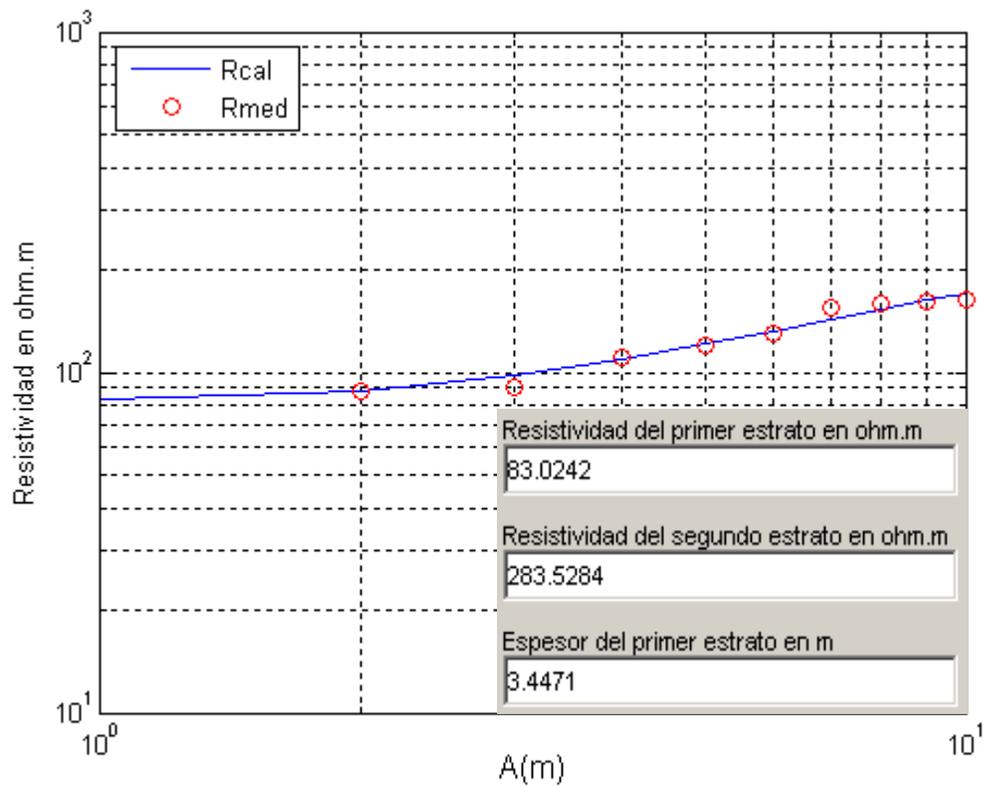
#### 3.1.1. Ejemplo # 1

En la tabla 3.1.1 se muestran los resultados de las mediciones realizadas.

**Tabla 3.1.1. Mediciones de resistividad aparente**

Con la ayuda del programa SistPTEx basado en la metodología descrita en el capítulo anterior, el resultado de interpretación de las mediciones de resistividad son los mostrados en la figura 3.1.1.1.

A(m)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$\rho_a(\Omega\text{-m})$	86.8	88.3	90.5	110.6	120.4	130.7	155.1	158.2	160.8	162.9



**Figura 3.1.1.1. Resultados del SistPTEx para las mediciones de resistividad aparente de la Tabla 3.1.1**

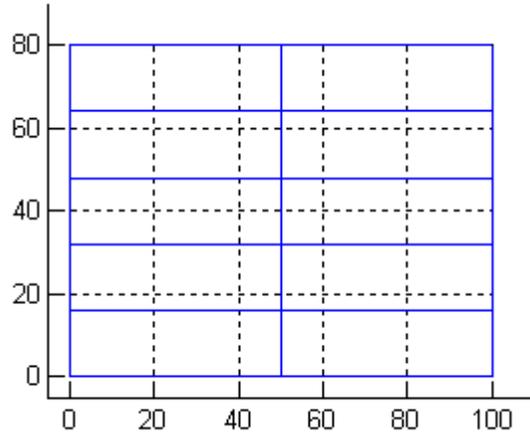
Como se puede apreciar se trata de un terreno de dos estratos, el primero con una resistividad de  $83 \Omega.m$  y espesor de  $3.44 \text{ m}$ , el segundo con una resistividad de  $283.5 \Omega.m$ .

Se realiza el diseño de la malla de una subestación en un terreno con estas características, los datos se muestran en la figura 3.1.1.2.

Numero de estratos (2-10)	2
Numero de Conductores Horizontales en el eje X	6
Numero de Conductores Horizontales en el eje y	3
Diametro de los conductores en m	0.01326
Profundidad de enterramiento de los conductores en m	1
Numero de Barras Verticales	0
Diametro de las Barras en m	0
Corriente inyectada en el terreno en A	1700
Tiempo de duración de la corriente en s	1
Resistividad superficial del Terreno en Ohm.m	3000
Espesor de la capa superficial en m	0.1
Si peso 50 Kg(poner 50), Si peso 70 Kg(poner 70)	50

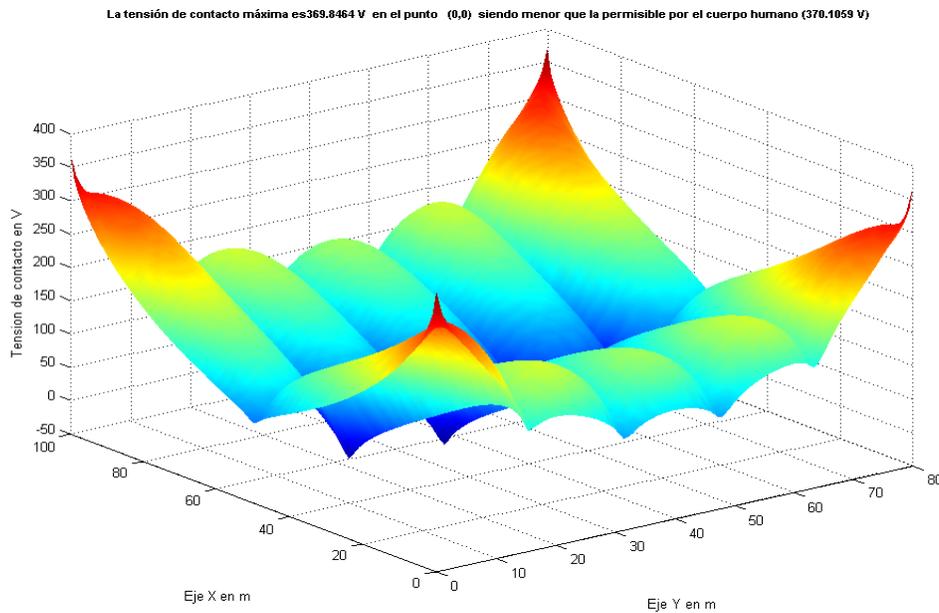
**Figura 3.1.1.2. Datos requeridos para el diseño de la malla en terreno no homogéneo.**

La figura 3.1.1.3.muestra la malla de reticulado uniforme que para un terreno como este cumple con los requerimientos de voltajes tolerables.



**Figura 3.1.1.3. Malla de reticulado uniforme para terreno no homogéneo.**

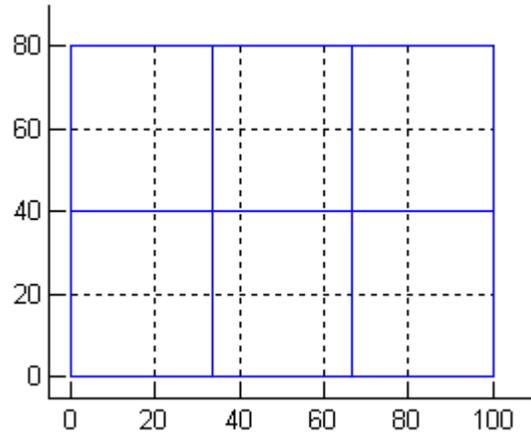
Los potenciales de contacto para esta malla se muestran en la figura 3.1.1.4.



**Figura 3.1.1.4. Potenciales de contacto para la malla de la figura 3.1.1.3.**

En este caso la tensión de contacto máxima (369.8 V) se produce en los extremos de la malla, siendo ligeramente inferior a la permisible por el cuerpo humano en 1%.

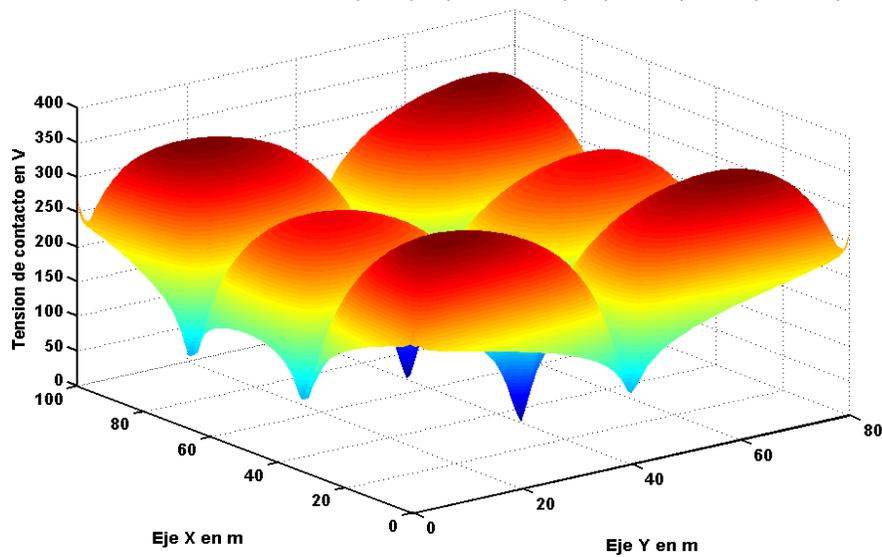
Si el terreno se considerara homogéneo y se tomara como resistividad de este, la resistividad del primer estrato  $83 \Omega.m$ , la malla obtenida para los mismos datos de la figura 3.1.1.1 sería la mostrada en la figura 3.1.1.5.



