

# Geofísica somera aplicada a informes geotécnicos de pequeña escala: detección de cavidades por tomografía eléctrica

**En el presente trabajo se describen varios casos de geofísica aplicada a la detección de cavidades superficiales. El método aplicado es el eléctrico en su variante de tomografía. Las secciones geoeléctricas obtenidas han mostrado sendas cavidades y correlaciones laterales de litologías. Se describen los fundamentos del método y ejemplos de su puesta a punto antes de proceder a los trabajos aplicados en geotecnia**

**Palabra clave:** AUSCULTACIÓN, CAVIDAD, DETECCIÓN, GEOFÍSICA, LITOLOGÍA, SECCIÓN, SOMERA, TOMOGRAFÍA ELÉCTRICA.

**Luis JORDÁ BORDEHORE,**  
Ingeniero de minas.  
**RUDNIK INGENIEROS CONSULTORES.**

La geofísica es una herramienta de gran utilidad no sólo en auscultación para grandes obras sino también en pequeños estudios geotécnicos, donde puede aportar información para correlacionar sondeos, calicatas y penetrómetros. Normalmente la movilización de los equipos geofísicos de gran potencia tiene unos costes que no siempre hace rentable su aplicación en pequeños informes geotécnicos. Por otro lado las principales firmas de geofísica han desarrollado equipos específicos para la geotecnia somera y arqueología, de menor potencia y por tanto coste muy inferior, pero con una tecnología semejante a la de los modelos mayores. Se pueden desplegar la misma cantidad de puntos de medida que en una gran campaña, pero al ser el objetivo somero, la distancia de estos es menor, y la resolución muy alta. Es preciso conocer el alcance de cada uno de los equipos.

El equipo empleado en estas campañas ha sido un resistivímetro *Syscal Kid Swich* de 24 electrodos y 9 niveles de investigación de la firma *Iris Instruments* (Orleans, Francia). La separación máxima de electrodos y con ello la profundidad de investigación esta limitada por la potencia del aparato, y su rango óptimo está entorno a los 0 – 20 m de profundidad.

En ese rango, por ejemplo, en una campaña ordinaria con dispositivo dipolo dipolo en un perfil de 2m de espaciado (48 metros de longitud) se alcanzará una profundidad de investigación de 7-9 metros (según litologías). En el caso de existir una cavidad de 2x2 metros po-

demo llegar a tener más de 4 puntos de medida *dentro* de la misma. La calidad de la señal geofísica en este caso es excelente. Una vez puesta a punto en cavidades conocidas (principalmente minas abandonadas y sistemas de trincheras de la Sierra de Guadarrama) hemos aplicado la técnica en la detección de cavidades bajo cimentaciones y socavamientos, con unos éxitos notables.

## Aplicación de los métodos geofísicos

Los métodos geofísicos, y en particular los geoeléctricos son una poderosa herramienta en geotecnia. Su empleo como técnica individual no legitima para presentar un modelo geológico definitivo; sin embargo aporta valiosos datos para el posicionamiento más juicioso de sondeos y calicatas. La combinación de varios métodos geofísicos con técnicas de recuperación de muestras da un resultado mucho más completo.

En la aplicación de los métodos eléctricos, la principal premisa a cumplir es la existencia de contraste de resistividades entre los materiales o estratos que se investigan. Si se dan las condiciones teóricas básicas, es posible detectar diferencias de conductividad geoeléctrica que permiten elaborar cartografías de apoyo geológico y columnas estratigráficas. Cuanto mayor sea el contraste de resistividades (o el opuesto de conductividades) de los materiales, mayor será la resolución.

Ejemplos clásicos de utilización de estas técnicas son el caso de cavidades<sup>1</sup>, rocas saturadas<sup>2</sup>, zonas con diques filonianos o discontinuidades, cambios bruscos laterales de facies, fallas<sup>3</sup>, y en general litologías diferentes con suficiente contraste eléctrico<sup>4</sup>. Las zonas de alteración y los vertidos también pueden tener firmas geofísicas características.

