

Geofísica en una Balsa de Lodos de San Quintín Este

D. Gómez Ortiz y T. Martín Crespo

Las **balsas mineras de lodos** constituyen lugares de acumulación de los materiales derivados de los procesos de metalurgia extractiva de las menas metálicas. El tratamiento clásico de los sulfuros de Cu, Pb, o Zn, pasa por su molienda a fracción fina, y posterior tratamiento en una planta de flotación donde las partículas sin interés económico o no deseables (p.ej. pirita, arsenopirita) pasan a formar parte de la cola del proceso, que es transportada como un lodo acuoso a la balsa de lodos en la que decanta. Así, una balsa de lodos abandonada está constituida por materiales de granulometría fina-media que contienen, entre otras especies minerales, sulfuros de escaso interés económico que fueron en su día rechazados en la planta de flotación, además de una pequeña proporción de partículas de la mena metálica que no llegaron a ser aprovechadas a causa de una tecnología extractiva deficiente o mal desarrollada. Por ello, las balsas mineras constituyen un problema ambiental, al representar una acumulación y subsiguiente fuente de emisión de metales pesados y formación de drenaje ácido por oxidación de los sulfuros. Los materiales de las balsas forman una pila de niveles sedimentarios de espesor no superior al centimétrico, diferenciados entre sí por pequeñas variaciones granulométricas y/o composicionales.

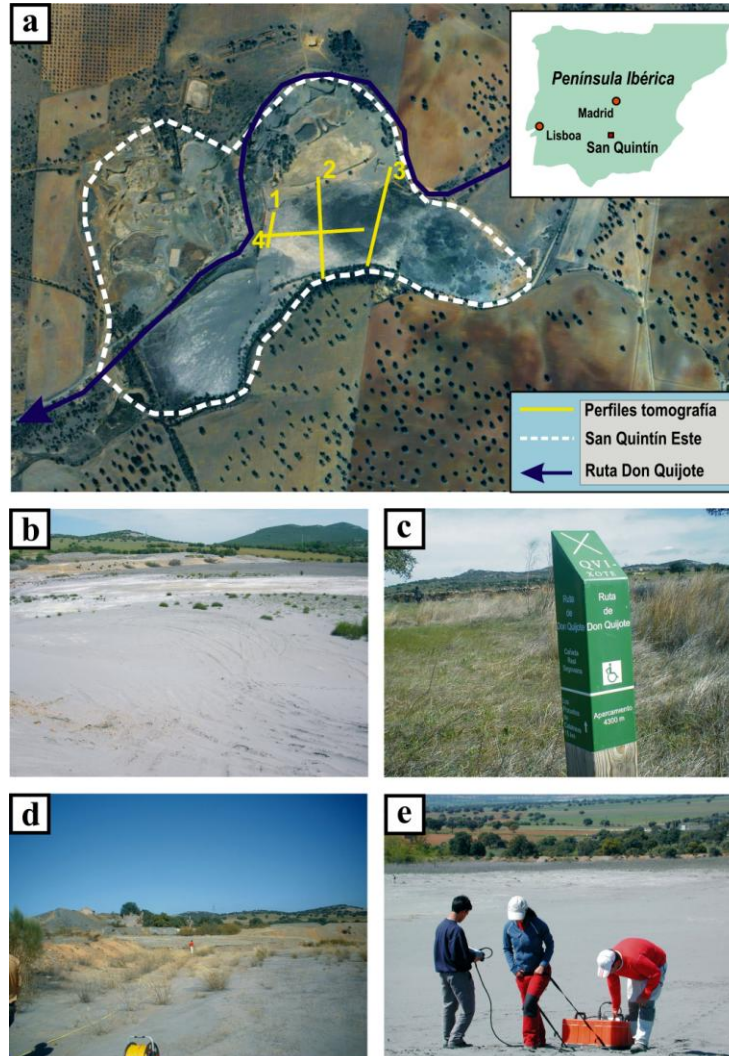
Se presentan aquí los resultados de la caracterización geofísica de una balsa de residuos mineros abandonada del **Grupo Minero de San Quintín**, situado al norte de Puertollano, en la provincia de Ciudad Real. Esta balsa forma parte de la llamada **Ruta de Don Quijote**, una serie de itinerarios turísticos que el gobierno regional trazó en el año 2005 con motivo del IV Centenario de la publicación de "El ingenioso hidalgo Don Quijote de La Mancha". Esta ruta conforma el corredor verde, sostenible y ecoturístico más largo de toda Europa, y aspira a ser catalogada como Patrimonio de la Humanidad por sus valores culturales y medioambientales. En marzo de 2007 fue declarada **Itinerario Cultural del Consejo de Europa**. Este hecho convierte a este grupo minero en una zona turística transitada, por lo que su caracterización resulta imprescindible para determinar su potencial impacto ambiental.

