

La tomografía eléctrica: una herramienta para la detección de huecos mineros (concesión de Arrayanes, Linares-Jaén)

Electrical resistivity tomography: a tool to aid in the detection of mining voids (Arrayanes mine, Linares-Jaén)

J. Martínez-López ⁽¹⁾, J. Rey ⁽²⁾, S. Sandoval ⁽³⁾ y M. Rodríguez ⁽³⁾

⁽¹⁾ Departamento Ingeniería Mecánica y Minera. Escuela Politécnica Superior de Linares, Universidad de Jaén, 23700 Linares (Jaén). jmartine@ujaen.es

⁽²⁾ Departamento de Geología. Escuela Politécnica Superior de Linares, Universidad de Jaén, 23700 Linares (Jaén). jrey@ujaen.es

⁽³⁾ Geofísica Aplicada Consultores, 28250 Torreldones (Madrid). senen@geofisica-aplicada.es; mrodriguez@geofisica-aplicada.es

ABSTRACT

Electrical resistivity tomography is well suited to find and map subsurface cavities because of its ability to detect resistive features and discriminating subtle resistivity variations. The Linares area (Jaén, Spain), where an important mining activity on metallic sulphides ores was developed, has been selected for this study. This activity has produced a large volume of mining voids. Electrical resistivity tomography is a geophysical tool well suited to the detection and mapping of known and unknown mining voids. The technique is capable of discriminating between the developing cavities, where the target is primarily conductive weathered material, and the empty voids comprising resistive air-filled cavities. Such cavities may be water-filled, in which case they are likely to yield conductive anomalies as the water would be significantly more conductive than the surrounding material (unweathered granite in this case). The survey results suggest that electrical resistivity tomography is an ideal geophysical tool to aid in the detection and monitoring of mining voids and other subsurface cavities.

Key words: *electrical resistivity tomography, conductive-resistive anomalies, mining voids, Linares, Arrayanes*

*Geogaceta, 42 (2007), 43-46
ISSN: 0213683X*

Introducción y objetivos

La *Tomografía Eléctrica* es una técnica geofísica empleada en el estudio del subsuelo que consiste en determinar la distribución de un parámetro físico característico del mismo (la resistividad), a partir de un número muy elevado de medidas realizadas desde la superficie del terreno o desde perforaciones. El diferente comportamiento geoelectrico del medio permite obtener perfiles 2D e imágenes 3D de la distribución de resistividades del mismo, por lo que se trata de una de las herramientas de carácter no destructivo más eficaz para el análisis y caracterización de posibles discontinuidades del subsuelo (Sasaki, 1992; Storz *et al.*, 2000). El rango de estudio puede variar desde algunos metros hasta centenares de metros de profundidad. Esta técnica tiene enormes posibilidades de aplicación en diversos medios geológicos y en distintas problemáticas. Así, su uso comienza a ser común en el ámbito del medio ambiente (contaminación de suelos y de acuíferos), la hidrogeología, y la geotecnia, entre otros campos. Mediante el ejemplo que se pre-

senta, se pretende ofrecer una visión de la capacidad resolutoria y de las posibilidades de aplicación de esta técnica en la localización de cavidades.

La presencia de huecos en el subsuelo, bien sean de origen natural como las cavidades kársticas, bien sean antrópicas como las galerías mineras, constituye un hecho determinante en la ordenación del territorio: al proyectar cualquier tipo de construcción, y en especial para la ingeniería civil, es necesario conocer la posible presencia de huecos en profundidad, ya que éstos podrían provocar hundimientos en superficie.

El estudio se ha realizado en el antiguo «distrito metalogénico» de Linares (Sur de España, Provincia de Jaén, Fig. 1 A). Éste se caracterizó por la presencia de yacimientos filonianos de galena (PbS), con cierto contenido en plata. La paragénesis presentaba además otros minerales tales como, blenda (ZnS), calcopirita (CuFeS₂), baritina (BaSO₄), entre otros (Azcárate y Argüelles, 1971; Martínez *et al.*, 2007). La explotación de las mineralizaciones filonianas del batolito de Linares se remonta al siglo VIII a.C., ligada al desarrollo de la ciu-

dad ibera de Cástulo (Gutiérrez-Guzmán, 1999). Esta actividad minera, continuada por cartagineses y romanos, experimentó diversos altibajos a lo largo de su historia y alcanzó su máximo esplendor a finales del siglo XIX, momento en que el distrito minero de Linares llegó a ser el primer productor mundial de plomo. Cuando cesa esta actividad, se estima que en el subsuelo de la comarca existen cientos de kilómetros de galerías y pozos de minas.