## Fundamentos del método de tomografía eléctrica

El método *eléctrico* consiste en introducir una corriente eléctrica continua en la superficie del terreno a través de dos electrodos de *corriente*. Se mide el voltaje mediante otro par de electrodos. A partir del valor de la corriente inyectada y del voltaje medido se obtiene la *resistividad aparente* del subsuelo. Cada tipo de material presenta un rango de resistividad *real* más o menos característico. Las cavidades vacías (llenas de aire) presentan una resistividad aparente que tiende al infinito: los terrenos saturados son altamente conductores y por tanto presentan baja resistividad, etcétera.

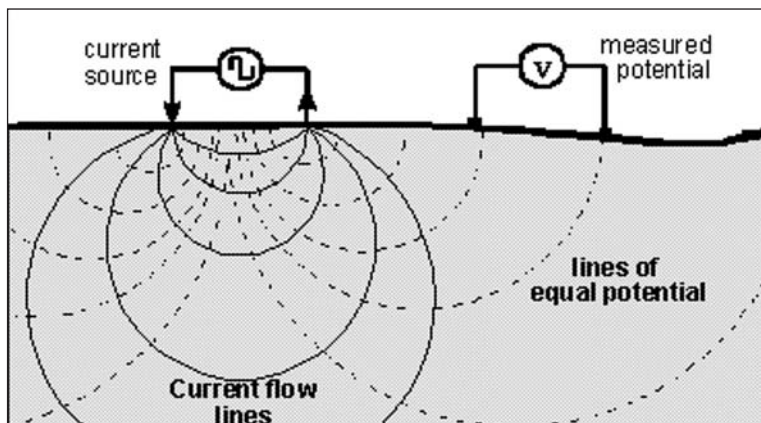
Según la posición de los electrodos, la corriente penetra más o menos en el terreno. En la práctica se extiende una línea de más de 24 electrodos que son seleccionados de cuatro en cuatro por el equipo de campo (resistivímetro). De esta manera, se obtienen gran número de puntos de resistividades aparentes. Clásicamente se ha empleado el *Sondeo Eléctrico Vertical*, de gran éxito en la detección de

<sup>1</sup> Una cavidad vacía cuya resistividad frente al encajante tiende a infinito se distingue del entorno o de cavidades rellenas de limos o arcillas.

<sup>2</sup> El nivel freático es conductivo y supone una caída brusca de la resistividad.

<sup>3</sup> Más que detectar la falla propiamente, se detectan dos materiales diferentes enfrentados.

<sup>4</sup> Típicamente sucesiones arcilla /arena /yeso y calizas y rocas intrusivas infrayacentes.



[Figura 1] A la izquierda emplazamiento de los electrodos de corriente. A la derecha, electrodos de medida de potencial (en la imagen se muestra un dispositivo dipolo - dipolo). En trazo continuo: líneas de flujo de corriente. En trazo discontinuo: líneas equipotenciales.



Colocación de una línea de electrodos: perfil geoelectrico en las inmediaciones de la excavación de una zapata de cimentación en Navalcarnero (Madrid).

transiciones litológicas y detección de niveles freáticos en la vertical de un punto; sin embargo, con los modernos equipos multielectródicos es una técnica superada por la tomografía para estudios de índole geotécnica.

Los datos del presente estudio se filtran y ordenan mediante el programa *Prosys* de *Iris Instruments* y se han interpretado e invertido mediante *Res2Dinv* de *Geotomo-Software* (Malasia).

En *tomografía eléctrica* se mide la resistividad en numerosos puntos de un perfil y se interpolan e interpretan los datos para hacer corte de resistividad del terreno. Si las condiciones son adecuadas es una herramienta muy potente para llevar a cabo correlaciones entre resistividad y tipo de material en terrenos ocultos.

