



Auvergne, Francia, 1914 (foto de Schlumberger, 1979)

“...si vous tirez tous deux dans la même direction, vous réussirez certainement.”

[“...si ustedes tiran los dos en la misma dirección, seguramente tendrán éxito.”]

Paul Schlumberger, a sus hijos Marcel y Conrad (1919)

MÉTODOS DE INYECCIÓN DE CORRIENTE ELÉCTRICA

Hacia una década que en Livorno había fallecido **Carlo Matteucci** cuando nació Conrad, en 1878, quien apenas alcanzaba a cumplir su primer añito cuando **Tobías Thalén** ya armaba en Upsala su pionera versión de magnetómetro. Pero Conrad no era sueco ni tano. Y contaba ya seis años cuando nació Marcel, que habría de convertirse en su socio empresario. Ellos y sus otros cuatro hermanos pasaron sus primeros años en Gâwiller, un pueblo de la región de Alsacia –del tamaño de Rada Tilly y que casi no ha variado su cantidad de población en más de un siglo–, en ese entonces como parte del Imperio alemán (*Deutsches Reich*). Una región lingüísticamente germánica, disputada ya desde el Medioevo, que pasó a ser francesa tras la Primera Guerra Mundial, alemana de nuevo en el lustro de 1940-45 y otra vez francesa tras la caída del *Führer* (en alemán, líder) y su monstruoso régimen.

En Gâwiller también nació **Alfred Kastler**, en 1902, quien habría de recibir el premio Nobel por su desarrollo de la técnica de bombeo óptico en vapores de álcali, vinculado a sus investigaciones acerca de la resonancia magnética nuclear.

Gâwiller, en alsaciano
Guebwiller, en francés
Gebweiler, en alemán
(foto École A.H.)



Conrad Schlumberger estudió física en la École Polytechnique, **Marcel** a su turno optó por cursar ingeniería en la École Centrale, los dos en París. Su madre, Margarita de Witt, era una activa promotora

del sufragio femenino y participaba en la recuperación de prostitutas –sentía intolerable que hubiera canallas que explotaran mujeres, algunas casi niñas–. En tanto, en 1912 Conrad comenzó a pergeñar la prospección geoelectrica de mineralizaciones y en 1913 tuvo los primeros resultados positivos, comenzando por la detección de una falla que atravesaba una mena en Normandía. En 1919, tras el fin de la Primera Gran Guerra, el padre de ambos, Paul, un industrial perteneciente a una familia rica pero que estaba venido a menos, acordó financiarles sus emprendimientos técnicos. Algunos francos le quedaban todavía.

En paralelo con el estadounidense **Frank Wenner** (cuyo dispositivo fue patentado en 1915), Conrad y Marcel estuvieron entre los pioneros de la prospección con corriente continua. Inicialmente en superficie, en trabajos en Francia y otros países de Europa, incluyendo el delineamiento de un domo salino en Rumania.

Luego, en 1927, la inquietud de un ejecutivo petrolero hizo que Conrad se percatara de que la misma técnica se

podría aplicar en pozos para evaluar los estratos atravesados. Probaron en Francia, con la ayuda de **Henri Doll**, el yerno de Conrad. *Et ça a marché!*, funcionó. Entonces decidieron cruzar el Atlántico con sus electrodos a bordo, como antes lo había hecho el húngaro **Lorand Eötvös** con la balanza gravimétrica. Estados Unidos era la gran potencia emergente de la Primera Guerra Mundial y el golfo de México presentaba magníficas oportunidades profesionales y económicas. También Venezuela y otros países del mundo. Y sabemos que a la compañía Schlumberger no le fue nada mal.

Conrad falleció de un paro cardíaco en Estocolmo en 1936, a los cincuenta y ocho, tras un viaje a Rusia. Marcel en 1940 mudó la sede de la compañía a Houston debido a la ocupación alemana de París. Falleció en 1953 ya de vuelta en Francia, en Val-Richer, un pueblito normando en la cuenca de Calvados.

DEFINICIONES BÁSICAS

A los **métodos de inyección de corriente** se los denomina también **métodos de resistividad**, aunque no son los únicos que buscan calcular las resistividades del subsuelo. Operan emitiendo un **campo artificial de corriente galvánica, o sea continua** (de ahí en inglés **DC**, *Direct Current*), y registrando las diferencias de potencial resultantes de su interacción con el terreno.

El procedimiento consiste esencialmente en la inyección en el suelo, mediante un par de electrodos, de corriente continua o de muy baja frecuencia (por ejemplo, 0,1 ciclos/s o Hz, que en la práctica puede considerarse continua) 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 masas rocosas del subsuelo, de las distancias entre los electrodos y de la intensidad de corriente inyectada.

Dispositivos de Prospección: del latín *dispositus* (dispuesto) constituye en la disposición superficial, configuración o arreglo geométrico (en inglés *spread* o *array*) de los **electrodos empleados (con distintas alternativas de orientación y distancia relativas entre ellos**, como veremos).

El precursor fue el dispositivo de dos electrodos ideado por el británico **Fred Brown** en 1883.

El método se enriqueció en 1932 con la investigación del rumano **Sabba Stefanescu** sobre las bases físicas de la distribución de potenciales en semiespacios estratificados. También con los aportes metodológicos del francés **Raymond Maillet** en las décadas de 1930 y 40. Y con su adaptación a prospección en fondos de cuerpos de agua que perfeccionó el ruso **I. V. Nazarenko** en la década de 1930.

Modalidades Prospectivas: dependen del objetivo y pueden ser de cuatro modos (*modi*; singular: *modus*).

- Sondeos Eléctricos Verticales, donde los datos se toman en un punto x, y y para distintas profundidades z .
- Calicatas Eléctricas, en las que la toma de datos en x (ó y) se hace a lo largo de un perfil a una z constante.
- Tomografías Eléctricas, combinación de los dos anteriores, con datos para distintas x (ó y) y distintas z . Una variante de éstas es la adquisición 3D en un volumen con distintas x, y, z . También es posible medir cómo cambia la ρ a través del tiempo.
- Mapeo de Líneas Equipotenciales, que se realiza en un plano x, y , con z constante.

Resistividad eléctrica del terreno y sus ruidos

El suelo es una mezcla de rocas, gases, agua y demás materiales orgánicos e inorgánicos. Su resistividad, aparte de depender de la composición intrínseca, como se comentó, depende de factores externos: humedad, temperatura, presión y otros que pueden provocar que un mismo tipo de suelo presente resistividades diferentes con el paso del tiempo. Es lo que se llama **ruido metodológico**, que a veces puede ser muy alto. De entre todos los factores, la **humedad** es el más importante para la aplicación de estos métodos; además de ser el factor 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 llevar a interpretaciones erróneas de los materiales constituyentes del sustrato.

Un caso particular a tener presente es la llamada **paradoja de los suelos**. En principio, cuanto más humedad, mayor conducción, por vía iónica. Sin embargo la conductividad en terrenos desérticos puede a menudo ser mayor que en suelos similares en condiciones de clima más húmedo. La explicación reside en la gran concentración superficial de sales que suele ocurrir en climas secos, bastando una mínima cantidad de humedad para que la conducción eléctrica sea muy efectiva.

También una **topografía** accidentada puede generar ruido metodológico, ya que el flujo de corriente se concentra en los valles y se dispersa en las colinas. Este efecto geométrico puede ser mayor si, como suele suceder, los valles son más húmedos que los cerros. Como resultado se distorsionan las superficies equipotenciales produciendo falsas anomalías. En todos los casos es fundamental prever las posibles fuentes de

error y corregir su influencia durante el procesamiento de los datos, muchas veces recurriendo a modelos teóricos de comparación, tal como hemos visto en otros métodos antes tratados.

Por último, entre los ruidos naturales también pueden presentarse fuertes **corrientes telúricas**.

Y, como en todo método, pueden ocurrir **ruidos instrumentales** (fallas en cables, voltímetro, etc.).

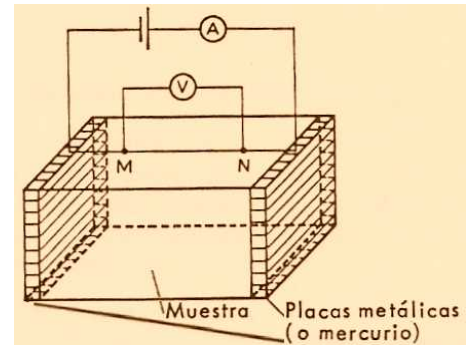
El **objetivo** de este tipo de prospección no es, sin embargo, dar una interpretación de los materiales constituyentes a partir de las resistividades aparentes medidas, sino obtener imágenes uni, bi, tri y hasta tetradimensionales de la distribución de la resistividad eléctrica del subsuelo, esto es, pozos, secciones horizontales o verticales, volúmenes e incluso el monitoreo de su variación en el tiempo, si fuera el caso. Partiendo de alguna de estas informaciones podrán hacerse interpretaciones geológicas o de otra índole, sean académicas o aplicadas.

Medición de resistividades ρ en el laboratorio

En general se pueden hacer en forma directa llevando muestras de afloramientos o de pozos y ubicándolas en un dispositivo muy simple. Se coloca el espécimen del modo que está graficado y entonces se puede calcular:

$$\rho = (V/I) \cdot (s/l)$$

(V es el potencial e I la intensidad de corriente; s la sección y l la longitud de la muestra)



ADQUISICIÓN DE DATOS

La figura de abajo muestra el principio indirecto de medida de la resistividad del terreno mediante la metodología de prospección geofísica.

Se inyecta una corriente I entre el par de electrodos AB y se mide la tensión ΔV entre el par de electrodos MN . Si el medio es homogéneo de resistividad ρ , la diferencia de tensión es:

$$\Delta V = \rho \cdot I / 2\pi (1/AM - 1/AN - 1/BM + 1/BN)$$

(donde AM , AN , BM , BN son las distancias entre los electrodos)

La resistividad viene dada por la expresión: $\rho = (\Delta V/I) \cdot g$

donde g –equivalente de (s/l) en laboratorio– es un factor geométrico que sólo depende de la disposición de los electrodos y resulta aquí: $g = 2\pi (1/AM - 1/AN - 1/BM + 1/BN)$

Dispositivo tetraelectrónico para la medida de la resistividad del terreno:

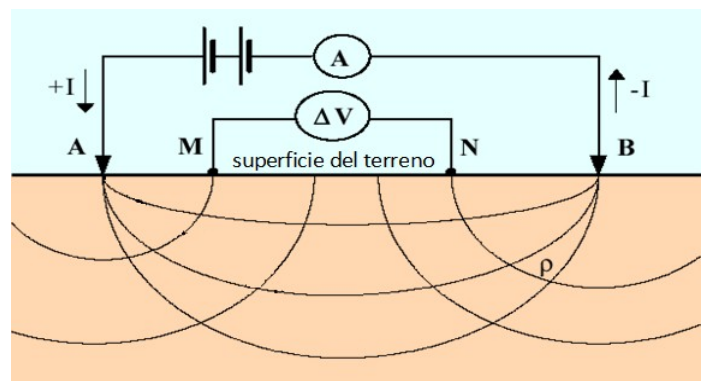
En la literatura anglosajona se habla de **electrodos de Corriente y de Potencial**.

En la de origen francés se los llama **electrodos de Emisión y de Recepción**.

En la nomenclatura rusa se denominan **electrodos de Alimentación y Medición**.

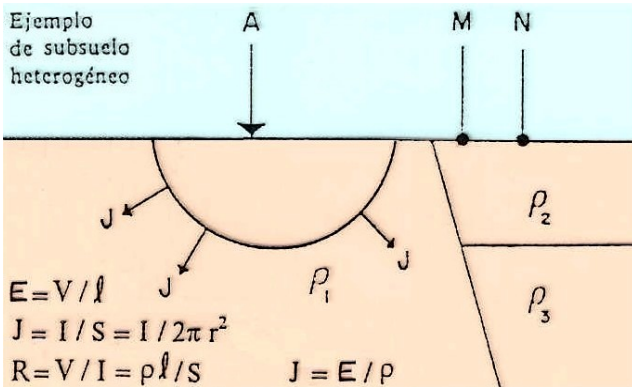
Las **líneas de corriente** van de A a B .

Las **curvas equipotenciales** son ortogonales a las de corriente en subsuelo con ρ homogénea y no lo son tanto con cambios de ρ , lo más usual.



Si el medio es homogéneo, para una misma corriente continua inyectada, la resistividad ρ que se obtiene 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 los medios heterogéneos. No obstante, en la práctica este enroque no es una buena estrategia en el ajedrez geoelectrónico, porque al colocar los electrodos M y N tan separados (como normalmente los A y B) la medición resulta más fácilmente **afectada por las corrientes telúricas, corrientes parásitas industriales, etc.**, es decir ruidos cuyo efecto aumenta proporcionalmente con la distancia entre M y N .

Las fórmulas antes referidas se basan en considerar que el suelo es homogéneo e isótropo. Si el medio no es homogéneo, la ahora **resistividad aparente ρ_a** y su valor dependerán, no sólo del factor geométrico g , sino también de las resistividades de los diferentes medios interesados. **A partir de esas resistividades aparentes obtenidas en un terreno, con sus correcciones, podrá entonces hacerse la interpretación de anomalías.**



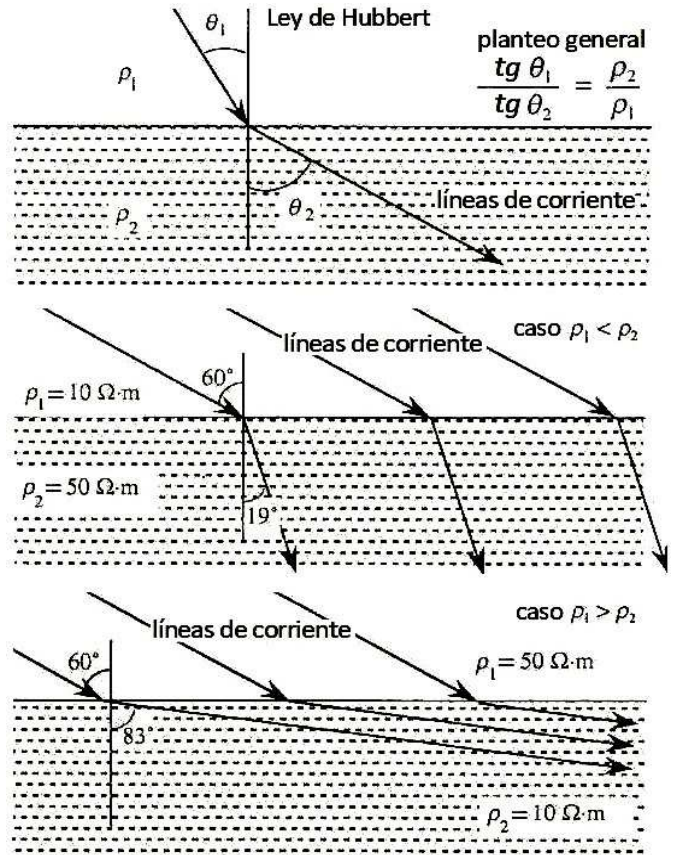
En la figura inmediata superior se muestra en forma esquemática una situación de subsuelo con masas rocosas de distinta resistividad. Se indican las líneas de flujo eléctrico y algunas relaciones físicas entre el campo eléctrico E, la densidad de corriente J y los demás parámetros vistos.

