

TÉCNICAS PRÁCTICAS PARA INVESTIGACION DE RESISTIVIDAD EN DOS Y TRES DIMENSIONES (TOMOGRAFÍA ELECTRICA 2D y 3D)

**Andrés Antonio López Hidalgo¹, Meng Heng Loke²
Gerardo Oscar Fanton¹, Enrique Cara Rubí¹**

¹Instituto Geofísico Sismológico Ing. F. S. Volponi, Facultad de Cs. Exactas, Físicas y Naturales.
Universidad Nacional de San Juan, Av. Ignacio de La Roza y Meglioli S/N- Rivadavia- CP (5400) - San
Juan - Argentina.

²School of Physics. University of Science of Malaysia. Penang, Malaysia
University Sains Malaysia. 11800 USM, Penang, Malaysia.

Andrés Antonio López Hidalgo: Licenciado en Geofísica. Investigador.

Domicilio laboral: - Instituto Geofísico Sismológico Ing. F. S. Volponi, Facultad de Cs. Exactas, Físicas y Naturales. Universidad Nacional de San Juan- Av. Ignacio de La Roza y Meglioli S/N- Rivadavia- CP (5400) - San Juan - Argentina./ Tel: (54-0264) 4945015- 4260355-4260394-4260353/ Fax:4234980

Domicilio particular: Barrio Natania XV- Manzana 15- Casa 16- Rivadavia- CP: (5400)- San Juan- Argentina./ Tel.: (54-0264) 4332402./ e-mail: alhgeofísica@arnet.com.ar

Meng Heng Loke: Doctor en Física

Domicilio laboral: School of Physics. University of Science of Malaysia. Penang, Malaysia. University Sains Malaysia. 11800 USM, Penang, Malaysia.

Domicilio particular: Cangkat M Lorong 6, Minden Lorong 6, Minden Heights, 11700 Penang, Malaysia
e-mail: mhloke@pc.jaring.my

Gerardo Oscar Fanton: Licenciado en Geofísica. Investigador.

Domicilio Laboral: Instituto Geofísico Sismológico Ing. F. S. Volponi, Facultad de Cs. Exactas, Físicas y Naturales. Universidad Nacional de San Juan- Av. Ignacio de La Roza y Meglioli S/N- Rivadavia- CP (5400) - San Juan - Argentina./ Tel: (54-0264) 4945015- 4260355-4260394-4260353/ Fax:4234980.

Domicilio Particular: Av. España- N° 239 (Norte)- Capital- CP: (5400)- San Juan- Argentina./ Tel: (54-0264) 4226678/ e-mail: gfanton@iinfo.unsj.edu.ar

Enrique Cara Rubí: Licenciado en Geofísica. Investigador.

Domicilio Laboral: Instituto Geofísico Sismológico Ing. F. S. Volponi, Facultad de Cs. Exactas, Físicas y Naturales. Universidad Nacional de San Juan- Av. Ignacio de La Roza y Meglioli S/N- Rivadavia- CP (5400) - San Juan - Argentina./ Tel: (54-0264) 4945015- 4260355-4260394-4260353/ Fax:4234980.

Domicilio Particular: Calle Mendoza - N° 600 (Norte) - Chimbass - CP (5400) / Tel: (54-0264) 4311518 / e-mail: cararubi@yahoo.com.ar

RESUMEN

La presente Investigación describe las Técnicas Prácticas que actualmente se están utilizando en Sondeos de Tomografía Eléctrica en dos y tres dimensiones (R2D y R3D) dentro del campo de la Exploración Geofísica, donde las mediciones son hechas sobre la superficie de la tierra con arreglos lineales y de grilla. Incluimos también una revisión del tradicional método de Sondeo Eléctrico Vertical (SEV-1D).

ABSTRACT

The present investigation describes the practical techniques that currently are used in Electrical Tomography surveys in two and three dimensions (R2D and R3D) within the field of Exploration Geophysics where the measurements are made on the ground surface with lineal and grid arrays. We also include a review of the traditional method of vertical electric soundings (VES-R1D).

INTRODUCCIÓN. Estado del Arte.

La temática a cubrir expone, de manera práctica, los métodos que actualmente se están utilizando en el campo de la Exploración Eléctrica, en lo referente a Tomografía Eléctrica, en temas tan importantes como la Contaminación Ambiental Subterránea, la Polución Agrícola, la Arqueología Moderna, la Geotecnología, y en general la localización de estructuras y anomalías complejas por lo general subsuperficiales, tanto geológicas como antrópicas.

La resistividad real para un medio determinado cambia en todas las direcciones debido a la anisotropía y heterogeneidad del subsuelo. La resolución de estos casos generales implica considerar en el planteo y resolución del problema una mayor cantidad de variables, no tomadas en cuenta en los métodos actualmente utilizados en 1D los cuales la consideran constante en cada estrato o capa del subsuelo, lo que nos lleva a metodologías y modelos matemáticos de mayor complejidad.

Para poder modelar al subsuelo con una distribución arbitraria de resistividades y tomar en cuenta también la variación de otros parámetros que influyen notoriamente en ella (como por ejemplo la topografía (Loke, 2000)), se utiliza para su cálculo los métodos de elementos finitos (Silvestre and Ferrari, 1990) y de diferencias finitas (Dey and Morrison, 1979a, 1979b), los cuales permiten considerar estas variaciones punto a punto y en todas las direcciones en un volumen de tierra considerado.

La determinación y cálculo de resistividad real en 2D y 3D se basa en los algoritmos desarrollados e implementados por M.H. Loke & Barker. (1996).

A través de estos algoritmos se puede optimizar la interpretación de los estudios geoelectricos, pudiéndose obtener la respuesta de ambientes geológicos y anomalías

complejas, las cuales no pueden ser solucionadas satisfactoriamente considerando modelos de distribución de resistividad en una (1D) o a veces en dos dimensiones (2D).

1. Relación entre la Geología / Anomalía y la Resistividad.

Las investigaciones de resistividad dan una imagen de la distribución de resistividad del subsuelo. Para convertir esa imagen en una estructura geológica, es muy importante y necesario conocer como varía este parámetro en los diferentes tipos de materiales que constituyen el subsuelo y en las estructuras geológicas del área bajo estudio; para ello describiremos brevemente los valores de resistividad de las rocas más comunes, de algunos materiales de suelo y de sustancias químicas.

En la tabla 1 (Keller y Frischknecht 1966, Daniels y Alberty 1966), se observa que las rocas ígneas y metamórficas típicamente tienen altos valores de resistividad. La resistividad de estas rocas depende mucho del grado de fracturación que posee, y del porcentaje de agua que rellena las fracturas del terreno.

Las rocas sedimentarias comúnmente son más porosas y tienen un alto contenido de agua, lo que normalmente hace disminuir los valores de resistividad.

Los suelos mojados y el agua fresca del terreno tienen valores aún más bajos. En los suelos arcillosos, las resistividades son normalmente menores que las correspondientes al suelo arenoso. Sin embargo, se destaca que existe una superposición en los valores de resistividad de las diferentes clases de rocas y suelos. Esto es debido a que este parámetro depende de un número de factores tales como la porosidad, el grado de saturación de agua y la concentración de sales disueltas.

La resistividad del agua del terreno varía desde 10 a 100 ohm.m. dependiendo de la concentración de sales disueltas. Nótese que el bajo valor (alrededor de los 0.2 ohm.m) en el

agua de mar se debe al alto contenido de sal, esto hace que los métodos de resistividad sean técnicas ideales para la planimetría de la interfase de estructuras con contenido de agua fresca y salina.

En la Tabla 1 también se muestra el valor de la resistividad de varios contaminantes industriales. Los metales, tal como hierro, tienen valores sumamente bajos. Los químicos, tal como sodio y cloruro de potasio, pueden reducir mucho la resistividad del agua del terreno a menos de 1 ohm.m con moderadas concentraciones. El efecto de electrolitos, tal como el ácido acético, es comparativamente menor. Algunos de los compuestos de hidrocarburos, tal como el Xileno, tienen resistividades muy altas.

Los valores de resistividad tienen un gran rango comparado a otras cantidades físicas obtenidos por otros Métodos Geofísicos. La resistividad de las rocas y el suelo en un área de estudio pueden variar por varios órdenes de magnitud. En comparación, la densidad usada en investigaciones gravimétricas usualmente cambia pero por debajo de un factor de 2, y las velocidades sísmicas normalmente no cambian por más de un factor de 10.

Esto hace que los métodos resistivos y otros métodos eléctricos y electromagnéticos sean técnicas geofísicas muy versátiles.

Material	Resistividad (ohm.m)	Conductividad (Siemens)
Rocas Ígneas y Metamórficas		
Granito	$5 \times 10^3 - 10^6$	$10^{-6} - 2 \times 10^{-4}$
Basalto	$10^3 - 10^6$	$10^{-6} - 10^{-3}$
Pizarra	$6 \times 10^3 - 4 \times 10^6$	$2 \times 10^{-8} - 1.7 \times 10^{-3}$
Mármol	$10^2 - 2.5 \times 10^8$	$4 \times 10^{-9} - 10^{-2}$
Cuarcita	$10^2 - 2 \times 10^8$	$5 \times 10^{-9} - 10^{-2}$
Rocas Sedimentarias		
Arenisca	$8 - 4 \times 10^3$	$2.5 \times 10^{-4} - 0.125$
Esquisto	$20 - 2 \times 10^3$	$5 \times 10^{-4} - 0.05$
Limolita	$50 - 4 \times 10^2$	$2.5 \times 10^{-3} - 0.02$
Suelos y Agua		
Arcilla	1 - 100	0.01 - 1

Aluvi3n	10 - 800	$1.25 \times 10^{-3} - 0.1$
Agua Fresca	10 - 100	0.01 - 0.1
Agua de Mar	0.2	5
Qu3micos		
Hierro	9.074×10^{-8}	$1.102 - 10^7$
0.01 M Cloruro de Potasio	0.708	1.413
0.01 M Cloruro de Sodio	0.843	1.185
0.01 M 3cido Ac3tico	6.13	0.163
Xileno	6.998×10^{16}	1.429×10^{-17}

Tabla 1: Resistividades de las Rocas m3s comunes, algunos Minerales y Qu3micos

2. Determinaci3n de los Dispositivos a Emplear.

Debemos aclarar que los dispositivos empleados para la determinaci3n de Resistividades en 3D en gran parte son aquellos mismos usados para las determinaciones en 2D (con las modificaciones necesarias) que nos permiten la adquisici3n de los datos en 3D.