La concesión de Arrayanes

De las innumerables concesiones de este distrito minero, hemos seleccionado para este estudio la conocida como la de «Arrayanes» (Fig.1). Por su riqueza en mineral y por su larga historia, es sin lugar a dudas, la más emblemática. Probablemente sea una de las minas más antiguas del distrito minero de Linares puesto que se supone que pudo ya ser explotada por los griegos. Esta concesión se encuentra situada a escasos kilómetros al noreste de Linares (Fig. 1 A). Desde el núcleo urbano, se accede por una carretera antigua propiedad de la mina, conocida como «carretera de Arrayanes». La con-

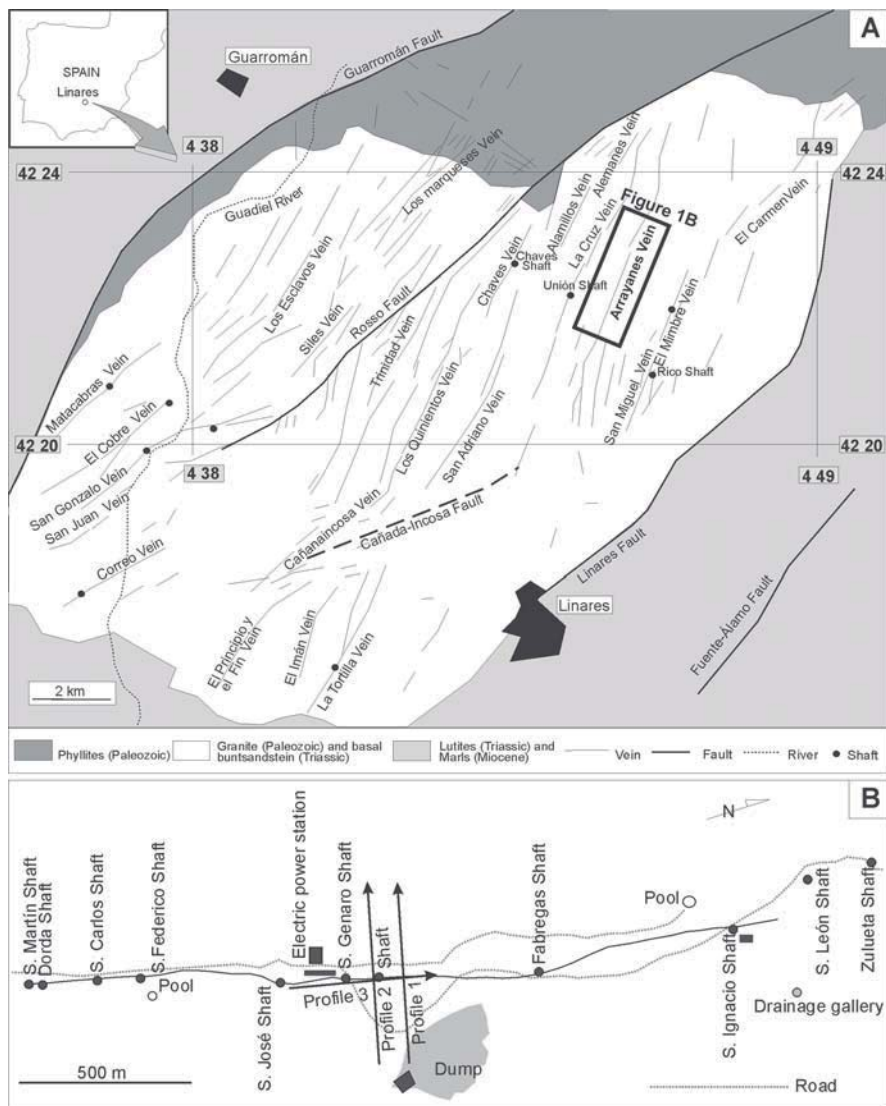


Fig.1.- A.- Mapa esquemático del distrito minero de Linares. B.- Situación de la región estudiada y localización de los tres perfiles analizados.

Fig.1.- A. Schematic map of the Linares mining district. B.- Situation of the study region and location of the three profiles analyzed.

cesión tiene forma rectangular, con 6.687,25 metros de largo por 835,90 metros de ancho. Presenta una orientación N-23°39'E, siguiendo una dirección paralela a los filones. Básicamente, las labores se centraron en cuatro filones, todos ellos subverticales y encajados en granito.