Acá a la derecha se ilustra la relación de **Marion Hubbert** (estadounidense que la planteó en 1940), análogo eléctrico de la ley de Snell en óptica y sísmica (Tema 11), que condiciona la profundidad de investigación de estos métodos.

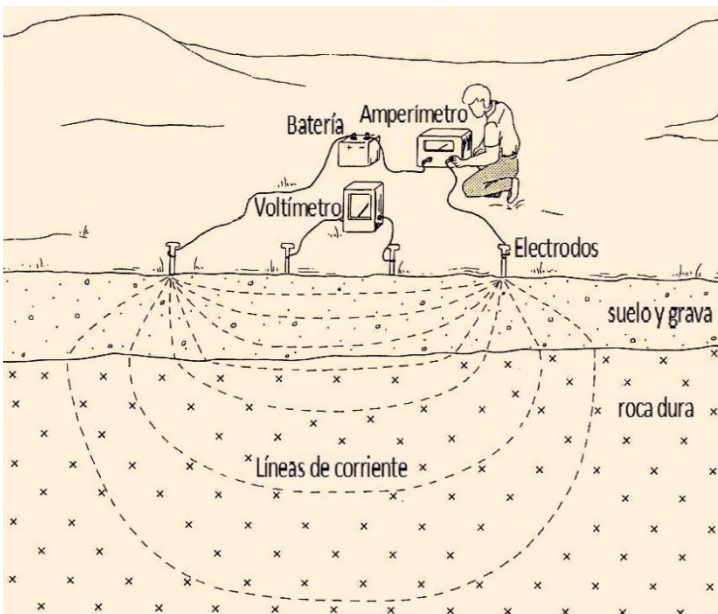
Además puede definirse el coeficiente de **refracción o transmisión eléctrica**, $K = (\rho_2 - \rho_1) / (\rho_2 + \rho_1)$

APARATOS DE CAMPO

El equipamiento requerido es sencillo. En primer lugar hace falta una **batería** (de 45 a 90 amperios), a veces pueden necesitarse 2 o 3 en serie para tener mayor intensidad, o bien, en casos especiales, puede ser conveniente un generador (usualmente movido por un motor a explosión, de 200 W a 1 KW de potencia) que se hace funcionar a la frecuencia mínima (alrededor de 0,1 Hz, prácticamente como corriente continua).



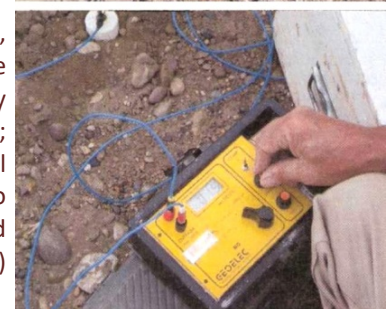
(modificado de Burger, 1992)



Adquisición geoelectrica con corriente continua (modificado de Robinson & Corugh, 1988)



Arriba, carrito de cable y electrodos; abajo, control integrado (fotos Ronald Grant)



Los **electrodos** empleados son cuatro (como vimos, dos de corriente y dos de potencial) y consisten en varillas de acero inoxidable de unos 70 cm de largo. Se los entierra unos 20 cm y se puede recurrir a regarlos con agua salada si no existe buen contacto eléctrico. Los electrodos de potencial podrían ser de tipo impolarizable, como los requeridos para mediciones del potencial espontáneo, aunque esto solamente resulta imprescindible

en determinados casos especiales donde la polarización en el contacto con el suelo altera significativamente las mediciones. Igual son siempre mejores que los comunes.

Serán además necesarios un **amperímetro** para medir la intensidad de corriente entregada por la batería y un **voltímetro** (con lectura de milivoltios) para registrar las tensiones eléctricas. Todo lo cual puede tener un control integrado. Y por supuesto **cables** para armar el circuito, que se enrollan como muestra la foto previa.

El equipo debe calibrarse para **compensar las corrientes telúricas**. Si las mediciones son de gran precisión y las fluctuaciones de las corrientes naturales son muy grandes, el operador tendrá que recurrir a la inyección de una mayor intensidad de corriente en el terreno y tal vez ampliar la distancia entre los electrodos de tensión. Únicamente en muy raros casos convendrá suspender la adquisición de datos.

DISPOSITIVOS DE PROSPECCIÓN

Cualquiera sea el dispositivo electródico utilizado, la resistividad aparente ρ_a puede ser calculada mediante la ecuación: $\rho_a = (\Delta V/I) \cdot g$ (conociendo el factor geométrico g , la corriente eléctrica I inyectada a través de los electrodos A y B, y la diferencia de potencial ΔV entre los electrodos M y N)

El factor o coeficiente geométrico es una corrección implícita en el método que hace que sean comparables los cálculos de ρ_a obtenidos con distintas distancias interelectródicas en razón de que, al variar éstas, varía ΔV en forma proporcional para un mismo valor de resistividad en el subsuelo. Además, si se aumenta la separación entre los electrodos emisores, conviene aumentar también la separación entre los receptores porque de no hacerlo las lecturas de ΔV disminuirían tanto que su precisión se vería comprometida. En ciertos casos también puede ser útil el aumento de la I de corriente inyectada que redundará en un aumento proporcional de ΔV facilitando entonces su lectura.

Los dispositivos electródicos pueden ser lineales, dipolares, etc.

Dispositivos tetraelectródicos lineales

Los más utilizados son los siguientes dos:

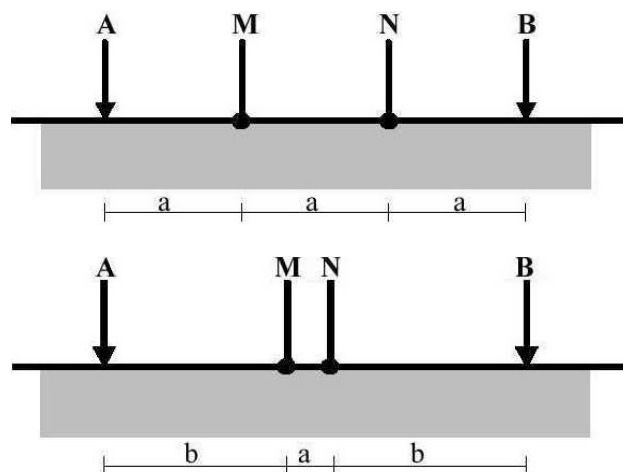
- dispositivo de Wenner:

Los electrodos se disponen equidistantes sobre una línea en el orden AMNB. El coeficiente geométrico deducido para este dispositivo es: $g = 2\pi a$

- dispositivo de Schlumberger:

Distribución simétrica de AMNB en una línea, siendo la distancia de los electrodos detectores MN mucho menor que entre los inyectores AB. En la práctica, $AB > 5MN$. El factor geométrico deducido resulta:

$$g = (L^2 - a^2/4) \pi / a \quad (\text{con } L=AB/2)$$



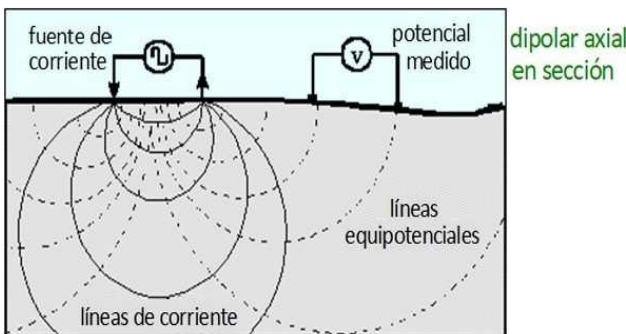
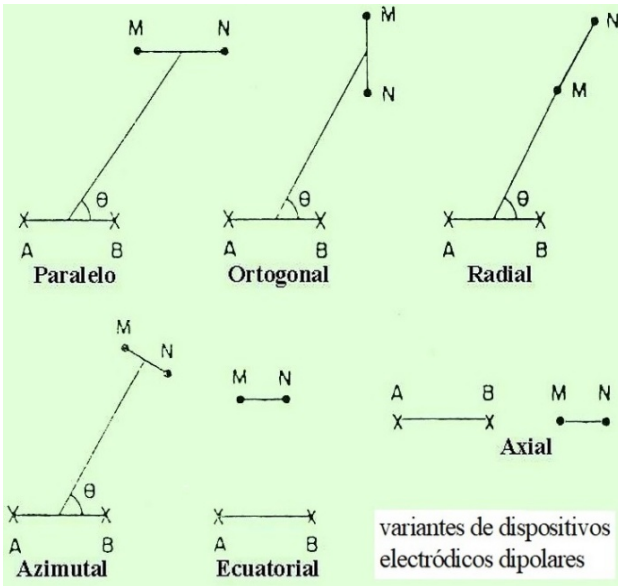
Dispositivos dipolares y otros

Además de los tetraelectródicos lineales, existe una enorme variedad de otros dispositivos (otras formas de distribuir los electrodos en el campo), entre ellos los **dipolares** perfeccionados por el ruso **L. M. Alpin** en 1939 y cuyo principal precursor fue el también ruso **Isay Blokh** desde 1957. En éstos el par de electrodos de corriente y el par de potencial son movidos separadamente según distintas geometrías –y por lo tanto cada una con su propio factor geométrico– de acuerdo con la estrategia de cateo definida. Puede incluso haber una gran distancia entre uno y otro par. Hay varias opciones que se bosquejan en la siguiente página, pero además existe un dispositivo dipolar llamado **por gradiente** en el que el dipolo de corriente queda fijo fuera del área a prospectar (de ahí el gradiente que se produce en la intensidad de la señal a medida que los registros se alejan de él) y sólo debe irse moviendo el dipolo de potencial, con lo cual se ahorra tiempo y da buena señal si la estructura del subsuelo es simple, permitiendo buenas interpretaciones, pero no así cuando existen geometrías tabulares subverticales. ***Siempre influyen las condiciones de contorno.***

Otras veces uno de los electrodos de corriente se deja fijo y muy alejado respecto a los otros tres (se asume que en el infinito) y se denomina a estos dispositivos **trielectródicos** (aunque en rigor siguen siendo cuatro) si están en línea, o bien **polo-dipolo** (como si se olvidase el polo que quedó en el “infinito”) si no se encuentran alineados. También están los llamados **polo-polo** en los que, además de uno de los electrodos de corriente, hay uno de potencial también en ese virtual infinito. Existen diversas variaciones de cualquiera de los antedichos:

semiSchlumberger, halfWenner, Lee y otros, algunos de los cuales se esquematizan a la derecha.

(basado en Orellana, 1972)



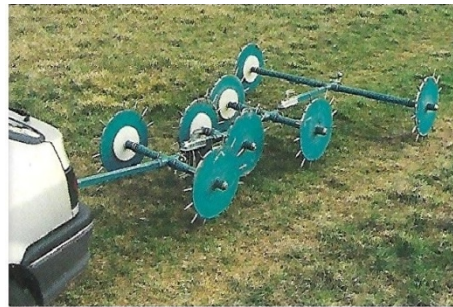
factor geométrico de diversos dispositivos electródicos	
<p>Wenner Alfa</p> <p>C1 P1 P2 C2</p> <p>←-a-→ ←-a-→ ←-a-→</p> <p>$k = 2\pi a$</p>	<p>Wenner Beta</p> <p>C2 C1 P1 P2</p> <p>←-a-→ ←-a-→ ←-a-→</p> <p>$k = 6\pi a$</p>
<p>Wenner Gamma</p> <p>C1 P1 C2 P2</p> <p>←-a-→ ←-a-→ ←-a-→</p> <p>$k = 1.5\pi a$</p>	<p>Polo - Polo</p> <p>C1 P1</p> <p>←-a-→</p> <p>$k = 2\pi a$</p>
<p>Dipolo - Dipolo</p> <p>C2 C1 P1 P2</p> <p>←-a-→ ←-na-→ ←-a-→</p> <p>$k = \pi n(n+1)(n+2)a$</p>	<p>Polo - Dipolo</p> <p>C1 P1 P2</p> <p>←-na-→ ←-a-→</p> <p>$k = 2\pi n(n+1)a$</p>
<p>Wenner - Schlumberger</p> <p>C1 P1 P2 C2</p> <p>←-na-→ ←-a-→ ←-na-→</p> <p>$k = \pi n(n+1)a$</p>	<p>Ecuatorial Dipolo - Dipolo</p> <p>C2 P2</p> <p>b ←-a-→ b</p> <p>$k = 2\pi a s / (s-a)$</p> <p>C1 P1</p> <p>$s = (a+a+b+b)^{1/2}$</p>
<p>$k =$ factor geométrico</p> <p>$a =$ separación electródica</p>	<p>C = electrodos de corriente</p> <p>P = electrodos de potencial</p>

Arriba se ilustran diferentes arreglos dipolares en planta, entre los cuales se grafica el axial en sección.

A la derecha, imágenes de varios tipos distintos de dispositivos sobre móviles para efectuar un más rápido trabajo de registro.

Y soluciones con arreglos electródicos múltiples son empleadas para los registros 3D, como se ve acá abajo.

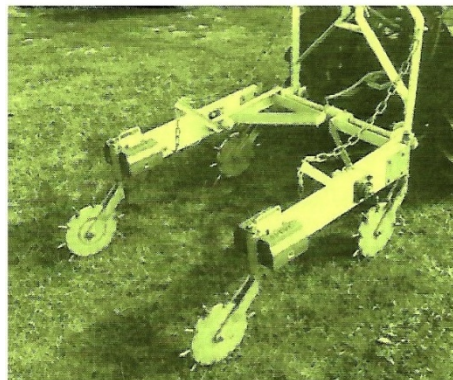
(imágenes de Panissod *et al.*, 1998)



Justo detrás del auto las ruedas que ofician de electrodos de corriente móviles para terreno agreste y más atrás los 3 pares de electrodos de potencial (configuración multi-dipolar).



Similar al caso de la izquierda, pero con 2 pares de electrodos de potencial, en ruedas electrostáticas para circular sobre caminos.

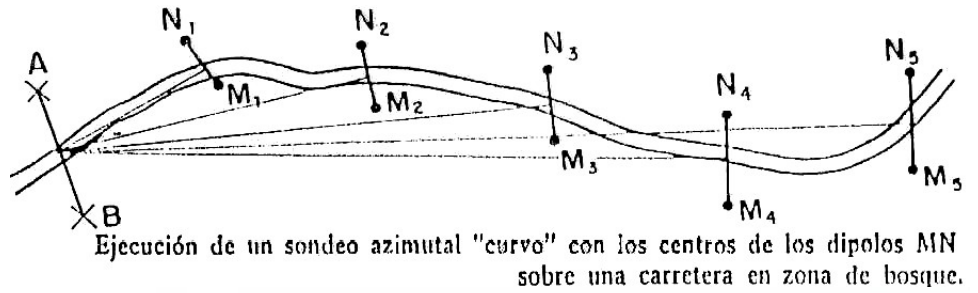


Tractor llevando una configuración dipolo-dipolo.