**Figura 3.1.1.5. Malla de reticulado uniforme para terreno homogéneo.**

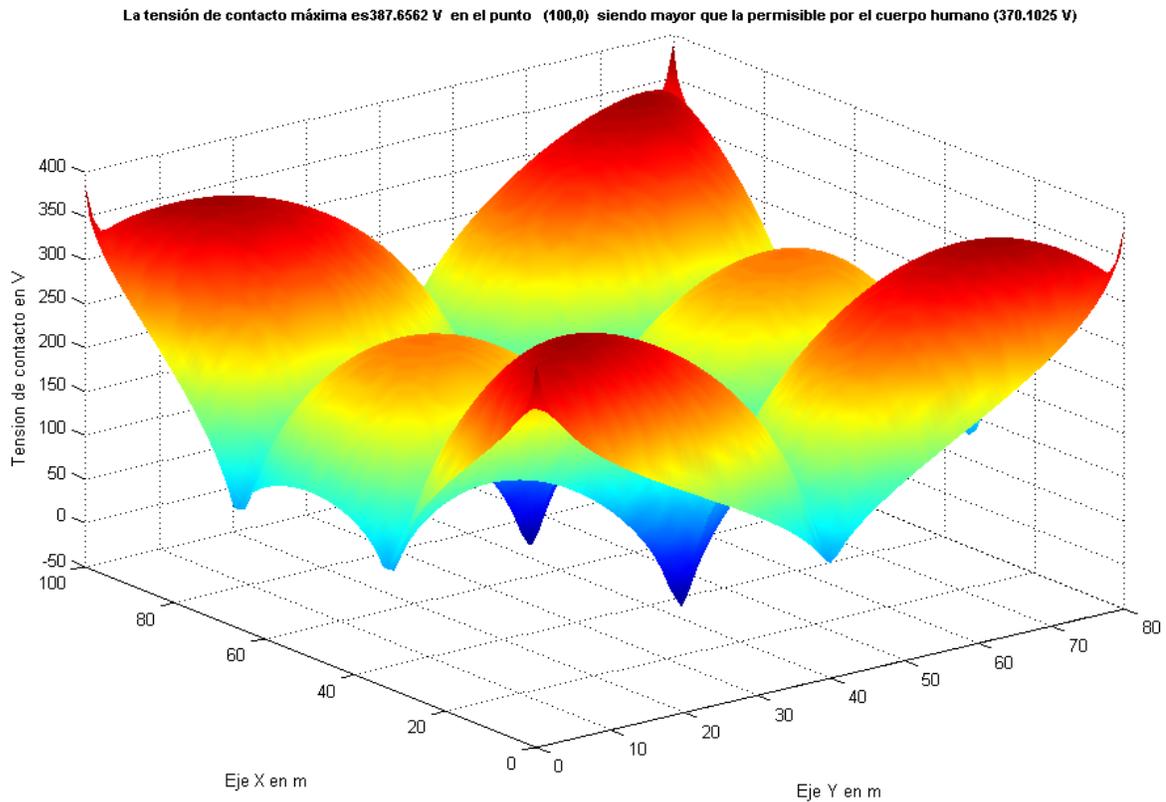
Los potenciales de contacto para esta malla se muestran en la figura 3.1.1.6.

La tensión de contacto máxima es 350.7387 V en el punto (13,66) siendo menor que la permisible por el cuerpo humano (370.6383 V)



**Figura 3.1.1.6. Potenciales de contacto para la malla de la figura 3.1.1.5.**

Como se puede observar el resultado es una malla de menor reticulado, cuyo comportamiento en un terreno que realmente es biestratificado, provocaría potenciales de contacto como los que se muestran en la figura 3.1.1.7.



**Figura 3.1.1.7. Potenciales de contacto para la malla de la figura 3.1.1.5, pero considerando el terreno no homogéneo.**

En este caso los potenciales de contacto máximos (387.65 V) superan al tolerable por el cuerpo humano en un 4%, por lo tanto el diseño es subdimensionado y existiría riesgo para la vida, además el diseño para terreno homogéneo cuenta con menos electrodos por lo tanto con una resistencia de puesta a tierra superior a la deseada.

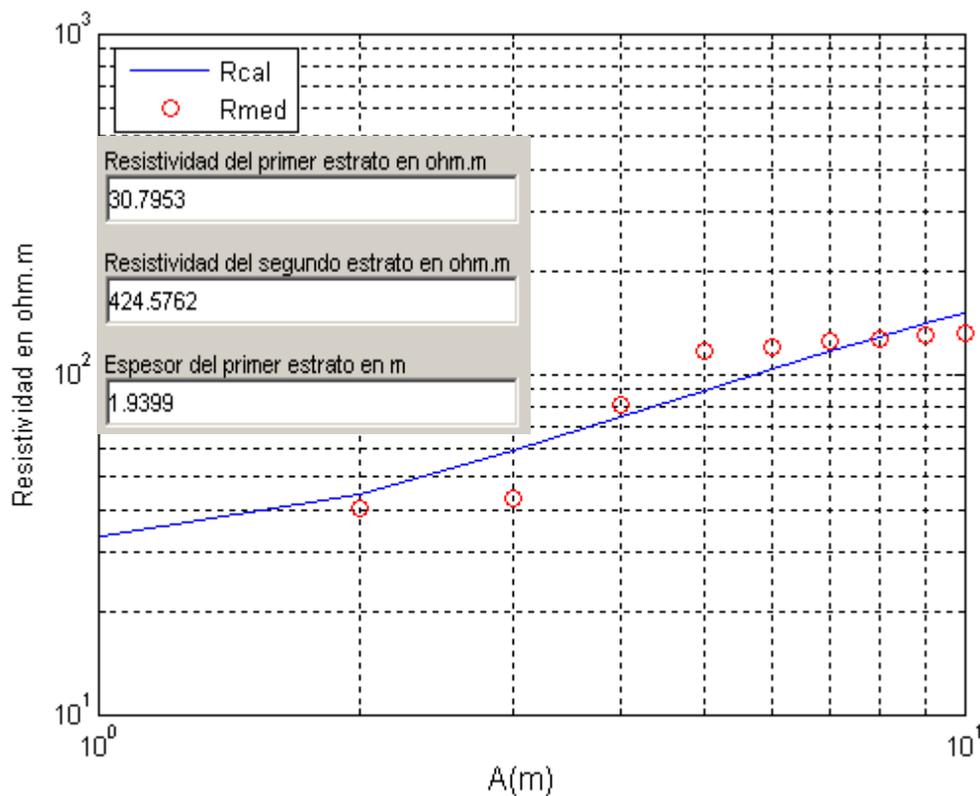
### 3.1.2. Ejemplo # 2

En la tabla 3.1.2 se muestran los resultados de las mediciones realizadas.

**Tabla 3.1.2. Mediciones de resistividad aparente**

A(m)	1	2	3	4	5
$\rho_a(\Omega\text{-m})$	35.69	40.35	43.37	80.75	116.95
A(m)	6	7	8	9	10
$\rho_a(\Omega\text{-m})$	120.47	125.11	127.29	130.75	131.12

Igual que en el ejemplo anterior, el resultado de interpretación de las mediciones de resistividad son los mostrados en la figura 3.1.2.1.



**Figura 3.1.2.1. Resultados del SistPTEx para las mediciones de resistividad aparente de la Tabla 3.1.2**

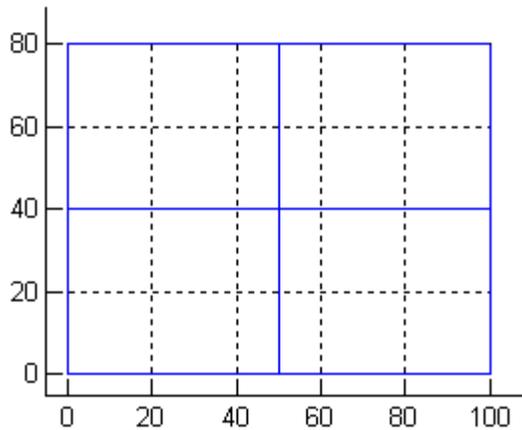
Como se puede apreciar se trata de un terreno de dos estratos, el primero con una resistividad de  $30.79 \Omega.m$  y espesor de  $1.93 m$ , el segundo con una resistividad de  $424.57 \Omega.m$ .

Se realiza el diseño de la malla de una subestación en un terreno con estas características, los datos se muestran en la figura 3.1.2.2.