Haremos una reseña de la mayor3a de los M3todos y Dispositivos actualmente empleados tanto para investigaciones 1D, 2D y 3D lo que nos permitir3 comprender con claridad las diferencias y ventajas de cada uno de ellos, como as3 tambi3n, identificar las complicaciones pr3cticas de los mismos.

Se destaca que normalmente los sondeos de resistividad 1D involucran entre 10 a 20 lecturas, mientras que un sondeo 2D involucra entre 100 a 1000 medidas, en comparaci3n con sondeos 3D que pueden involucrar varios miles de medidas.

2.1. M3todo tradicional del Sondeo El3ctrico Vertical (SEV).

El m3todo de **Sondeo El3ctrico Vertical** tiene su origen en la d3cada del a3o 1920 debido al trabajo de los hermanos Schlumberger. Por casi 60 a3os, las interpretaciones cuantitativas se realizaron usando este m3todo en conjunto con los algoritmos de Koefoed (Koefoed, 1979) y una gran variedad de 3bacos publicados por una serie de investigadores como el de Orellana-Mooney y otros (Orellana, 1972). En este m3todo, el centro del arreglo

de electrodos es fijo, pero el espaciamiento entre los electrodos va aumentando para obtener más información sobre secciones más profundas del subsuelo.

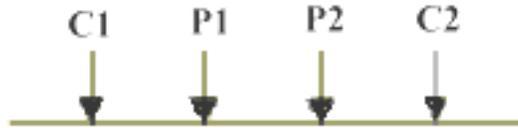


Figura 1. Dispositivo Electrónico Convencional Simétrico empleado para medir la resistividad del subsuelo.

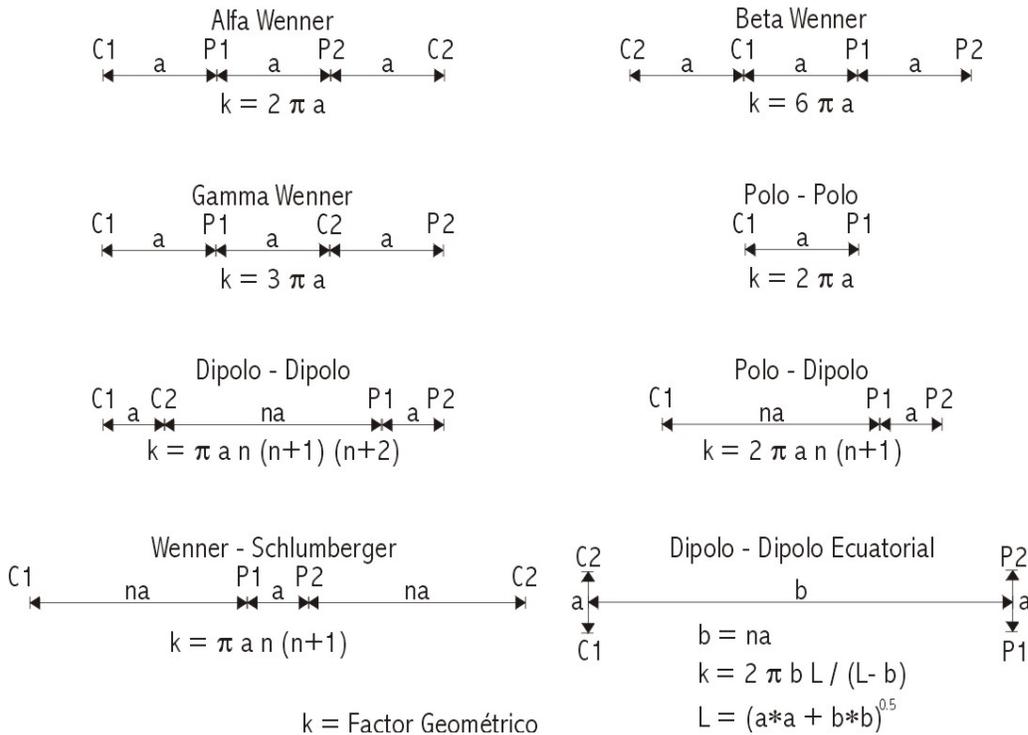


Figura 2. Diferentes Dispositivos usadas en Sondeos Eléctricos de Resistividad 1D, 2D y 3D con sus correspondientes Factores geométricos.

Para interpretar los datos del sondeo 1D, se presume normalmente que el subsuelo consiste de capas horizontales homogéneas e isotrópicas. Para estos casos, la resistividad del subsuelo cambia únicamente con la profundidad, pero no cambia en la dirección horizontal (Figura 3a). La Figura 4 muestra un ejemplo de los datos de un sondeo y un modelo de interpretación posible. A pesar de esta limitación, el método tiene resultados útiles para

situaciones geológicas donde el modelo unidimensional es aproximadamente verdadero p.e. en la determinación de agua subterránea.

La limitación más severa del método de Sondeo Eléctrico Vertical es que normalmente en el subsuelo se presentan cambios de resistividad en direcciones horizontales (laterales).

La situación ideal mostrada en la Figura 3a se encuentra rara vez en la práctica. Los cambios laterales en la resistividad del subsuelo causan los cambios en los valores de resistividad aparente que pueden ser y son frecuentemente mal interpretados.

En muchos estudios, donde la geología del subsuelo es muy compleja, la resistividad puede cambiar rápidamente en cortas distancias. El método de Sondeo Eléctrico Vertical anteriormente mencionado no podría ser suficientemente preciso para tales situaciones.

A pesar de sus limitaciones, hay dos razones principales por lo que el Sondeo Eléctrico Vertical 1D es comúnmente usado. La primera es la carencia de equipo apropiado de campo, que efectúe mediciones de datos para relevamientos en 2D y tridimensionales ya que estos son de muy reciente aparición en el mercado. La segunda razón es la carencia de herramientas prácticas de interpretación por computadora para manejar modelos más complejos en 2D y modelos tridimensionales 3D.

Sin embargo, los relevamientos eléctricos en 2D y 3D son las técnicas comerciales más usadas en la práctica con el desarrollo relativamente reciente de instrumentos de resistividad multi-electrodo (Griffiths et al. 1990) y el software de inversión por computadora (Loke & Barker 1996).

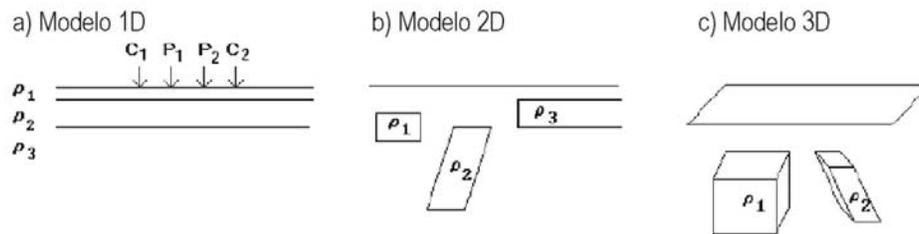


Figura 3: Tres modelos diferentes en la interpretación de datos de resistividad según el método aplicado: a) 1D; b) 2D; c) 3D.

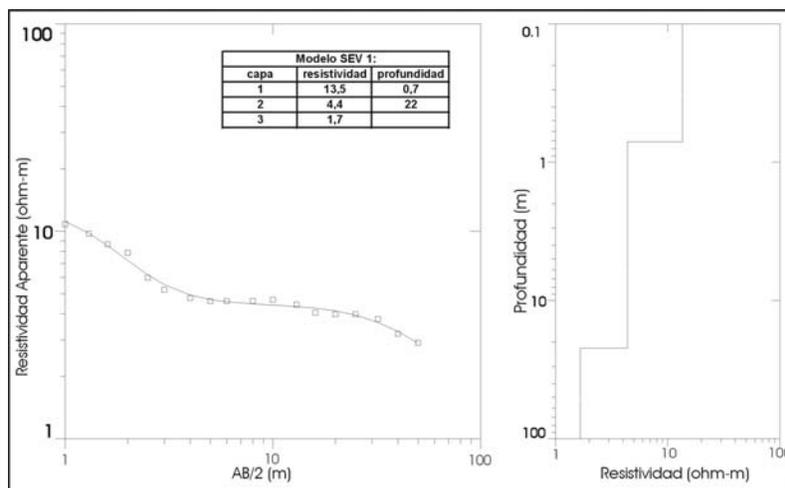


Figura 4. Modelo típico 1D usado para la interpretación de datos de resistividad para la configuración Electrónica Schlumberger

2.2. Sondeos Eléctricos en 2D.

2.2.1. Introducción.

Un modelo más preciso del subsuelo es un modelo bidimensional (2D) donde la resistividad cambia tanto en la dirección vertical como en la dirección horizontal a lo largo de la línea del relevamiento. En estos casos, se presume que la resistividad en la dirección perpendicular a la línea del sondeo no varía. En muchas situaciones, particularmente para relevamientos sobre cuerpos geológicos o anomalías elongadas, es una suposición muy razonable.

En teoría, una investigación de resistividad 3D y la interpretación del modelo 3D debería ser aun más exacta. Sin embargo, en la actualidad, los sondeo 2D son los más prácticos teniendo en cuenta la relación entre los costos y los resultados.

2.2.2. Método de Campo. Procedimiento de medida e instrumentación.

Uno de los nuevos métodos desarrollos en años recientes es el uso de la Tomografía Eléctrica 2D, que pueden obtener mejores resultados en áreas con geología / anomalías moderadamente complejas (Griffiths y Barker 1993). Tales mediciones se efectúan comúnmente usando un número grande de electrodos (25 o más) conectados a un cable multi-núcleo. Una microcomputadora portátil junto con un conector electrónico se usa para automáticamente seleccionar los cuatro electrodos correspondientes para cada medida (Figura 5). En la actualidad, tanto el equipo como las técnicas de campo para efectuar sondeos de resistividad 2D están bien desarrollados.

En nuestro caso empleamos para las determinaciones de campo un Selector Universal de Dipolo (SUD) desarrollado en el IGSV, el cual está dando excelentes resultados.

La figura 5 muestra la distribución típica para un relevamiento 2D con un gran número de electrodos a lo largo de una línea. Normalmente se usa una distancia interelectrónica constante entre los electrodos adyacentes.

Para obtener una buena imagen eléctrica del subsuelo en 2D, la cobertura de las medidas también debe ser 2D. Como un ejemplo, la Figura 5 muestra una sucesión posible de medidas para el arreglo electródico Wenner para un sistema con 20 electrodos.