Hasta el año 1869 los sistemas de explotación eran muy primitivos y desorganizados. Su técnica consistía en excavar socavones aprovechando laderas naturales del terreno para el desagüe y acceso a las labores. Concretamente, en un lugar conocido como el Rincón, se realizó uno que ganaba de 35 a 50 m de profundidad, según la topografía. Posteriormente se abrían pozos sobre el filón a distancias variables, pero siempre cortas, que alcanzaban una profundidad de

24 a 32 metros. Los comunicaban por galerías en las que se abrían nuevos pozos de parecida profundidad, pero siempre fuera de la vertical de los anteriores, uniéndolos entre sí también por galerías, y formando macizos de beneficio que disfrutaban con bancos descendentes y ascendentes (Gutiérrez-Guzmán, 1999). A partir de 1869, la llegada de las máquinas de vapor supone una enorme mejora de los sistemas de bombeo, permitiendo una explotación más ordenada y en profundidad del filón. Así, a partir de esas fechas, los planos de labores que se disponen del sector estudiado, marcan huecos a profundidades mayores de 70 m, llegando en esta concesión incluso a los 600 m de profundidad. Por el contrario, nuestro trabajo pretende detectar las primitivas labores mineras (anteriores a

1869), realizadas a profundidades inferiores a los 40 m, de las que hoy no tenemos constancia documental.

Metodología empleada y trabajo realizado

Para la realización del trabajo se ha empleado el método eléctrico de resistividades en su modalidad de tomografía eléctrica. El método se basa en la implantación de electrodos a lo largo de perfiles, con una separación que viene condicionada por el grado de resolución, la profundidad y los objetivos que se pretendan cubrir, de tal modo que, a menor separación mayor resolución y a mayor separación mayor profundidad. Para el caso concreto que nos ocupa, se realizaron distintos ensayos en una campaña piloto con espaciado de 3, 5 y 10 m, para conseguir que, con suficiente resolución, se pudiesen prospectar las antiguas labores superficiales que alcanzaron unos 30-40 m de profundidad.

El equipo de tomografía eléctrica utilizado en este estudio es el modelo RESECS de la marca Deutsche Montan Technologie (DMT). Es un equipo multielectrodo con ordenador integrado capaz de gestionar hasta 960 electrodos. La fuente de energía es de 250 W y 2,5 A, lo que genera impulsos de 880 Vp-p. Ofrece transmisor, receptor y emisor de energía incorporados en el equipo. Entre el resto de características, destacar la presencia de un procesador automático de resistividad aparente y cargabilidad, control de resistividad en tiempo real en 2D y 3D, control de curva de inyección de corriente y voltaje, ajuste de tiempo de inyección, PC integrado y procesador de conmutación integrado.

De las distintas campañas de prospección realizadas, se han seleccionado 3 perfiles en el entorno del pozo de San Genaro, presentando la zona una orografía plana. Los dos primeros perfiles son paralelos entre sí y separados 60 m, y el tercero, perpendicular a las dos anteriores (Fig.1). Los tres se han ejecutado con una configuración Wenner-Schlumberger, con un espaciado entre electrodos de 5 m. Los dos primeros (Perfiles 1 y 2 en la Fig. 2) se extienden a lo largo de 395 m, con 80 electrodos y una orientación N 113° E (perpendiculares al filón principal de la concesión). Por el contrario, el Perfil 3, se extiende 315 m, con 64 electrodos, y coincide con la traza del filón (N23° E).

En la figura 2 se representan los modelos de resistividad eléctrica del terreno, con las profundidades alcanzadas,