Numero de estratos (2-10)	2
Numero de Conductores Horizontales en el eje X	3
Numero de Conductores Horizontales en el eje y	3
Diametro de los conductores en m	0.01326
Profundidad de enterramiento de los conductores en m	1
Numero de Barras Verticales	0
Diametro de las Barras en m	0
Corriente inyectada en el terreno en A	1700
Tiempo de duración de la corriente en s	1
Resistividad superficial del Terreno en Ohm.m	3000
Espesor de la capa superficial en m	0.1
Si peso 50 Kg(poner 50), Si peso 70 Kg(poner 70)	50

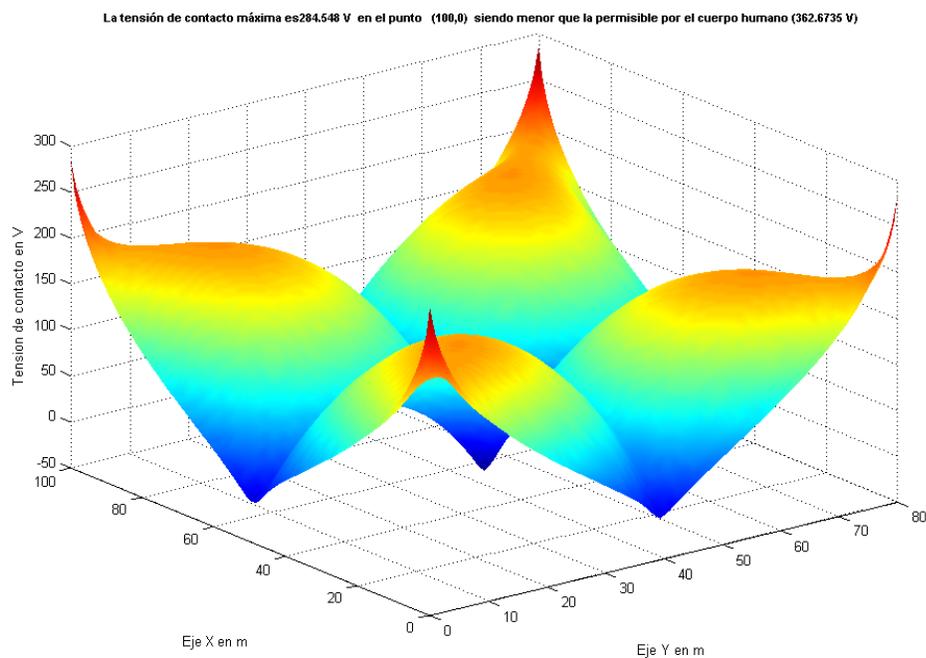
**Figura 3.1.2.2. Datos requeridos para el diseño de la malla en terreno no homogéneo.**

La figura 3.1.2.3.muestra la malla de reticulado uniforme que para un terreno como este cumple con los requerimientos de voltajes tolerables.



**Figura 3.1.2.3. Malla de reticulado uniforme para terreno no homogéneo.**

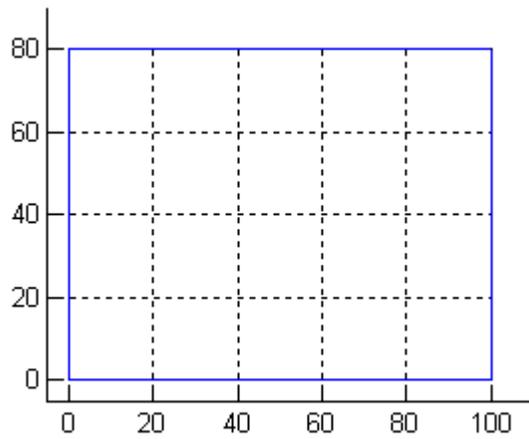
Los potenciales de contacto para esta malla se muestran en la figura 3.1.2.4.



**Figura 3.1.2.4. Potenciales de contacto para la malla de la figura 3.1.2.3.**

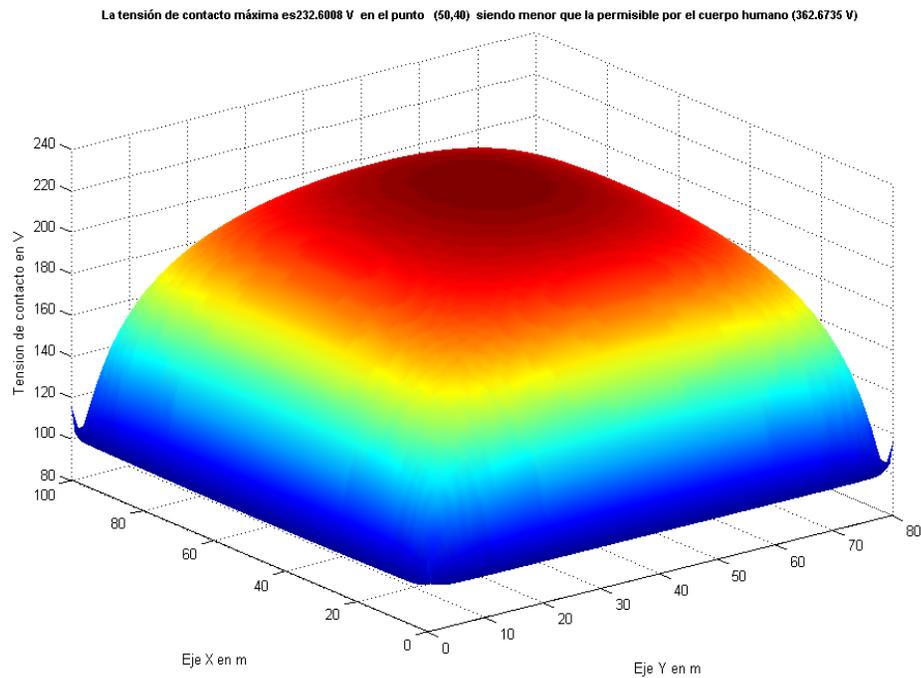
En este caso la tensión de contacto máxima (284.54 V) se produce en los extremos de la malla, siendo inferior a la permisible por el cuerpo humano (362.6 V) en un 21.55%.

Si el terreno se considerara homogéneo y se tomara como resistividad de este, la resistividad del primer estrato  $30.79 \Omega.m$ , la malla obtenida para los mismos datos de la figura 3.1.2.1 sería la mostrada en la figura 3.1.2.5.



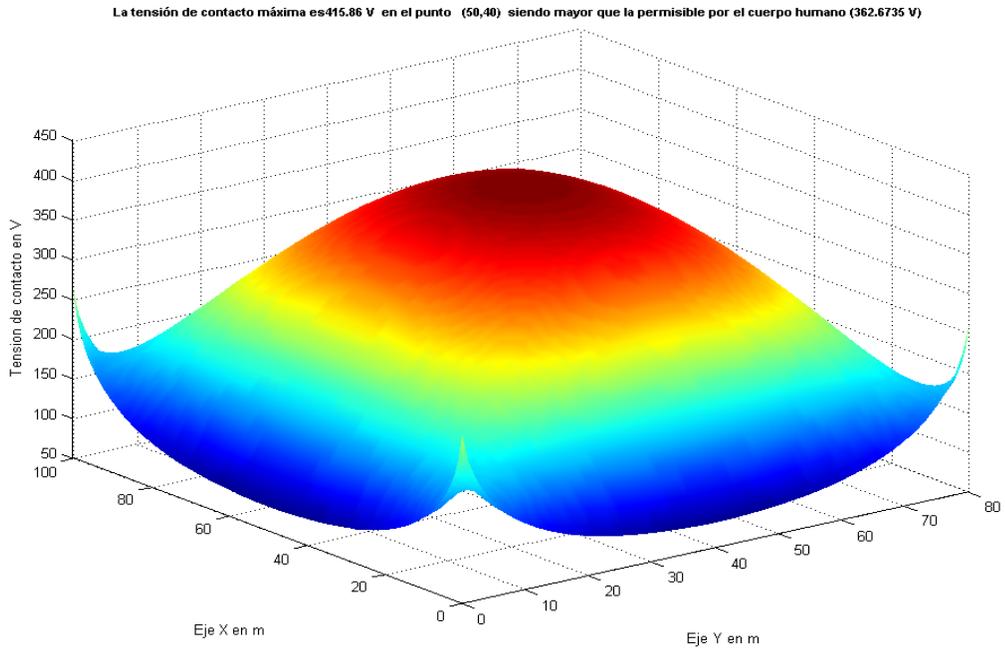
**Figura 3.1.2.5. Malla de reticulado uniforme para terreno homogéneo.**

Los potenciales de contacto para esta malla se muestran en la figura 3.1.2.6.



**Figura 3.1.2.6. Potenciales de contacto para la malla de la figura 3.1.2.5.**

Como se puede observar el resultado es una malla perimétrica, cuyo comportamiento en un terreno que realmente es biestratificado, provocaría potenciales de contacto como los que se muestran en la figura 3.1.2.7.



**Figura 3.1.2.7. Potenciales de contacto para la malla de la figura 3.1.2.5, pero considerando el terreno no homogéneo.**

En este caso los potenciales de contacto máximos (415.86 V) superan al tolerable por el cuerpo humano en un 14.66%, el diseño es subdimensionado por lo tanto existiría riesgo para la vida, además de incrementarse la resistencia de puesta a tierra a un valor superior al deseado.