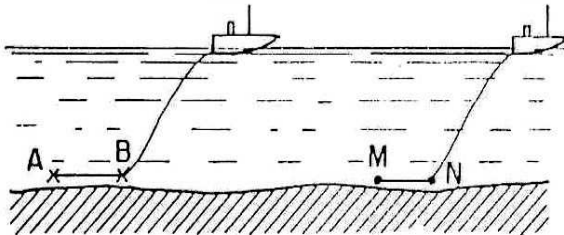


Caso de configuración móvil polo-polo para bajo presupuesto...

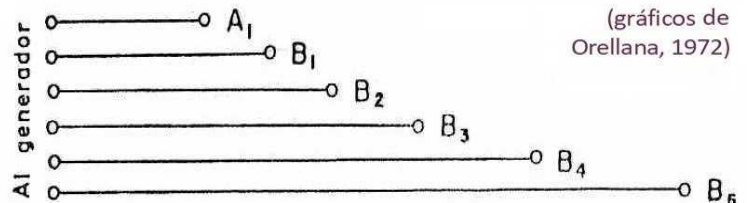
En la figura de la derecha se muestra el esquema de una estrategia de adquisición geoelectrica de corriente continua realizada con un dispositivo dipolar que se adapta a las posibilidades a lo largo de una ruta.



(gráficos de Orellana, 1972)



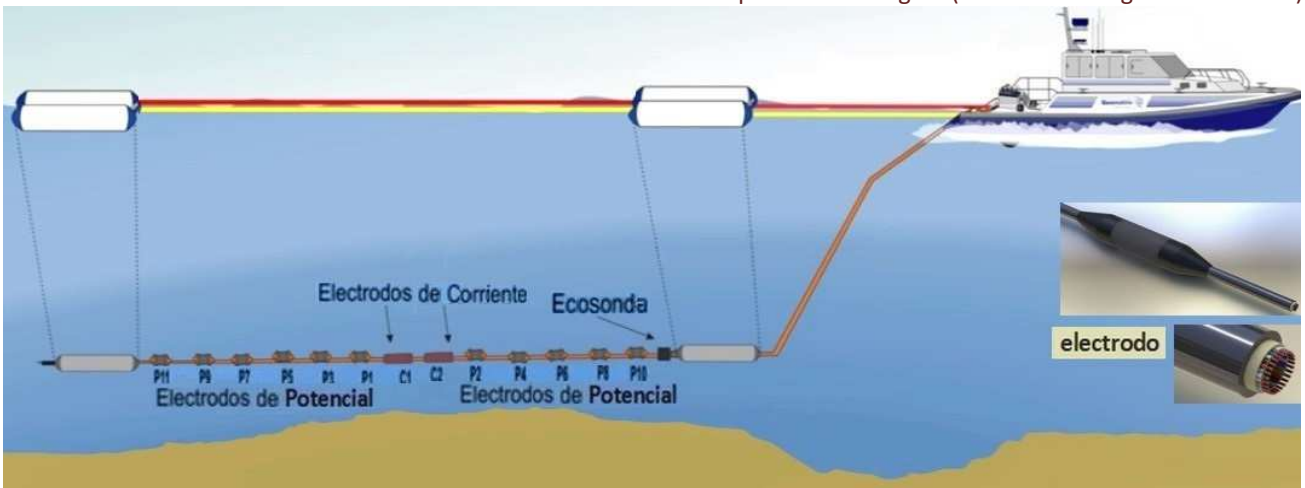
Ejecución de sondeos axiales marinos. El barco de emisión AB se mueve hacia el de recepción MN, que permanece fijo.



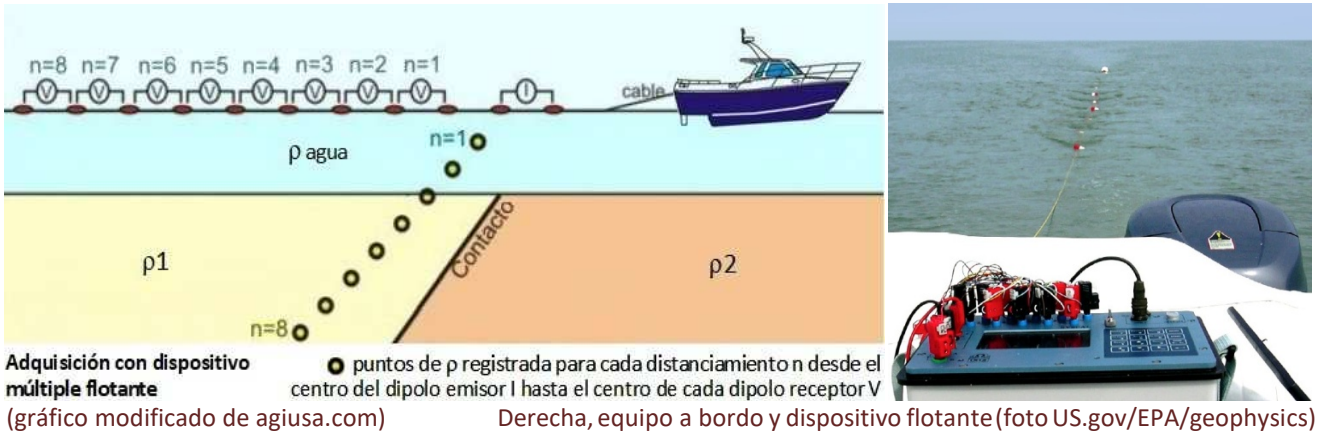
Esquema de los haces de conductores empleados en prospección geoelectrica marina. En la realidad los conductores van atados, conformando un mazo, pero se han dibujado separados para mayor claridad.

En las figuras precedentes se ve un dispositivo dipolar antiguo sobre el lecho marino (cada dipolo llevado desde distinta lancha) y el detalle de los electrodos tipo haz. La alternativa moderna es la de arrastrar ambos dipolos desde una única nave y los haces de conductores, ahora de grafito, van dentro de una vaina plástica impermeable. Como opción, los de potencial pueden ser de cerámica, impolarizables. Lo más común es disponer varios dipolos receptores para obtener datos provenientes de diversas profundidades bajo el lecho, lo cual, sumado al desplazamiento a lo largo de la línea, permite generar una sección o tomografía 2D por cada trayectoria de navegación realizada (a velocidad entre 3 y 8 km/h y lecturas cada unos 3 segundos, es decir distancias horizontales de entre 1 y 3 metros entre lecturas sucesivas). El dispositivo se lleva unos 2 a 4 metros por encima del fondo si se prevé que éste no es plano sino un poco accidentado, y va colgado de flotadores para mantener la profundidad de sumersión constante. Un sonar va midiendo la profundidad del cuerpo de agua a lo largo del perfil. La navegación sigue preferentemente una línea recta, salvo que deba hacerse a lo largo de un canal o río con sinuosidades. Pueden registrarse diversos perfiles paralelos y eventualmente ortogonales o con oblicuidades de acuerdo al presupuesto y el objetivo geológico por debajo del fondo ácuo. La profundidad bien iluminada bajo el lecho puede ser de hasta 100 metros, a más profundidad se va perdiendo definición. La distancia entre cada dos dipolos receptores suele ser de entre 2 y 8 metros según sea la densidad de datos requerida en subsuelo. **En agua salada (0,2-0,5 Ωm) la corriente viaja en mayor proporción dentro de ésta y se requiere mayor I inyectada, mientras que si es dulce (10-200 Ωm) la intensidad de corriente que llega y vuelve del subsuelo es mayor y la I necesaria es menor**, siendo mejor la calidad de los datos obtenidos. En ocasiones es conveniente utilizar varias baterías de 12V en serie. Con muchas líneas paralelas cercanas podría generarse una imagen 3D si el detalle requerido lo amerita (y si el jefe o la jefa autoriza la inversión).

Dispositivo sumergido (modificado de geomatrix.co.uk)



Abajo vemos otra variante, consistente en una adquisición con arrastre superficial de un dispositivo con un dipolo emisor y muchos dipolos receptores que en verdad van un poco bajo el pelo de agua. En este caso las lecturas suelen ser buenas con una profundidad ácuca de hasta 10 metros si es salada y bastante más si es dulce. *Esta técnica permite también medir variaciones de salinidad del propio río, lago o mar.*



TIPOS DE INYECCIONES Y REGISTROS ELECTRÓDICOS

La finalidad de una prospección geoelectrónica es conocer la forma, composición y dimensiones de estructuras o cuerpos de interés inmersos en el subsuelo a partir de medidas en la superficie. Mediante su empleo conseguimos trazar una cartografía de resistividades aparentes del subsuelo que nos darán información sobre los emplazamientos que subyacen en él. **El dispositivo a emplear será elegido en función de pruebas de campo, como en cualquier método geofísico.** Las prospecciones geoelectrónicas que se realizan se dividen, como ya adelantamos, en cuatro modalidades:

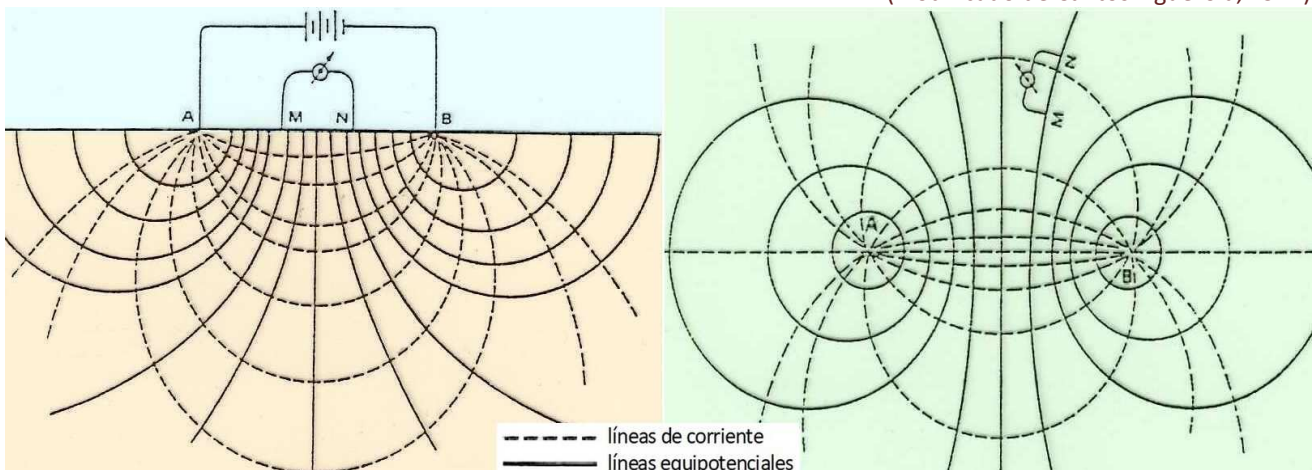
- Mapeo de Líneas Equipotenciales (LE)
- Sondeo Eléctrico Vertical (SEV)
- Calicatas Eléctricas (CE)
- Tomografías Eléctricas (TE) 2D y 3D

Mapeo de Líneas Equipotenciales

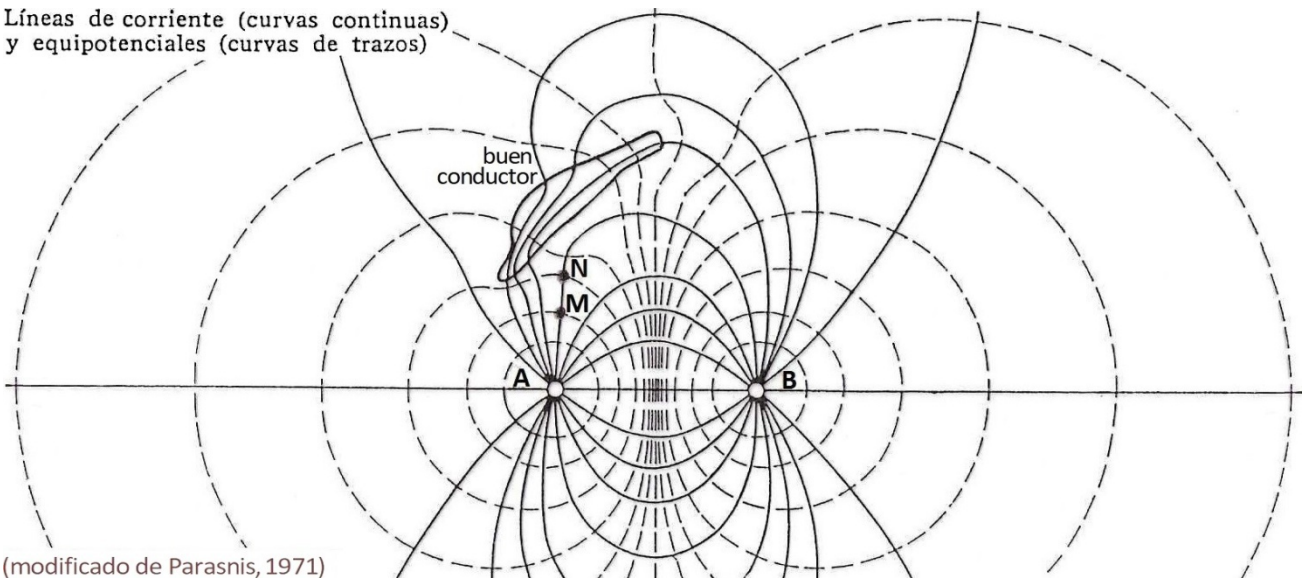
Para orientarse viene bien un mapa. O mirar la posición de las constelaciones o del Sol. Orientarse deriva de oriente (*oriens*, naciente en latín, el amanecer) y en la antigüedad muchos mapas tuvieron el este arriba. Mapa viene de *mappa* (pañó, mantelito donde hacían planos de fincas, etc.), palabra latina a su vez originaria de la Cartago que masacraron y arrasaron los romanos. Pero el mapa aquí es la base sobre la cual obtener las curvas equipotenciales del área a prospectar, con profundidad de investigación constante y un objetivo de cobertura areal. Abreviada LE, esta técnica se aplica a fines hidrogeológicos, mineros, ambientales, etc.

En las figuras que siguen se observa una configuración ideal en perfil y planta con subsuelo homogéneo, y luego el resultado de mapear las líneas en un área con una anomalía conductiva, donde éstas se distorsionan (véase siguiente página). Esta simple modalidad prospectiva en general se realiza con alguno de los dispositivos dipolares, ya que son los más prácticos de manejar arealmente.