En este ejemplo, el espaciamiento entre electrodos adyacentes es "a". Para la primera medida, se usan los electrodos 1, 2, 3 y 4 . Note que se usa el electrodo 1 como electrodo de corriente C1, el electrodo 2 como el electrodo de potencial P1, el electrodo 3 como electrodo

de potencial P2 y el electrodo 4 como el segundo electrodo de corriente C2. Para la segunda medida, se usan los electrodos 2, 3, 4 y 5 para C1, P1, P2 y C2 respectivamente. Esto se repite sobre la línea de electrodos hasta que se utilizan los electrodos 17, 18, 19 y 20 para la última medida con espaciamento "1a".

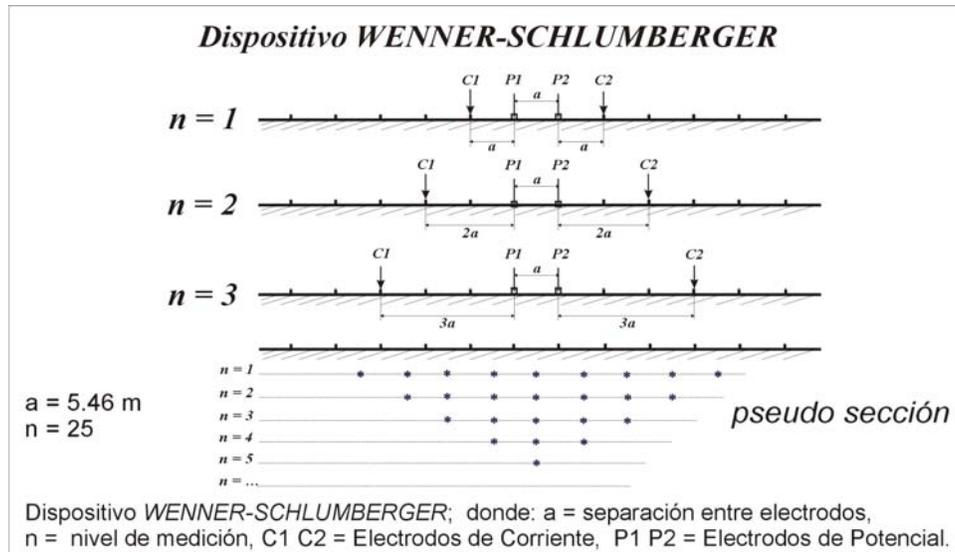


Figura 5. Dispositivo para un relevamiento eléctrico 2-D y 3D y la secuencia de las medidas empleadas para construir la pseudosección.

Para un sistema con 20 electrodos, hay 17 ($20 - 3$) medidas posibles con espaciamento "1a" para el tipo de dispositivo Wenner. Después de completar la primera secuencia de medidas con el espaciamento "1a", las próximas sucesiones de medidas se realizan con espaciamento electrodico "2a". Los primeros electrodos 1, 3, 5 y 7 se usan para la primera medida. Los electrodos se eligen para que el espaciamento entre los electrodos adyacentes sea "2a".

Para la segunda medida, se utilizan los electrodos 2, 4, 6 y 8. Este proceso se repite sobre la línea de medición hasta que se utilizan los electrodos 14, 16, 18 y 20 para la última medida con espaciamento "2a". Para un sistema con 20 electrodos, hay 14 ($20 - 2 \times 3$) medidas posibles con espaciamento "2a".

El mismo proceso se repite para medidas con espaciamiento "3a", "4a", "5a" y "6a". Para conseguir los mejores resultados, las medidas en un relevamiento de campo deberían hacerse de una manera sistemática para que todas las medidas posibles se efectúen. Esto afectará la calidad de interpretación del modelo que se obtenga a partir de la inversión de las mediciones de resistividad aparente (Dahlin and Loke, 1998). A medida que el espaciamiento entre electrodos aumenta, disminuye el número de mediciones.

La cantidad de datos que puede obtenerse para cada espaciamiento entre electrodos para un determinado número de electrodos a lo largo de una línea de sondeo, depende del tipo de configuración electródica que se utiliza. Como ejemplo se cita que el Dispositivo Wenner es el que menos datos arroja en comparación con el Dispositivo Polo-Polo, siendo este el de mayor número de datos para una cantidad determinada de electrodos y un mismo nivel de medida n .

2.2.3. Pseudosección.

Para representar las mediciones en un sondeo eléctrico 2D se utiliza el método de contorneado o pseudosección . En estos casos, la ubicación horizontal del punto de medición se pone en el medio entre los electrodos del arreglo o dispositivo utilizado. La ubicación vertical del punto de medición se dispone a una distancia que es proporcional a la separación entre los electrodos.

En las determinaciones con el Dispositivo Electrónico Dipolo-Dipolo, un método común de representación gráfica es el punto intersección de dos líneas que comienzan desde el punto medio de C1-C2 y P1-P2 y bajan a 45° , (esto ciertamente no implica que la corriente o las equipotenciales sean líneas a 45° con la superficie).

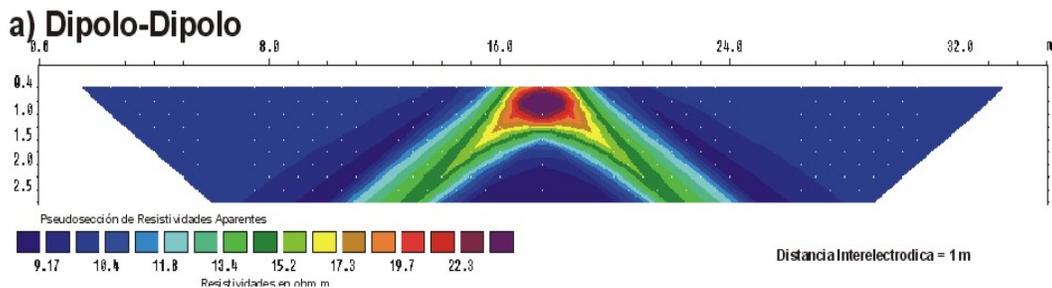
Otro método es poner sobre la vertical el punto a graficar en la mediana de la profundidad de investigación o pseudoprofundidad, de la configuración eléctrica que se usó (Edwards 1977).

La pseudosección da una idea aproximada de la distribución de resistividad del subsuelo. Sin embargo la pseudosección da una visión deformada del subsuelo, porque la forma de los contornos depende del tipo de arreglo o configuración eléctrica utilizada, así como también, de la resistividad del subsuelo (Figura 6: de a) hasta f)). Una equivocación común es tratar de usar la pseudosección como una imagen final de resistividad verdadera del subsuelo.

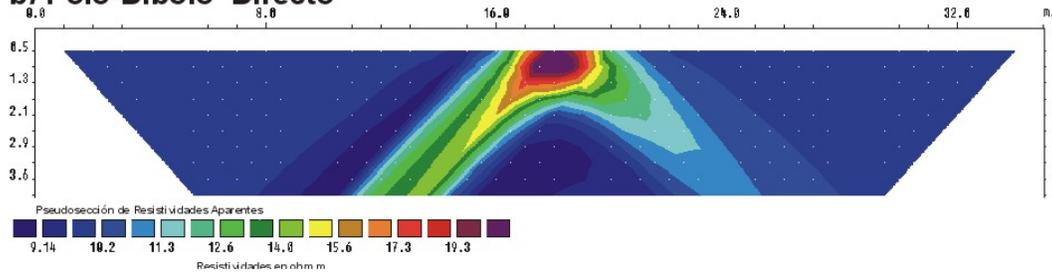
Como se muestra en la Figura 6, las diferentes configuraciones utilizadas para una misma zona pueden dar origen a representaciones gráficas o pseudosecciones muy diferentes. Esta Figura también da una idea de la cobertura de datos que puede obtenerse con arreglos diferentes; nótese que el conjunto Polo-Polo da una cobertura horizontal más amplia, mientras la cobertura obtenida por el arreglo Wenner disminuye mucho más rápidamente con el aumento del espaciado de electrodos.

Una aplicación práctica y de gran utilidad de la pseudosección es escoger y reconocer medidas de resistividad aparente “malas”, ya que tales medidas comúnmente aparecen como puntos con valores extraordinariamente altos o bajas.