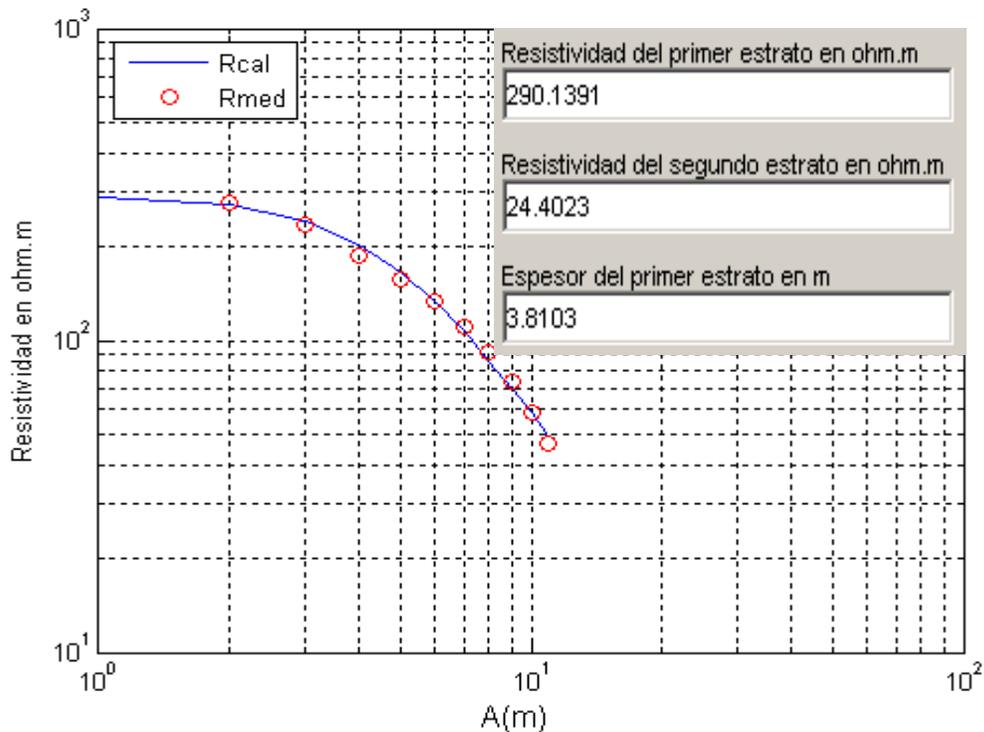
### 3.1.3. Ejemplo # 3

En la tabla 3.1.3 se muestran los resultados de las mediciones realizadas.

**Tabla 3.1.3. Mediciones de resistividad aparente**

A(m)	1	2	3	4	5	6
$\rho_a(\Omega\text{-m})$	311.01	275.20	235.43	185.98	156.13	133.45
A(m)		7	8	9	10	11
$\rho_a(\Omega\text{-m})$		110.39	91.48	73.51	58.43	46.99

Con la ayuda del programa SistPTE<sub>x</sub>, el resultado de interpretación de las mediciones de resistividad son los mostrados en la figura 3.1.3.1.



**Figura 3.1.3.1. Resultados del SistPTE<sub>x</sub> para las mediciones de resistividad aparente de la Tabla 3.1.3**

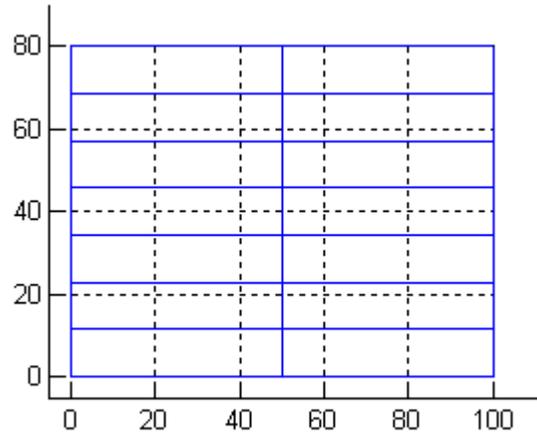
Como se puede apreciar se trata de un terreno de dos estratos, el primero con una resistividad de 290.13  $\Omega$ .m y espesor de 3.81 m, el segundo con una resistividad de 24.40  $\Omega$ .m.

Se realiza el diseño de la malla de una subestación en un terreno con estas características, los datos se muestran en la figura 3.1.3.2.

Numero de estratos (2-10)	2
Numero de Conductores Horizontales en el eje X	8
Numero de Conductores Horizontales en el eje y	3
Diametro de los conductores en m	0.01326
Profundidad de enterramiento de los conductores en m	1
Numero de Barras Verticales	0
Diametro de las Barras en m	0
Corriente inyectada en el terreno en A	1200
Tiempo de duración de la corriente en s	1
Resistividad superficial del Terreno en Ohm.m	3000
Espesor de la capa superficial en m	0.1
Si peso 50 Kg(poner 50), Si peso 70 Kg(poner 70)	50

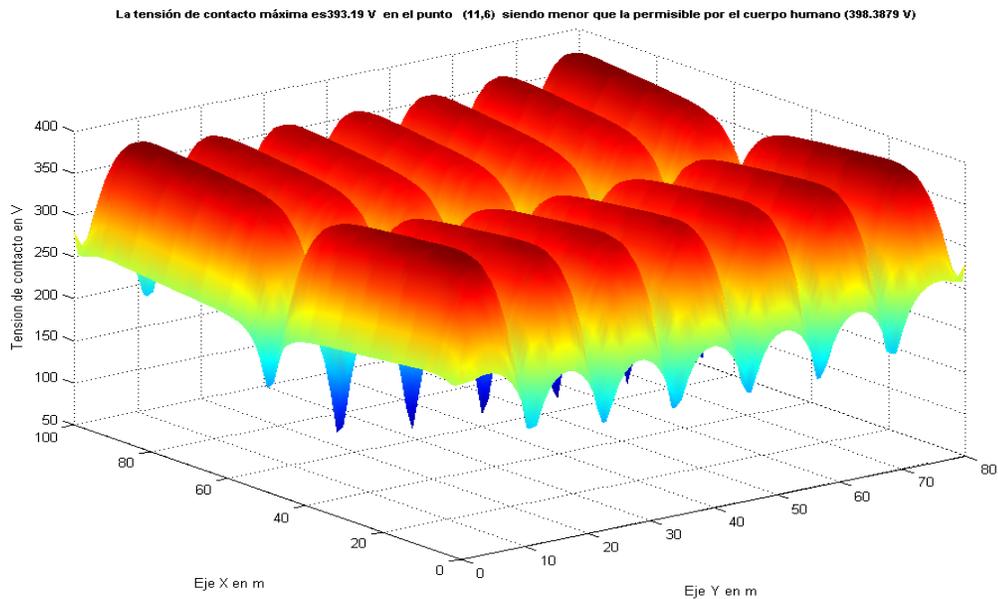
**Figura 3.1.3.2. Datos requeridos para el diseño de la malla en terreno no homogéneo.**

La figura 3.1.3.3.muestra la malla de reticulado uniforme que para un terreno como este, cumple con los requerimientos de voltajes tolerables.



**Figura 3.1.3.3. Malla de reticulado uniforme para terreno no homogéneo.**

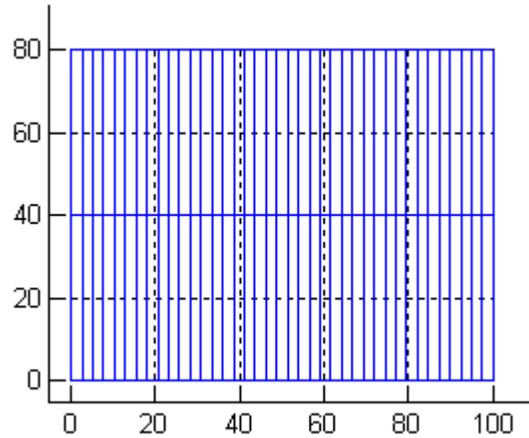
Los potenciales de contacto para esta malla se muestran en la figura 3.1.3.4.



**Figura 3.1.3.4. Potenciales de contacto para la malla de la figura 3.1.3.3.**

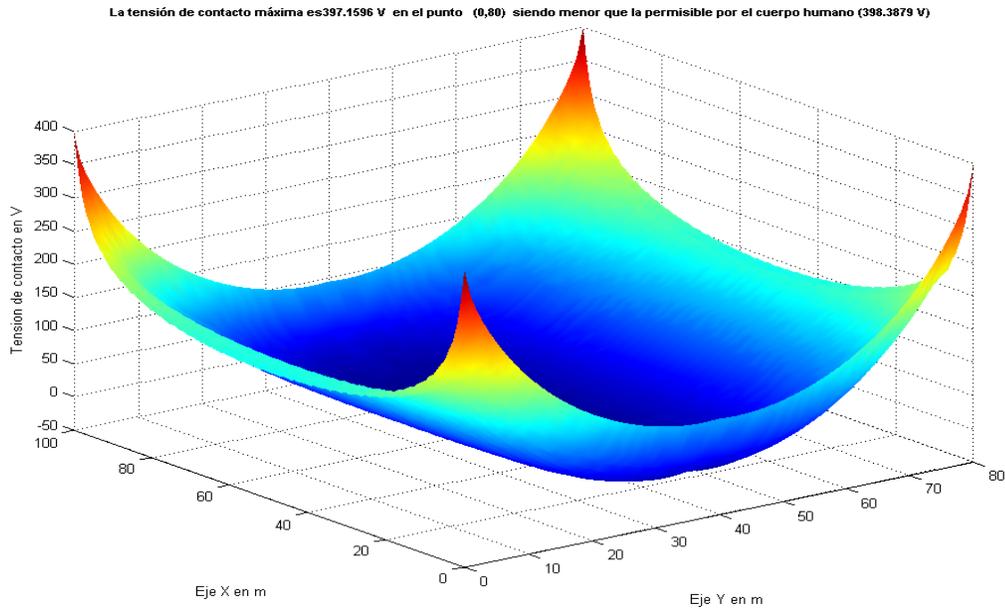
En este caso la tensión de contacto máxima (393.19 V) se produce en los módulos esquina de la malla, siendo ligeramente inferior a la permisible por el cuerpo humano (398.3 V) en un 2.31%.