(modificado de Cantos Figuerola, 1972)



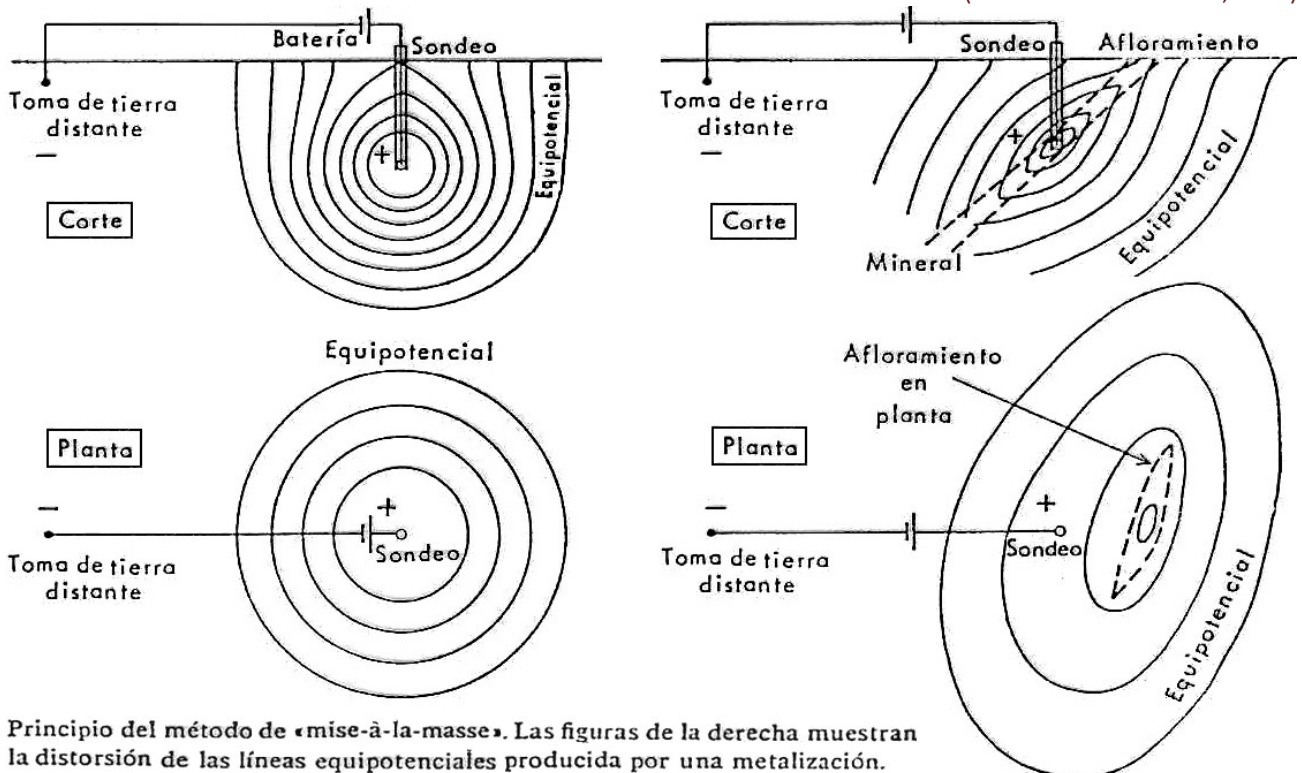
Líneas de corriente (curvas continuas) y equipotenciales (curvas de trazos)



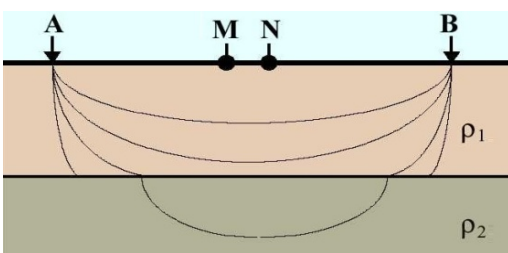
(modificado de Parasnis, 1971)

Existe una técnica de mapeo de las líneas equipotenciales que se fundamenta en un dispositivo tetraelectrónico singular: el método de *mise à la masse* (excitación de la masa) concebido por **Conrad Schlumberger** en 1920. En él debe hincarse uno de los electrodos de corriente en contacto directo con una masa mineralizada, si es necesario mediante una perforación. Ha sido empleado principalmente para mapeos geoelectricos de mineralizaciones metalíferas, como se ilustra seguidamente.

(modificado de Parasnis, 1971)



Principio del método de «mise-à-la-masse». Las figuras de la derecha muestran la distorsión de las líneas equipotenciales producida por una mineralización.



Líneas de corriente entre los electrodos A y B.

Sondeo Eléctrico Vertical

Sonda viene del francés *sonde*, a su vez del anglo antiguo *sund* (mar, y la medición de su profundidad con cuerda y plomada). La finalidad del sondeo eléctrico vertical (SEV; en inglés *VES: Vertical Electric Sounding*) es averiguar la distribución en profundidad de las resistividades aparentes bajo el punto sondeado a partir de medidas de la diferencia de potencial en la superficie. Es utilizado sobre todo para detectar y establecer los

límites de capas horizontales del subsuelo estratificado e interpretar geología y eventuales recursos. En general los dispositivos lineales son los que mejor registran en esta modalidad prospectiva.

A medida que los electrodos inyectoros A y B se separan entre cada medición y la siguiente (manteniendo un punto central fijo), la corriente eléctrica va penetrando en capas cada vez más profundas, aunque naturalmente la densidad de corriente tiende a disminuir con la profundidad. Debemos tener presente la relación de Hubbert que ya hemos referido y por lo tanto recordar que existe una influencia variable y significativa de las resistividades de los varios medios atravesados. Y también reparar en que un SEV puede tener distorsión (**ruido**) por cambios de ρ laterales al dispositivo que no están previstos en el *modelo simplificado de capas horizontales, planas e infinitas*.

El español **Ernesto Orellana** en 1972 calculó que para un medio isótropo y homogéneo el 50% de la corriente circula por encima de la profundidad $AB/2$ y el 70% por encima de una profundidad AB . 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 va disminuyendo de modo gradual, sin nunca anularse del todo. La profundidad de penetración guarda cierta proporción directa con la distancia AB , pero la función es muy cambiante en tanto cambien las condiciones del subsuelo, que es lo que sucede en la mayoría de los casos.

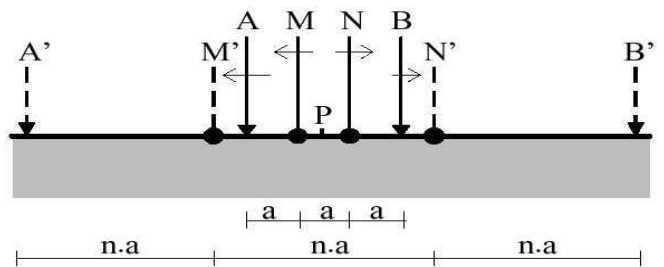
En 1971 los investigadores indios **Amalendu Roy y Ankaraboyina Apparao** definieron la **profundidad de investigación característica** como la profundidad a la que una capa delgada de terreno (paralela a la superficie) contribuye con participación máxima a la señal total medida en la superficie del terreno. Asimismo observaron que la profundidad de investigación en parte viene determinada también por la posición de los electrodos detectores, y no sólo por la penetración o distribución de la corriente debida a los inyectoros, lo cual resulta evidente a partir del ya mencionado **principio de reciprocidad**: *si se intercambian entre sí las posiciones de los electrodos de potencial con los de corriente, la distribución de las líneas de corriente cambia, pero no así la profundidad de investigación*.

Definiendo L como la distancia entre los dos electrodos extremos (sin considerar los situados en el infinito), Roy y Apparao determinaron la profundidad de investigación de diversos dispositivos electródicos en un suelo supuesto homogéneo: por ejemplo, resulta de $0,35L$ para un dispositivo polo-polo. Autores posteriores han perfeccionado estos conceptos, tal el caso de los estadounidenses **L. S. Edwards** (1977) y **Ronald Barker** (1989). Edwards planteó como definición práctica la profundidad a la cual la mitad de la señal medida en la superficie se debe a la porción de subsuelo superior a esa profundidad y la otra mitad de la señal a la porción de subsuelo inferior, concepto que Barker bautizó como **profundidad de investigación efectiva**, la cual resulta de $0,17L$ para el dispositivo Wenner, $0,19L$ para el de Schlumberger y alrededor de $0,25L$ para los dipolares. **Condiciones geológicas particulares de conductividad preferencial pueden canalizar las líneas de corriente y alterar la profundidad de investigación esperada.**

Ahora veremos cómo se aplica un SEV con los dos dispositivos más clásicos, de permanente vigencia.

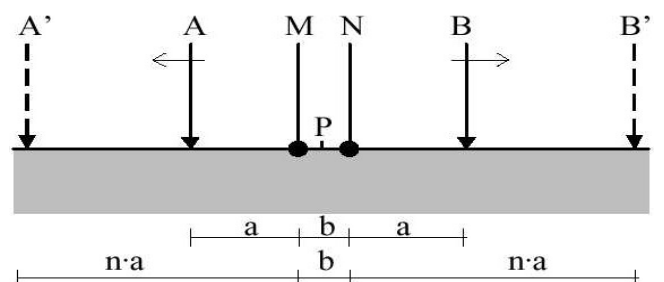
- Sondeo Wenner:

Disponiendo el dispositivo Wenner AMNB con una separación interelectródica a , este sondeo consiste en ir aumentando progresivamente la magnitud de a manteniendo como referencia un punto central fijo P. Para la representación de los datos se muestra en ordenadas el valor de la resistividad aparente medida ρ_a en Ωm , y en abscisas el valor de a en metros para cada paso. Como se aprecia en la gráfica aladaña, la distancia interelectródica pasa de a (AMNB) a na ($A'M'N'B'$), moviendo los cuatro electrodos en cada medición sucesiva. El factor geométrico es la corrección que asegura la consistencia entre los resultados de las mediciones realizadas.



- Sondeo Schlumberger:

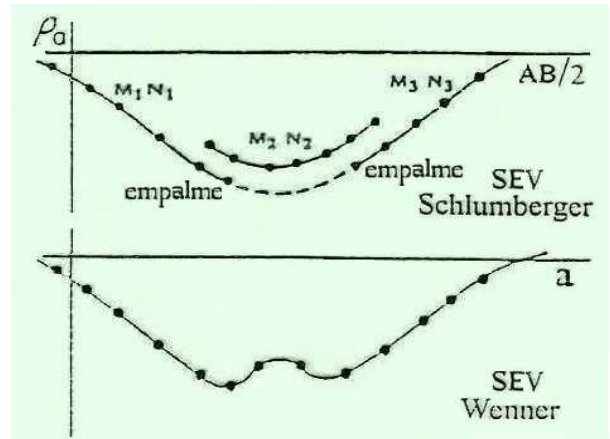
Planteado el dispositivo Schlumberger AMNB en el cual $AB \gg MN$, este tipo de sondeo estriba en separar progresivamente los electrodos inyectoros A y B con los electrodos detectores M y N fijos en torno a un punto central P, guardando una distancia a fija. La representación de este sondeo muestra en ordenadas ρ_a (Ωm) y en abscisas la distancia $AB/2$ (en m).



Los electrodos A y B deben separarse progresivamente (**n.b**) mientras M y N están fijos. Cuando la distancia AB se hace tan grande que la diferencia de potencial MN es muy chica, entonces deben desplazarse M y N, de manera que el intervalo **a** se haga suficientemente mayor –y por lo tanto también mayor la diferencia de potencial– y se recomienza a abrir A y B progresivamente, pero siempre repitiendo un par de puntos comunes a dichos empalmes. El método de cálculo es tal que da siempre resultados de ρ comparables.

- Comparación de sondeos verticales Wenner versus Schlumberger:

Como se dijo, *en el dispositivo Wenner en cada punto han de moverse los cuatro electrodos, mientras que en Schlumberger sólo dos* (A y B), excepto que se esté en un empalme. Esa es ya una ventaja operativa a favor del segundo. Pero además *los empalmes pueden poner en evidencia* casos como el representado en la figura de la derecha, esto es, *saltos cuyo origen no se halla en el subsuelo sino en modificaciones del acople eléctrico superficial* (variación litológica o en el contenido de humedad o de sales superficiales, que se reflejan en la conductividad) en esos primeros centímetros donde están clavados los electrodos y que normalmente no son objetivo de la prospección. Esta situación en Wenner podría ser erróneamente interpretada como producto de cambios en las capas de interés.



Cotejo práctico de SEVs (modificado de Orellana, 1972)

A la inversa, el dispositivo *Wenner suele preferirse en relevamientos arqueológicos superficiales o de resistividades en afloramiento*, dado que al manejar distancias MN relativamente mayores *atenúa ciertos canales preferenciales de la corriente eléctrica como venas o acumulaciones de minerales más conductivos que no son el objetivo de la prospección*. En general el arreglo de Wenner es también elegible cuando el ruido es alto y se requiere de una señal más fuerte (mayor ΔV). También se lo puede usar sin problemas para objetivos más profundos cuando las condiciones del suelo son aceptablemente homogéneas, lo cual es una práctica muy común entre quienes suelen hacer prospección con estos métodos y tienen una experiencia y conocimiento previo del terreno a relevar.

- Procesamiento e Interpretación de un SEV:

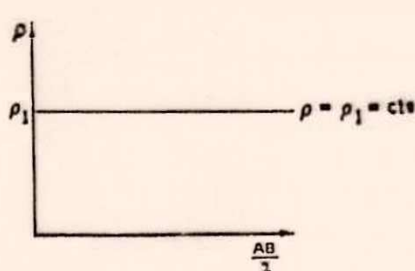
Ya sea que las curvas hayan sido obtenidas a partir de registros del dispositivo Wenner, Schlumberger u otro de los muchos que existen, hay una *primera etapa del proceso de los datos ya realizada: aplicar el factor geométrico*. La siguiente etapa consiste en volcar los datos en gráficas como las recién vistas (ρ_a en ordenadas versus **a**, AB/2 u otra distancia interelectródica en abscisas, según sea el dispositivo) y luego se efectúa la superposición de la gráfica de campo con **curvas patrones** como las bosquejadas arriba de la siguiente página. Así se puede **interpretar** el número de capas sondeadas, calcular sus resistividades (ρ_1 , ρ_2 , etc.) y el espesor de cada una, partiendo siempre de la asunción de que no existen variaciones laterales de ρ en los estratos modelados y que la ρ_n (la que subyace a los niveles de interés) es infinita.

CURVAS PATRONES:

Se obtienen según un modelo físico simplificado que cumple:

- A) Discontinuidades horizontales c/ última capa $\rho = \text{infinito}$
- B) No existen variaciones laterales de resistividad.