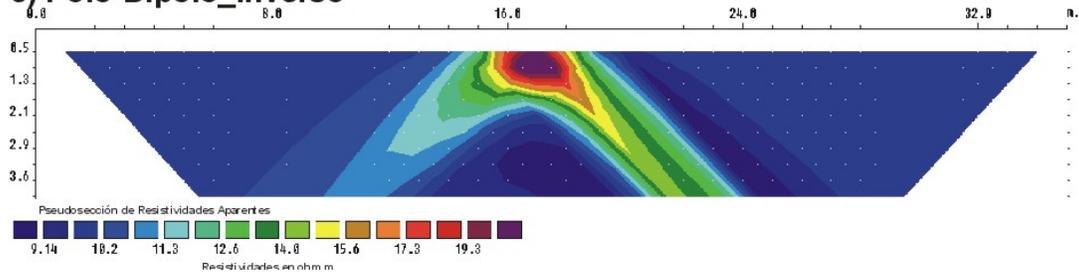
Modelo Sobre un Bloque Rectangular



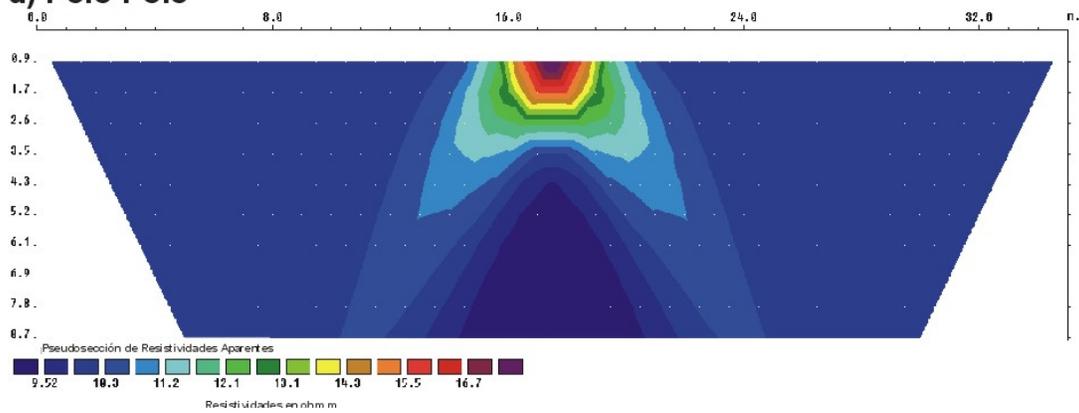
b) Polo-Dipolo Directo



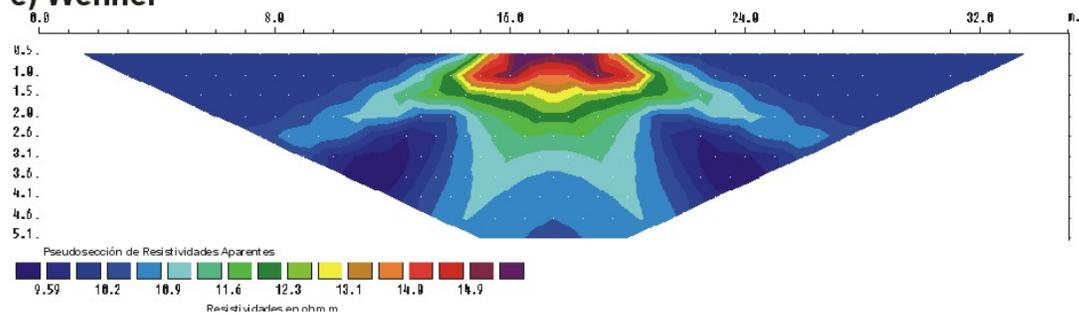
c) Polo-Dipolo_Inverso



d) Polo-Polo



e) Wenner



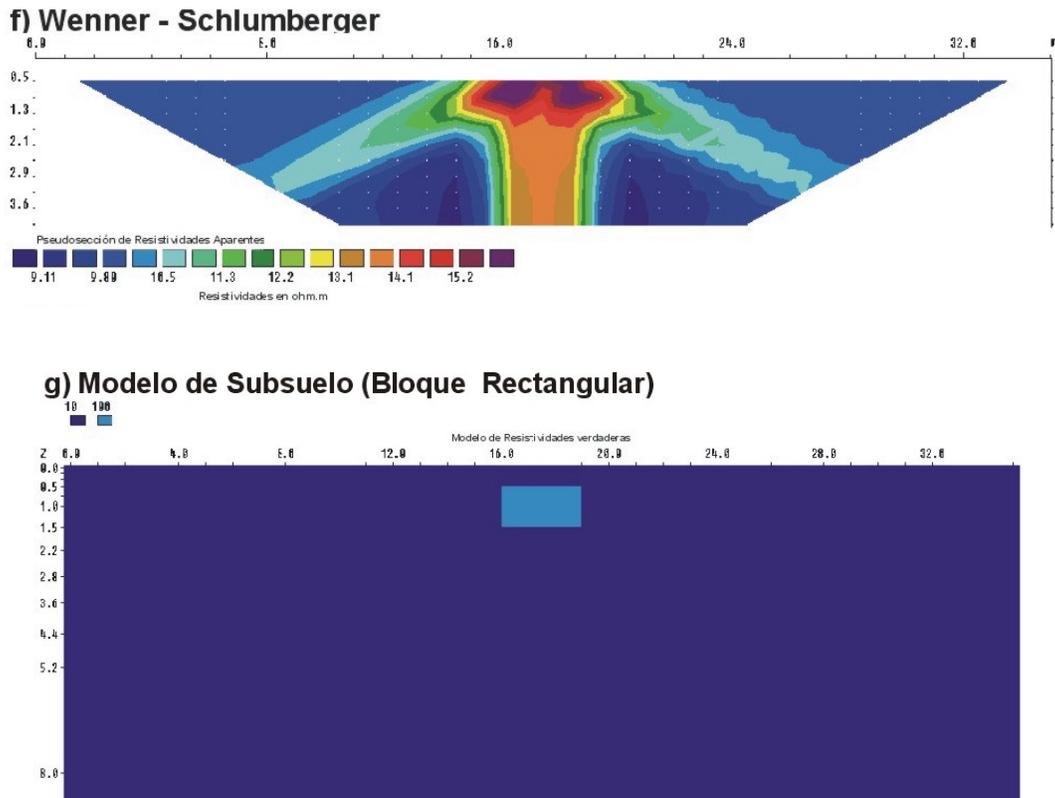


Figura 6: Pseudosecciones de valores de resistividad aparente a partir de un sondeo 2 D con diferentes configuraciones electrónicas sobre un bloque rectangular. a) Dipolo-Dipolo, b) Polo-Dipolo Directo, c) Polo-Dipolo Inverso, d) Polo-Polo, e) Wenner y f) Wenner-Schlumberger; g) Modelo de subsuelo.

2.2.4. Ventajas y desventajas de las diferentes configuraciones.

Los Dispositivos más usados comúnmente para determinaciones de resistividad se mostraron en la Figura 2. La elección de la "mejor" configuración para un sondeo de campo depende del tipo de estructura a ser estudiada, la sensibilidad del resistímetro y el nivel de ruido de fondo de la zona de estudio.

En la práctica, los conjuntos más usados para la obtención de Imágenes de Resistividad Eléctrica en 2D son: a) Dipolo-Dipolo, b) Wenner-Schlumberger, c) Wenner, d) Polo-Polo y d) Polo-Dipolo. De entre las características de un determinado arreglo debe

considerarse: i) la profundidad de investigación, ii) la sensibilidad del arreglo a los cambios verticales y horizontales de la resistividad subterránea, iii) la cobertura horizontal de datos y la relación señal /ruido.

2.2.5. Profundidad de Investigación

El Gráfico 1 da la profundidad media de investigación para los diferentes conjuntos; esta da una idea de la profundidad a la que nosotros podemos sondear con un conjunto en particular. Los valores de profundidad son determinados al integrar la función de sensibilidad con la profundidad (Edwards, 1977).

Hay que destacar que las profundidades son estrictamente válidas para un modelo homogéneo de tierra. Si hay grandes contrastes de resistividad cerca de la superficie, la profundidad real de investigación podría ser algo diferente.

2.2.6. Sensibilidad

Las figuras 8, 9, 10, 11 y 13 muestran el contorno para la función de sensibilidad de las configuraciones a) Wenner, b) Dipolo-Dipolo, c) Wenner-Schlumberger, d) Polo-Polo y e) Polo-Dipolo para un modelo de tierra homogéneo y para el nivel 4 de medida. La sensibilidad es una función que básicamente nos muestra el grado en que un cambio en la resistividad de una sección del subsuelo influirá en la medida del potencial. A valores más altos de la función de sensibilidad, mayor es la influencia de la región del subsuelo sobre la medida (McGillivray and Oldenburg, 1990).

Nótese que para todos los conjuntos, los valores más altos de sensibilidad se encuentran cerca de los electrodos. A diferentes distancias desde los electrodos, los modelos de contorno son distintos para las diversas configuraciones. La diferencia en el contorno

ayuda para explicar la respuesta de los conjuntos a distintos tipos de estructuras. El rango de sensibilidades es único para un modelo de subsuelo determinado y para todos los dispositivos, se presenta solamente junto al Dispositivo Polo-Dipolo (Figura 13).

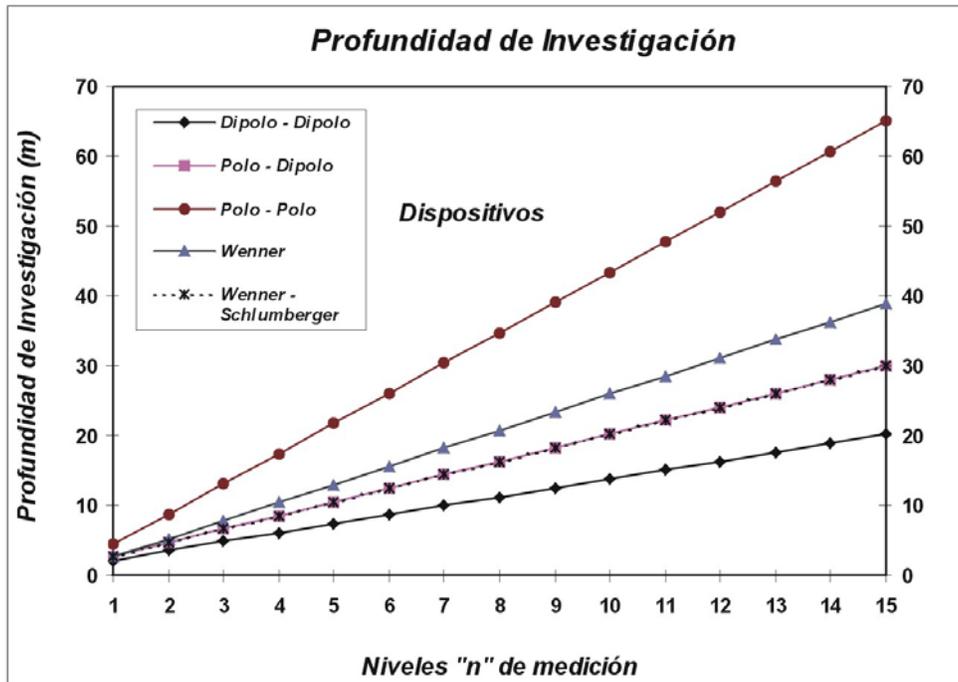


Gráfico 1: Profundidades medias de investigación sobre un medio homogéneo de resistividad para los dispositivos Dipolo -Dipolo; Polo-Dipolo; Polo-Polo; Wenner y Wenner-Schlumberger obtenidas para una distancia interelectródica de 5 metros y distintos niveles de medición (Edwards 1977). Nótese valores idénticos para los dispositivos Polo-Dipolo y Wenner-Schlumberger. En la Figura 2 se muestran los diferentes tipos de dispositivos.

2.2.7. Cobertura. Relación Señal /Ruido.

En la Figura 7 (a y b) se muestra, como ejemplo, el modelo de los datos en pseudosecciones para los dispositivos Wenner y Wenner-Schlumberger; nótese que el dispositivo Wenner-Schlumberger tiene una cobertura horizontal mejor comparado con el Wenner.

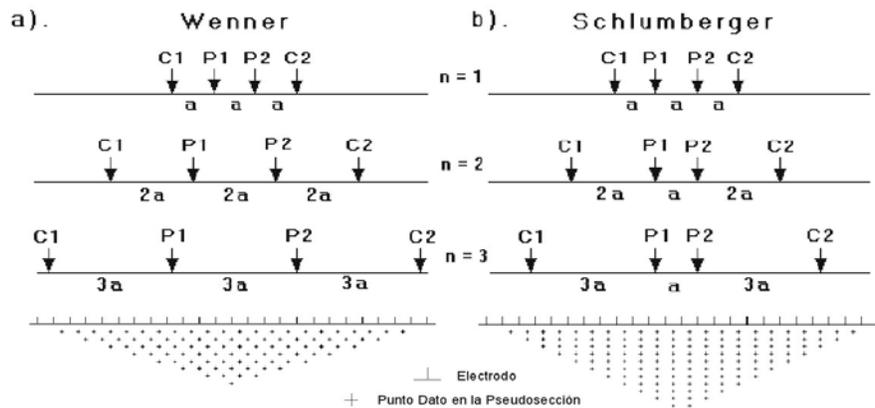


Figura 7. Comparación de Cobertura para los Arreglos de electrodos y pseudosección de datos para las configuraciones a) Wenner y b) Wenner-Schlumberger.