Si el terreno se considerara homogéneo y se tomara como resistividad de este, la resistividad del primer estrato  $290.13 \Omega \cdot m$ , la malla obtenida para los mismos datos de la figura 3.1.3.1 sería la mostrada en la figura 3.1.3.5.



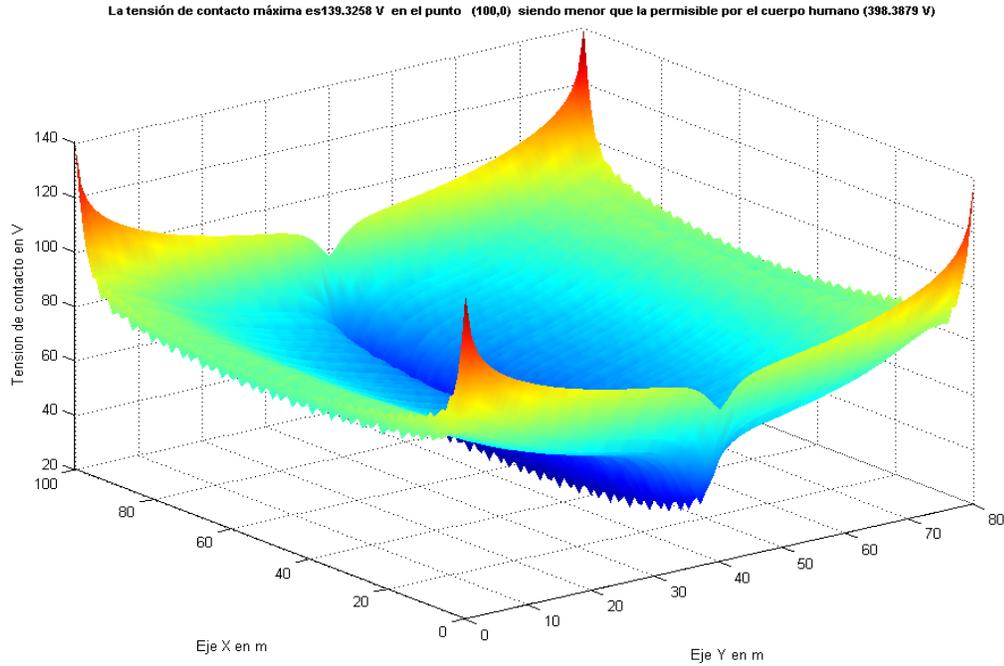
**Figura 3.1.3.5. Malla de reticulado uniforme para terreno homogéneo.**

Los potenciales de contacto para esta malla se muestran en la figura 3.1.3.6.



**Figura 3.1.3.6. Potenciales de contacto para la malla de la figura 3.1.3.5.**

Como se puede observar el resultado es una malla de mayor reticulado, cuyo comportamiento en un terreno que realmente es biestratificado, provocaría potenciales de contacto como los que se muestran en la figura 3.1.3.7.



**Figura 3.1.3.7. Potenciales de contacto para la malla de la figura 3.1.3.5, pero considerando el terreno no homogéneo.**

En este caso los potenciales de contacto máximos (139.32 V) son inferiores al tolerable por el cuerpo humano en un 65.03%, por lo tanto el diseño es sobredimensionado y mucho más costoso que el necesario.

### 3.2 Ejemplos de mediciones realizadas con el método de Schlumberger.

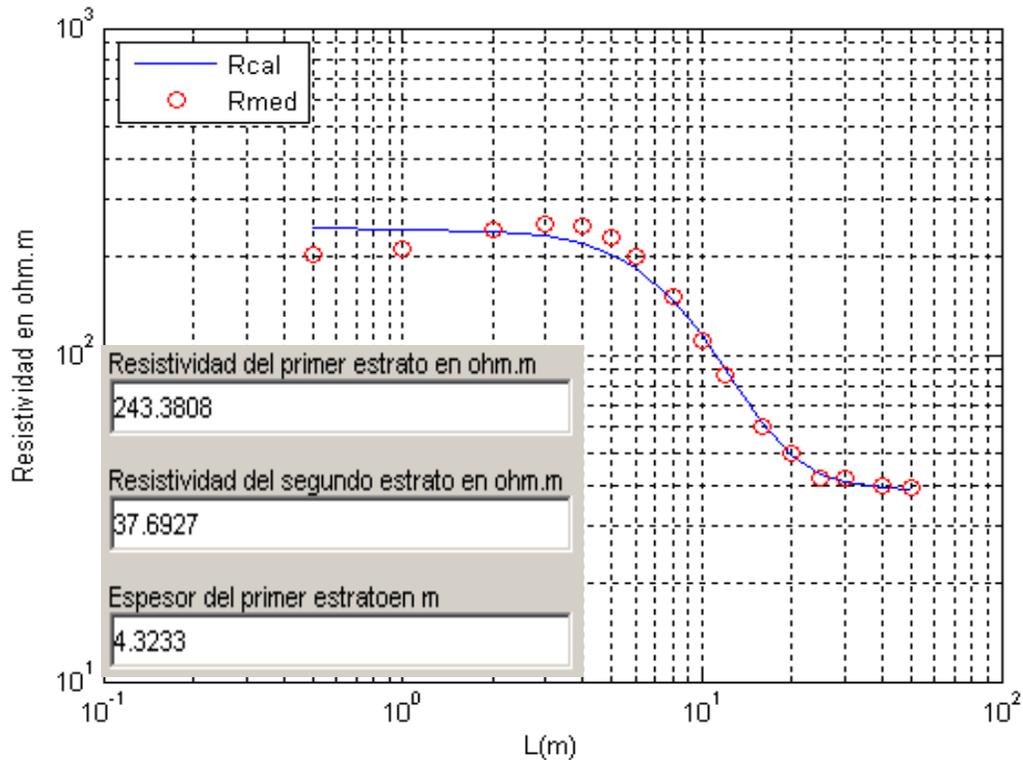
#### 3.2.1. Ejemplo # 1

En la tabla 3.2.1 se muestran los resultados de las mediciones realizadas.

**Tabla 3.2.1. Mediciones de resistividad aparente**

$L(m)$	0,5	1	2	3	4	5	6	8	10	12	16	20	25	30	40	50
$\rho_a(\Omega\text{-m})$	202	210	240	253	248	228	200	150	110	87	60	50	42	42	40	39

Con la ayuda del programa SistPTEx, los resultados de interpretación de las mediciones de resistividad son los mostrados en la figura 3.2.1.1.



**Figura 3.2.1.1. Resultados del SistPTEx para las mediciones de resistividad aparente de la Tabla 3.2.1**

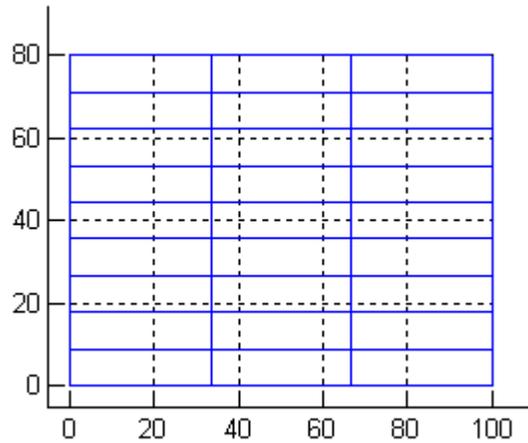
Como se puede apreciar se trata de un terreno de dos estratos, el primero con una resistividad de 243.38  $\Omega$ .m y espesor de 4.32 m, el segundo con una resistividad de 37.69  $\Omega$ .m.

Si se realiza el diseño de la malla de una subestación en un terreno con estas características, cuyos datos se muestran en la figura 3.2.1.2.