Los objetivos planteados en este trabajo serían: determinar la distribución vertical y horizontal de los diferentes materiales, establecer el límite y la morfología del vaso de la balsa, identificar la presencia de agua subsuperficial, flujos internos y filtraciones en el vaso de la balsa, y determinar si se están produciendo flujos de drenaje ácido desde la balsa.

Métodos Geofísicos

Para la caracterización geofísica de la balsa se emplearon dos técnicas geofísicas someras y no destructivas: **tomografía eléctrica** y **georadar**. La tomografía eléctrica utiliza la medida de las resistividades de los materiales geológicos subsuperficiales para determinar su espesor y profundidad. Los valores de resistividad obtenidos se interpretaron mediante un software específico que permite determinar la geometría y los espesores de las unidades con diferentes resistividades mediante un proceso iterativo de inversión. Este método de prospección es especialmente útil en la determinación de agua en el subsuelo, debido al carácter poco resistivo de la misma cuando su contenido en iones es moderado o alto, así como en la detección de plumas contaminantes. En el caso de las balsas mineras, existe un buen contraste de resistividad entre los materiales que constituyen el relleno de la balsa y los que definen la base de la misma, lo que permite obtener buenos resultados acerca de la geometría y espesores del relleno. La tomografía eléctrica se ha empleado con buenos resultados en el estudio de balsas mineras de los distritos de Riotinto y de Cartagena-La Unión. En este trabajo se utilizó un equipo

de tomografía eléctrica Syscal Junior Switch 48, con una configuración Wenner-Schlumberger que presenta una buena relación entre resolución, tanto horizontal como vertical, y profundidad. Se realizaron 4 perfiles con longitudes de 94 y 235 m, y un espaciado entre electrodos de 2 y 5 m respectivamente. La profundidad máxima de penetración obtenida fue de 25 m. El software empleado en la obtención de los modelos de resistividades fue el RES2DINV.



Localización de los perfiles de tomografía eléctrica y los sondeos de muestreo en la balsa de lodos; b) vista general de la balsa de lodos; c) hito del tramo de la Ruta de Don Quijote que transcurre por la mina de San Quintín; d) realización del perfil 1 de tomografía eléctrica; e) realización de un perfil de georadar.

Por otra parte, la técnica de georadar se basa en la medida de la respuesta de los distintos materiales a las ondas electromagnéticas de alta frecuencia. Una antena situada sobre el terreno emite estas ondas en forma de sucesivos pulsos que se propagan, se reflejan y/o se difractan en las superficies donde se produce un cambio en la permitividad dieléctrica. Los datos de velocidad de estas ondas permiten posteriormente estimar profundidades a partir de la transformación de los tiempos de respuesta medidos. Las reflexiones de las ondas electromagnéticas se producen por cambios en las propiedades eléctricas de las rocas, por variaciones en el contenido en agua y por cambios en la densidad de las rocas por las superficies y discontinuidades estratigráficas. También se producen cambios en la velocidad de las ondas cuando atraviesan huecos del terreno. Por tanto, el éxito de esta técnica dependerá en gran medida de si las superficies de interés están asociadas con un contraste dieléctrico lo suficientemente importante como para producir fenómenos de reflexión. La profundidad de penetración y la resolución de los datos están en función de la longitud de onda y de la constante

dieléctrica, parámetros controlados fundamentalmente por el contenido en agua de los materiales. La resolución se incrementa con la frecuencia de emisión, pero la profundidad disminuye. Esta técnica se utiliza para la localización de contactos litológicos, la localización de fracturas, estudios de suelos, glaciología y en la estimación de profundidades de aguas subterráneas. En este trabajo se utilizó un equipo SIR-3000 de GSSI con una antena apantallada de 200 Mhz, obteniéndose perfiles con una resolución horizontal de 0,10 m y una ventana de tiempos dobles de 160 ns.