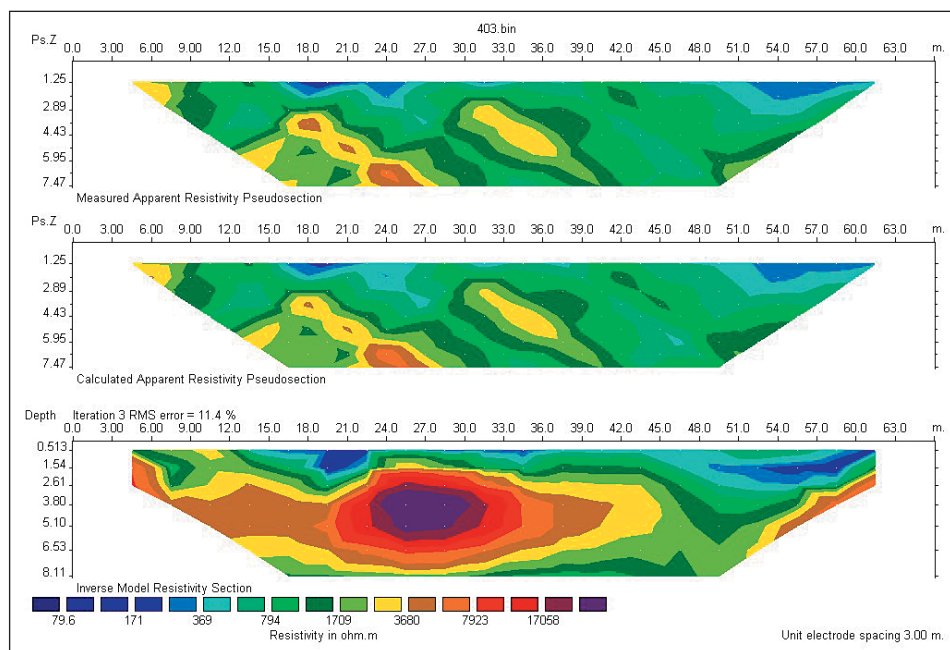
Se sitúan al mismo tiempo un gran número de electrodos en el terreno siguiendo una alineación y se conectan a un multicable el cual a su vez esta unido a un resistivímetro y un selector de electrodos. Es debido a la gran cantidad de datos que se obtienen al combinar de cuatro en cuatro los puntos conectados que se necesita del apoyo informático para tratar la información. El desarrollo de modernos equipos permite tomar unos datos de mayor calidad: comprobar los electrodos que están incorrectamente colocados y el gran número de combinaciones y repeticiones que se pueden hacer dan una serie de valores muy fiables. Mediante un ordenador portátil puede obtenerse directamente en campo un corte eléctrico básico, lo que permite un control de calidad de las medidas obtenidas.

Una vez obtenidas las medidas en campo, es necesaria una inversión. Este procedimiento consiste en realizar iteraciones que acerquen un modelo informático al modelo real. El paso clave está en la construcción de sucesivas secciones geoelectricas, que se comparan con la obtenida en el campo. El fin del proceso iterativo será en el momento en que simulemos una toma de datos y cuyo resultado sea lo más parecido posible a los datos del campo. Es el llamado *error RMS* de tomografía y es un punto crítico del trabajo de interpretación.

La profundidad de investigación que se obtiene varía mucho según la litología pero puede estar en un rango de valores de la tercera a la cuarta parte de la mayor abertura de electrodos que se emplean.



Imágenes de colocación de electrodos en un vial.



[Figura 2] Modelo de inversión. Arriba: resistividades aparentes medidas en campo sobre la que se ha interpolado para obtener unas zonas de resistividad. En el centro resistividades calculadas, y en la parte inferior resistividades "verdaderas" al final de la 3ª iteración. La imagen inferior (resistividad real) muestra una cavidad en yesos, junto a una nueva autopista en Cuenca.

## Ejemplos. Puesta a punto del equipo

Los trabajos de puesta a punto del equipo se han efectuado en zonas donde se conocía la ubicación, forma y tamaño de las cavidades. Con ello se perseguía poner de manifiesto las peculiaridades de la señal recibida y la calidad de la misma.

El primer caso [Figura 3] es un perfil de 24 metros de longitud y 1 metro de espaciado de electrodos, en una zona de antiguas trincheras militares y polvorines en Galapagar. Bajo los electrodos 8 a 11 existe una zona de alta resistividad ( $> 200.000 \text{ ohm}\cdot\text{m}$ ) que corresponde a una galería tras la trinchera. Los terrenos superficiales son de tipo limo-arcilloso y la roca encajante gneises glandulares y episienitas.

