

## 2. Medida de la resistividad eléctrica del subsuelo

Las medidas de resistividad eléctrica del subsuelo son habituales en las prospecciones geofísicas. Su finalidad es detectar y localizar cuerpos y estructuras geológicas basándose en su contraste resistivo. El método consiste en la inyección de corriente continua o de baja frecuencia en el terreno mediante un par de electrodos y la determinación, mediante otro par de electrodos, de la diferencia de potencial. La magnitud de esta medida depende, entre otras variables, de la distribución de resistividades de las estructuras del subsuelo, de las distancias entre los electrodos y de la corriente inyectada.

Este capítulo consta de 6 apartados. El apartado 2.1 revisa el concepto de resistividad eléctrica y muestra las resistividades típicas de algunos suelos. El apartado 2.2 describe cómo se realiza la medida de resistividad con el método resistivo. El apartado 2.3 describe los dispositivos tetraelectródicos básicos. El apartado 2.4 describe los tipos de prospecciones normalmente realizadas con el método resistivo. El apartado 2.5 muestra el sistema de medida automático PROGEO (Alberto, 1997), que será descrito con más detalle en el capítulo 4, y describe las configuraciones multielectródicas propuestas para realizar las medidas. Por último el apartado 2.6 resume el capítulo.

### 2.1. Resistividad eléctrica de suelos

La resistividad eléctrica  $\rho$  de un material describe la dificultad que encuentra la corriente a su paso por él. De igual manera se puede definir la conductividad  $\sigma$  como la facilidad que encuentra la corriente eléctrica al atravesar el material. La resistencia eléctrica que presenta un conductor homogéneo viene determinada por la resistividad del material que lo constituye y la geometría del conductor. Para un conductor rectilíneo y homogéneo de sección  $s$  y longitud  $l$  la resistencia eléctrica es

$$R = r \frac{l}{s} \quad (2.1)$$

A partir de esta ecuación podemos despejar la resistividad

$$\rho = \frac{R \cdot s}{l} \quad (2.2)$$

La unidad de resistividad en el Sistema Internacional es el ohm por metro ( $\Omega \cdot m$ ). La conductividad se define como el inverso de la resistividad

$$\sigma = \frac{1}{\rho} \quad (2.3)$$

La unidad de conductividad en el Sistema Internacional es el siemens (S). La resistividad es una de las magnitudes físicas con mayor amplitud de variación para diversos materiales. Además, su valor depende de diversos factores como la temperatura, humedad o presión.

Estrictamente hablando todos los cuerpos son eléctricamente conductores dado que permiten, en mayor o menor medida, el paso de portadores de cargas eléctricas. Estos portadores pueden ser electrones o iones, hecho que permite distinguir entre dos tipos de conductividad: electrónica e iónica. Los cuerpos con conductividad electrónica se clasifican en metales y semiconductores. Los cuerpos con conductividad iónica se conocen como electrolitos si no presentan forma gaseosa.

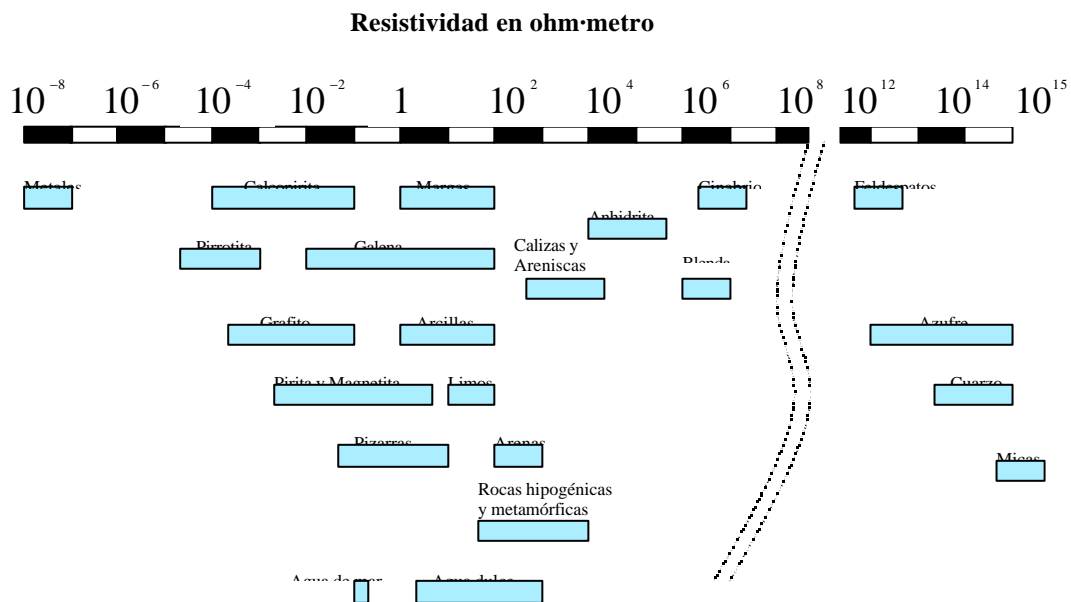
El mecanismo de la conductividad de los metales puede imaginarse como debido a que los electrones de valencia de sus átomos pueden moverse libremente entre la red cristalina que éstos forman, sin vinculación a ninguno determinado. La facilidad de movimiento de los electrones y su gran número redundan en una conductividad muy elevada. Su resistencia aumenta con la temperatura y con el contenido de impurezas. La resistividad de los metales a temperatura normal varía entre  $10^{-8}$  y  $10^{-7}$   $\Omega\text{m}$ . Son pocos y muy escasos los componentes de la corteza terrestre que posean conductividad metálica. Entre ellos se cuentan los metales nativos (oro, plata, cobre, estaño) y quizá algún mineral poco abundante como la ullmanita (NiSbS).

Los minerales semiconductores son muchos y de gran importancia práctica. Su resistividad depende de su contenido en impurezas, a veces en grado extremo. Además su conductividad aumenta con la temperatura. Por ello, no cabe esperar que la resistividad de una especie mineralógica determinada pueda representarse por un dato único, sino que puede variar dentro de límites amplios. En general los telururos y los arseniuros son conductores muy buenos. Los sulfuros suelen entrar también entre los conductores buenos, con excepciones como la blenda y el cinabrio. Los óxidos, y los compuestos de antimonio suelen ser malos conductores, con la excepción de la magnetita. Ahora bien, estos minerales no suelen aparecer en la naturaleza de forma individual, sino en asociaciones, y junto con una ganga frecuentemente aislante (cuarzo, calcita, etc.), por lo que la resistividad conjunta del filón puede variar mucho de unos casos a otros.

En los cuerpos dieléctricos o aisladores, los electrones están fuertemente ligados a los átomos. Esto puede deberse a que existan enlaces covalentes o iónicos. En este último caso la red cristalina forma un electrólito sólido. La mayoría de los minerales pertenecen a este grupo. A temperaturas normales las resistividades son muy altas, generalmente superiores a  $10^7$   $\Omega\text{m}$ . Son minerales dieléctricos el azufre, la blenda, la calcita, el cinabrio, el cuarzo, las micas y el petróleo entre otros. Entre estos minerales, además, figuran los más importantes constituyentes de las rocas, las cuales se comportarían como aisladoras si no fuera por la presencia de electrolitos.

El agua pura es muy poco conductora a causa de su muy reducida disociación. La resistividad del agua destilada es de unos  $10^5 \Omega\text{m}$  por lo que puede considerarse como aislante. Las aguas que se encuentran en la naturaleza presentan, sin embargo, conductividad apreciable, pues siempre tienen disuelta alguna sal, generalmente NaCl. Así las aguas de lagos y arroyos de alta montaña varían entre  $10^3 \Omega\text{m}$  y  $3 \times 10^3 \Omega\text{m}$ , las aguas subterráneas tienen resistividades de 1 a  $20 \Omega\text{m}$ , y las aguas marinas tienen una resistividad de unos  $0,2 \Omega\text{m}$ .