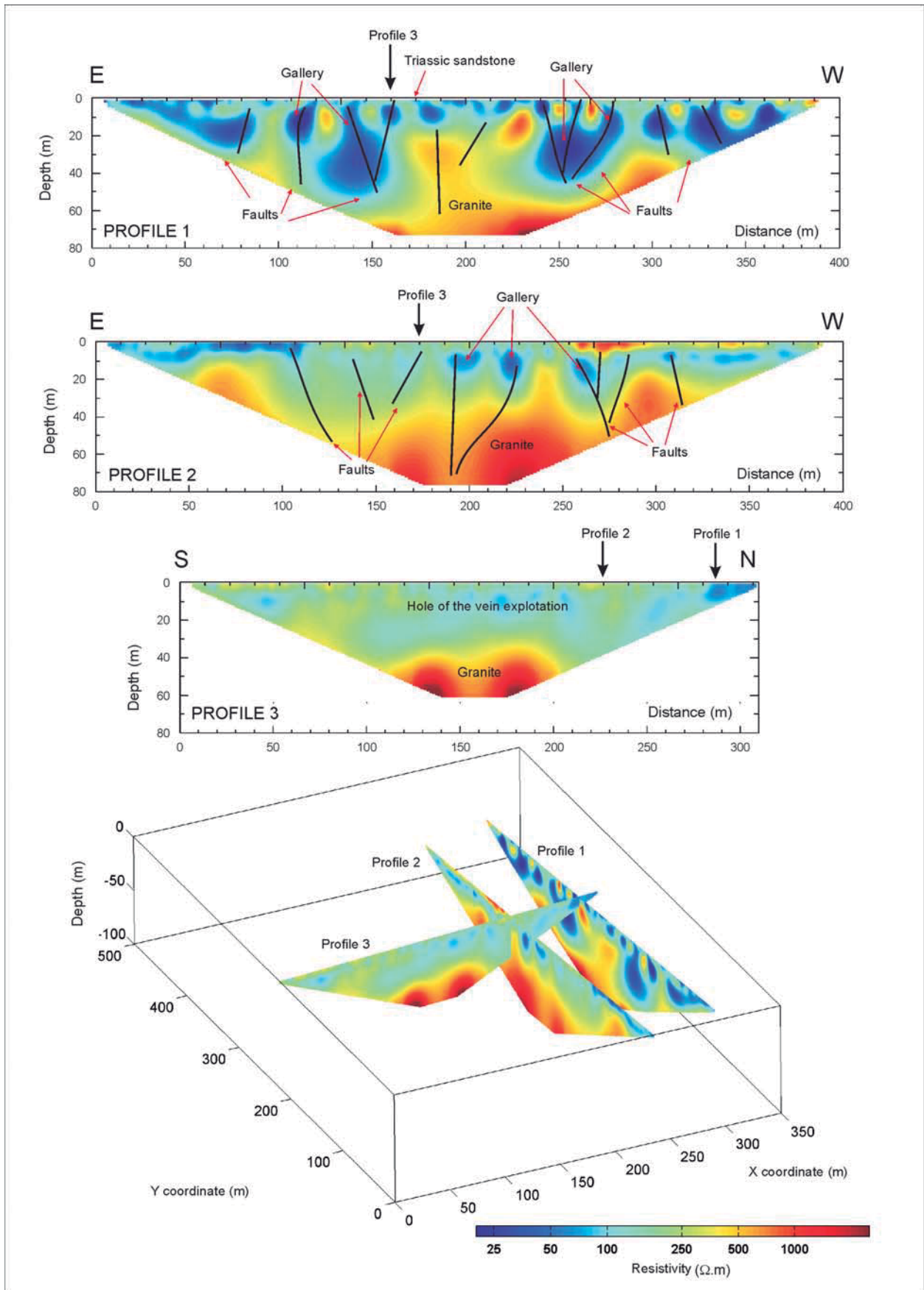


Fig. 2.- Modelos de resistividad eléctrica del terreno obtenidos a partir de la inversión de los datos de campo. La localización de los mismos aparece en la figura 1.

Fig.2.- Electrical resistivity models obtained from the inversion of field data. The location of the profiles is shown in figure 1.

para cada uno de los tres perfiles seleccionados. Los perfiles muestran valores de resistividad representados por colores para una mejor y más fácil observación de las variaciones verticales y horizontales, y se acompañan con una carta de distribución de colores. Esta gama de colores representa los distintos valores de resistividad de las distintas unidades analizadas.

En el Perfil 1 se han tomado 1.256 puntos de medida, alcanzándose una profundidad de investigación de 77 metros (Fig. 2). El Perfil 2 se ha realizado paralelo al anterior y desplazado 60 metros al Oeste. En total se han tomado 1.409 puntos de medida, alcanzándose también una profundidad de investigación de 77 metros (Fig. 2). En ambos perfiles las medidas se han tomado desde el este hacia el oeste. Por último, en el Perfil 3 se han tomado 889 puntos de medida con dirección sur - norte, alcanzando una profundidad de investigación de torno a los 60 m.