El segundo caso [Figura 4], corresponde a una galería parcialmente inundada de la mina Fernandito en el Valle de Lozoya (Madrid). Se

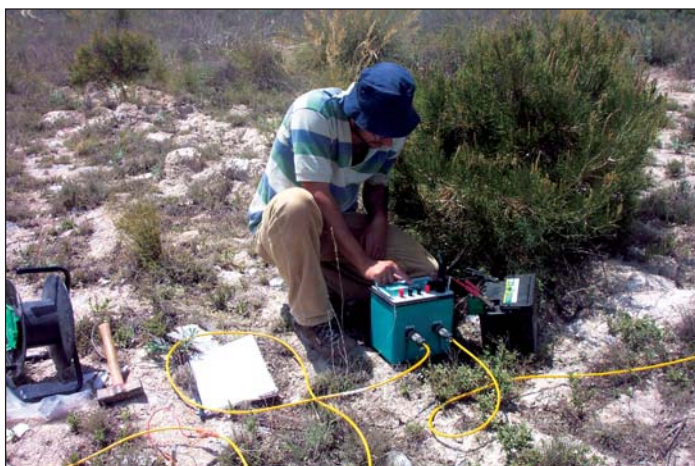
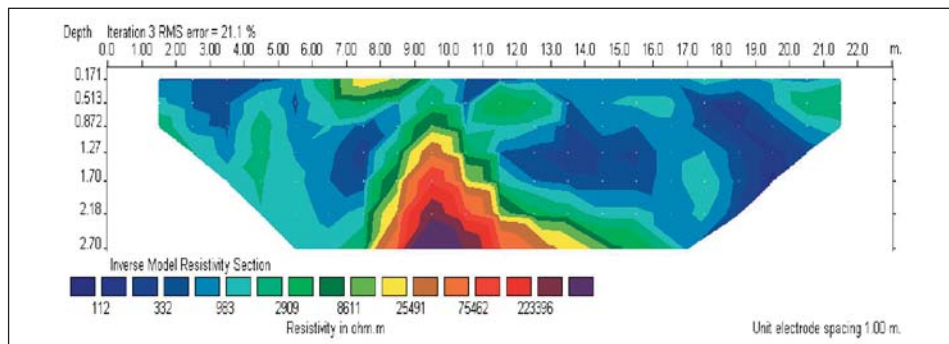


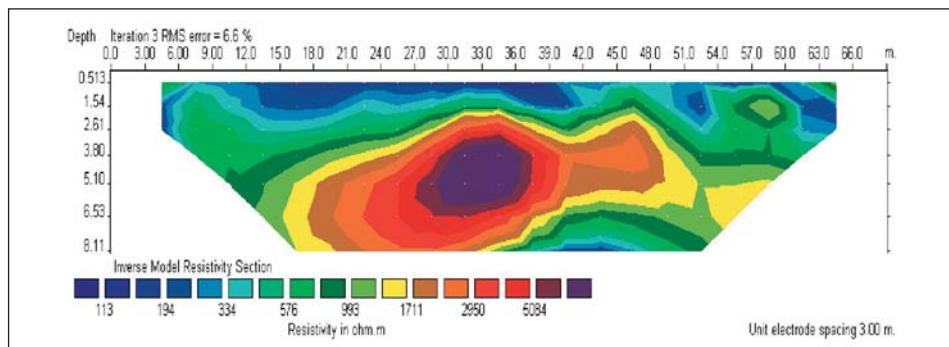
Imagen del equipo de registro empleado.

trata de una explotación de cobre abandonada en 1965 a escasos kilómetros de la localidad de Garganta de Los Montes. Conocida la bocamina del primer nivel (de tres existentes) y

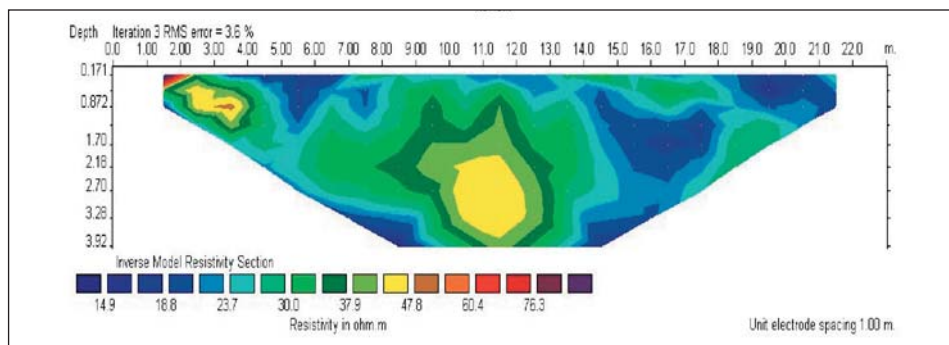
la posición del pozo maestro se procedió a un perfil de 2 metros de espaciado cuya profundidad de investigación era suficiente para que las líneas de potencial pasaran por debajo de la galería y se detectase correctamente el alcance de la misma.