Si la resistividad de las rocas dependiese únicamente de los minerales constituyentes, habrían de considerarse como aislantes en la inmensa mayoría de los casos, puesto que el cuarzo, los silicatos, la calcita, las sales, etc., lo son prácticamente. Sólo en el caso de que la roca contuviese minerales semiconductores en cantidad apreciable, podría considerarse como conductora, es decir, sólo lo serían las menas metálicas. Afortunadamente, todas las rocas tienen poros en proporción mayor o menor, los cuales suelen estar ocupados total o parcialmente por electrolitos, de lo que resulta que, en conjunto, las rocas se comportan como conductores iónicos, de resistividad muy variable según los casos. La resistividad de las rocas puede variar en margen amplísimo en función del contenido en agua, de la salinidad de ésta y del modo de distribución de los poros. La Figura 2.1 presenta un gráfico de los márgenes de variación más comunes en algunas rocas y minerales. La fisuración, impregnación en agua salada, etc., pueden extender estos límites.



**Figura 2.1. Valores de resistividad de diferentes rocas y minerales (Orellana, 1982)**

La resistividad de las rocas también depende de la temperatura a la que se encuentre ya que la temperatura influye notablemente en la resistividad de los fluidos que hay en los poros. En concreto, un descenso de la temperatura provoca un aumento de la resistividad y en el punto de congelación

el agua pasa a ser un dieléctrico mal conductor. Por último, cabe mencionar que la resistividad de algunos minerales, y como consecuencia de las rocas que estos forman, varía según la dirección de medida que se toma, es decir, que presentan *anisotropía*. La formación de estratos puede producir anisotropía. Tal es el caso de las rocas sedimentarias. En general este efecto será débil dada la aleatoriedad de las orientaciones de los minerales en la roca.

El suelo es una mezcla de rocas, gases, agua y otros materiales orgánicos e inorgánicos. Esta mezcla hace que la resistividad del suelo aparte de depender de su composición intrínseca, dependa de otros factores externos como la temperatura, la humedad, presión, etc. que pueden provocar que un mismo suelo presente resistividades diferentes con el tiempo. De entre todos los factores, la humedad es el más importante; además, es el que se puede alterar más fácilmente mediante la lluvia o el riego del suelo. Diferentes grados de humedad para un mismo terreno darían lugar a resistividades diferentes que podrían llevarnos a interpretaciones erróneas de los materiales constituyentes del suelo.

Una limitación del método resistivo es su alta sensibilidad a pequeñas variaciones de la conductividad cerca de la superficie, debido por ejemplo al contenido de humedad. Hablando en términos electrónicos, el nivel de ruido es alto. Una topografía accidentada puede tener un efecto similar, ya que el flujo de corriente se concentra en los valles y se dispersa en las colinas. Como resultado se distorsionan las superficies equipotenciales produciendo falsas anomalías debido solo a la topografía.

El objetivo de este trabajo no es, sin embargo, dar una interpretación de los materiales constituyentes a partir de las resistividades aparentes medidas, sino obtener imágenes tridimensionales de la distribución de la resistividad eléctrica del subsuelo. El proceso de interpretación desde un punto de vista geológico habría de ser realizado por geólogos o geofísicos.

## 2.2. Medida de la resistividad eléctrica

La Figura 2.2 muestra el principio de medida de la resistividad del suelo: se inyecta una corriente  $I$  entre el par de electrodos  $AB$  y se mide la tensión  $\Delta V$  entre el par de electrodos  $MN$ . Si el medio es homogéneo de resistividad  $\rho$ , la diferencia de tensión es (Orellana, 1982)

$$\Delta V = \frac{Ir}{2\rho} \left( \frac{1}{AM} - \frac{1}{AN} - \frac{1}{BM} + \frac{1}{BN} \right) \quad (2.4)$$

donde  $AM$ ,  $AN$ ,  $BM$ ,  $BN$  son las distancias entre electrodos. La resistividad viene dada por la expresión

$$r = g \frac{\Delta V}{I} \tag{2.5}$$

donde

$$g = 2p \left( \frac{1}{AM} - \frac{1}{AN} - \frac{1}{BM} + \frac{1}{BN} \right)^{-1} \tag{2.6}$$

es un factor geométrico que depende exclusivamente de la disposición de los electrodos. De hecho, (2.5) es equivalente a (2.2) pero con un factor geométrico diferente

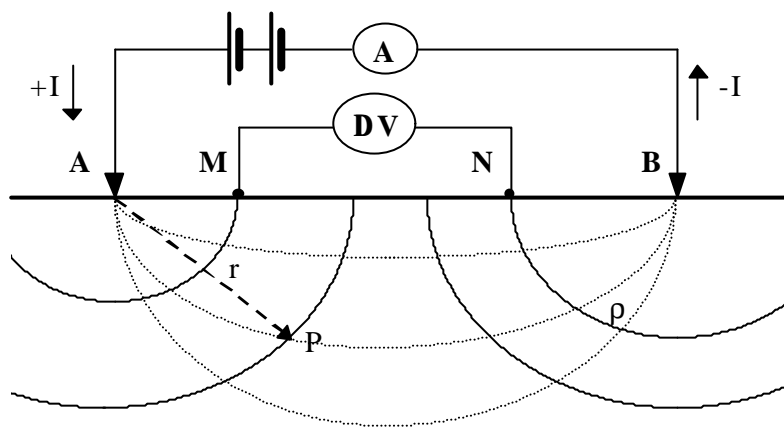


Figura 2.2. Dispositivo tetraelectrónico para la medida de la resistividad del suelo

Dos dispositivos tetraelectrónicos lineales (los cuatro electrodos están en línea) en los que intercambiamos los electrodos de inyección y detección presentan unos coeficientes de dispositivo

$$g_1 = 2p \left( \frac{1}{AM} - \frac{1}{AN} - \frac{1}{BM} + \frac{1}{BN} \right)^{-1} \tag{2.7}$$

$$g_2 = 2p \left( \frac{1}{MA} - \frac{1}{MB} - \frac{1}{NA} + \frac{1}{NB} \right)^{-1} \tag{2.8}$$

Dado que las distancias cumplen  $AM=MA$ ,  $AN=NA$ , etc., se obtiene que  $g_1 = g_2$ . Luego si el medio es homogéneo, para una misma corriente de inyección las diferencias de potencial leídas  $DV_1$  y  $DV_2$  serán iguales. Por tanto la resistividad medida  $r$  será independiente de la posición de los electrodos de inyección y detección cuando estos se intercambian. Esta propiedad se conoce con el nombre de *principio de reciprocidad*, que se cumple también para medios heterogéneos (Orellana, 1982). No obstante, en la práctica no es conveniente colocar los electrodos M y N tan separados como suelen estar los A y B, pues al ser grande la distancia entre los primeros, la medida se vería afectada por

la corrientes telúricas, parásitos industriales, etc., cuyo efecto aumenta proporcionalmente con la distancia entre M y N.

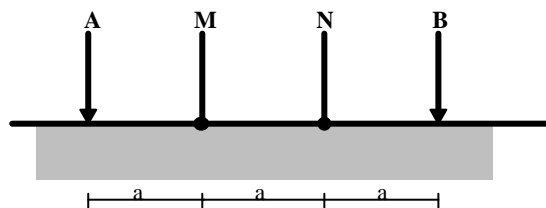
Los cálculos anteriores se basan en la consideración de que el suelo es homogéneo e isótropo. Cuando el medio no es homogéneo, (2.5) da la *resistividad aparente*,  $r_a$ , y su valor depende, además del factor geométrico  $g$ , de las resistividades de los diferentes materiales. A partir de la interpretación de las resistividades aparentes medidas en un terreno se podrán extraer conclusiones sobre la composición estructural del subsuelo.