Discusión y resultados

Las interpretaciones de los perfiles de tomografía eléctrica se han realizado mediante el Software de interpretación RES2DINV (Loke y Barker, 1996, Loke y Dahlin, 2002) de resistividad y polarización inducida. Este programa de cálculo se basa en el método de mínimos cuadrados con suavizado forzado, modificado con la técnica de optimización Cuasi-Newton. El método de inversión construye un modelo del subsuelo mediante prismas rectangulares y determina los valores de resistividad para cada uno de ellos minimizando la diferencia entre los valores de resistividad aparente observados y calculados (Loke y Barker, 1996, Loke y Dahlin, 2002).

En los dos primeros perfiles geoelectrónicos (Perfil 1 y Perfil 2 en la

Fig. 2), se define una parte superior de unos 3-5 m de espesor con resistividades bajas, que oscilan entre los 50 y los 200 $\Omega \cdot m$, y que se corresponden con la cobertera sedimentaria (areniscas triásicas silicificadas). Bajo estas litologías aparece el zócalo paleozoico, constituido por granitos, donde se alcanzan las mayores resistividades (entre 500 y 1.200 $\Omega \cdot m$). La parte superior del granito, en contacto con las facies triásicas, ofrece un importante grado de alteración, lo que se refleja en una bajada de las resistividades (entre 200 y 500 $\Omega \cdot m$). Además, los valores de resistividad son muy variables en el seno de esta masa granítica, lo que se asocia a dos causas. Por un lado, en ambos perfiles se detectan bajadas en los valores de la resistividad que se relacionan con la fracturación del granito, fracturación directamente asociada con las antiguas mineralizaciones filonianas del sector. Por otro lado, se observan importantes bajadas de resistividad (valores entre 10-20 $\Omega \cdot m$) que se relacionan a las primitivas galerías de explotación del filón de Arrayanes. Estos huecos están actualmente rellenos de material fino, poco compactado y generalmente saturado en agua, lo que justifica la conductividad que ofrecen estas galerías. En cada uno de los perfiles se detectan varias galerías, a distintas profundidades, entre los 15 y 25 m.

El Perfil 3 se ha realizado perpendicular a los anteriores y coincidiendo con la antigua traza del filón. Esto justifica la mayor profundidad que hay que alcanzar para llegar al granito sin alterar (unos 40 m). Los primeros 35 m ofrecen valores de resistividad equivalentes a las galerías mineras anteriormente comentadas. Esto se debe a que, una vez explotado el filón, la caja se relleno con materiales sueltos equivalentes a los de las galerías detectadas.

Conclusiones

La tomografía eléctrica es una técnica de prospección geofísica que permite detectar oquedades en el subsuelo. En el presente trabajo se describe un caso en el que se aplica este método de prospección a la detección de cavidades asociadas a las antiguas labores mineras del filón de Arrayanes (distrito minero de Linares-Jaén). Gracias a la tomografía eléctrica se puede precisar el tamaño, la profundidad e incluso el tipo de relleno de las mismas. Así, cuando la cavidad está vacía, aparece una anomalía de fuerte gradiente y unos valores de resistividad muy altos, debido a que el aire que rellena el hueco es dieléctrico. En nuestro estudio, las cavidades aparecen generalmente rellenas de material fino, poco compactado, y generalmente saturado en agua. En este caso, la resistencia eléctrica es menor, ya que tanto el agua como la arcilla son buenos conductores de la corriente eléctrica. En esta situación, la tomografía eléctrica mostrará una anomalía de fuerte gradiente y bajo valor de resistividad.

Referencias

- Azcárate, J.E. y Argüelles, A. (1971). En: *Congreso Hispano-Luso-Americano de Geología Económica*. Madrid, Tomo I, Sección 4, 17-32.
- Gutiérrez-Guzmán, J. (1999). *Colegio Oficial de Ingenieros Técnicos de Minas de Linares*, 667 p.
- Loke, M. H. y Bakrer, R.D. (1996). *Geophysical Prospecting*, 44, 131-152.
- Loke, M. H. y Dahlin, T. (2002). *Journal of Applied Geophysics*, 49, 149-162.
- Martínez, J., Llamas, J.F., De Miguel, E., Rey, J. e Hidalgo, M.C. (2007). *The Journal of Geochemical Exploration*, 92, 73-82.
- Sasaki, Y. (1992). *Geophysical Prospecting*, 54, 453-464.
- Storz, H., Storz, W. y Jacobs, F. (2000). *Geophysical Prospecting*, 48, 455-471.