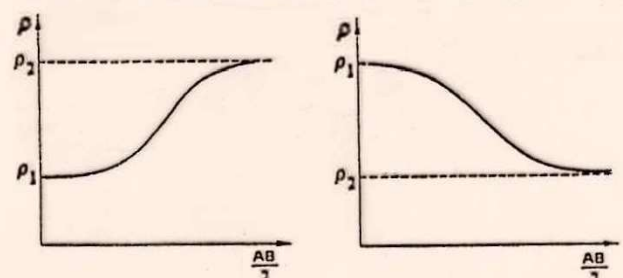
1 CAPA:



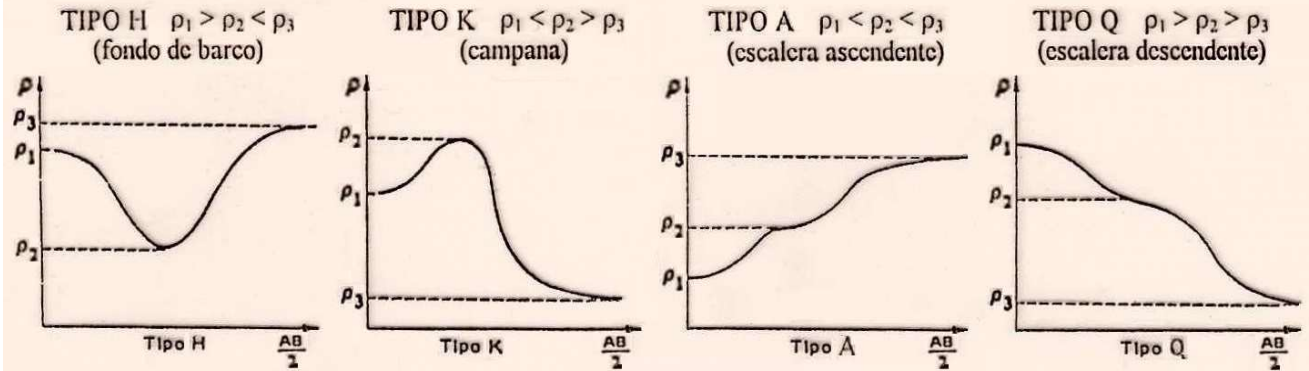
2 CAPAS:

La curva comienza tangente a ρ_1 y tiende asintóticamente a la resistividad de la 2ª capa ρ_2

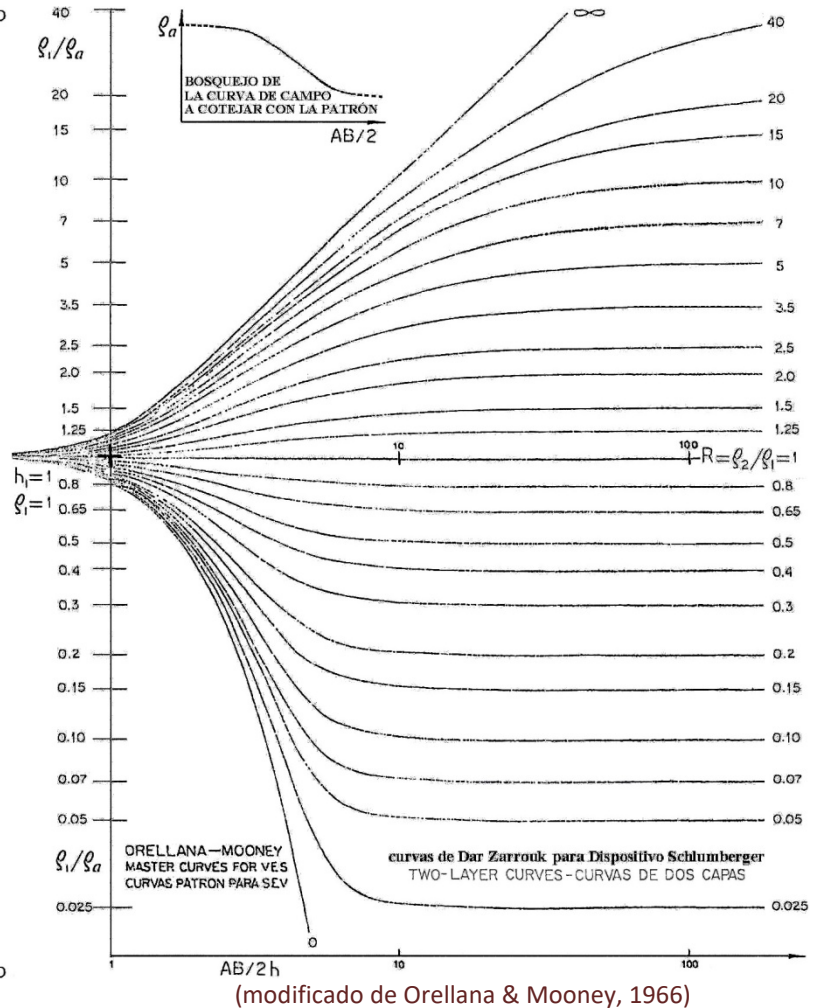
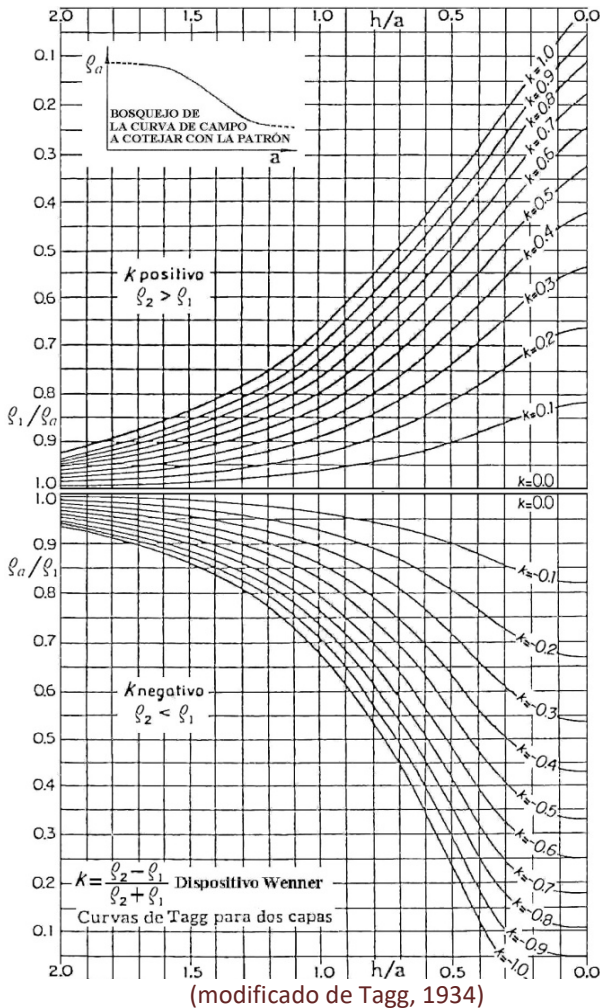
Tendremos dos posibilidades: $\rho_2 > \rho_1$ ó $\rho_2 < \rho_1$



3 CAPAS: Se caracterizan porque poseen un máximo o un mínimo o tres puntos de inflexión (no siempre apreciables). Se clasifican en los siguientes tipos:



(modificado de Cantos Figuerola, 1972)



Con el dispositivo Schlumberger, una vez calculadas las resistividades aparentes para cada punto medido, la curva de campo debe graficarse en escala doble logarítmica (sea en papel transparente o en pantalla) de modo tal que la distribución de valores medidos (ρ_a vs $AB/2$) abarque aproximadamente lo mismo que las curvas patrón, en este caso de Dar Zarrouk de 2 capas. (Estas curvas se basan en la investigación del francés **Raimond Maillet**, quien en 1947 las denominó así en recuerdo al nombre del palacio aristocrático de la familia Zarrouk en la medina –ciudad antigua– de Túnez donde descubrió la relación de estos parámetros). Si hay saltos de la curva en los empalmes entre los sucesivos tramos MN deben desplazarse hasta generar una única curva continua. Luego se recurre al **método del punto auxiliar**, para lo cual ha de efectuarse la superposición sin rotar (manteniendo paralelos los ejes coordenados) de la curva de campo sobre el juego de

curvas patrón, buscando la mejor coincidencia (puede ser entre dos de ellas), y han de leerse en la de campo los valores de $AB/2$ y ρ_a que corresponden al punto que cae sobre la cruz de las curvas patrón donde L ó $AB/2=1$ y $\rho_a=1$. Esos valores así leídos dan ρ_1 (la resistividad de la capa superior) y h (el espesor de dicha capa, desde la superficie hasta la interfaz con la siguiente), dado que en la cruz la abscisa $h/a=1$ y la ordenada $\rho_1/\rho_a=1$. A continuación debe visualizarse qué magnitud de la relación ρ_2/ρ_1 corresponde a la curva de Dar Zarrouk sobre la que se ha hecho la coincidencia. Teniendo ya ρ_1 , el valor de ρ_2 (capa infrayacente) puede entonces ser calculado en forma inmediata.

Con el dispositivo Wenner, una vez que sean calculado las ρ_a en cada punto, se las vuelca en las ordenadas de una gráfica con valores de separaciones interelectródicas a en abscisas, generando la curva de campo. Se les debe asignar unas escalas lineales que en ordenadas sean el doble de largo que en abscisas y tales que en x e y abarquen más o menos lo mismo que las curvas de la gráfica patrón (en este caso las publicadas para 2 capas en Estados Unidos por **G. F. Tagg**; página anterior). Éstas tienen en ordenadas valores de ρ_1/ρ_a o ρ_a/ρ_1 y en abscisas de h/a (siendo h el espesor de la capa superior) y cuanto más aumenta a menor es el cociente, por lo cual la relación h/a disminuye de izquierda a derecha. Luego se superpone la curva de campo sobre la correspondiente gráfica patrón. En base a la coincidencia (sin rotar) con alguna de las patrón (o entre dos de ellas), se define el valor del coeficiente de refracción eléctrica k . Entonces hay que moverse sobre la curva elegida hasta interceptar el punto que cae sobre la relación $h/a=1$ sabiendo que el valor de a en ese punto coincidente sobre la curva de campo será igual al valor de h (espesor de la capa superior). Luego desde ese punto interceptado hay que ir al eje de ordenadas y ver qué relación existe de ρ_1/ρ_a ó ρ_a/ρ_1 . Dado que el valor de ρ_a se tiene en ese punto desde la curva de campo, la ρ_1 se calcula en forma inmediata. Paso siguiente, con el k definido al principio y teniendo ρ_1 , puede calcularse ρ_2 (para la capa infrayacente) empleando la ecuación del coeficiente de refracción eléctrica: $K = (\rho_2 - \rho_1) / (\rho_2 + \rho_1)$

Existen diversos *programas en computadora para resolver los SEV con Wenner, Schlumberger u otros.*

Para cualquier dispositivo electródico que esté próximo a un contacto vertical las líneas de corriente se distorsionan y la medición en MN es afectada por el otro medio, tanto más cuanto mayor es la separación de los electrodos AB. Por lo tanto, la medida de ρ_a en un SEV está realmente influida por la distribución de resistividades en un cierto volumen de terreno. Esto implica que para distancias AB grandes se ignora si la resistividad aparente se debe a cambios de estructura en profundidad o a heterogeneidades laterales por contraste de resistividades. Puede ocurrir que las curvas de resistividad aparente para dos casos diferentes de SEV sean idénticas si la relación entre la profundidad a la que se encuentra un estrato y su resistividad permanece constante, causando una *ambigüedad en la deducción del grosor de la capa y de su resistividad*. En estos casos cabe *recurrir a modelados (inversión)* análogos a los vistos en gravimetría y magnetometría, apoyados en información geológica, de pozos o de otros métodos geofísicos. *Es necesario modelar cuando se tiene una topografía significativa*, para deducir el error que implica tal variación topográfica.

Si es posible realizar **sondeos paramétricos**, éstos son de gran ayuda para ajustar la interpretación. Se trata de sondeos eléctricos verticales realizados allí donde existen pozos perforados, sean éstos mineros, hidrogeológicos, petroleros, etc. Podrá así obtenerse un ajuste preciso de las profundidades, lo cual permitirá interpretar más confiablemente otros puntos del área prospectada. De no ser así, el error metodológico suele estar en el orden del 10 y hasta el 20%.

- Aplicaciones:

Los SEV no son adecuados para detectar contactos verticales, fallas, diques, etc. En cambio sí son aplicables cuando el objetivo tiene una posición subhorizontal y una extensión mayor que su profundidad. Tal es el caso del estudio de capas tectosedimentarias con objetivos hidrológicos, petrolíferos, etc.

Se los suele clasificar en: - **SEV Cortos o Someros** si la distancia AB es menor a 300 m.

- **SEV Normales** cuando AB es de entre 300 m y 3 km.

- **SEV Largos o Profundos** cuando AB va de 3 a 30 km.

- **SEV Ultraprofundos** si AB supera los 30 km.

Los **SEV cortos** son los más comunes, *se los emplea en hidrogeología, minería*, etc. Suelen ser adecuados para poca profundidad sobre topografía suave como complemento de las calicatas eléctricas para decidir la profundidad de éstas, tal el caso en *arqueología*. Se los emplea también *sobre ríos y lagos o mares muy someros*, por ejemplo para hallar naves naufragadas que han sido cubiertas por sedimentos del lecho.

Los **SEV normales** son los más usados en exploración de *cuencas sedimentarias* a profundidades de cientos de

metros, especialmente con **objetivos hidrogeológicos y mineros** (por ejemplo cateo de mantos de carbón).

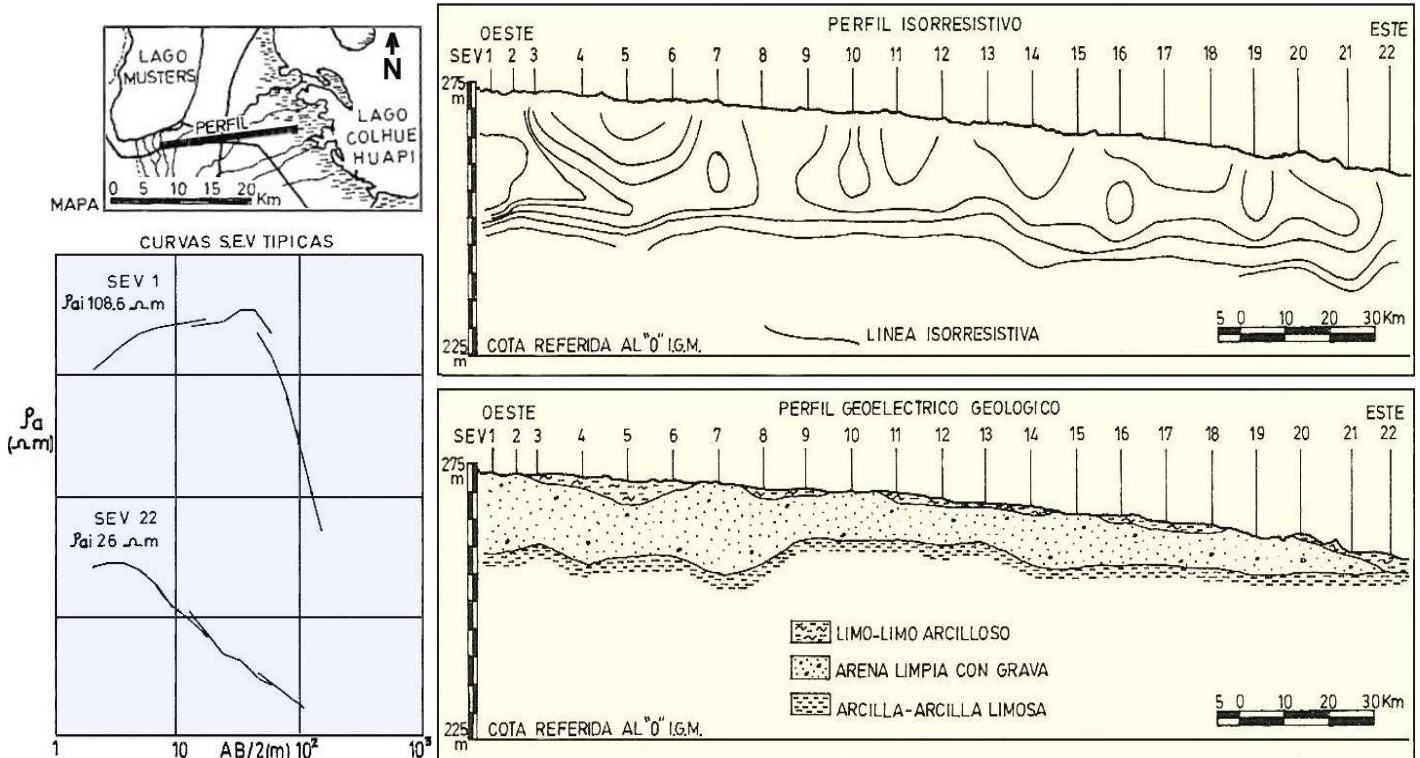
Los **SEV profundos** se han utilizado sobre todo en **prospección de hidrocarburos** y también en **exploración geotérmica** (la resistividad de las rocas disminuye cuando hay fluidos mineralizados pero aumenta con la presencia de vapor producido por altas temperaturas).