Numero de estratos (2-10)	2
Numero de Conductores Horizontales en el eje X	10
Numero de Conductores Horizontales en el eje y	4
Diametro de los conductores en m	0.01326
Profundidad de enterramiento de los conductores en m	1
Numero de Barras Verticales	0
Diametro de las Barras en m	0
Corriente inyectada en el terreno en A	1700
Tiempo de duración de la corriente en s	1
Resistividad superficial del Terreno en Ohm.m	3000
Espesor de la capa superficial en m	0.1
Si peso 50 Kg(poner 50), Si peso 70 Kg(poner 70)	50

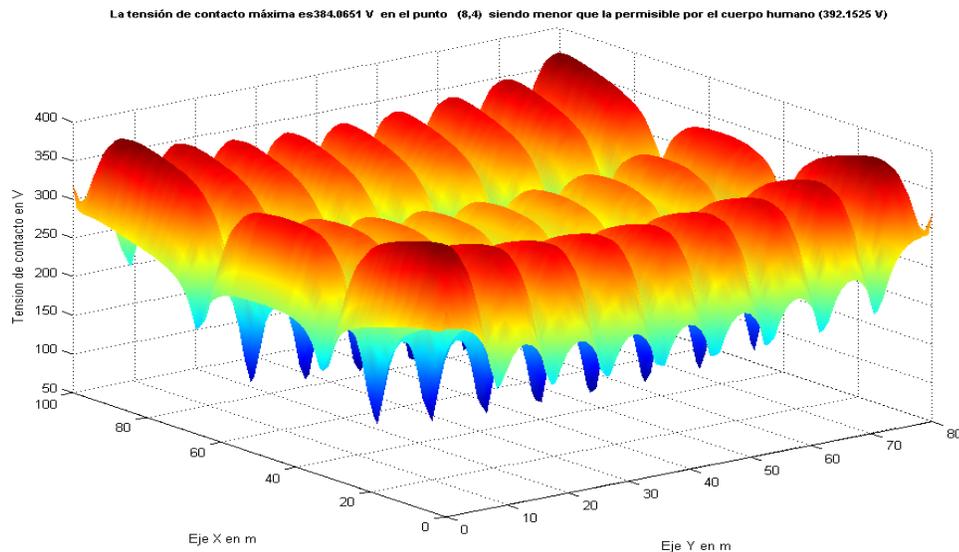
**Figura 3.2.1.2. Datos requeridos para el diseño de la malla en terreno no homogéneo.**

La figura 3.2.1.3.muestra la malla de reticulado uniforme que para un terreno como este cumple con los requerimientos de voltajes tolerables.



**Figura 3.2.1.3. Malla de reticulado uniforme para terreno no homogéneo.**

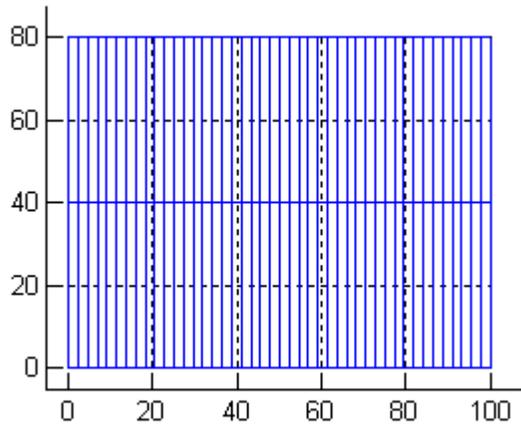
Los potenciales de contacto para esta malla se muestran en la figura 3.2.1.4.



**Figura 3.2.1.4. Potenciales de contacto para la malla de la figura 3.2.1.3.**

En este caso la tensión de contacto máxima (384.06 V) se produce en los módulos extremos de la malla, siendo ligeramente inferior a la permisible por el cuerpo humano (392.15 V) en un 2.07%.

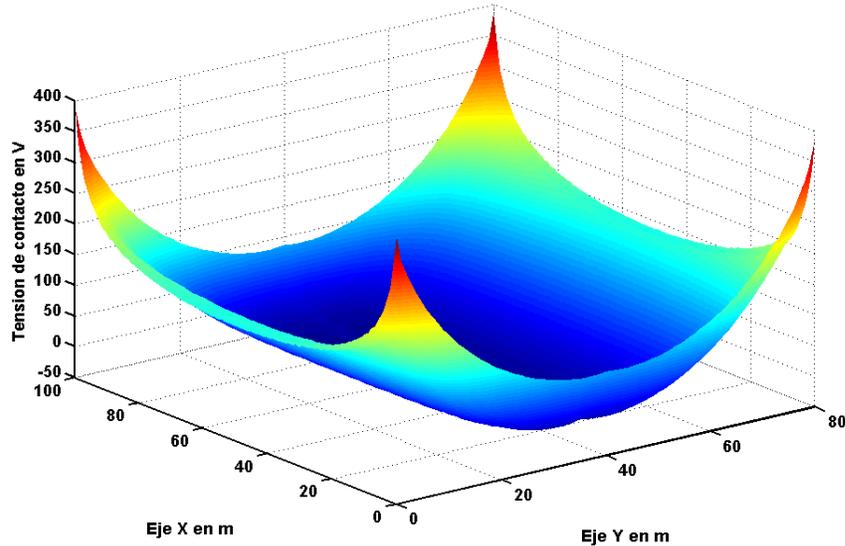
Si el terreno se considerara homogéneo y se tomara como resistividad de este, la resistividad del primer estrato  $243.38 \Omega.m$ , la malla obtenida para los mismos datos de la figura 3.2.1.1 sería la mostrada en la figura 3.2.1.5.



**Figura 3.2.1.5. Malla de reticulado uniforme para terreno homogéneo.**

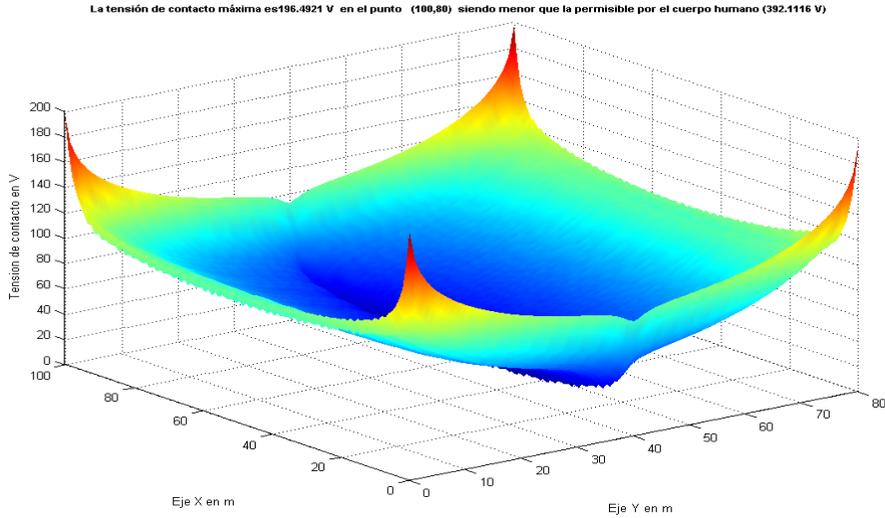
Los potenciales de contacto para esta malla se muestran en la figura 3.2.1.6.

La tensión de contacto máxima es 385.7478 V en el punto (0,80) siendo menor que la permisible por el cuerpo humano (386.577 V)



**Figura 3.2.1.6. Potenciales de contacto para la malla de la figura 3.2.1.5.**

Como se puede observar el resultado es una malla de mayor reticulado, cuyo comportamiento en un terreno que realmente es biestratificado, provocaría potenciales de contacto como los que se muestran en la figura 3.2.1.7.



**Figura 3.2.1.7. Potenciales de contacto para la malla de la figura 3.2.1.5, pero considerando el terreno no homogéneo.**

En este caso los potenciales de contacto máximos (196.49 V) son inferiores al tolerable por el cuerpo humano en un 49.89%, por lo tanto la malla es sobredimensionada y más costosa.

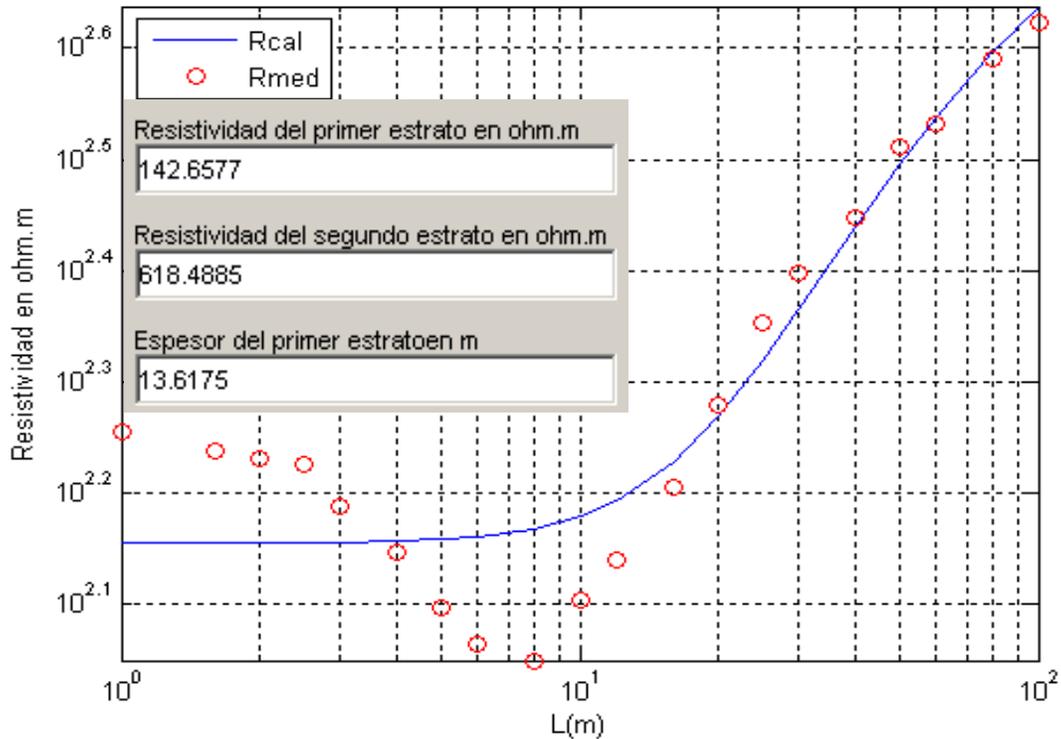
### 3.2.2. Ejemplo # 2

En la tabla 3.2.2 se muestran los resultados de las mediciones realizadas.