### 2.3. Dispositivos tetraelectródicos lineales básicos

En cualquier dispositivo electródico, si conocemos el factor geométrico  $g$ , la corriente eléctrica  $I$  inyectada por los electrodos A y B, y la diferencia de potencial entre los electrodos M y N, podemos calcular la resistividad aparente mediante (2.5). Los dispositivos tetraelectródicos lineales más utilizados son los siguientes:

#### *Dispositivo Wenner.*

Los electrodos se disponen equidistantes sobre una línea en el orden AMNB (Figura 2.3)



**Figura 2.3. Dispositivo Wenner**

El factor geométrico del dispositivo se deduce de (2.6),

$$g = 2pa \quad (2.9)$$

#### *Dispositivo Schlumberger*

Se trata de una composición simétrica de los electrodos AMNB dispuestos en línea, donde la distancia de los electrodos detectores MN es mucho menor que la de los inyectores AB (Figura 2.4). En la práctica,  $AB > 5MN$ .

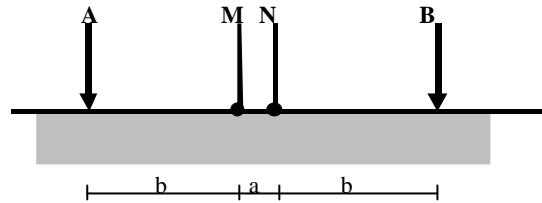


Figura 2.4. Dispositivo Schlumberger

El coeficiente del dispositivo en este caso es

$$g = \rho \frac{b(b+a)}{a} \quad (2.10)$$

Si definimos  $L = b + a/2$ , el factor geométrico se puede expresar como

$$g = \rho \left( \frac{L^2}{a} - \frac{a}{4} \right) \quad (2.11)$$

Si la distancia  $a$  que separa los electrodos M y N tiende a cero el factor geométrico queda

$$g = \rho \frac{L^2}{a} \quad (2.12)$$

que tiende a infinito. Sin embargo la resistividad aparente es finita ya que  $DV$  en (2.5) decrece al mismo tiempo que  $a$ . Tendremos, pues,

$$r_a = \lim_{a \rightarrow 0} \rho \frac{L^2}{a} \frac{\Delta V}{I} = \rho \frac{L^2}{I} \lim_{a \rightarrow 0} \frac{\Delta V}{a} = \rho \frac{L^2}{I} E \quad (2.13)$$

donde  $E$  es el campo eléctrico. La idea del dispositivo Schlumberger consiste, pues, en utilizar una distancia  $MN = a$  muy corta, de tal modo que pueda tomarse como válida la ecuación anterior. Los desarrollos teóricos se establecen suponiendo que lo que medimos realmente es el campo  $E$ , el cual en la práctica se toma igual a  $DV/a$ . Trabajar con el campo eléctrico comporta ventajas teóricas a la hora de trabajar con expresiones analíticas, como veremos en el próximo capítulo. El inconveniente es que la tensión diferencial medida disminuye linealmente con la separación  $a$  y es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia  $L$ . Además, la precisión de las mediciones geoelectricas de campo está muy limitada por heterogeneidades irrelevantes del terreno (ruido geológico).

En ciertos casos, el electrodo B se lleva a gran distancia de los demás de modo que no influya sobre el valor de  $DV$  observado. Se tiene entonces el dispositivo denominado *Schlumberger asimétrico*, o *semi-Schlumberger*.

#### Dispositivo polo-dipolo

En este dispositivo el electrodo B se lleva a una gran distancia (teóricamente en el infinito) de los otros tres (Figura 2.5)

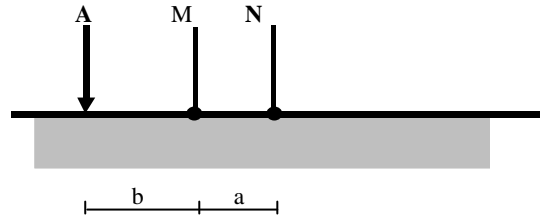


Figura 2.5. Dispositivo polo-dipolo

El factor geométrico del dispositivo en este caso es

$$g = 2\rho \frac{b(b+a)}{a} \quad (2.14)$$

Cuando  $a \ll b$  este dispositivo es equivalente al *semi-Schlumberger*. Una variación del dispositivo *polo-dipolo* se obtiene moviendo uno de los electrodos de potencial, por ejemplo N, a un punto distante (teóricamente al infinito). En este caso el factor geométrico es

$$K = 2\rho b \quad (2.15)$$

que coincide con la expresión del dispositivo *Wenner*, por lo que también recibe el nombre de dispositivo *half-Wenner* (Telford, Geldart y Sheriff, 1990).

#### Dispositivo doble dipolo (axil)

En este dispositivo los electrodos se disponen sobre una línea en el orden ABMN formando así un doble dipolo (Figura 2.6). En América del Norte este dispositivo se denomina a veces *dispositivo dipolo-dipolo*. Realmente el dispositivo *doble dipolo* tiene diversas variantes (Orellana, 1982), pero en este trabajo solo se utilizará la que se ha descrito.



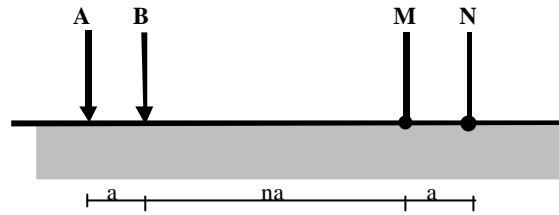


Figura 2.6. Dispositivo doble dipolo

El factor geométrico del dispositivo es en este caso

$$g = -pn(n+1)(n+2)a \tag{2.16}$$

Este dispositivo se implementa normalmente con  $n \gg 1$  (entonces AB y MN se comportan como un dipolo de corriente y de tensión respectivamente), aunque muchos autores utilizan este dispositivo incluso con  $n = 1$ . El factor geométrico cuando  $n \gg 1$  se puede expresar como

$$g = -pn^3a \tag{2.17}$$

El inconveniente es que el campo dipolar decrece con el cubo de la distancia entre los dipolos de corriente y tensión, por lo que necesita detectores más sensibles que los otros dispositivos.

*Dispositivos Wenner a,b*

La Figura 2.7 muestra la disposición de electrodos en los dispositivos *Wenner a* y *b*, donde  $m$  es un número real positivo (Roy, 1972). Un caso particular del dispositivo *a-Wenner* son los dispositivos *Wenner* ( $m = 1$ ) y *Schlumberger* ( $m \ll 1$ ). El dispositivo doble dipolo es un caso particular del *b-Wenner* cuando  $m \gg 1$ .

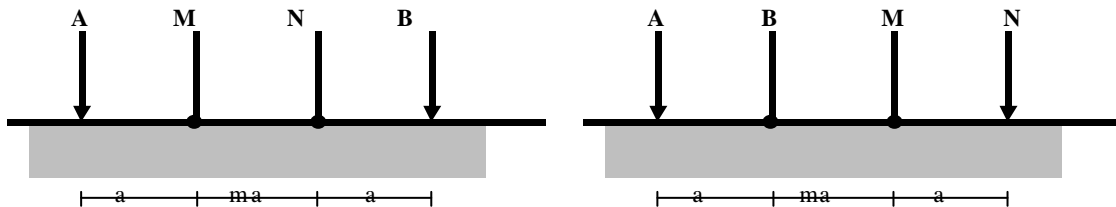


Figura 2.7. Dispositivos a-Wenner (izquierda) y b-Wenner (derecha).

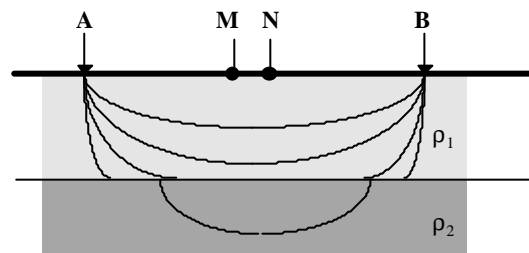
## 2.4. Tipos de prospecciones geoelectricas

La finalidad de una prospección geoelectrica es conocer la forma, composición y dimensiones de estructuras o cuerpos inmersos en el subsuelo a partir de medidas en la superficie. Mediante la prospección geoelectrica conseguimos trazar una cartografía de resistividades aparentes del subsuelo que nos darán información sobre las estructuras que subyacen en él. Las prospecciones geoelectricas que se realizan se dividen generalmente en dos tipos:

- Sondeo eléctrico vertical (S.E.V).
- Calicatas eléctricas (C.E).