Los **SEV ultraprofundos** tienen **finés geocientíficos** y fueron realizados especialmente en países de la ex Unión Soviética desde 1938 (**A. P. Kraev** y otros superaron profundidades de 10 km en Rusia).

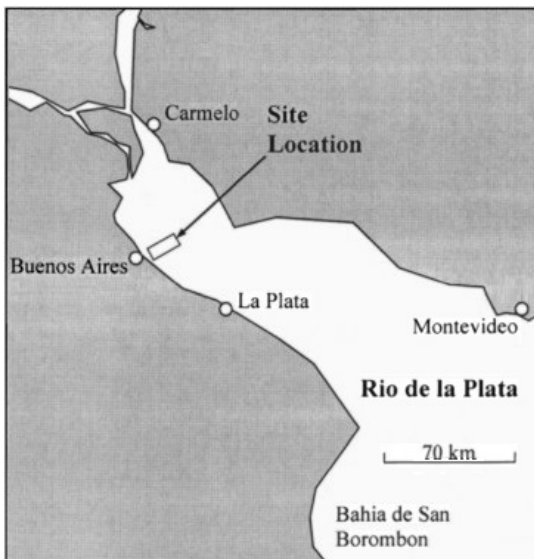
- Ejemplos:

El primer caso (figuras siguientes) cercano a Colonia Sarmiento (Chubut) es un perfil generado a partir de una sucesión de sondeos eléctricos verticales con la finalidad de caracterizar la sedimentología del subsuelo somero a los fines del mejor entendimiento de la hidrogeología del área donde el río Senguerr desemboca en los lagos Musters y Colhue Huapi.

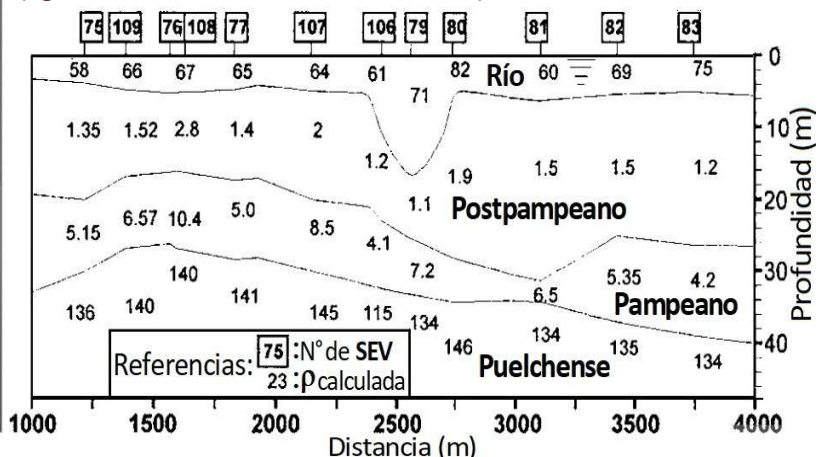
SEV someros en Chubut (figuras modificadas de Díaz et al., 1987)

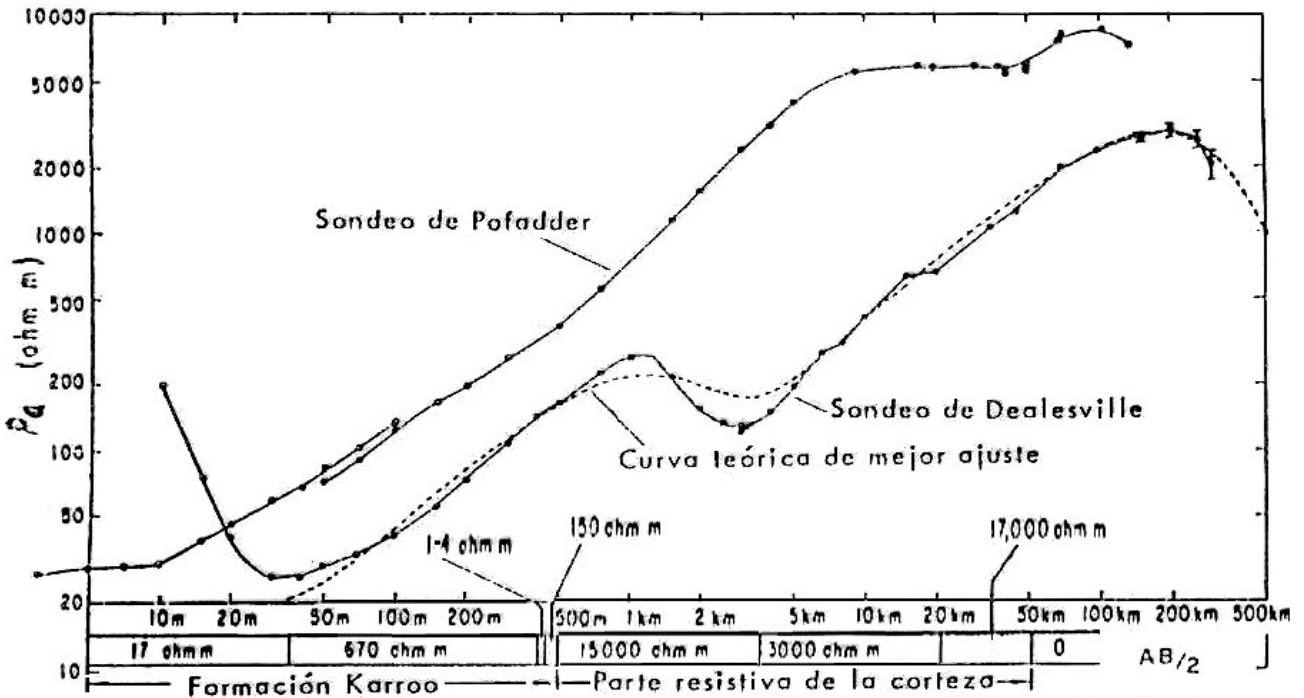


A continuación, ejemplo de una serie de SEV someros adquiridos a lo largo de una línea sobre el lecho del Río de la Plata y luego la gráfica de dos SEV ultraprofundos que fueron registrados en Sudáfrica.



Abajo, perfil resultante de numerosos SEV cortos sobre el Río de la Plata, registrados desde una embarcación mediante arrastre de un dispositivo flotante; a la izquierda el mapa de ubicación (figuras modificadas de Rinaldi et al., 2006)

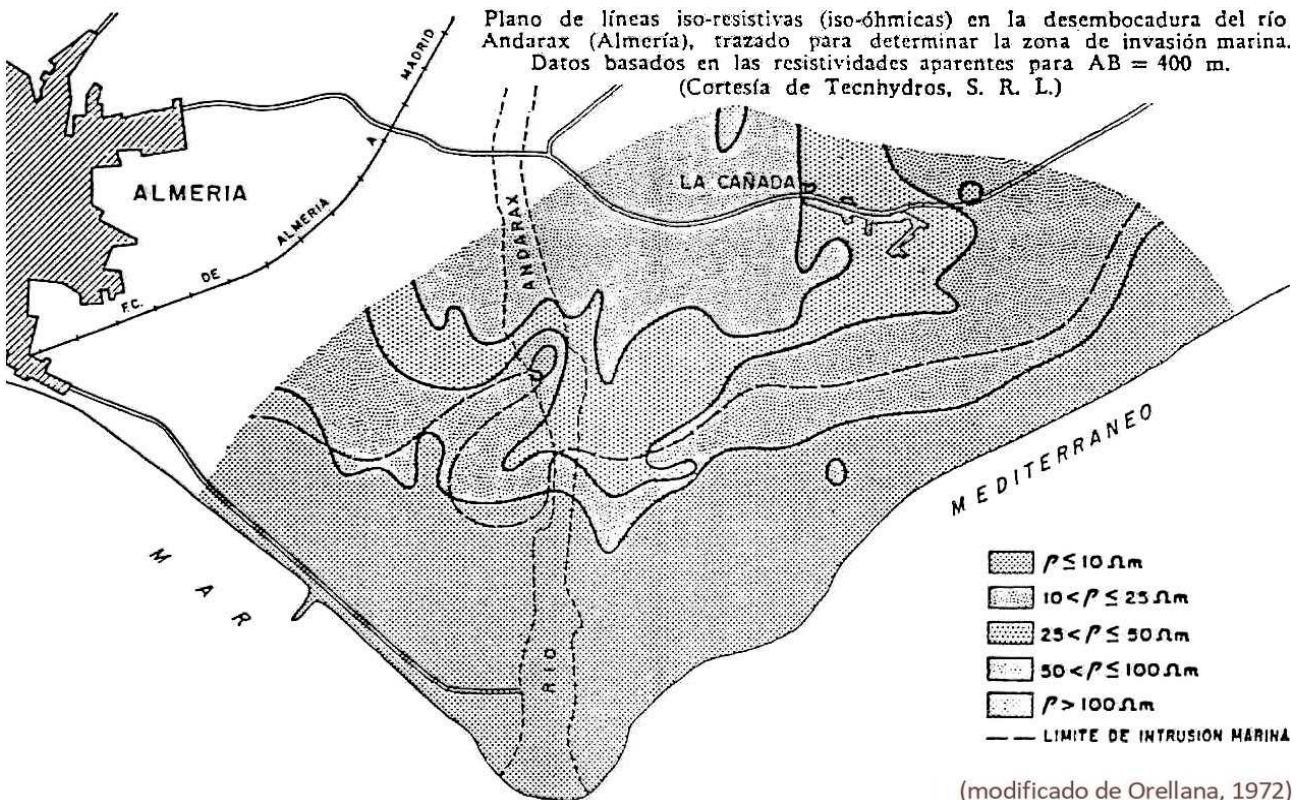




Curvas de SEV Schlumberger ultraprofundos realizados en Africa del Sur, los de mayor longitud AB realizados hasta la fecha. Según Van Zijl (Cortesía de la EAEG)

SEV ultraprofundos en Sudáfrica (modificado de Orellana, 1972)

El último ejemplo, abajo, es el resultado de interpolar los datos de un cierto número de sondeos eléctricos verticales distribuidos dentro de un área de interés hidrogeológico en el sur de España.



(modificado de Orellana, 1972)

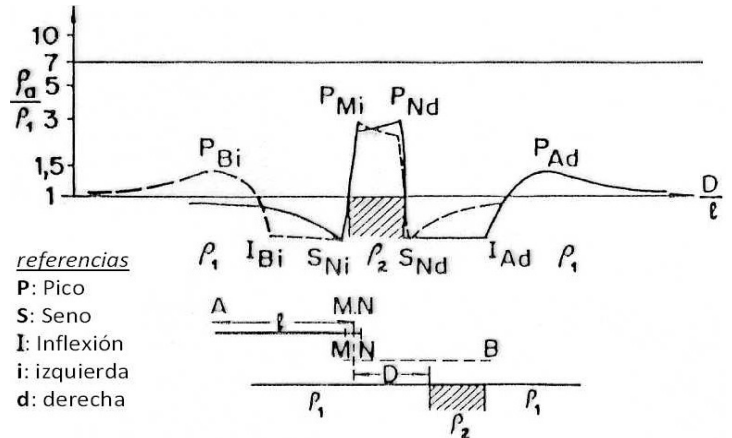
Calicatas Eléctricas

Del latín *calare-captare* (bajar-captar) y denominadas en inglés *electric trenches (ET)*, son una modalidad prospectiva en la cual se desplaza el dispositivo a lo largo de un perfil, con una separación constante entre los electrodos, para poder conocer la variación de las resistividades a lo largo de éste con una profundidad de

investigación constante, es decir algo análogo a lo que sería una calicata o zanja minera, pero en este caso de existencia virtual en función de la información dada por el campo eléctrico. En las CE pueden utilizarse los dispositivos de electrodos en línea (Schlumberger, Wenner, etc.), aunque *suelen preferirse los dipolares y los trielectródicos* (ejemplo a la derecha) que son más sensibles a las *variaciones laterales de ρ* , en general indicativas de estructuras sub-verticales y también para delimitar depósitos de placer. En este ejemplo, que atraviesa una capa vertical, una curva se obtuvo dejando fijo A y la otra fijando B (y moviendo A, M y N).