La relación señal /ruido está estrechamente relacionada con el valor de la constante k de cada dispositivo y para el mismo modelo de subsuelo, o sea, que a mayor valor de constante k menor será la señal de potencial medido y viceversa. En otras palabras, la señal es inversamente proporcional al factor geométrico usado para calcular el valor de resistividad aparente (Figura 2).

2.2.8. Configuraciones / Dispositivos.

A continuación se describen los dispositivos más empleados en Tomografía Eléctrica R2D los cuales son: a) Dipolo-Dipolo, b) Wenner-Schlumberger, c) Wenner, d) Polo-Polo y d) Polo-Dipolo.

2.2.8.1. Configuración Wenner.

Esta es una configuración que se ha popularizado por el trabajo experimental llevado a cabo por el grupo de investigación de la Universidad de Birmingham (Griffiths y Turnbull 1985; Griffiths, Turnbull y Olayinka de 1990). En la Figura 8, se muestra para la configuración Wenner, que los contornos graficados para la Sensibilidad son casi horizontales abajo del

centro del conjunto, lo que nos indica que este dispositivo es sensible a cambios de resistividad vertical del subsuelo, no así para aquellos cambios de resistividad horizontales.

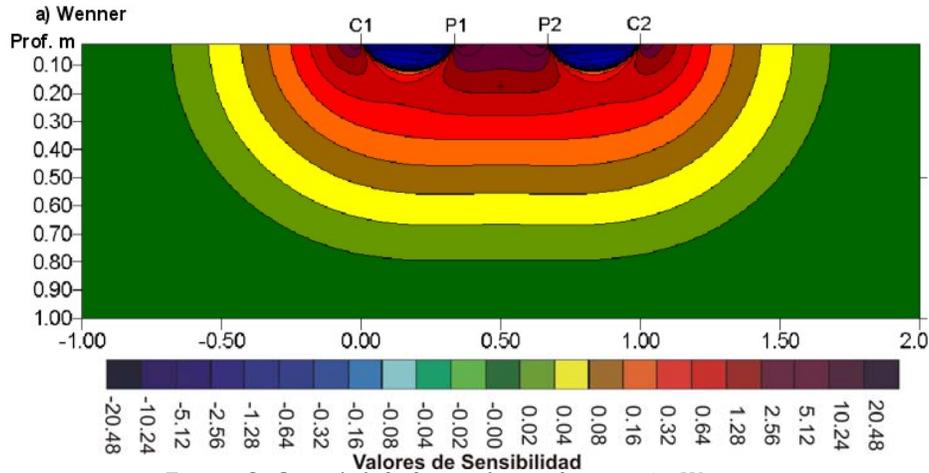


Figura 8: Sensibilidad para la configuración Wenner.

En general, el dispositivo Wenner es bueno resolviendo cambios verticales de resistividad (estructuras horizontales), pero relativamente pobre en detectar los cambios horizontales (estructuras verticales estrechas).

En el Gráfico 1, vemos que para la configuración Wenner, la profundidad media de investigación es aproximadamente 0.5 del espaciamiento "a" utilizado. Comparado con el Polo-Polo, el Wenner tiene una profundidad moderada de investigación.

Para el dispositivo Wenner, el factor geométrico k es $2\pi a$, que es menor que el factor geométrico para otras configuraciones, lo que se concluye que este dispositivo tiene una fortaleza significativa en la señal. Esto puede ser un factor importante si los relevamientos son llevados a cabo en áreas con un ruido de fondo alto.

Una de las desventajas de este dispositivo para relevamientos 2D es que la cobertura horizontal es relativamente pobre cuando el espaciamiento entre electrodos se aumenta (Figura 6e). Esto puede ser un problema cuando se usa un sistema con un número relativamente pequeño de electrodos.

2.2.8.2. Configuración Dipolo-Dipolo.

Este conjunto ha sido, y es todavía, ampliamente usado en sondeos de resistividad y PI (Polarización Inducida) a causa del bajo acoplamiento entre la corriente y los circuitos potenciales; esto es debido a que los efectos de la cargabilidad son afectados notablemente por la señal de acoplamiento inductivo. El arreglo de los electrodos se muestra en la Figura 2. El espaciamiento entre los electrodos, C1-C2, es determinado como “a” al igual que la distancia entre los electrodos potenciales P1-P2. Este arreglo tiene otro factor denominado “n” en la Figura 2. Este es la relación de la distancia entre los electrodos C1 y P1 y la separación de dipolo “a” C2-C1 (o P2-P1).

Para relevamientos con este dispositivo, el espaciamiento “a” se mantiene inicialmente fijo y el factor “n” se aumenta desde 1, 2, 3 y hasta 15 veces a fin de aumentar la profundidad de investigación. Cuando se acompaña con la medida de IP, “n” normalmente no sobrepasa el valor de 8 debido a la fuerte atenuación de la cargabilidad.

En la Figura 9 se muestra que los valores más importantes de sensibilidad se ubican entre los electrodos C2-C1, así como también entre el par P1-P2. Esto significa que este conjunto es muy sensible a cambios de resistividad entre los electrodos en cada par de dipolos. Note que la sensibilidad en el modelo de contorno es casi vertical.

Así el dispositivo Dipolo-Dipolo es muy sensible a cambios de resistividad horizontal, pero relativamente insensible a cambios verticales, de modo que es útil en estructuras verticales tales como muros enterrados, cavidades y plumas contaminantes, pero relativamente pobre en estructuras horizontales tales como capas sedimentarias.

La profundidad media de investigación de este conjunto también depende del factor “n”, así como también de “a” (Gráfico 1); en general, este conjunto posee una profundidad

más somera de investigación comparado con el dispositivo Wenner. Sin embargo, para sondeos 2D, este conjunto tiene una cobertura mejor de datos horizontales que el Wenner (Figura 6a).

Una posible desventaja de este conjunto es que la señal es muy pequeña para valores grandes del factor “n”; el voltaje es inversamente proporcional al cubo del factor “n”, lo que significa que para la misma corriente, el voltaje medido por el resistivímetro disminuye más de 200 veces cuando “n” aumenta desde 1 a 6.

Para usar este conjunto el resistivímetro debería tener comparativamente una alta sensibilidad y un muy buen rechazo de ruido en el circuito receptor además de asegurar un muy buen contacto entre electrodo y terreno.

Se ha usado exitosamente en muchas áreas para detectar estructuras tales como cavidades, plumas contaminantes, etc. donde la resolución horizontal de este conjunto es una ventaja importante.

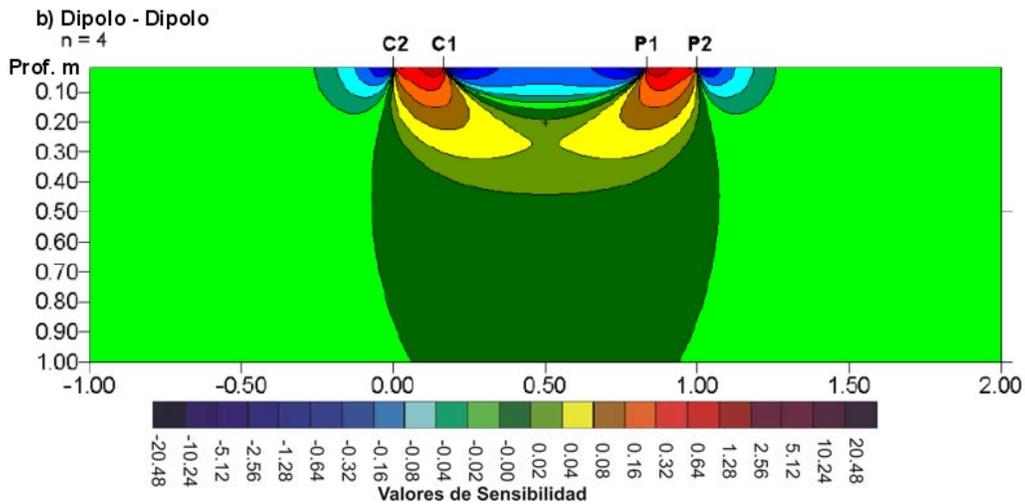


Figura 9: Sensibilidad para la Configuración Dipolo-Dipolo.

2.2.8.3. Configuración Wenner-Schlumberger

Este es una configuración híbrida entre los dispositivos Wenner y Schlumberger (Pazdirek y Blaha 1996). Una forma modificada del dispositivo Schlumberger con un espaciamiento constante se muestra en la Figura 7a; note que el factor "n" es la relación entre la distancia de los electrodos C1-P1 (o P2-C2) y el par potencial P1 – P2. La sensibilidad para el Wenner-Schlumberger (Figura 10) es ligeramente diferente al Wenner con una curvatura vertical delgada más adelante del centro del conjunto y la sensibilidad ligeramente más inferior en las regiones entre el C1 y P1 (y también C2 y P2). Hay una concentración ligeramente mayor de alta sensibilidad en la zona de los electrodos P1-P2.

Esto significa que este conjunto es moderadamente sensible a estructuras horizontales y verticales. En áreas en donde ambos tipos de estructuras geológicas son esperadas, este conjunto puede ser utilizado convenientemente. La profundidad media de investigación para este conjunto es 10% más grande que para el dispositivo Wenner para la misma distancia entre los electrodos (C1 y C2) . La señal para este conjunto es menor que para el dispositivo Wenner , pero es más alta que para el arreglo Dipolo-Dipolo.