### 2.4.1. Sondeo eléctrico vertical.

La finalidad del sondeo eléctrico vertical (SEV) es averiguar la distribución vertical en profundidad de las resistividades aparentes bajo el punto sondeado a partir de medidas de la diferencia de potencial en la superficie. Se utiliza sobre todo para detectar y establecer los límites de capas horizontales de suelo estratificado (Figura 2.8).



**Figura 2.8. Principio del SEV. A medida que A y B se separan, la corriente va penetrando en las capas más profundas**

La profundidad de penetración de la corriente eléctrica depende de la separación de los electrodos inyectores AB. Si la distancia entre los electrodos AB aumenta, la corriente circula a mayor profundidad pero su densidad disminuye. Para un medio isótropo y homogéneo, el 50% de la corriente circula por encima de la profundidad  $AB/2$  y el 70.6% por encima de una profundidad AB (Orellana, 1982). Sin embargo, no es posible fijar una profundidad límite por debajo de la cual el subsuelo no influye en el SEV, ya que la densidad de corriente disminuye de modo suave y gradual, sin anularse nunca. Podría pensarse que la *penetración* es proporcional a AB. Sin embargo esto no es cierto en general puesto que lo dicho sólo es válido para un subsuelo homogéneo.

Durante mucho tiempo, en prospección geoelectrica en corriente continua, la profundidad de investigación ha sido considerada sinónimo de la profundidad de penetración de la corriente. Sin embargo, el efecto de una capa en los potenciales o campos observados en superficie no depende únicamente de la densidad de corriente que la atraviesa. Roy y Apparao (1971) definen la *profundidad de investigación característica* como la profundidad a la que una capa delgada de

terreno (paralela a la superficie) contribuye con participación máxima a la señal total medida en la superficie del terreno. Los autores indican que la profundidad de investigación viene determinada por la posición de los electrodos inyectoros y detectores, y no sólo por la penetración o distribución de la corriente. Esto queda claro con un ejemplo: si se intercambian entre sí las posiciones de los electrodos de potencial con los de corriente, la distribución de las líneas de corriente cambia. Sin embargo, en virtud del principio de reciprocidad visto anteriormente, la resistividad aparente y por tanto la profundidad de investigación no cambian. Definiendo  $L$  como la distancia entre los dos electrodos extremos (sin considerar los situados en el infinito), los mismos autores determinan la profundidad de investigación de diversos dispositivos electródicos en un suelo homogéneo, siendo para el dispositivo polo-polo de  $0,35L$ , para Schlumberger de  $0,125L$  y para Wenner de  $0,11L$ . Edwards (1977) sugiere que un valor más útil puede ser la profundidad a la cual la mitad de la señal medida en la superficie es debida a la porción de suelo superior a esa profundidad y la otra mitad de la señal a la porción de suelo inferior. Barker (1989) la define como la *profundidad de investigación efectiva*, y muestra con ejemplos la mayor utilidad de ésta sobre la utilizada por Roy y Apparao (1971). Las profundidades de investigación efectiva para los dispositivos Wenner, Schlumberger y doble dipolo son respectivamente de  $0,17L$ ,  $0,19L$  y  $0,25L$  (para este último la profundidad de investigación característica es de  $0,195L$ ), es decir ligeramente mayores que utilizando la definición de profundidad de investigación característica.

Experimentalmente, a partir de los dispositivos vistos en el apartado 2.3, el SEV consiste en aumentar progresivamente la distancia entre los electrodos manteniendo un punto central fijo (punto de sondeo P). Ahora veremos cómo se aplica a los diferentes dispositivos.

### Sondeo Wenner

Dado el dispositivo Wenner AMNB con separación interelectródica  $a$ , el sondeo consiste en el aumento progresivo del valor de  $a$  manteniendo un punto central fijo P (Figura 2.9). Para la representación de los datos se muestra en ordenadas el valor de la resistividad aparente medida,  $\rho_a$ , en ohms-m, y en abscisas el valor de  $a$  en metros para cada paso.

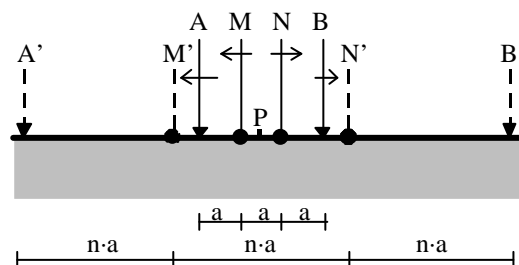
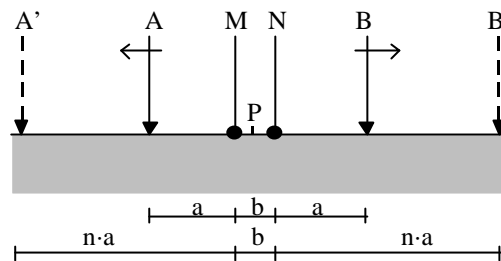


Figura 2.9. Sondeo Wenner. La distancia interelectródica pasa de  $a$  (AMNB) a  $na$  (A'M'N'B').

### Sondeo Schlumberger.

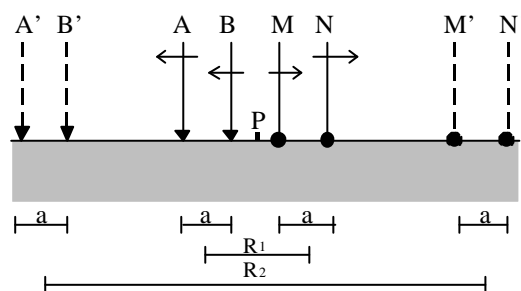
Dado el dispositivo Schlumberger AMNB con  $AB \gg MN$ , el sondeo consiste en separar progresivamente los electrodos inyectoros A y B dejando los electrodos detectores M y N fijos en torno a un punto central fijo P. (Figura 2.10). La representación de este sondeo muestra en ordenadas  $\rho_a$  ( $\Omega \cdot m$ ) y en abscisas la distancia  $AB/2$  (m). En este sondeo el efecto de las heterogeneidades irrelevantes es menor pues sólo se mueven el par de electrodos inyectoros A y B.



**Figura 2.10. Sondeo Schlumberger. Los electrodos A y B se abren progresivamente mientras M y N están fijos.**

### Sondeo dipolar

Dado el dispositivo doble dipolo ABMN, el sondeo consiste en la separación creciente de los centros de los dipolos respecto a un punto fijo origen P (Figura 2.11). La representación de este sondeo muestra en ordenadas  $\rho_a$  ( $\Omega \cdot m$ ) y en abscisas la separación de los centros de los dipolos en metros.



**Figura 2.11. Sondeo dipolar. Los dipolos se mantienen, aumentando la separación entre ellos.**

### Efectos laterales en el SEV y ambigüedades en su interpretación

Si el dispositivo electródico está próximo a un contacto vertical, las líneas de corriente serán distorsionadas por lo que  $\Delta V_{MN}$  se verá afectado por el otro medio, tanto más cuanto mayor sea la separación de los electrodos AB. Por lo tanto, la medida de la resistividad aparente en un SEV está influida por la distribución de resistividades en un cierto volumen de terreno. Esto implica que para

distancias AB grandes no se sabrá si la resistividad aparente es debida a cambios de estructuras en la profundidad o a las heterogeneidades laterales por contraste de resistividades (Orellana, 1982).

Puede ocurrir que las curvas de resistividad aparente para dos casos diferentes de SEV sean idénticas si la relación entre profundidad a la que se encuentra un estrato y su resistividad permanece constante, lo que provoca una ambigüedad en la deducción del grosor de la capa y su resistividad.