Hay programas también para resolver calicatas. Un tipo especial de calicateo geoelectrico es el

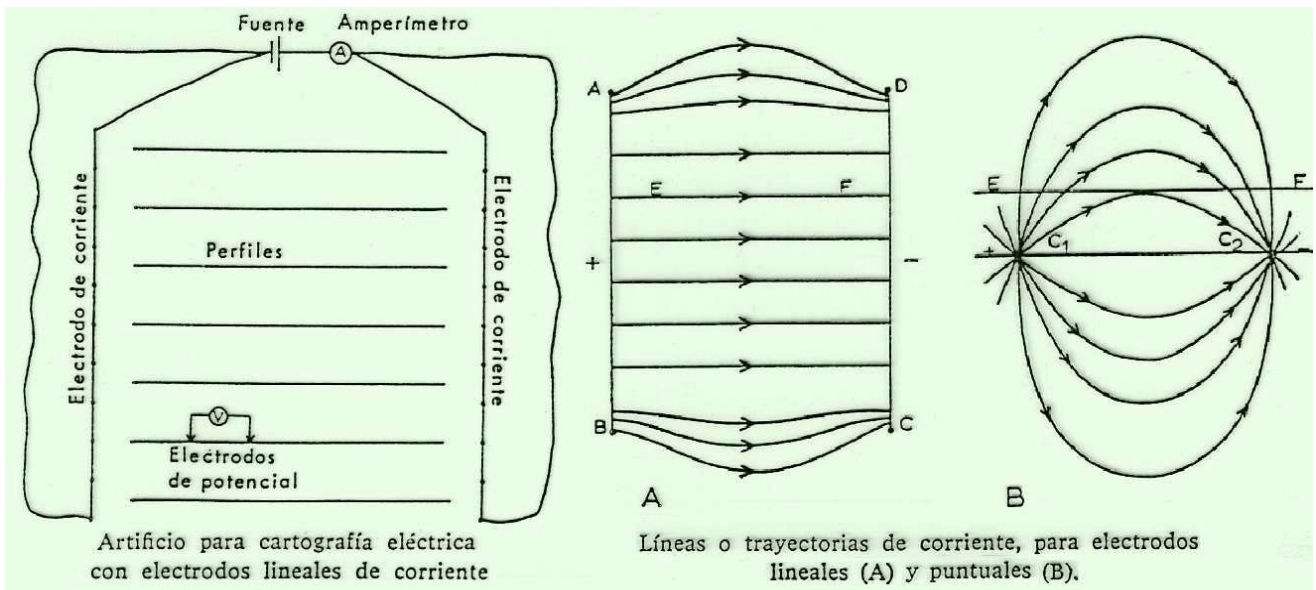
que se implementa con dispositivos basados en *electrodos de corriente lineales* (cables pelados tendidos en el terreno con bastante separación y paralelos entre sí, que se fijan con clavos cada cierta distancia). Sucesivas calicatas paralelas se hacen en forma perpendicular a dichos electrodos lineales, entre uno y otro, como se ve en la figura siguiente. Conviene emplear esta técnica en terreno llano, con la ventaja de distribuir mejor la corriente en el subsuelo y facilitar la interpretación de las anomalías geoelectricas.



referencias

- P: Pico
- S: Seno
- I: Inflexión
- i: izquierda
- d: derecha

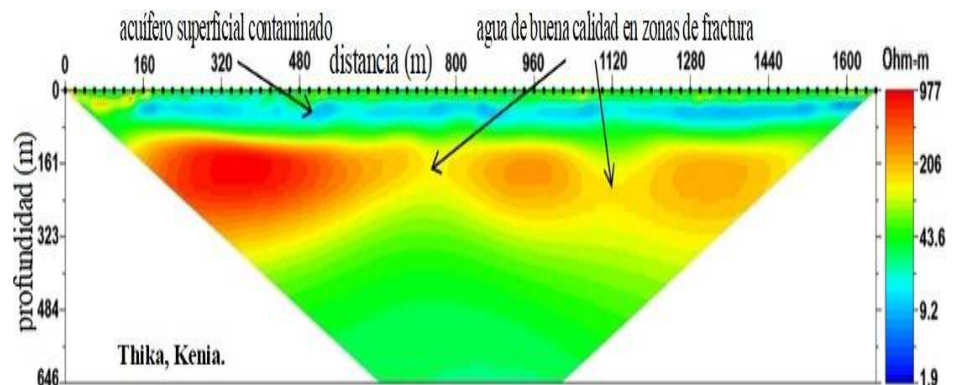
Curva de resistividades aparentes (en escala logarítmica) obtenida en una CE sobre una capa delgada resistiva (según Blokh). (modificado de Orellana, 1972)



(modificado de Parasnis, 1971)

Tomografías Eléctricas

Del griego τόμος (tomos, sección) y γραφία (grafía, graficación o escritura), en las TE o ERT (*Electrical Resistivity Tomography*) se investiga a lo largo de una calicata con diversas profundidades de interés a fin de generar una **pseudosección** (así denominada porque la atribución de profundidades sigue una geometría esquemática, no a una escala precisa) que permite ver a la vez los cambios laterales y verticales hasta cierta profundidad. Son como una combinación de CE con SEV.



Tomografía eléctrica 2D sobre acuíferos (modificado de agiusa.com)

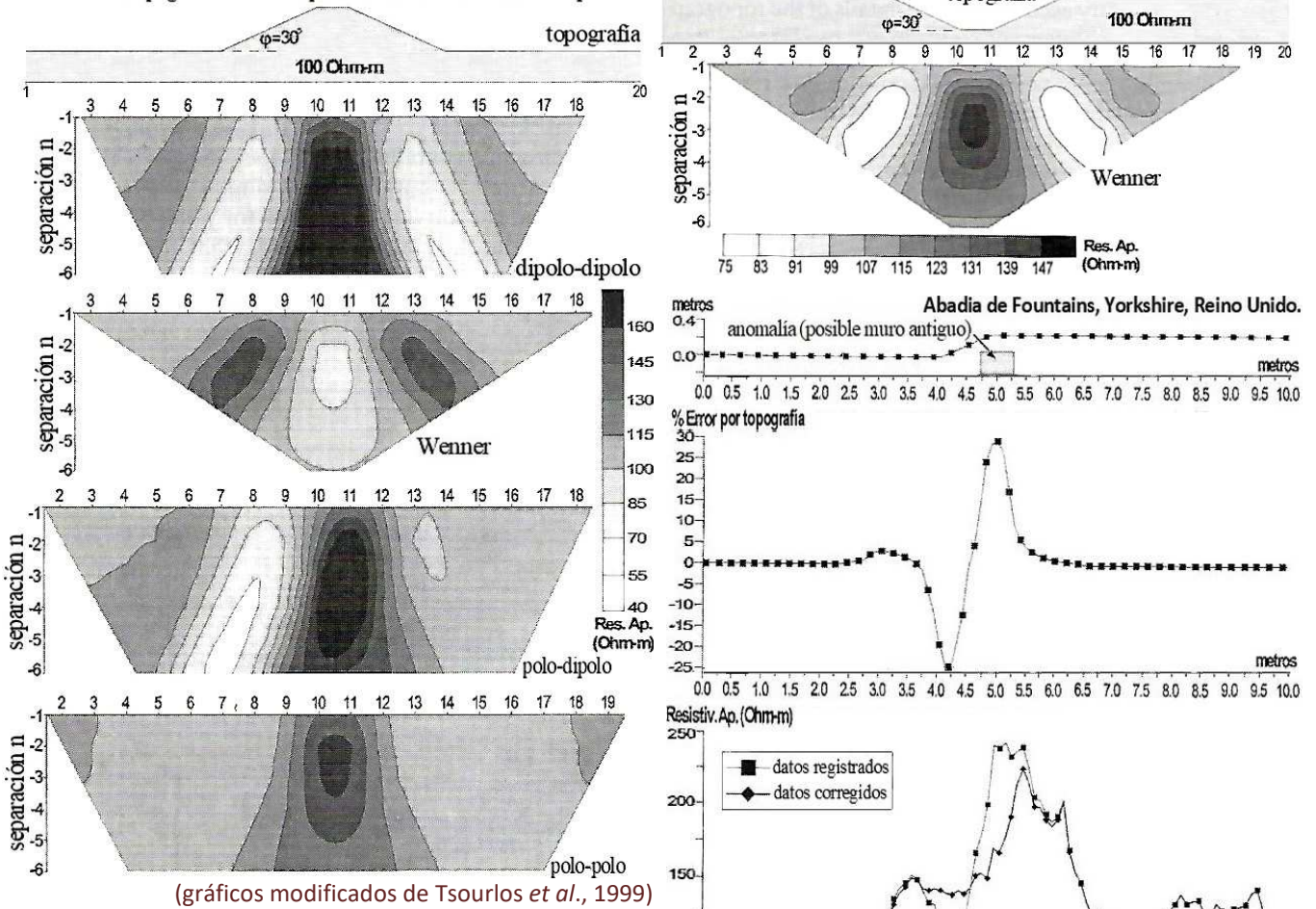


Trabajo de campo en la sabana africana (foto agiusa.com)

La precedente tomografía en dos dimensiones (x, z) fue registrada con 20 metros de espaciamiento interelectrónico y la combinación de dispositivos Schlumberger y polo-dipolo. Luego se procesó realizando una inversión de los datos (ajuste con un modelo de subsuelo) que requirió de 6 iteraciones para llegar a un error RMC (raíz de la media cuadrática) aceptable del 4%. Se interpretaron fracturas con presencia de agua potable profunda.

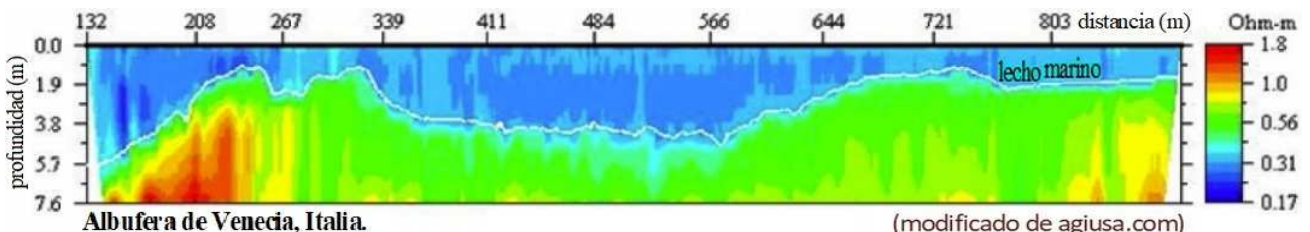
Las siguientes figuras evidencian la evaluación de la influencia del relieve sobre distintos dispositivos alternativos que han sido empleados para una TE hecha a través de una colina (izquierda), un valle (derecha) y la cuantificación del error causado por un desnivel (más abajo), en este caso en un relevamiento de extremo detalle, que constituye una **corrección topográfica mediante un modelo calculado, lo cual ha de hacerse también para los SEV, CE y LE si hay relieve relativamente marcado, dependiendo de la escala de trabajo, el detalle requerido y el error aceptable.**

Efecto de la topografía sobre una pseudosección con diferentes dispositivos:



(gráficos modificados de Tsourlos *et al.*, 1999)

Abajo, caso de registro marino de TE, del modo antes ilustrado con el dispositivo flotante apenas bajo el pelo de agua. Acá con 11 pares de electrodos de potencial, más un par de corriente y 3 m de espaciamiento por par.

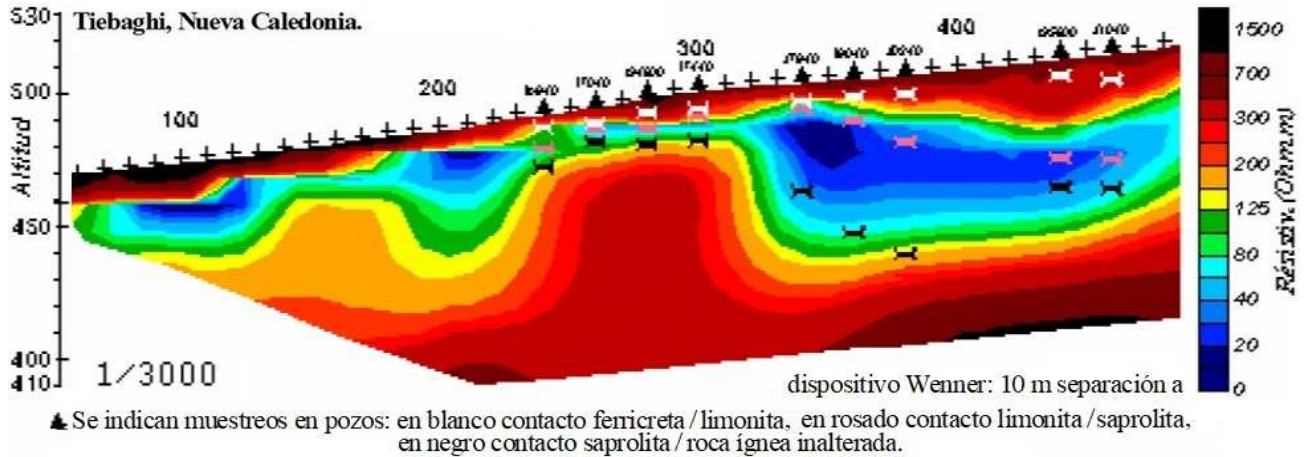


Albufera de Venecia, Italia.

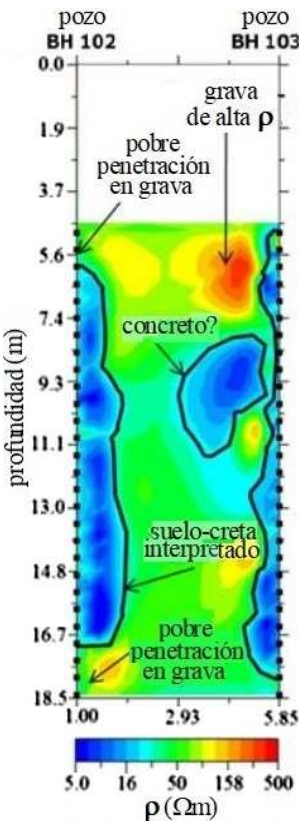
(modificado de agiusa.com)

A continuación un ejemplo de prospección metalífera en la isla de Nueva Caledonia (colonia francesa en Melanesia, con represión del movimiento independentista). Dentro del horizonte de saprolita (roca ígnea alterada) existe acumulación de níquel de interés económico. La tomografía geoelectrica, junto con muestreos, permite tener clara visión de la zona de interés en profundidad.

(modificado de Savin *et al.*, 2003)



▲ Se indican muestreos en pozos: en blanco contacto ferricreta / limonita, en rosado contacto limonita / saprolita, en negro contacto saprolita / roca ígnea inalterada.



Estudio de fundación. (modific. de agiusa.com)

celda correspondiente de datos. Es decir, a cierto valor de $\rho_n(t_1)$ en la ubicación x_n, z_n se le resta el valor de $\rho_n(t_2)$ de la misma posición x_n, z_n , siendo t_1 y t_2 las fechas de uno y otro registro.

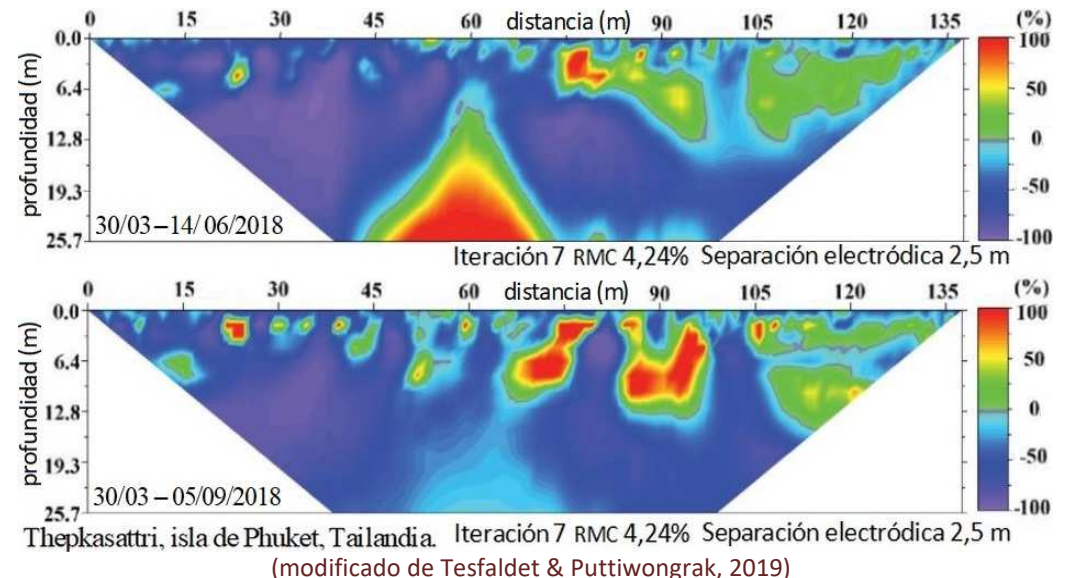
Las fallas pueden igualmente muchas veces ser visualizadas mediante TE, tal el caso de la falla recientemente activada, causante de potentes sismos, estudiada en la isla de Java (Indonesia) por Daryono *et al.*, 2023.