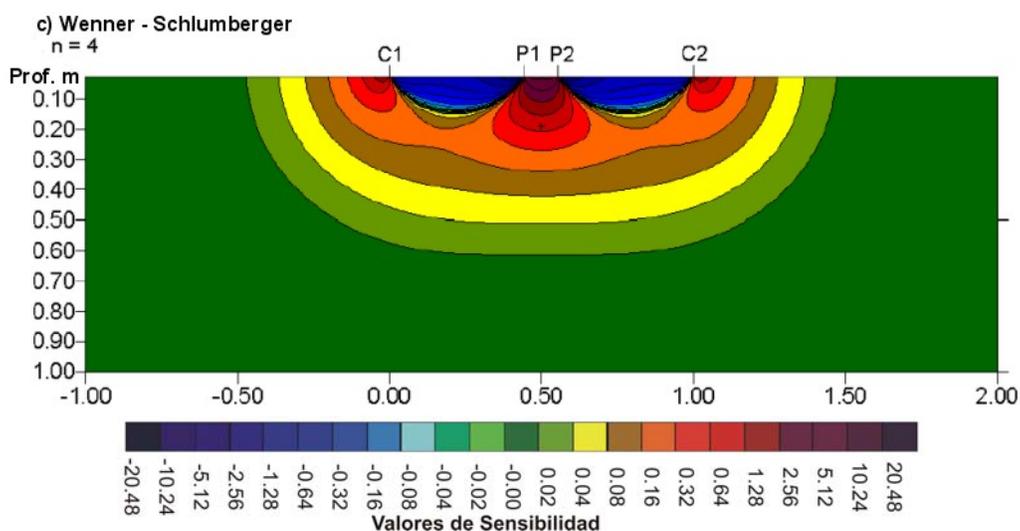


Figura 10: Sensibilidad para la configuración Wenner-Schlumberger.

2.2.8.4. Configuración Polo - Polo

Este conjunto no es tan usado como los anteriores; en la práctica, el dispositivo Polo-Polo posee un único electrodo de corriente y un electrodo de potencial (Figura 2). El segundo electrodo de corriente y el electrodo de potencial (C2 y P2) deben ponerse a una distancia mayor de 20 veces la separación máxima entre C1 y P1 que se utilizaron en el sondeo.

Una desventaja de este conjunto es que a causa de la gran distancia que existe entre los electrodos P1 y P2, se pueden generar una cantidad importante de ruido telúrico que puede degradar severamente la calidad de las medidas. Así este conjunto se usa principalmente en relevamientos donde el espaciamiento entre electrodos es relativamente pequeño (menos de 10 metros). Es popular en algunas aplicaciones tales como relevamientos arqueológicos, en donde los espaciamientos entre electrodos es pequeño. También es usado para sondeos tridimensionales (Li y Oldenburg 1992).

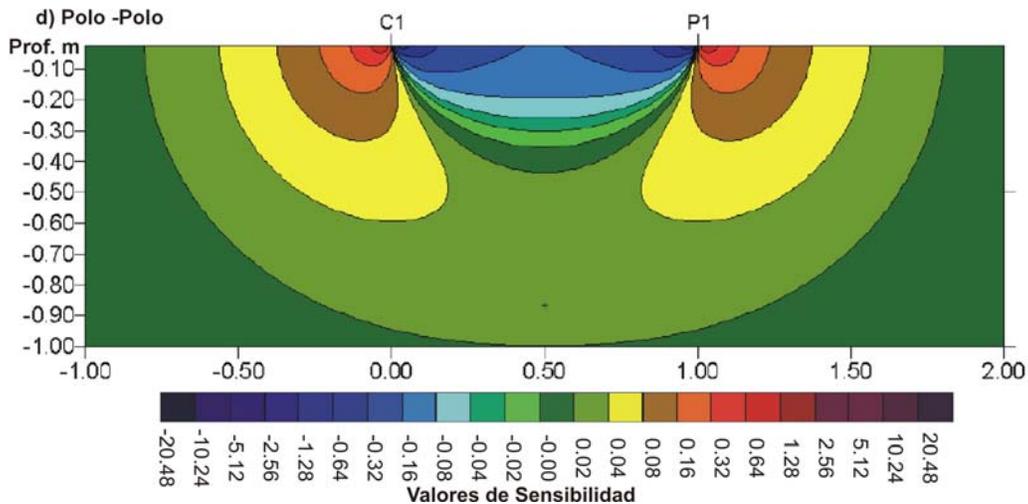


Figura 11: Sensibilidad para la configuración Polo-Polo

Este conjunto tiene la cobertura horizontal muy amplia y la profundidad de investigación es más profunda. Sin embargo, tiene una resolución relativamente pobre, que es reflejada por el espaciamiento comparativamente grande entre los contornos graficados

2.2.8.5. Configuración Polo – Dipolo

La configuración Polo–Dipolo también tiene cobertura horizontal buena, pero tiene una fortaleza de señal significativamente más alta comparada con el dispositivo Dipolo-Dipolo y no es tan sensible al ruido telúrico como la configuración Polo-Polo.

Diferente a las otras configuraciones comunes, el conjunto polo – dipolo es un dispositivo asimétrico (Figura 12 (a y b)) y sobre estructuras simétricas las anomalías de resistividad aparente en la pseudosección son asimétricas (Figura 6 (b y c)). En algunas situaciones, la asimetría en los valores de resistividad aparente podría influir en el modelo obtenido después de la inversión.

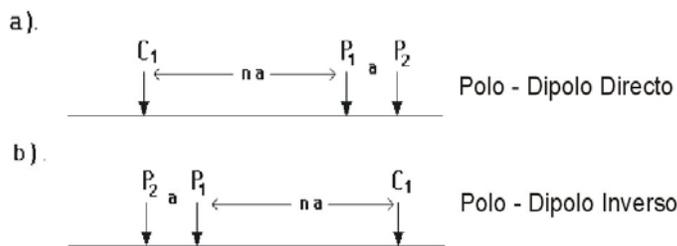


Figura 12: Dispositivo a) Polo-Dipolo Directo, b) Polo-Dipolo Inverso.

Un método para eliminar el efecto de esta asimetría sería repetir las mediciones con un arreglo de electrodos inverso (Figura 12b). Por combinaciones entre las medidas realizadas en forma "Directa" e "Inversa", cualquier predisposición en el modelo debido a la naturaleza asimétrica de este conjunto se eliminaría.

El conjunto Polo-Dipolo requiere también un electrodo remoto (el electrodo C2) que debe ponerse suficientemente lejos de la línea del sondeo. Debido a su buena cobertura

horizontal, este es un conjunto atractivo para medir resistividades con un sistema multi-electrodo que posea un número relativamente pequeño de electrodos. La fortaleza de señal es comparativamente menor a los dispositivos Wenner y Wenner-Schlumberger, pero más alto que el dispositivo Dipolo-Dipolo.

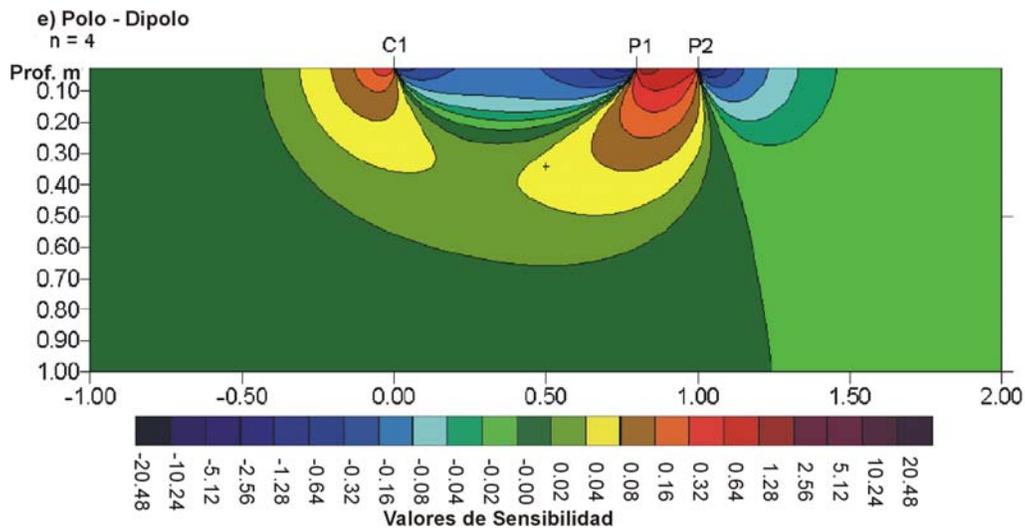


Figura 13: Sensibilidad para la configuración Polo-Dipolo

2.2.9. Alta resolución para relevamientos eléctricos con datos con niveles de superposición.

En prospección sísmica, el método del punto común profundo se utiliza frecuentemente para mejorar la calidad de las señales de los reflectores del subsuelo. Una técnica similar puede usarse para mejorar la calidad de los datos para sondeos de Resistividad y PI, particularmente en áreas ruidosas. Esta técnica utiliza los datos de niveles de superposición con combinaciones de valores diferentes de "a" y "n" para las configuraciones Wenner-Schlumberger, Dipolo-Dipolo y Polo-Dipolo.

2.2.10. Resumen

Si el relevamiento está en un área ruidosa y se necesita que la resolución vertical sea buena, se recomienda el uso del dispositivo Wenner. Si la cobertura horizontal de datos es buena, la resolución es importante, el resistivímetro es suficientemente sensible y hay buen contacto con el terreno, se utiliza el dispositivo Dipolo-Dipolo. Si se necesitaran ambos, o sea buena cobertura horizontal y resolución vertical, se usa el dispositivo Wenner-Schlumberger con niveles de datos de superposición.

Si se tiene un sistema con un número limitado de electrodos, una opción viable sería utilizar el dispositivo Polo-Dipolo con medidas realizadas en forma Directa e Inversa. Para los relevamientos con pequeño espaciamiento entre electrodos y una buena cobertura horizontal, se recomienda la utilización del dispositivo Polo-Polo, el cual presenta mejores resultados en estos casos.

2.3. Sondeos Eléctricos Tridimensionales R3D

2.3.1. Introducción a los Relevamientos Tridimensionales

Puesto que en la naturaleza todas las estructuras geológicas son tridimensionales, un relevamiento tridimensional de resistividad generaría un modelo de interpretación tridimensional 3D (Figura 3c), lo que debería, en teoría, dar resultados más precisos. Hasta el presente, las investigaciones 3D están en pleno desarrollo. La desventaja principal de este tipo de relevamiento es el costo, el cual es comparativamente más alto que 2D, donde las áreas a investigar son suficientemente grandes.

Hay dos desarrollos actuales que hacen que estos relevamientos tridimensionales sean una opción más eficaz en función de los costos. Uno de estos, está en los resistivímetros multi-canal que permiten tomar más de una lectura a un mismo tiempo; esto es importante para

reducir el tiempo del sondeo. El segundo avance se encuentra en las microcomputadoras que cada vez son más rápidas, lo que permiten la inversión de conjuntos de datos muy grandes y obtener resultados en un tiempo razonable corto.

2.3.2. Tipos de Configuraciones para Relevamientos Tridimensionales

Las configuraciones Polo-Polo, Polo-Dipolo y Dipolo-Dipolo se utilizan frecuentemente para sondeos tridimensionales, ya que los otros conjuntos tienen una cobertura de datos más pobre cerca de los bordes de la grilla del sondeo. Las ventajas y desventajas de los dispositivos Polo-Polo, Polo-Dipolo y Dipolo-Dipolo se mencionaron anteriormente, en donde las consideraciones realizadas para los relevamientos 2D son también válidas para los sondeos tridimensionales R3D.