### *Aplicaciones*

El SEV es aplicable cuando el objetivo tiene una posición horizontal y una extensión mayor que su profundidad. Tal es el caso del estudio de capas tectónicas, hidrológicas, etc. También es adecuado para trabajar a poca profundidad sobre topografías suaves como complemento de las calicatas eléctricas, con el objetivo de decidir la profundidad a la cual realizar el perfil de resistividades, como ocurre por ejemplo en Arqueología. El SEV no es adecuado para contactos verticales, fallas, diques, etc.

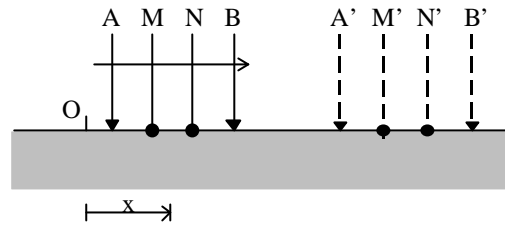
#### **2.4.2. Calicatas eléctricas**

La finalidad de las calicatas eléctricas (CE) es obtener un perfil de las variaciones laterales de resistividad del subsuelo fijada una profundidad de investigación. Esto lo hace adecuado para la detección de contactos verticales, cuerpos y estructuras que se presentan como heterogeneidades laterales de resistividad. Orellana (1982) resalta que la zona explorada en el calicateo eléctrico se extiende desde la superficie hasta una profundidad más o menos constante, que es función tanto de la separación entre electrodos como de la distribución de resistividades bajo ellos.

Experimentalmente, la CE consiste en trasladar los cuatro electrodos del dispositivo a lo largo de un recorrido, manteniendo su separación, obteniéndose un perfil de resistividades aparentes a lo largo de aquél.

#### *Calicata Wenner*

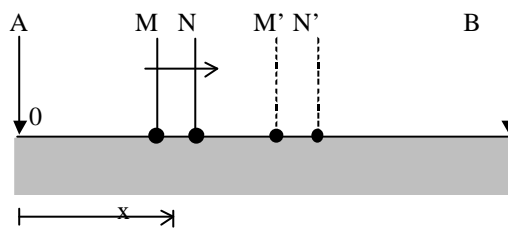
Partiendo de sus respectivos dispositivos base, esta calicata consiste en desplazar los cuatro electrodos AMNB a la vez manteniendo sus separaciones interelectródicas a lo largo de un recorrido (Figura 2.12). Se representa la distancia del origen, O, al centro de los electrodos MN en abscisas y en ordenadas el valor de  $r_a$  ( $\Omega\text{m}$ ) para cada distancia  $x$ .



**Figura 2.12. Calicata Wenner. Los cuatro electrodos se desplazan a la vez manteniendo sus separaciones.**

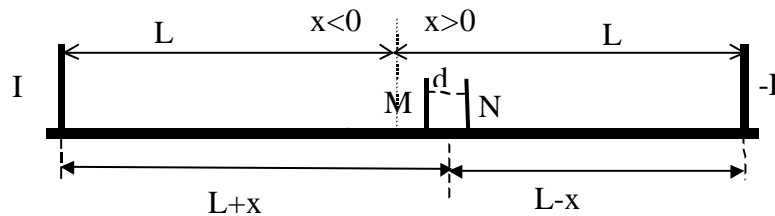
*Calicata Schlumberger.*

En este tipo de calicata podemos citar dos variantes. La primera sería similar a la calicata Wenner, desplazando lateralmente los cuatro electrodos del dispositivo Schlumberger a la vez. La segunda consiste en desplazar los electrodos detectores M y N entre A y B, los cuales están fijos y a una gran distancia de los electrodos detectores (Figura 2.13). La profundidad de penetración de la medida no es constante puesto que no es una verdadera calicata, siendo máxima cuando los electrodos MN se hallan en el centro del segmento AB.



**Figura 2.13. Calicata Schlumberger (segunda variante). Los electrodos M y N se mueven de A hasta B manteniendo su separación.**

La Figura 2.14 muestra las distancias entre electrodos, donde se escoge el origen en el punto medio entre los electrodos inyectores.



**Figura 2.14. Dispositivo de cuatro electrodos. La corriente se inyecta por los electrodos externos y la diferencia de potencial se mide entre los electrodos M y N.**

El factor geométrico es en este caso

$$g(x) = 2p \left( \frac{1}{L + (x - d/2)} - \frac{1}{L - (x - d/2)} - \frac{1}{L + (x + d/2)} + \frac{1}{L - (x + d/2)} \right)^{-1} \quad (2.18)$$

Si la medida es de campo eléctrico, es decir si  $d$  tiende a cero, la resistividad aparente es

$$r_a(x) = \frac{\rho}{I} \frac{(L^2 - x^2)^2}{L^2 + x^2} E_x \quad (2.19)$$

Si la distancia entre los electrodos inyector es muy grande respecto a la otras distancias, es decir, si  $L \gg x, d$ , la resistividad aparente es

$$r_a(x) \cong \frac{\rho L^2}{I} \frac{\Delta V(x)}{d} \quad (2.20)$$

Si en este último caso la distancia  $d$  tiende a cero (medida del campo eléctrico) tenemos que

$$r_a(x) \cong \frac{\rho L^2}{I} E_x \quad (2.21)$$

*Calicata polo-dipolo*

La calicata polo-dipolo consiste en desplazar los tres electrodos AMN a la vez, manteniendo sus separaciones interelectródicas, a lo largo de un recorrido. Se representa la distancia de un origen escogido al centro de los electrodos MN en abscisas y el valor de la resistividad aparente medida ( $\Omega \cdot m$ ) para cada distancia  $x$  en ordenadas. En la calicata polo-polo se desplazan los electrodos AM y la resistividad aparente se representa respecto al punto medio entre A y M.

*Calicata dipolar.*

Esta calicata basada en el dispositivo dipolar consiste en desplazar los cuatro electrodos ABMN a la vez, manteniendo sus separaciones interelectródicas, a lo largo de un recorrido (Figura 2.15). Se representa la distancia del origen, O, al punto medio entre los dos dipolos en abscisas y en ordenadas el valor de la resistividad aparente medida ( $\Omega \cdot m$ ) para cada distancia  $x$  (m).

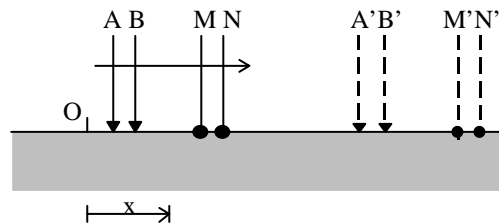


Figura 2.15. Calicata dipolar. Se desplaza el dispositivo dipolar manteniendo las separaciones.

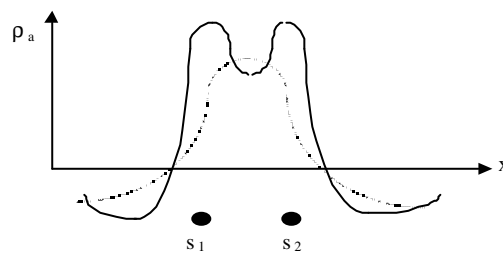
Cada tipo de calicata responde a las heterogeneidades laterales con diferente resolución e intensidad de cambio, por lo que a la hora de interpretar las curvas de resistividad aparente hay que tener en cuenta el dispositivo electródico utilizado.

*Elección del tipo de calicata más adecuado. Factores a considerar.*

En general no puede afirmarse que tal o cual tipo de calicata eléctrica sea superior a los demás. Para cada problema concreto, cada uno de estos tipos presenta ventajas e inconvenientes. La elección debe tener en cuenta muchos factores, tales como el corte geoelectrico esperado, las características de la zona de trabajo, la clase de prospección, así como factores económicos.

En una curva de resistividad aparente se produce una discontinuidad cada vez que un electrodo pasa sobre un cambio lateral de resistividad, por lo que resulta que cuanto mayor sea el número de electrodos movidos más ancha y complicada se hace la anomalía en la curva de resistividad aparente, lo cual hace más difícil la interpretación. Por esta razón se recomienda la calicata Schlumberger con los electrodos A y B fijos o la dipolar con los dipolos bien separados (equivalente a mover solo dos electrodos).