- Tomografías entre pozos superficiales

Se obtienen bajando el dispositivo electrodico elegido dentro de dos o más pozos, emitiendo desde uno de ellos y registrando en el otro u otros, a veces también haciendo luego el enroque. A la izquierda se presenta un ejemplo en Carolina del Norte (USA) con dispositivo dipolo-dipolo de 0,5 m de separación entre electrodos M-N y A-B. Se necesitaba conocer la competencia del suelo para fundación edilicia. Se registraron tres de estas secciones entre pozos (2D cross borehole) con unos 6 metros entre ellos para tener un triángulo de terreno estudiado y poder así planificar mejor los cimientos a realizar.

- Tomografías a intervalos de tiempo (time-lapse)

Consiste en adquirir los datos en diferentes fechas –distantes días, semanas, meses o años–, según sea el objetivo específico en subsuelo, para monitorear el movimiento de fluidos, generalmente agua. Una vez registrada esa información temporalmente repetida se efectúa la operación de restar entre los conjuntos los valores de cada



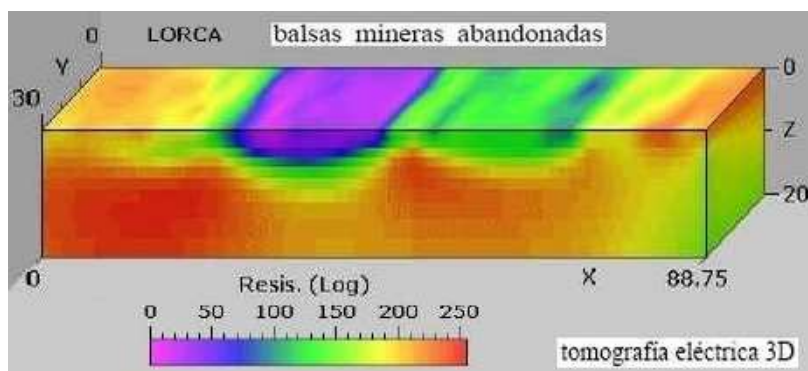
(modificado de Tesfaldet & Puttiwongrak, 2019)

Esa simple operación hecha mediante un programa permite desplegar una tomografía de porcentual de diferencia donde entonces interpretar los eventuales cambios ocurridos.

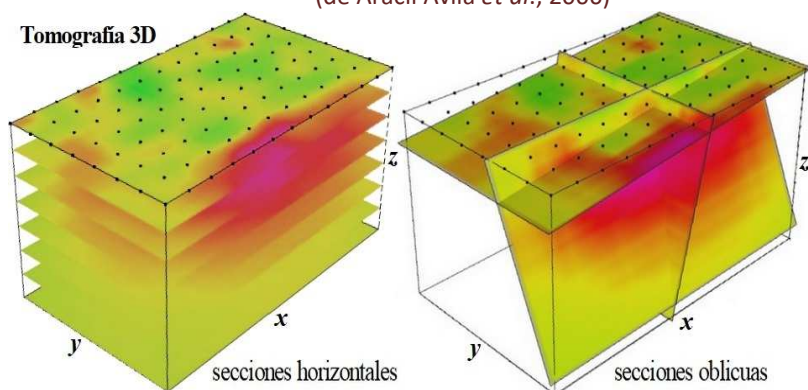
El caso en la página precedente, en la paradisíaca Phuket –en Tailandia primer punto de arribo del tsunami de 2004– se registró con dispositivo Wenner en los meses de marzo (estación seca), junio (lluviosa) y septiembre (lluviosa recargada), siempre calor, obvio. Le resta entre las tomografías de marzo y junio y entre las de marzo y septiembre, expresadas en %, permiten observar un significativo decrecimiento de los valores de resistividad durante la estación de lluvias indicando infiltración de agua meteórica, y además puede ser estudiada la dinámica del proceso de recarga a través de los meses en ese sector de divisoria de aguas. Este conocimiento es útil para el manejo estacional del recurso dado el continuo incremento de la demanda a través de los años. Es útil en situaciones similares realizar modelados de la variación de conductividad eléctrica ante distintas condiciones de porosidad y saturación de la rocas (véase Cai *et al.*, 2017).

- Tomografías 3D

Los ejemplos de TE vistos hasta acá son bidimensionales; los más habituales. Pero en casos particulares, más bien raros por su complejidad y costo, se puede optar por registros tridimensionales (TE 3D).



(de Aracil Ávila *et al.*, 2006)



A la izquierda, ejemplo de tomografía 3D, realizada en una mina de España. Más abajo las imágenes de cómo un paralelepípedo (aunque en la jerga se dice siempre “cubo”) de datos en x, y, z se puede visualizar mediante secciones (*slices*) horizontales, oblicuas o también verticales, según sea la conveniencia para su interpretación.

Un dispositivo para obtener *anisotropía resistiva* provee nueve términos en un arreglo de tensores de voltaje de 3 por 3, para cualquier medición dada. Los 9 acoplamientos son medidos de modo simultáneo y luego con una técnica de inversión matemática se extraen las ρ desde la matriz de voltajes registrados.

Las CE y TE (2D y 3D) se utilizan para el cateo y desarrollo minero, así como en la exploración geotérmica, hidrogeológica o arqueológica, para detección de cavernas, fundaciones de diversa magnitud, en estudios de remediación ambiental, etc.

Aplicaciones en la prospección de hidrocarburos

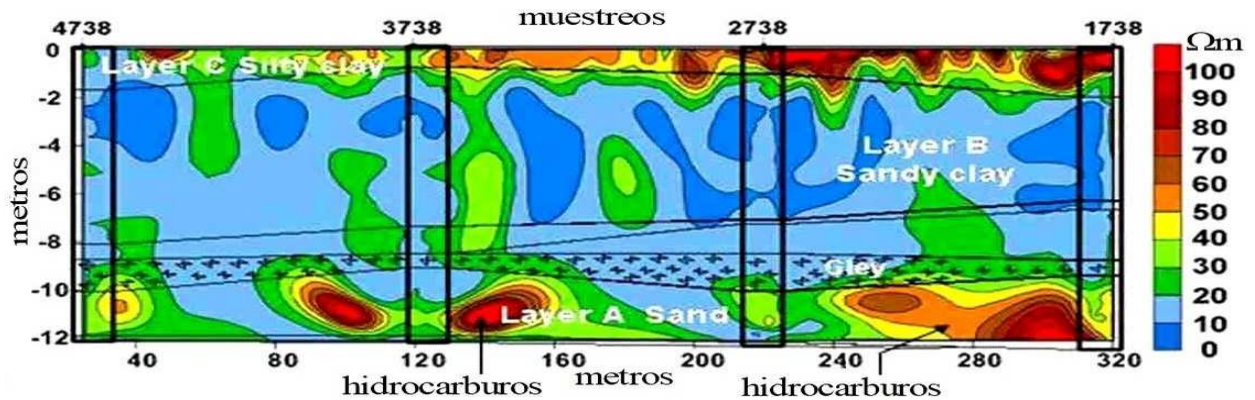
Además del perfilaje de pozos profundos –que se verá un poco más adelante– los métodos geoelectrónicos de corriente continua desde la superficie han sido utilizados en algún grado en la prospección e incluso desarrollo de yacimientos de hidrocarburos.

Los principales ejemplos de aplicación tienen que ver, como se mencionó, con los *SEV profundos* realizados para la exploración de nuevas cuencas potencialmente hidrocarburíferas, especialmente en los países de la ex Unión Soviética. Téngase presente que, si bien los hidrocarburos son resistivos y el agua formacional es conductiva, estos métodos casi nunca permiten distinguirlos desde la superficie si los fluidos se hallan a gran profundidad a causa del espesor relativamente acotado de los reservorios. También recuérdese que la halita, sal de roca o sal gema que forma los *diapiros o domos salinos tiene alta resistividad* (véanse las magnitudes en el Tema 06) y, dado que la carga litostática impide la presencia de agua intersticial, no hay conductividad en estos emplazamientos que son típicos de algunas cuencas sedimentarias.

Otras aplicaciones someras modernas están vinculadas a condiciones de suelo alterado por eventuales *microfugas o manaderos de hidrocarburos*, configurando una herramienta prospectiva que en algunas áreas ha dado interesantes resultados. Los suelos pueden poseer cementación carbonática debajo de la superficie (que

resulta en anomalías de alta resistividad) y también zonas más profundas de baja resistividad asociada a la presencia de pirita, magnetita y otros minerales conductivos generados a partir del metabolismo de las bacterias que se nutren biodegradando hidrocarburos.

La siguiente gráfica corresponde a una TE 2D en la cual las capas subsuperficiales evidencian aumento de resistividad allí donde existen pequeñas acumulaciones de hidrocarburos provenientes de trampas profundas.



Perfil resistivo somero para la búsqueda de hidrocarburos en Enid, Oklahoma (modificado de agiusa.com)



Mediante dispositivos electrónicos de corriente continua también puede procederse a la prospección de shungitas, rocas altamente ricas en carbono orgánico, resistivas respecto a otras rocas del entorno.

Prospección de shungitas en la cuenca de Onega, norte de la Rusia europea (foto de Ryazantsev & Deines, 2022)

En todos los casos, incluso con la evolución tecnológica, en campaña la prospección mediante inyección de corriente todavía conserva el aroma sabiamente estacionado de las antiguas cosechas...

CUESTIONARIO BÁSICO

- ¿Qué equipamiento de campo se requiere en los métodos de CC y cuáles ruidos podemos tener?
- ¿Cómo son las líneas equipotenciales y de corriente en planta y perfil ante una anomalía?
- Explicar el significado y la utilidad del factor geométrico.
- ¿Qué diferencias hay entre los dispositivos de Wenner y Schlumberger en operación y resultados para el método de SEV?
- ¿Cómo se interpreta la información con las curvas patrón?
- ¿Cómo pueden ser los dispositivos dipolares y cómo los de electrodos lineales?
- ¿En qué consisten las CE y las TE?
- ¿Qué tipo de información brindan las CE y TE 2D?
- ¿Cómo se obtienen las TE entre pozos, las intervaladas en el tiempo y las 3D?
- ¿Qué aplicaciones tienen los métodos de inyección de corriente?
- ¿Cómo podrían detectarse las microfiltraciones de hidrocarburos con estos métodos?

BIBLIOGRAFÍA DE REFERENCIA

- Aracil Ávila, E., Porres, J., Espinosa, A., Martínez, P., Faz, A., Maruri, U. & Vallés, J., 2006. Balsas mineras abandonadas y balsas de purines: dos problemas medioambientales abordables mediante tomografía eléctrica. III Congreso de Ingeniería Civil, Territorio y Medioambiente, Ponencias (8 p).
- Burger, H., 1992. Exploration geophysics of the shallow subsurface (p 242-307). Prentice-Hall.
- Cai, J., Wei, W., Hu, X. & Wood, D., 2017. Electrical conductivity models in saturated porous media: a review. Earth-Science Reviews, V.171 (p 419-433).
- Cantos Figuerola, J., 1972. Tratado de geofísica aplicada (p 394-420, 431-446). Librería de Ciencia e Industria.
- Daily, W., Ramírez, A., Binley, A. & LaBrecque, D., 2004. Electrical resistance tomography. The Leading Edge, V.23 N°5 (p 538-442).
- Daryono, M., Pamumpuni, A., Wardhana, D. & Natawidjaja, D., 2023. Mataram Fault, new active fault crosses east-west in the centre of Yogyakarta City. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, N°1227 (6 p).
- Díaz, E., Savoy, H. & Ponti, N. 1987. Prospección geoeléctrica para la determinación de las condiciones hidrogeológicas en el valle del río Senguerr, Colonia Sarmiento, provincia del Chubut. 10° Congreso Geológico Argentino, Actas, V.3 (p 215-218).
- Dobrin, M., 1976. Introduction to geophysical prospecting (p 574-591). McGraw-Hill.
- Griffiths, D. & King, R., 1972. Geofísica aplicada para ingenieros y geólogos (p 19-84). Editorial Paraninfo.
- Kraev, A., Semenov, A. & Tarkhov, A., 1947. Сверхглубокое электротзондирование (*Ultradeep electric sounding*). Разведка и охрана Недр (*Exploration and Protection of Subsoil*), N°3 (p 40-41).
- Herrero Ducloux, 1981. Memoria de los primeros 10 años de la unidad geofísica (86 p). INCyTH.
- Lowrie, W., 1997. Fundamentals of geophysics (p 212-217). Cambridge University Press.
- Maillet, R., 1947. The fundamental equations of electrical prospecting. Geophysics, V.12 (p 529-556).
- Orellana, E., 1972. Prospección geoeléctrica en corriente continua (p 26-33, 100-460, 489-495). Editorial Paraninfo.
- Orellana, E. & Mooney, H., 1966. Master tables and curves of vertical electrical sounding over layered structures (34 p). Interciencia.
- Panissod, C., Dabas, M., Hesse, A., Jolivet, A., Tabbagh, J. & Tabbagh, A., 1998. Recent developments in shallow-depth electrical and electrostatic prospecting using mobile arrays. Geophysics, V.63 N°5 (p 1542-1550).
- Parasnis, D., 1971. Geofísica minera (p 175-205). Editorial Paraninfo.
- Rinaldi, V., Guichón, M., Ferrero, V., Serrano, C. & Ponti, N., 2006. Resistivity survey of the subsurface conditions in the estuary of the Río de la Plata. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, V.132 N°1 (p 72-79).
- Robinson, E. & Coruh, C., 1988. Basic exploration geophysics (p 447-478). John Wiley & Sons.
- Ryazantsev, P. & Yulia Deines, Y., 2022. Electrical resistivity tomography for characterization of carbon-rich rocks (shungites). Journal of Applied Geophysics, V.203 (6 p),
- Savin, C., Robineau, B., Montell, G, Beauvais, A., Parisot, J. & Ritz, M., 2003. Electrical imaging of peridotite weathering mantles as a complementary tool for nickel ore exploration in New Caledonia. A.S.E.G. extended abstracts (5 p).
- Sharma, P., 1976. Geophysical methods in geology (p 263-293). Elsevier Scientific Publishing Co.
- Sheriff, R., 1991. Encyclopedic dictionary of exploration geophysics (376 p). Society of Exploration Geophysicists.
- Schlumberger, 1979. Schlumberger, the first years (29 p).
- Tagg, G., 1934. Interpretation of resistivity measurements. Transactions of the Metallurgical Society of A.I.M.E., V.110 (p 110-135).
- Telford, W., Geldart, L., Sheriff, R. & Keys, D., 1976. Applied geophysics (p 632-701). Cambridge University Press.
- Tesfaldet, Y. & Puttiwongrak, A., 2019. Seasonal groundwater recharge characterization using time-lapse electrical resistivity tomography in the Thepkasattri watershed on Phuket Island, Thailand. Hydrology, V.6 N°2 (36 p).

- Tsourlos, P., Szymanski, J. & Tsokas, G., 1999. The effect of terrain topography on commonly used resistivity arrays. *Geophysics*, V.64 N°5 (p 1357-1363).
- Udías, A. & Mezcuca, J., 1997. *Fundamentos de geofísica* (p 365-379). Alianza Editorial.

Los posibles errores y sesgos contenidos en estas Glosas de Geofísica son sólo atribuibles al primero de los autores.