2.3.2.1 Configuración Polo – Polo

En la figura 14 se muestra un arreglo electródico para una relevamiento tridimensional con un sistema de 25 electrodos. Por conveniencia se ubican comúnmente los electrodos en una grilla o malla cuadrada con el mismo espaciamiento entre electrodo en las direcciones x e y. Para mapear cuerpos elongados también puede utilizarse una grilla rectangular con números diferentes de electrodos y espaciamientos en las direcciones x e y.

El número máximo de medidas independientes para este tipo de configuraciones, $n_{\text{máx.}}$, que puede hacerse con n_e electrodos (Xu and Noel, 1993) está dado por:

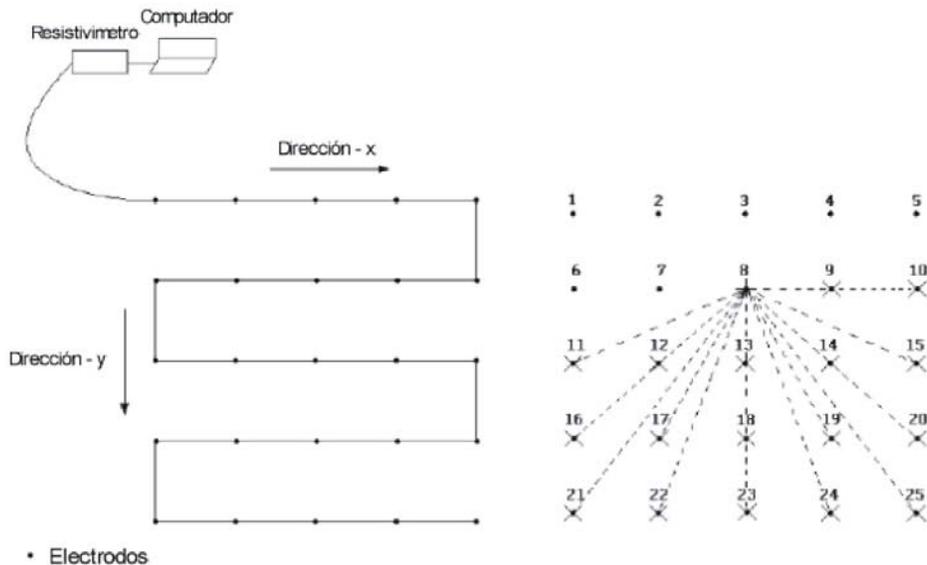
$$n_{\text{máx.}} = n_e (n_e - 1) / 2$$

En este caso, cada electrodo se usa uno a la vez como electrodo de corriente y se mide el potencial eléctrico en todos los otros electrodos; debe notarse que debido a la reciprocidad,

es necesario medir solo los potenciales en los electrodos con un índice más alto que el electrodo actual de corriente, como se observa en la Figura 15a.

Para una grilla de electrodos de 5 por 5, hay 300 medidas posibles. En grillas de 7 por 7 y 10 por 10, para medir el conjunto completo de datos se obtendrían 1176 y 4500 mediciones respectivamente.

Una técnica para reducir el número de medidas sin degradar seriamente la calidad del modelo, es efectuar una sucesión alternativa de medidas como la mostrada en la Figura 15b. En esta, se propone un método denominado "sondeo por intersección de diagonales"; las medidas de los potenciales son realizadas únicamente en los electrodos a lo largo de las direcciones x e y, y las líneas diagonales a 45° que pasan sobre el electrodo de corriente. Esta técnica permite reducir en una tercera parte la cantidad de mediciones realizadas, ya que para una grilla de 7 por 7 se reduce a 476 la cantidad de datos (Loke y Barker 1996). La configuración Polo-Polo tiene desventajas que fueron analizadas en apartados anteriores.



Arreglo de Electrodos para un Relevamiento Geoelectrico 3-D y la Secuencia de Medida para Construir una completo Set de Datos
Figura 14. Arreglo electródico para un sondeo 3D.

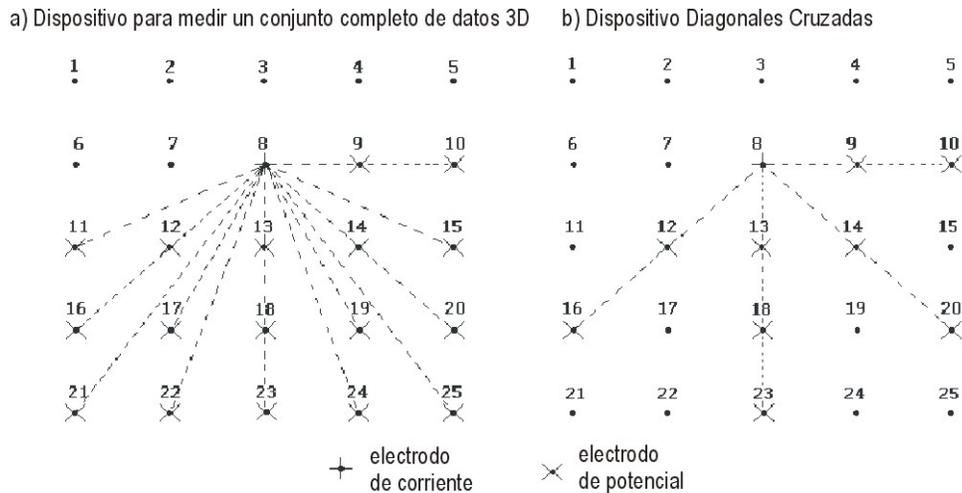


Figura 15. Localización de los electrodos de potencial correspondientes a un electrodo de corriente usado para a) Sondeo para un conjunto de datos completos en condiciones normales y b) Sondeo por intersección de diagonales.

2.3.2.2. Configuración Polo – Dipolo

Este conjunto es una alternativa a la configuración Polo-Polo para relevamientos en donde las grillas de datos son más grandes (12 por 12 y superiores), tiene un mejor poder de resolución que el conjunto Polo-Polo (Sasaki 1992), y es menos susceptible al ruido telúrico ya que ambos electrodos de potencial son incluidos dentro de la grilla del sondeo.

Comparado al conjunto Dipolo-Dipolo, tiene una señal más fuerte; a pesar de tener un electrodo "remoto" (C2), el efecto de este electrodo sobre las medidas es mucho más pequeño comparado al conjunto Polo-Polo. Como el conjunto Polo-Dipolo es asimétrico, las medidas deberían ser realizadas con arreglos Electrónicos hacia adelante "Directo" y hacia atrás "Inverso" (Figura 12).

2.3.2.3 Configuración Dipolo-Dipolo

Este conjunto es recomendado únicamente para grillas que son más grandes que 12 por 12 electrodos, debido a que posee una cobertura más pobre de datos en forma horizontal. El problema principal es la fortaleza de la señal que es comparativamente más baja que para

otros casos. Similarmente que para relevamientos en 2D, este problema puede ser superado aumentando el espaciamiento "a" entre electrodos P1-P2, a fin de conseguir una profundidad de investigación mayor.

En muchos casos un conjunto de datos para un modelado 3D para Polo-Polo, Polo-Dipolo y Dipolo-Dipolo, puede ser obtenido a partir de un número determinado de líneas paralelas de relevamientos 2D.

2.3.3. Resumen

Para grillas relativamente pequeñas de menos de 12 por 12 electrodos, la configuración Polo-Polo tiene un número considerablemente más grande de medidas independientes posibles comparado a otros conjuntos. La pérdida de los puntos de datos cerca de los extremos de la rejilla se reduce al mínimo, y provee una mejor cobertura horizontal comparada con otros conjuntos. Esta es una configuración atractiva para los relevamientos con grillas pequeñas y con espaciamientos relativamente pequeños entre electrodos (menos de 5 metros). Sin embargo, tiene la desventaja de requerir dos electrodos "remotos" que deben ser ubicados a una distancia suficientemente grande a partir de la grilla del sondeo, debido a la distancia grande entre los electrodos potenciales; este conjunto es además más sensible al ruido telúrico.

El conjunto Polo-Dipolo es una opción atractiva para un grillado de estaciones regular. Tiene una resolución más alta que el conjunto Polo-Polo, ya que requiere un único electrodo remoto y es mucho menos sensible al ruido telúrico. Para relevamientos con grillado grande, particularmente cuando no hay ubicación conveniente para un electrodo remoto, es conveniente utilizar la configuración Dipolo-Dipolo . Para ambos casos (Polo-Dipolo y Dipolo-

Dipolo) las medidas con niveles de superposición de datos que usan diferentes combinaciones de "a" y "n" deberían usarse para mejorar la calidad de los resultados.

3. Adquisición de datos en 3D (Técnicas de Relevamiento Continuo en 3D)

Muchas prospecciones de Tomografía Eléctrica R3D involucrarán grillas probablemente de al menos 16 por 16 electrodos para cubrir áreas razonablemente extensas. Una grilla de 16 por 16 requerirá 256 electrodos, los cuales son mucho más que los disponibles por varios resistivímetros multi-electródicos. Un método para trabajar en grillas grandes con un número limitado de electrodos es extender la técnica de relevamiento continuo usada en relevamientos 2D a 3D (Dahlin and Bernstone 1997). La figura 16 muestra un ejemplo de toma de datos utilizando un Resistivímetro Multielectrónico con 50 electrodos para medir sobre una grilla de 10 por 10. Inicialmente los electrodos se ordenan en una grilla 10 por 5 con las líneas mas largas orientadas en la dirección x. Las mediciones se realizan primero en la dirección x, con algunas posibles mediciones en las direcciones diagonales.