La diferencia de potencial  $V_{MN}$  representa la integral del gradiente de potencial entre los electrodos M y N. Por tanto, cuanto más separados estén los electrodos M y N tanto más suavizada será la curva de la resistividad aparente, lo que provocará que objetos pequeños y cercanos se confundan en uno solo. Cuanto más pequeña sea la distancia MN se tiene mayor resolución y amplitud de cambio de resistividad aparente debido a un objeto (Figura 2.16), por lo que la calicata Schlumberger tiene mayor resolución que la Wenner.



**Figura 2.16. Efecto del aumento de la distancia MN en la resistividad anómala de dos cuerpos pequeños  $s_1$  y  $s_2$ , a) MN pequeña (línea continua), b) MN grande (línea a trazos)**

El paso por el que se avanzará en la trayectoria depende del tamaño del objeto buscado. Este debe ser en principio menor que las dimensiones del objeto buscado para tener mayor resolución, aunque también se verá afectado por mayor ruido geológico. En el caso de cuerpos de extensión limitada es necesario que el perfil pase sobre él, puesto que la amplitud de la anomalía varía poco si el perfil en vez de pasar por su centro pasa por su borde y es casi inapreciable a distancias del borde superiores a la longitud del dispositivo (Orellana, 1982).



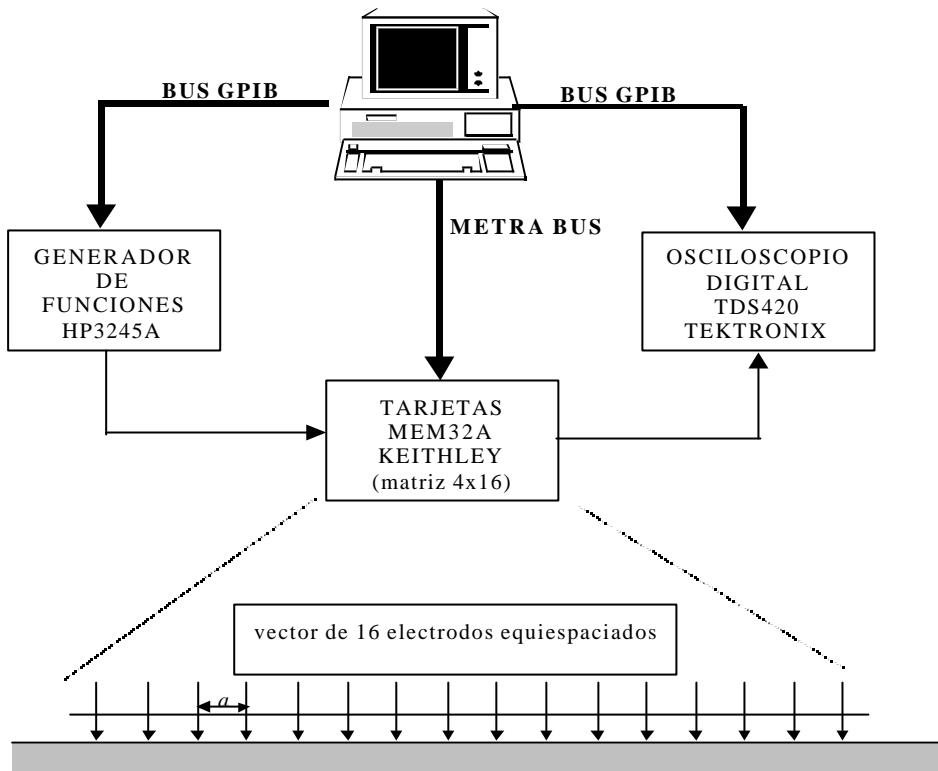
### *Aplicaciones.*

Las aplicaciones de la calicata eléctrica están en la detección de fisuras, fallas, contactos verticales en general y objetos o estructuras enterradas. La realización de calicatas en trayectorias paralelas permite trazar la cartografía de resistividades aparentes de un terreno a profundidad constante representada por curvas de isoresistividad. Estos mapas de resistividad se aplican en arqueología para decidir sobre la estrategia a seguir en las excavaciones.

## **2.5. Sistema de medida y configuraciones electrónicas utilizadas.**

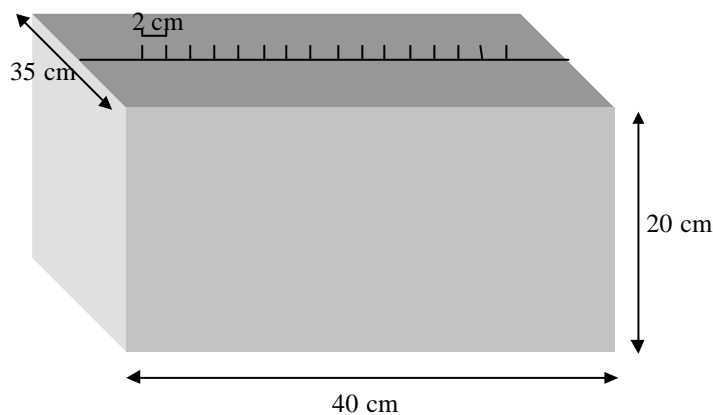
Cuando se necesita una exploración detallada y con gran resolución espacial se requiere un gran número de medidas. El cambio manual de los electrodos inyectoros y detectores a cada medida es un proceso laborioso y lento. Los sistemas automáticos aceleran los procesos de medida e interpretación (Griffiths, Turnbull y Olayinka, 1990). Sin embargo, los equipos comerciales (e.g., Terrameter) son sistemas cerrados que no permiten mucha flexibilidad en la elección de parámetros como la frecuencia o la forma de onda de la corriente inyectada. Además, tampoco están pensados para trabajar con modelos a escala (modelos analógicos) en el laboratorio.

La Figura 2.17 muestra el sistema PROGEO desarrollado para realizar medidas automáticas en el laboratorio (Alberto, 1997), que será descrito con detalle en el capítulo 4. El sistema usa instrumentos comerciales. El generador de funciones (HP3245A) inyecta una señal sinusoidal o cuadrada de frecuencia 10 Hz a 10 kHz y de amplitud máxima 20 V (pico a pico). El programa de aplicación selecciona estos parámetros vía el bus GPIB. El generador de funciones también proporciona una señal de referencia para disparar el osciloscopio digital (TDS420), el cual digitaliza la tensión amplificada por la sonda diferencial (ADA400A). El osciloscopio digitaliza simultáneamente la tensión diferencial de la sonda (canal 2) y la tensión que cae en la resistencia  $R_o$  (canal 1) que se utiliza para realizar una medida indirecta de la corriente inyectada. Se han configurado dos tarjetas con 32 relés SPST cada una (MEM32A, Keithley) para implementar una matriz de conmutación 4x16. Esto permite escoger, en una ristra de 16 electrodos, cualquier par de electrodos para la inyección y cualquier otro par para la detección. El programa de aplicación está implementado en LabWindows versión 2.3 para DOS (National Instruments). Las principales funciones son: selección de parámetros para la señales inyectada y detectada, configuración electrónica, adquisición de la señal y demodulación software, y representación de la resistividad aparente.



**Figura 2.17. Sistema automático de medida PROGEO**

Las medidas se realizan en un modelo analógico constituido por una cubeta de plástico de dimensiones 40 cm x 35 cm x 20 cm llena de agua hasta un nivel de unos 16 cm, en la que se introducen diferentes objetos a fin de simular la presencia de objetos locales. Se utilizan 16 electrodos equiespaciados 1 cm o 2 cm. Debido a las reducidas dimensiones de la cubeta, no se han implementado los dispositivos electródicos que tienen uno o más electrodos en el infinito, como son el dispositivo doble dipolo y el dispositivo polo-polo. El apéndice E muestra imágenes del sistema de medida PROGEO y del modelo analógico para realizar las medidas.