**Tabla 3.2.2. Mediciones de resistividad aparente**

$L(m)$	0,5	1	1,2	1,6	2	2,5	3	4	5	6	8	10
$\rho_a(\Omega\text{-m})$		180		173	170	168	154	140	125	116	112	127
$L(m)$			12	16	20	25	30	40	50	60	80	100
$\rho_a(\Omega\text{-m})$			138	160	190	225	250	280	325	340	390	420

Con la ayuda del programa SistPTEx, el resultado de interpretación de las mediciones de resistividad son los mostrados en la figura 3.2.2.1.



**Figura 3.2.2.1. Resultados del SistPTEx para las mediciones de resistividad aparente de la Tabla 3.2.2**

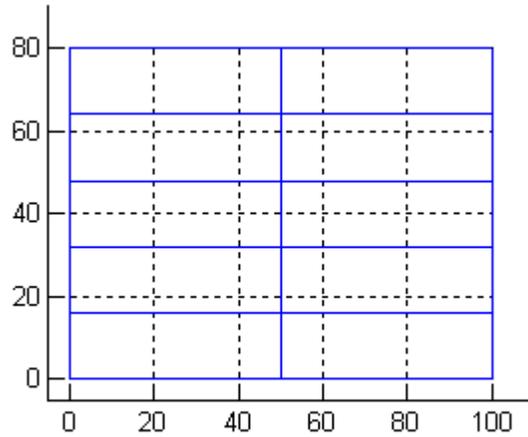
Como se puede apreciar en este caso se trata de un terreno de tres estratos, que nuestra metodología aun incompleta asume como de dos estratos, el primero con una resistividad de  $142.65 \Omega \cdot m$  y espesor de  $13.61 \text{ m}$ , el segundo con una resistividad de  $618.48 \Omega \cdot m$ , lo cual aunque no es exacto da un mayor acercamiento a la realidad.

Si se realiza el diseño de la malla de una subestación en un terreno con estas características, cuyos datos se muestran en la figura 3.2.2.2.

Numero de estratos (2-10)	2
Numero de Conductores Horizontales en el eje X	6
Numero de Conductores Horizontales en el eje y	3
Diametro de los conductores en m	0.01326
Profundidad de enterramiento de los conductores en m	1
Numero de Barras Verticales	0
Diametro de las Barras en m	0
Corriente inyectada en el terreno en A	1200
Tiempo de duración de la corriente en s	1
Resistividad superficial del Terreno en Ohm.m	3000
Espesor de la capa superficial en m	0.1
Si peso 50 Kg(poner 50), Si peso 70 Kg(poner 70)	50

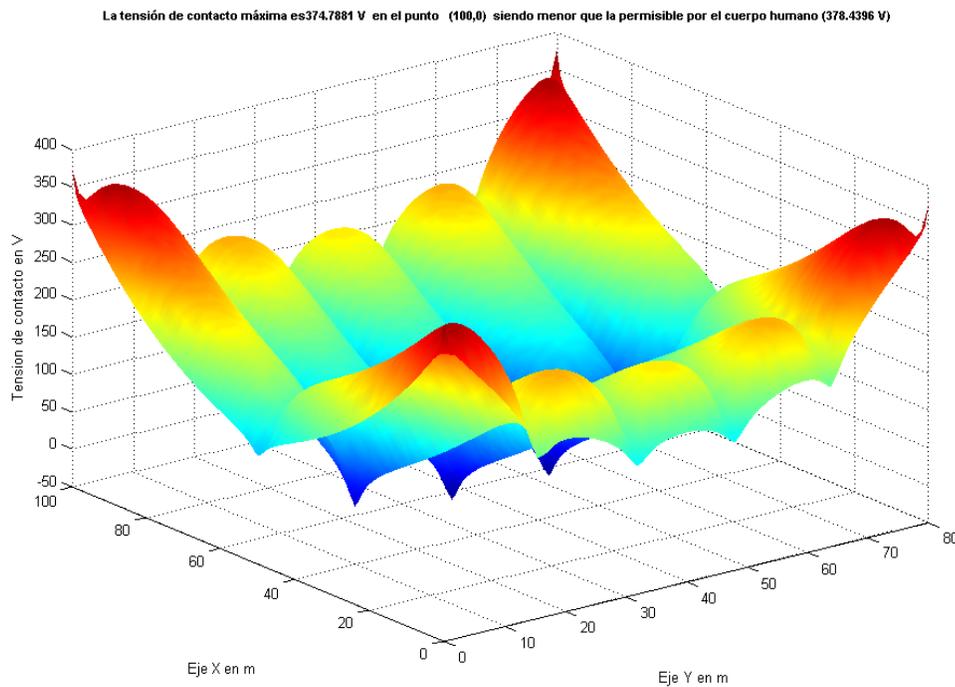
**Figura 3.2.2.2. Datos requeridos para el diseño de la malla en terreno no homogéneo.**

La figura 3.2.2.3.muestra la malla de reticulado uniforme que para un terreno como este, cumple con los requerimientos de voltajes tolerables.



**Figura 3.2.2.3. Malla de reticulado uniforme para terreno no homogéneo.**

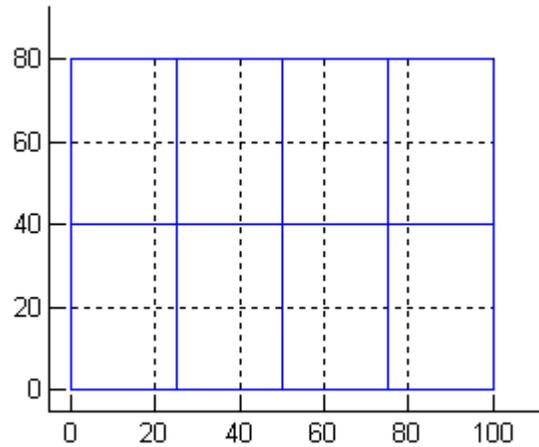
Los potenciales de contacto para esta malla se muestran en la figura 3.2.2.4.



**Figura 3.2.2.4. Potenciales de contacto para la malla de la figura 3.2.2.3.**

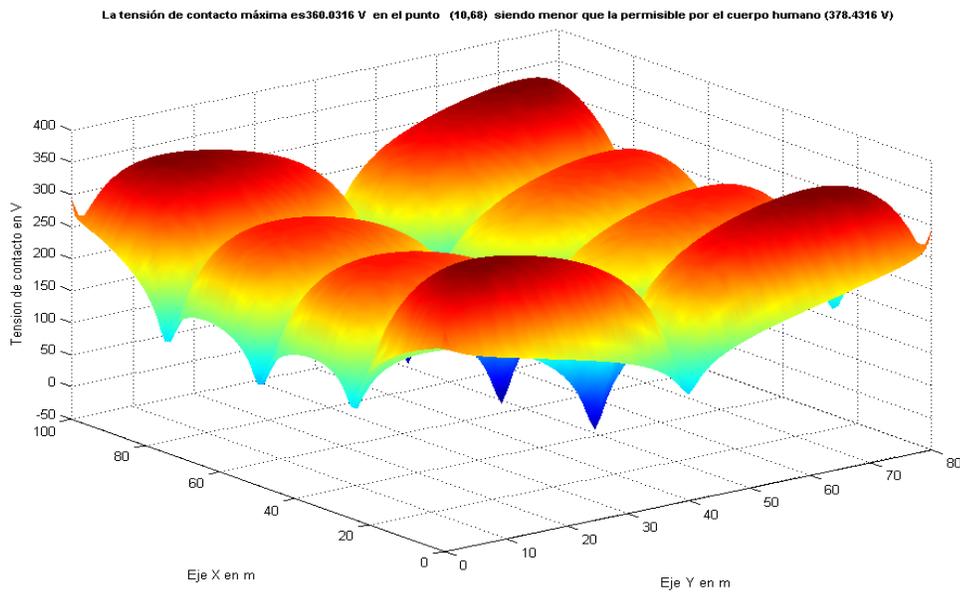
En este caso la tensión de contacto máxima (374.78 V) se produce en los módulos esquina de la malla, siendo ligeramente inferior a al permisible (378.43 V) en un 1.05%.

Si el terreno se considerara homogéneo y se tomara como resistividad de este, la resistividad del primer estrato  $142.65 \Omega.m$ , la malla obtenida para los mismos datos de la figura 3.2.2.1 sería la mostrada en la figura 3.2.2.5.