Resultados

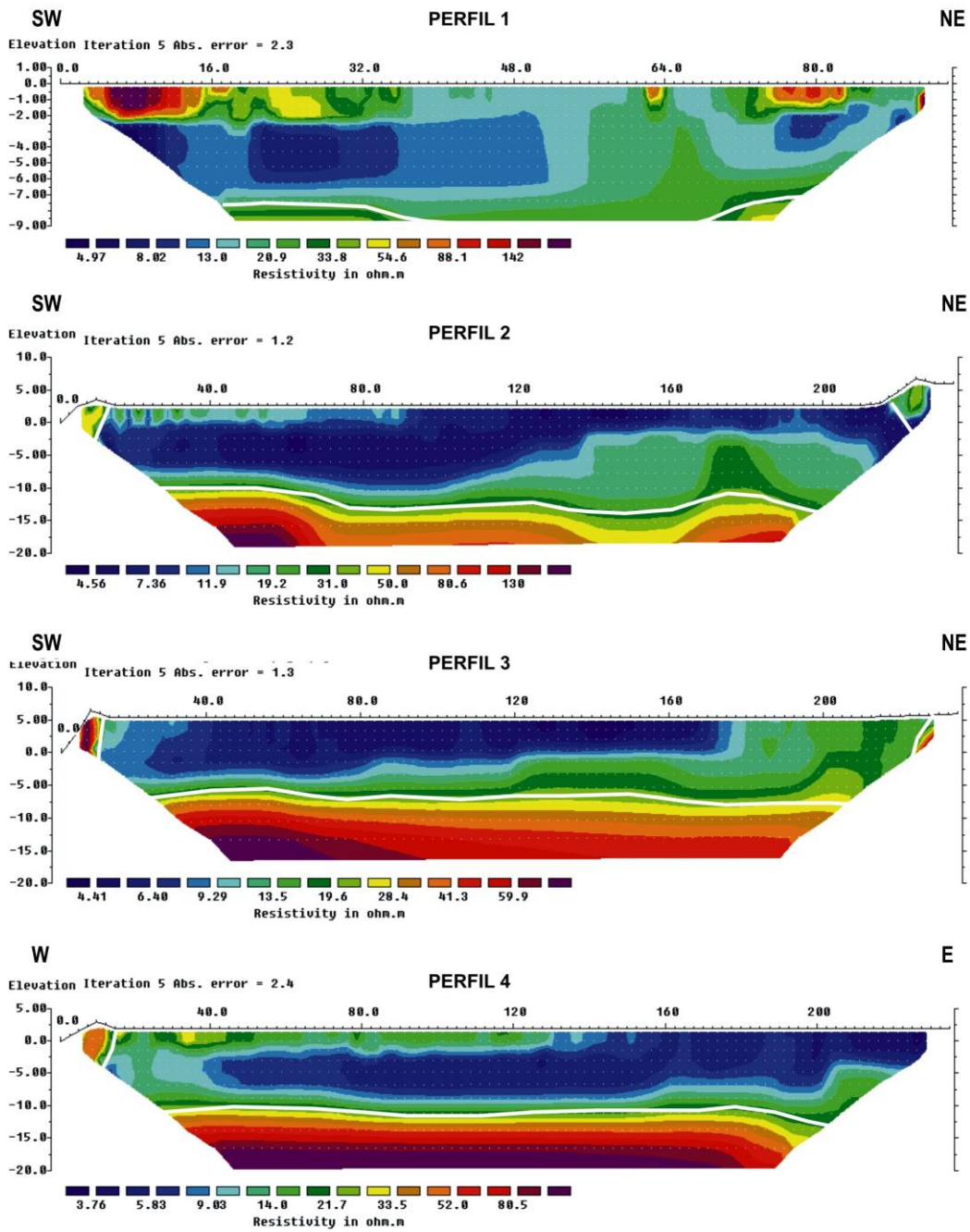
De los cuatro perfiles de tomografía eléctrica realizados, tres de ellos fueron transversales a la balsa y con dirección NE-SW, mientras que el otro es longitudinal a la misma y orientación E-W. En la segunda figura se muestran las secciones de resistividad obtenidas para cada uno de ellos tras el proceso de inversión.