[Figura 3] Antiguo polvorín militar abandonado. Nótese la elevadísima resistividad del hueco que genera algunos artificios de interpolación.



[Figura 4] Perfil geoelectrico en la mina Fernandito en dispositivo combinado wenner y dipolo dipolo. Detección de la galería de arrastre. El encajante esta formado por gneises (la resistividad de la cavidad es de más de  $10.000 \text{ ohm}\cdot\text{m}$  y teóricamente tiende al infinito).

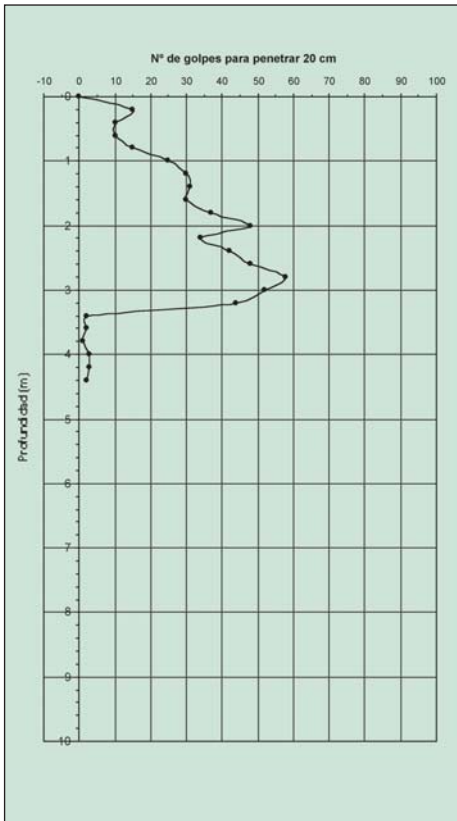


[Figura 5] Resultado del perfil geoelectrico: cavidad rellena en terrenos arcósicos.

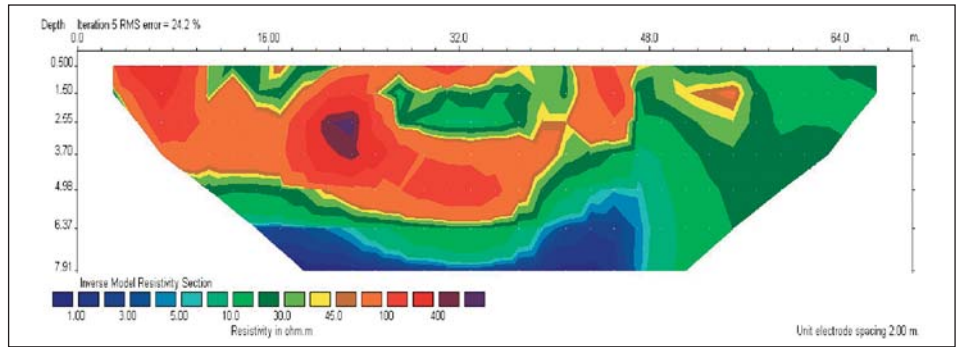
## Casos prácticos

En la localidad madrileña de Navacarnero desde el punto de vista geotécnico los terrenos, arenas arcósicas, son de muy buena calidad. Sin embargo, hay gran profusión de cavidades artificiales en el casco urbano, no siempre detectadas mediante sondeos y penetrómetros y de las cuales se ha perdido la memoria histórica. En la excavación de la cimentación de un edificio se encontró una enorme cueva en uno de los laterales. Se decidió llevar a cabo dos perfiles geoelectricos cruzados con el fin de detectar si existían cavidades bajo la zona donde se iban a situar las zapatas. El resultado [Figura 5] arrojó la presencia de una posible cavidad a 2,70 metros y de un socavamiento bajo dos de las zapatas proyectadas. Ambas estaban rellenas de material arenoso por lo que la señal fue muy tenue. La primera cavidad se relleno con  $10 \text{ m}^3$  de hormigón.