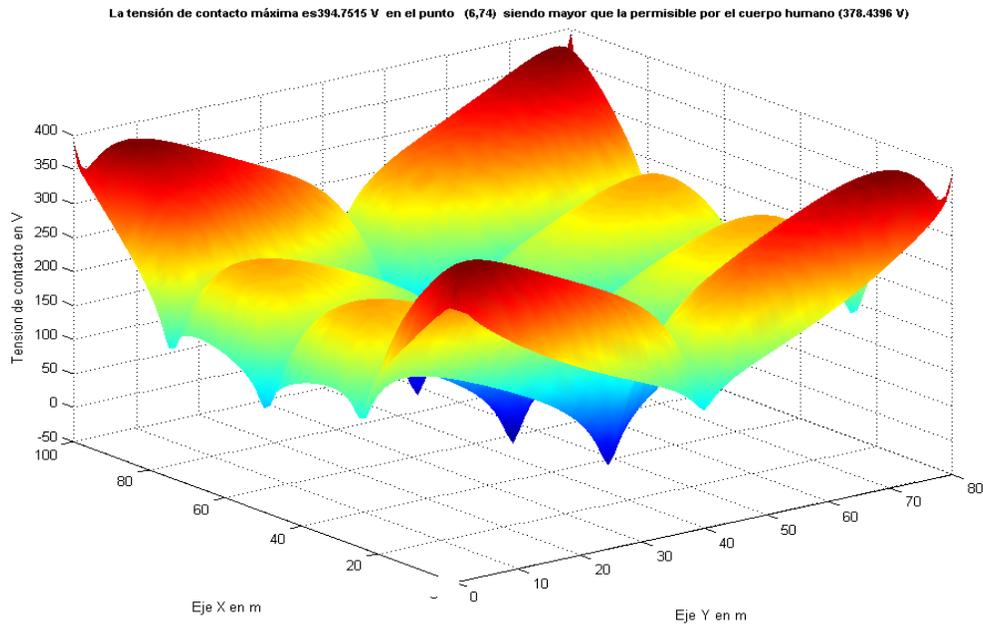
**Figura 3.2.2.5. Malla de reticulado uniforme para terreno homogéneo.**

Los potenciales de contacto para esta malla se muestran en la figura 3.2.2.6.



**Figura 3.2.2.6. Potenciales de contacto para la malla de la figura 3.2.2.5.**

Como se puede observar el resultado es una malla de menor reticulado, cuyo comportamiento en un terreno que realmente es biestratificado, provocaría potenciales de contacto como los que se muestran en la figura 3.2.2.7.



**Figura 3.2.2.7. Potenciales de contacto para la malla de la figura 3.2.2.5, pero considerando el terreno no homogéneo.**

En este caso los potenciales de contacto máximos (394.75 V) superan al tolerable por el cuerpo humano en un 4.31%, por lo tanto el diseño es subdimensionado y existiría riesgo para la vida, además la resistencia de puesta a tierra se elevó a un valor superior al deseado.

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### Conclusiones

Como resultado de este trabajo se arribaron a las siguientes conclusiones:

- 1- Una medición adecuada de las resistividades aparentes de un terreno utilizando cualquiera de las configuraciones de electrodos presentadas en este trabajo, permite determinar con la metodología de interpretación desarrollada, las resistividades y espesor del primer estrato para terrenos biestratificados y aproximar los terrenos de tres estratos a un terreno de dos con una relativa exactitud.
- 2- Considerar los terrenos como homogéneos con una resistividad igual a la del estrato superior, provoca errores de diseño que están en función de las relaciones entre las resistividades del primer y segundo estrato.
  - Cuando  $\rho_1 > \rho_2$  el diseño queda sobredimensionado y por lo tanto mucho más costoso que el necesario.
  - Cuando  $\rho_1 < \rho_2$  el diseño queda subdimensionado con riesgo para la vida.

### Recomendaciones

1. Ampliar la metodología para terrenos de más de dos estratos.
2. Dar a conocer las potencialidades del programa para el diseño de puestas a tierra.

**REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

- [1] - E. D. Sunde, *Earth Conduction Effects in Transmission Systems* (texto), D. Van Nostrand Company, 1949.
- [2] - G. F. Tagg, *Earth Resistances*, (texto), Pitman Publishing Corporation, 1964.
- [3] - F. S. Grant, G. F. West, *Interpretation Theory in Applied Geophysics* (texto), McGraw-Hill Book Company, 1965.
- [4] - G. V. Keller, F. C. Frischknecht, *Electrical Methods in Geophysical Prospecting* (texto), Pergamon Press, 1966.
- [5] - E. Orellana, *Prospección Geoeléctrica en Corriente Continua* (texto), Paraninfo, Madrid (España), 1972.
- [6] - H. J. Albrecht, *On the Relationship Between Electrical Ground Parameters* Proc. IEEE, vol. 53, May 1965.
- [7] - J. R. Hearst, P. H. Nelson, *Well Logging for Physical Properties* (texto), McGraw-Hill Book Company, 1985.
- [8] - J. Logan, *Estimation of Electrical Conductivity from Chemical Analysis of Natural Waters*, Journal of Geophysical Research, vol. 66, No. 8, August 1961.
- [9] - S. N. Davis, R. N. M. De Wiest, *Hydrogeology* (texto), John Wiley & Sons, Inc., 1966.
- [10] - E. Orellana, H. M. Mooney, *Master Tables and Curves for Vertical Electrical Sounding Over Layered Structures* (texto), Interciencia, Madrid 1966.
- [11] - Westinghouse Electric Corporation, *Electrical Transmission and Distribution Reference Book*, 1950.
- [12] - Soiltest Inc, *Earth Resistivity Manual* (manual), Evanston, Illinois, 1968.
- [13] - E. W. Kimbark, *Direct Current Transmission, vol. I* (texto), Wiley-Interscience, 1971.
- [14] - National Association of Corrosion Engineers, *NACE Basic Corrosion Course*, 2400 W. Loop South, Houston, Texas 77027.
- [15] - R. W. Moore, *An Empirical Method of Interpretation of Earth Resistivity Measurements*, Trans. A.I.M.E. vol. 1964, 1945.

- [16] - S. Stefanescu, C. et M. Schlumberger, *Sur la distribution électrique potentielle autour d'une prise de terre ponctuelle dans un terrain á couches horizontales, homogénes et isotrope*, Journal Physique et le Radium, vol. 11, 1930.
- [17] - L. B. Slichter, *Interpretation of the Resistivity Prospecting Method for Horizontal Structures*, Physics, vol. 4, 1933.
- [18] - I. Roman, *An Image Analysis of Multiple-Layer Resistivity Problems*, Geophysics, vol. 24, July 1959.
- [19] - I. Roman, *The Kernel Function in the Surface Potential for a Horizontally Stratified Earth*, Geophysics, vol. 28, April 1963.
- [20] - S. Onodera, *Numerical Analysis of Relative Resistivity for a Horizontal Layered Earth*, Geophysics, vol. 28, April 1963.
- [21] - J. C. Van Dam, *A simple Method for the Calculation of Standard Graphs to Be Used in Geo-Electrical Prospecting*, Geophysical Prospecting, vol. 13, 1965.
- [22] - G. Kunetz, J. P. Rocroi, *Traitement Automatique Des Sondages Electriques*, Geophysical Prospecting, vol. 18, 1970.
- [23] - H. M. Mooney, E. Orellana, H. Pickett, L. Tornheim, *A Resistivity Computation Method for Layered Structures*, Geophysics, vol. 31, Feb. 1966.
- [24] - M. Abramowitz, I. A. Stegun, *Handbook of Mathematical Functions* (manual), Dover Publications, Inc., New York, 1968.
- [25] - J. R. Inman, J. Ryu, S. H. Ward, *Resistivity Inversion*, Geophysics, vol. 38, 1973.
- [26] - H. K. Johansen, *A Man/Computer Interpretation System for Resistivity Soundings Over a Horizontally Stratified Earth*, Geophysical Prospecting, vol. 25, 1977.
- [27] - L. Rijo, W. H. Pelton, E. C. Feitosa, S. H. Ward, *Interpretation of Apparent Resistivity Data from Apodi Valley, Rio Grande do Norte, Brazil*, Geophysics, vol. 42, 1977.
- [28] - G. M. Hoversten, A. Dey, H. F. Morrison, *Comparision of Five Least-Squares Inversion Techniques in Resistivity Sounding*, Geophysical Prospecting, vol. 30, 1982.
- [29] - J. Chyba, *On the Interpretation of Resistivity Soundings By the Least-Squares Method*, Geophysical Prospecting, vol. 31, 1983.

- [30] - B. Demidovitch, I. Maron, *Eléments de Calcul Numérique* (texto), Editions Mir, Moscou, 1973.
- [31] - C. J. Blattner, *Analysis of Soil Resistivity Test Methods in Two Layer Earth*, IEEE Trans., vol. PAS-104, No. 12, Dec. 1985.
- [32] - A. P. Meliopoulos, A. D. Papalexopoulos, *Interpretation of Soil Resistivity Measurements: Experience with the Model SOMIP*, IEEE Trans., vol. PWRD-1, No. 4, Oct. 1986.
- [33] - V. V. Burgsdorf, *Cálculo de Puestas a Tierra en Terrenos No-Homogéneos*, Elektrichestvo, No. 1, 1954, (Traducción Ruso-Español).