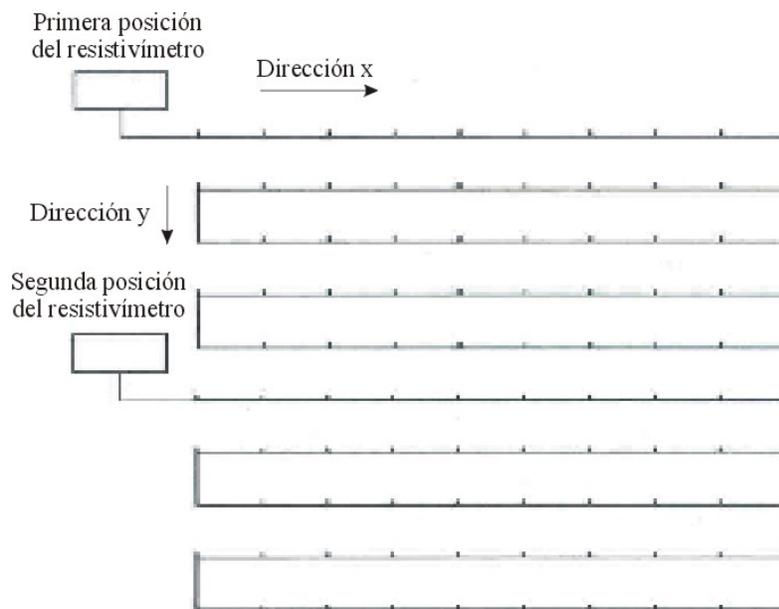


Figura 16. Grilla de 10 por 10 electrodos (Técnica de Relevamiento Continuo en 3D)

En algunos casos las mediciones se efectúan solamente en una dirección. Un conjunto de datos 3D consiste de un número de líneas paralelas 2D. Los datos de cada línea relevados en 2D son inicialmente invertidos independientemente para obtener secciones transversales en 2D. Finalmente, la totalidad del conjunto de datos se combina dentro de un conjunto de datos 3D y se invierte con el propósito de obtener una imagen R3D. Mientras que la calidad del modelado de estos datos es más pobre que para los obtenidos con una técnica de adquisición 3D pura (full 3D), tales datos podrían mostrar importantes variaciones de resistividad a través de líneas relevadas en 2D.

3.1. Técnica de Inversión de Datos

La rutina de inversión usada por el programa se basa en el método mínimos cuadrados con suavizado forzado (de Groot-Hedlin and Constable 1990, Sasaki 1992). Una nueva implementación del método de mínimos cuadrados basada sobre la técnica de optimización cuasi-Newton (Loke and Barker 1996) puede ser también usada. Esta técnica puede ser hasta 10 veces más rápida que el método de mínimos cuadrados para un gran conjunto de datos y requiere menos memoria. El método de mínimos cuadrados con suavizado forzado se basa en la siguiente ecuación:

$$(\mathbf{J}'\mathbf{J} + \mathbf{uF})\mathbf{d} = \mathbf{J}'\mathbf{g} \quad (1)$$

donde $\mathbf{F} = \mathbf{fxfx}' + \mathbf{fzfz}'$

fx = filtro de achatamiento horizontal

fz = filtro de achatamiento vertical

J = matriz de derivadas parciales

J' = transpuesta de J

u = factor de amortiguamiento

d = vector del modelo de perturbación

g = vector de discrepancia

Una de las ventajas de este método es que el factor de amortiguamiento y los filtros de achatamiento pueden ser ajustados para satisfacer diferentes tipos de datos.

También puede usarse el método convencional de Gauss-Newton el cual recalcula el Jacobiano de la matriz de derivadas parciales después de cada iteración. Esto es mucho más lento que el método cuasi-Newton, pero en áreas con gran contraste de resistividad más grandes que 10:1, brinda resultados ligeramente mejores (Loke and Dahlin, 2002). Una tercera opción es utilizar el método Gauss-Newton para las primeras dos o tres iteraciones, después que se usó el método cuasi-Newton. En muchos casos, esto provee la mejor solución de compromiso.

El modelo de inversión divide el subsuelo en un pequeño número de prismas rectangulares e intenta determinar los valores de resistividad de los prismas tanto para minimizar la diferencia entre los valores de resistividad aparente observados y calculados. Uno de los posibles arreglos usados por Loke and Barker (1996), se muestra en la Figura 17.a. Aquí, cada bloque en el techo de la capa tiene un electrodo en cada esquina. Además de este arreglo básico, otros dos arreglos pueden ser utilizados.

Una alternativa es dividir los bloques en el techo de pocas capas por la mitad, en direcciones horizontales solamente (Figura 17.c). La tercera alternativa es dividir las capas por la mitad en la dirección vertical también (Figura 17.b). Puesto que la resolución del método de resistividad decrece rápidamente con la profundidad ha sido encontrado que subdividir los bloques es solamente provechoso para el techo de las dos primeras capas únicamente. En muchos casos, subdividir el techo de la capa únicamente es suficiente. Por subdivisión de los

bloques, el número de parámetros del modelo y así el tiempo de computadora requerido para invertir los datos, puede incrementar dramáticamente.

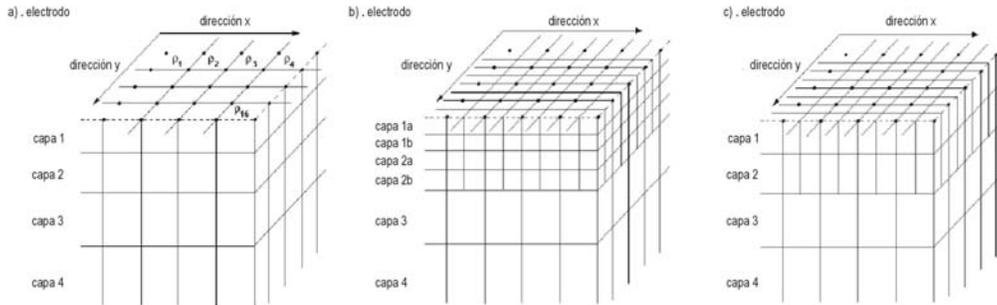


Figura 17. Los modelos usados en la inversión. (a) Modelo convencional donde los anchos de los bloques rectangulares son iguales a los espaciamiento de electrodo unitario en las direcciones x e y. (b) Un modelo donde el techo de pocas capas se divide por la mitad, ambos verticalmente y horizontalmente, para proporcionar la mejor resolución. (c) Un modelo donde los bloques se dividen en direcciones de la horizontal pero no en la dirección vertical.

El método de optimización intenta reducir la diferencia entre la resistividad aparente calculada y la medida por adecuación de la resistividad del modelo de bloques. Una medida de esta diferencia está dada por el error del término medio de la raíz cuadrada (RMS). Sin embargo el modelo con el más bajo posible error RMS puede, algunas veces, mostrar grandes y no realistas variaciones en los valores del modelo de resistividad y puede no siempre ser el “mejor” modelo desde la perspectiva geológica. En general la aproximación más prudente es elegir el modelo para una iteración, después del cual el RMS no cambia significativamente. Esto usualmente ocurre entre la cuarta y quinta iteración.

REFERENCIAS

- Dahlin, T. and Bernstone, C., 1997. A roll-along technique for 3D resistivity data acquisition with multi-electrode arrays, *Procs. SAGEEP'97 (Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems)*, Reno, Nevada, March 23-26 1997, vol 2, 927-935.
- Dahlin, T and Loke, M.H., 1998. Resolution of 2D Wenner resistivity imaging as assessed by numerical modelling. *Journal of Applied Geophysics*, 38, 237-249.
- de Groot-Hedlin, C. and Constable, S.C., 1990. Occam's inversion to generate smooth, two dimensional models from magnetotelluric data. *Geophysics*, 55, 1613-1624.
- Daniels, F. and Alberty, R.A., 1966. *Physical Chemistry*. John Wiley and Sons, Inc.
- Dey, A. and Morrison, H.F., 1979a. Resistivity modelling for arbitrary shaped two-dimensional structures. *Geophysical Prospecting* 27, 1020-1036.
- Dey, A. and Morrison, H.F., 1979b. Resistivity modelling for arbitrary shaped three-dimensional structures. *Geophysics* 44, 753-780.
- Edwards, L.S., 1977. A modified pseudosection for resistivity and induced-polarization. *Geophysics*, 42, 1020-1036.
- Griffiths, D.H. and Turnbull, J., 1985. A multi-electrode array for resistivity surveying. *First Break* 3 (No. 7), 16-20.
- Griffiths, D.H., Turnbull, J. and Olayinka, A.I., 1990. Two-dimensional resistivity mapping with a computer- controlled array. *First Break* **8**, 121-129.
- Griffiths, D.H. and Barker, R.D., 1993. Two-dimensional resistivity imaging and modelling in areas of complex geology. *Journal of Applied Geophysics*, 29, 211-226.
- Keller, G.V and Frischknecht, F.C., 1966. *Electrical methods in geophysical prospecting*. Pergamon Press Inc., Oxford.
- Koefoed, O., 1979. *Geosounding Principles 1: Resistivity sounding measurements*. Elsevier Science Publishing Company, Amsterdam.
- Li, Y. and Oldenburg, D.W., 1992. Approximate inverse mappings in DC resistivity problems. *Geophysical Journal International*, 109, 343-362.
- - Loke, M.H. and Barker, R.D.,1996a. Rapid least-squares inversion of apparent resistivity pseudosections using a quasi-Newton method. *Geophysical Prospecting*, 44, 131":152.

- Loke, M.H. and Barker, R.D., 1996b. Practical techniques for 3D resistivity surveys and data inversion. *Geophysical Prospecting*, 44, 499-523.
- Loke, M.H., 1999. Time-lapse resistivity imaging inversion. Proceedings of the 5th Meeting of the Environmental and Engineering Geophysical Society European Section, Eml.
- Loke, M.H., 2000. Topographic modelling in resistivity imaging inversion. 62nd EAGE Conference & Technical Exhibition Extended Abstracts, D-2.
- Loke, M.H., 2002. Electrical Imaging Surveys for Environmental and Engineering Studies. Tutorial: 2-D and 3-D Electrical Imaging Surveys.
- Loke, M.H. and Dahlin, T., 2002. A comparison of the Gauss-Newton and quasi-Newton methods in resistivity imaging inversion. *Journal of Applied Geophysics*, 49, 149- 162.
- McGillivray, P.R. and Oldenburg, D.W., 1990. Methods for calculating Frechet derivatives and sensitivities for the non-linear inverse problem : A comparative study. *Geophysical Prospecting*, 38, 499-524.
- Orellana, Ernesto (1972). *Prospección Geoeléctrica en Corriente Continua*. Paraninfo, Madrid. España.
- Pazdirek, O. and Blaha, V., 1996. Examples of resistivity imaging using ME-100 resistivity field acquisition system. EAGE 58th Conference and Technical Exhibition Extended Abstracts. Amsterdam.
- Sasaki, Y. 1992. Resolution of resistivity tomography inferred from numerical simulation. *Geophysical Prospecting*, 40, 453-464.
- Silvester P.P. and Ferrari R.L., 1990, *Finite elements for electrical engineers* (2nd. ed.) . Cambridge University Press.
- Xu, B. and Noel, M. 1993. On the completeness of data sets with multielectrode systems for electrical resistivity survey. *Geophysical Prospecting*, 41, 791-801.