**Figura 2.18. Dimensiones de la cubeta utilizada para realizar las medidas experimentales en el laboratorio.**

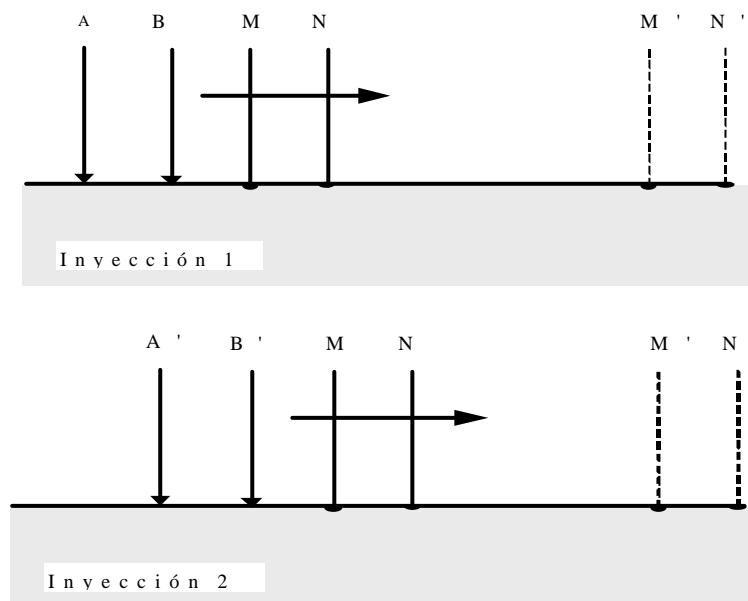
Con un sistema de medida automático es interesante plantearse la posibilidad de adquirir un mayor número de valores de resistividad aparente con la idea de mejorar la interpretación de las estructuras del subsuelo. Noel y Xu (1991) afirman que con un vector de  $N$  electrodos, el número máximo de medidas independientes,  $S_N$ , es

$$S_N = \frac{N(N-3)}{2} \quad (2.22)$$

Los autores ilustran esta afirmación con ejemplos y muestran cómo muchas medidas se pueden obtener como superposición de otras. Con 16 electrodos tendremos 104 medidas independientes. En lo que sigue describimos cómo utilizar los dispositivos electródicos vistos para obtener el máximo número de medidas independientes. Una medida nueva será independiente si no se puede obtener como combinación de las anteriores. De aquí en adelante entenderemos el término *configuración* como un conjunto de medidas utilizando uno o varios dispositivos electródicos. Normalmente estas configuraciones serán combinaciones de calicatas y sondeos, ya que nuestro interés radica en la obtención del cambio de la resistividad en las tres direcciones del espacio. Las configuraciones basadas en los dispositivos polo-dipolo y polo-polo no serán implementables en el laboratorio, debido a las reducidas dimensiones de la cubeta

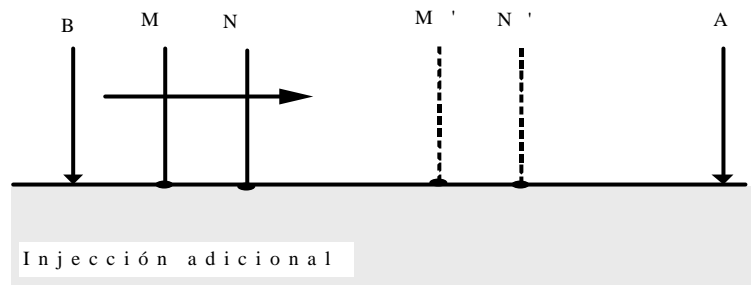
#### *Configuración doble dipolo*

Es una combinación del sondeo y de la calicata doble dipolo. Para cada inyección desplazamos los electrodos MN desde el par de electrodos adyacentes a los electrodos AB hasta el extremo derecho. A cada nueva inyección desplazamos los electrodos AB una unidad (espaciado interelectródico) hacia la derecha. La Figura 2.19 muestra el proceso



**Figura 2.19. Configuración doble dipolo. Es una combinación del sondeo y la calicata con el dispositivo doble dipolo.**

El número de total de medidas son 91 y todas son independientes. Para conseguir 13 medidas independientes adicionales podemos utilizar una calicata *Schlumberger* con los electrodos A y B fijos en los extremos de la agrupación de 16 electrodos (Figura 2.20). Esta configuración con 104 medidas independientes recibirá el nombre de configuración *doble dipolo* y es la misma utilizada por Kotre (1996a).



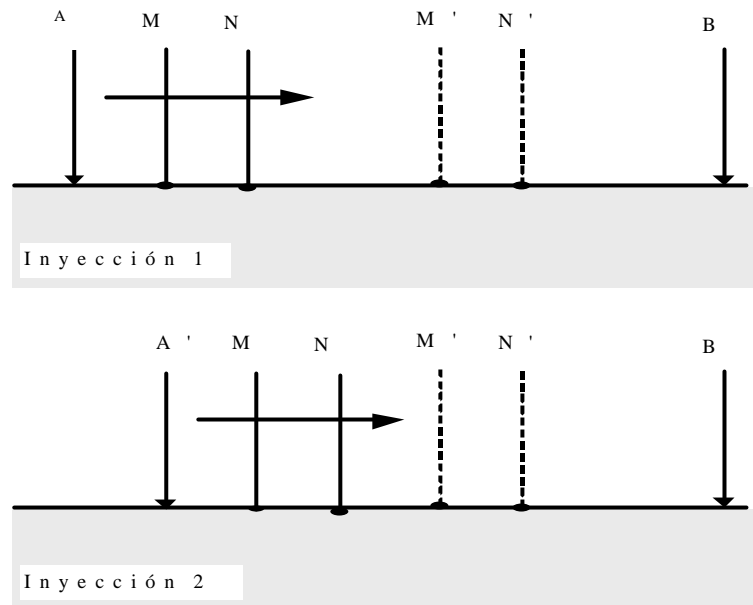
**Figura 2.20. Medidas adicionales en la configuración doble dipolo para conseguir las 104 medidas independientes.**

Un problema de esta configuración es la elevada relación entre las medidas mayor y menor (en un suelo homogéneo). La diferencia de potencial mayor se produce cuando inyectamos por los electrodos 1 (extremo izquierdo) y 16 (extremo derecho) y medimos bien entre los electrodos 2 y 3 o bien entre los electrodos 14 y 15. La diferencia de potencial es mínima cuando la inyección se produce entre los electrodos 1 y 2 y la detección entre los electrodos 15 y 16. De (2.4) se obtiene que la relación es de 690. Si se quisiera tener una resolución del 1% en la medida menor, el margen dinámico del detector habría de ser de 69000 (casi 100 dB).

#### *Configuración Schlumberger.*

Se basa en la calicata *Schlumberger* y en el dispositivo *a-Wenner*. Para cada inyección desplazamos los electrodos MN desde el electrodo A hasta el electrodo B. En cada nueva inyección el electrodo A se va desplazando una unidad hacia la izquierda quedando fijo el electrodo B (Figura 2.21). Esto produce 91 medidas independientes.