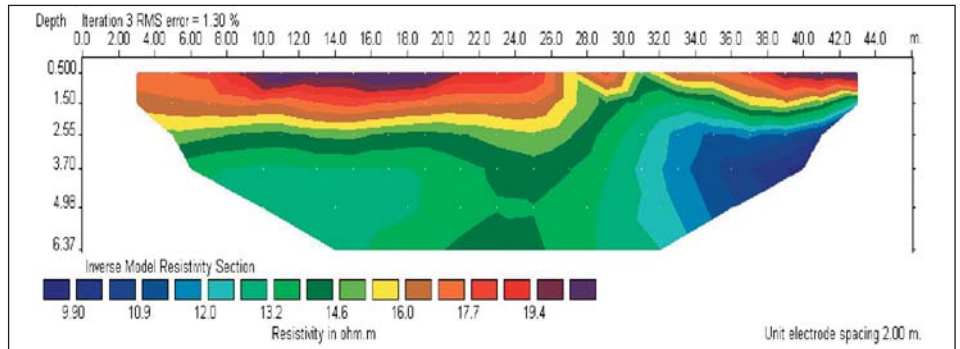
En la localidad conquesa de Honrubia se han producido serios problemas de socavamiento en el firme de la calle travesía de la iglesia. Estos socavones se han desarrollado a favor de antiguas cuevas artificiales excavadas en material arcilloso. Además, durante las lluvias y eventuales roturas de canalizaciones el agua fluye de una cavidad a otra produciendo peores socavamientos que han estado a punto de colapsar uno de los edificios colindantes [Figura 6]. Mediante tomografía eléctrica se ha buscado delimitar la zona de mayor riesgo por cavidades [Figura 7], así como una caracterización rápida de los terrenos. El firme de la calle donde se han llevado a cabo los perfiles esta constituido por hormigón, cuyo espesor y resistencia difiere de una zona a otra de la calle. Previo a la colocación de los electrodos ha sido necesario el taladro de orificios de 12 mm de diámetro y 17 cm de profundidad.



[Figura 6] *Caída de golpeo de un penetrómetro tipo borros por la presencia de una cavidad. Casarrubios del Monte (Toledo).*



[Figura 7] *En la imagen geoeletrica se aprecia el alcance de una de las cavidades rellenas y zona de debilidad donde se ha iniciado el socavamiento del inicio de la calle. También se detecta la presencia de un nivel infrayacente de muy baja resistividad, que se ha asumido como un tramo saturado en agua (conductor de la corriente).*



[Figura 8] *En la localidad de Somosaguas se realizó un perfil geoeletrico encaminado a determinar las variaciones laterales del terreno, principalmente transiciones entre suelos más o menos arenosos-arcillosos y el alcance de la zona limosa superficial.*



Arriba. *auscultación de un socavamiento en el firme y su continuación lateral (Honrubia, Cuenca). Corresponde al perfil de la Figura 7.*

## Consideraciones finales

La geofísica es una poderosa herramienta de trabajo. Puede servir muy bien en las correlaciones laterales donde falta información directa, así como llevar a cabo estudios en donde las técnicas destructivas no son aplicables. Sin embargo su empleo en condiciones que no son las adecuadas, así como la persecución de objetivos no aptos para esa técnica, puede llevar a grandes fracasos. Es por ello que se ha de seleccionar el método geofísico más adecuado en función del objetivo y del ter-

no existente. En este trabajo se ha presentado la aplicación de la técnica geoeletrica con objetivos de cavidades métricas.

## Bibliografía

- *Manual de usuario (inglés): RES2DINIV Rapid 2D Resistivity and IP Inversión.* Geoelectrical Imaging 2D. Geotomo Software. RES2DINV ver 3.54 (2004).

Información:

**RUDNIK INGENIEROS CONSULTORES**  
 Tel.: 606 03 90 74  
 E-mail: info@rudnikconsultores.com  
 Pág. Web: www.rudnikconsultores.com