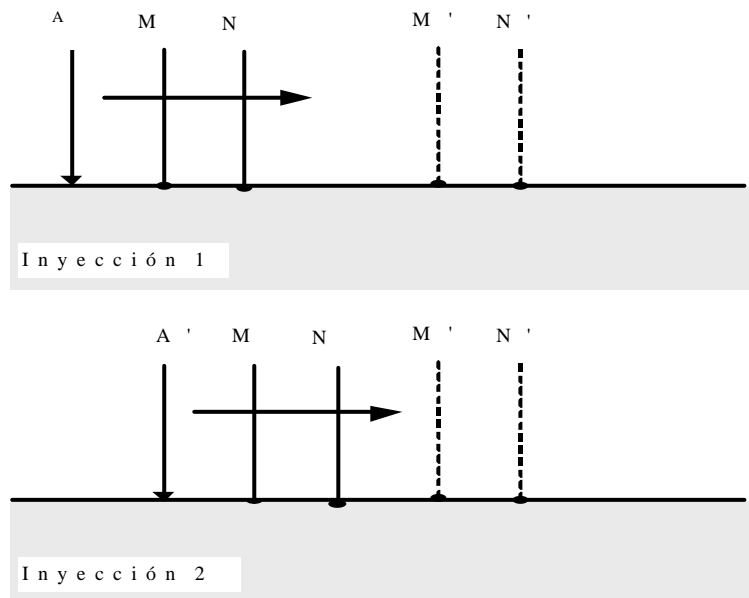
Si inyectamos corriente entre los electrodos 1 y 15 y medimos la tensión diferencial entre los pares adyacentes restantes obtenemos 12 medidas independientes más. La última medida la podemos obtener, por ejemplo, inyectando corriente entre los electrodos 3 y 16, y midiendo la tensión diferencial entre los electrodos 1 y 2. Esta configuración (con las 104 medidas independientes) recibirá el nombre de *Schlumberger*. La relación entre las medidas mayor ( $AB = 13-16$ ,  $MN = 14-15$ ) y menor ( $AB = 1-16$ ,  $MN = 8-9$ ) es en este caso de 28, mucho menor que en la configuración *doble dipolo*.



**Figura 2.21. Configuración Schlumberger.** Está basado en la calicata Schlumberger con los electrodos de corriente fijos. En cada nueva inyección el electrodo A se desplaza una unidad hacia la derecha.

*Configuración polo-dipolo*

El procedimiento es análogo al de la configuración Schlumberger pero con el electrodo B en el infinito. La Figura 2.22 muestra el proceso para las dos primeras inyecciones. El electrodo A se desplaza desde el electrodo 1 hasta el electrodo 14. En total resultan 105 medidas independientes.

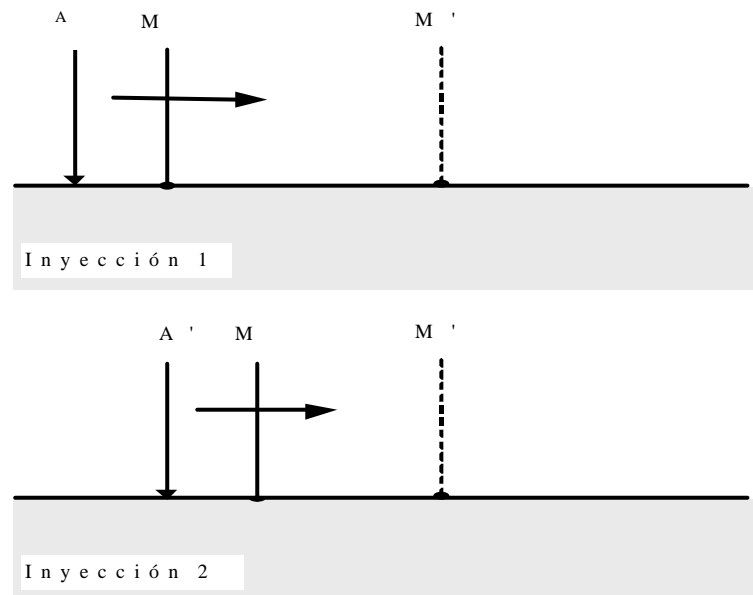


**Figura 2.22. Configuración polo-dipolo.** El procedimiento es análogo a la configuración Schlumberger per ahora el electrodo B está en el infinito.

El número de medidas independientes se puede incrementar situando el electrodo A en la posición 16 y midiendo entre los electrodos adyacentes restantes. En total tendremos 119 medidas independientes. Esto no es una contradicción, ya que ahora el número real de electrodos es 17 contando el electrodo en el infinito. Esta configuración recibirá el nombre de *polo-dipolo*. La relación entre las medidas mayor y menor es ahora de 104.

### Configuración polo-polo

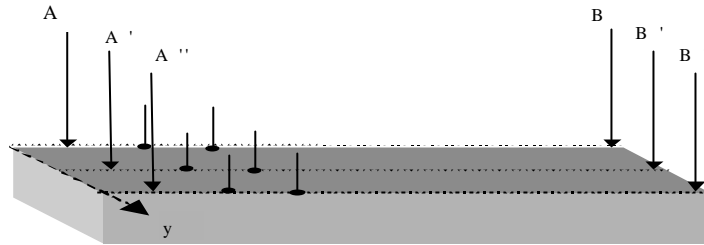
La Figura 2.23 muestra la secuencia de medida. Los electrodos B y N están situados en el infinito. El potencial se mide en los electrodos a la derecha del electrodo inyector A. En cada nueva inyección el electrodo A se desplaza una unidad hacia la derecha. El total de medidas independientes es de 120 cuando el máximo teórico es de 119 (con 17 electrodos). Esto es debido a que la coincidencia de los electrodos N y B permite una medida independiente más. La relación entre las medidas mayor (electrodos A y M contiguos) y menor (electrodos A y M en los extremos) es de 15.



**Figura 2.23. Configuración polo-polo. Los electrodos N y B están en el infinito. El electrodo A se desplaza de izquierda a derecha. Las medidas de tensión se realizan a la derecha del electrodo A.**

De las configuraciones utilizadas la *polo-polo* y la *polo-dipolo* presentan un mayor número de medidas independientes pero esto se debe a que en realidad ha utilizado un electrodo más. Si bien teóricamente este electrodo está en el infinito, en la práctica suele considerarse suficiente una distancia 10 veces mayor que la máxima separación entre los electrodos activos (los no situados en el infinito), lo que no siempre es posible. Las configuraciones que requieren menor margen dinámico son la *polo-polo* y la *Schlumberger*. En cambio el margen dinámico requerido por la configuración *doble dipolo* puede resultar demasiado exigente.

Para obtener imágenes tridimensionales de la distribución de resistividad del subsuelo necesitamos incrementar el número de medidas (con cualquiera de las configuraciones anteriores). El procedimiento adoptado será repetir las configuraciones anteriores a lo largo del eje y (Figura 2.24), como veremos en los capítulos 5 y 6.



**Figura 2.24.** Las configuraciones se repiten a lo largo del eje perpendicular al vector de electrodos con el fin de obtener imágenes tridimensionales de la distribución de resistividad en el subsuelo.

## 2.6. Resumen

La resistividad de los suelos tiene un margen de variación muy amplio. Incluso un mismo suelo puede presentar diferentes resistividades con el tiempo dependiendo de factores como la temperatura o la humedad, siendo éste el más determinante. Por lo tanto es difícil estimar la composición del subsuelo solamente a partir de la medida de resistividad.

La medida de la resistividad aparente se realiza normalmente mediante cuatro electrodos, dos para inyectar la corriente y otros dos para medir la diferencia de potencial. Los dispositivos lineales más utilizados son: Wenner, Schlumberger, doble dipolo, polo-dipolo y polo-polo.

Las prospecciones geoelectricas se dividen normalmente en dos tipos: SEV y CE. El SEV tiene como objetivo determinar la variación de la resistividad con la profundidad, lo que es adecuado, por ejemplo, en la determinación de las diferentes capas o estratos de un suelo. La CE trata de determinar la variación de la resistividad a una profundidad determinada y se utiliza por ejemplo en prospecciones arqueológicas.

Cuando se pretende obtener imágenes en dos o tres dimensiones de la distribución de resistividad del subsuelo es más adecuado utilizar una combinación de calicatas y SEV. Se proponen configuraciones multielectrónicas basadas en dispositivos clásicos. Con 16 electrodos el número máximo de medidas independientes es de 104. El número de medidas se puede incrementar desplazando la agrupación de electrodos perpendicularmente. Para acelerar el proceso de medida se utiliza un sistema de medida automático (Alberto, 1997) que permite cualquier combinación de electrodos inyectores y detectores. Debido a las reducidas dimensiones de la cubeta utilizada para

realizar medidas en el laboratorio, sólo es posible implementar las configuraciones Schlumberger y doble dipolo. Esta última necesita un gran margen dinámico en el detector.