El perfil 1 tiene 94 m de longitud y es paralelo y muy próximo al dique de la balsa. Se diferencian tres unidades: una superficial de resistividades altas (de 80 a 130 ohm.m) que aparece fundamentalmente en la primera mitad del perfil y se extiende hasta los 2 m de profundidad, una intermedia de menor resistividad (5 a 20 ohm.m) que se encuentran en todo el perfil entre los 2 y 7 m de profundidad, y otra inferior con materiales más resistivos (20 a 80 ohm.m) que aparecen en todo el perfil a profundidades mayores de 7 m. Las dos primeras unidades se corresponden a los materiales arenoso-arcillosos que constituyen el relleno de la balsa, siendo los más superficiales y de mayor resistividad zonas con menor contenido en agua. La tercera unidad, de mayor resistividad, se corresponde a los materiales metamórficos que constituyen la base de la balsa.

El perfil 2 tiene 235 m de longitud y cruza transversalmente la balsa de lodos apreciándose los diques en ambos extremos. En ambos extremos de la superficie del perfil aparecen dos zonas de resistividad entre 10 y 45 ohm.m que corresponden con los materiales de los diques. En general se distinguen dos unidades que aparecen a lo largo de todo el perfil, una superior de valores de resistividad bajos, entre 5 y 20 ohm.m, que corresponde a los materiales del relleno de la balsa, y otra inferior, de valores de resistividad entre 20 a 145 ohm.m, que constituyen los materiales metamórficos del sustrato. La base de la balsa presenta algunos escalones y alcanza una profundidad máxima de unos 12 m.

El perfil 3 es de igual longitud y orientación que el 2, pero se encuentra situado en la parte central de la balsa. La estructura obtenida es similar al perfil 2, con dos grandes unidades que representan el relleno de la balsa (unidad superficial con valores de resistividad entre 5 y 20 ohm.m) y el sustrato metamórfico (unidad inferior con valores de resistividad entre 20 y 80 ohm.m), con una zona discreta de alta resistividad en el inicio del perfil (> 60 ohm.m) que corresponde con los materiales del dique. La base de la balsa es más horizontal que en el perfil 2 y se encuentra a la misma profundidad, unos 12 m.

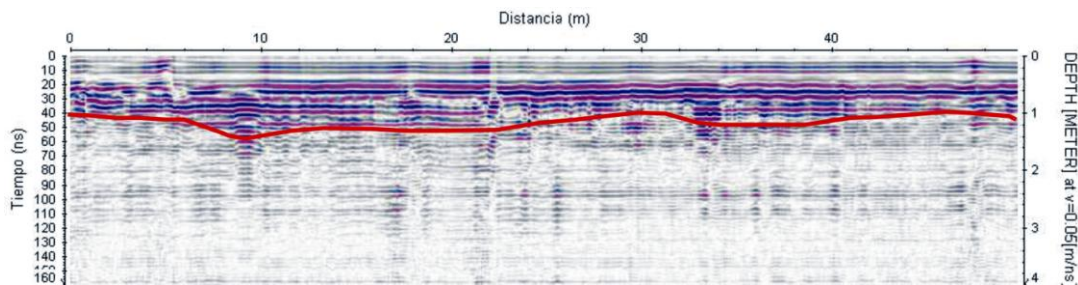
El perfil 4 es tiene una longitud de 235 m y transversal a los anteriores, con el fin de determinar la geometría de la base de la balsa longitudinalmente a la misma. Los resultados son muy semejantes al perfil 1: una primera unidad superficial hasta unos 2 m de profundidad y que se extiende solo en la primera mitad del perfil (resistividad entre 15 y 30 ohm.m), una segunda unidad que se extiende a lo largo de todo el perfil y que presenta los valores de resistividad más bajos (entre 5 y 15 ohm.m) y una tercera unidad, muy subhorizontal, que corresponde al sustrato metamórfico de la balsa y que se encuentra a una profundidad máxima de 12-13 m (resistividad 30 a 100 ohm.m).



Secciones de resistividad obtenidas para los cuatro perfiles de tomografía eléctrica realizados.

Respecto a la prospección con georadar, se realizaron 12 perfiles en la zona del perfil 1 de tomografía eléctrica con el fin de obtener más detalle de la parte superficial del relleno de lodos. Una vez llevada a cabo la calibración, se obtuvo un valor de propagación de las ondas electromagnéticas de 0,05 m/ns, lo que supone una profundidad máxima de penetración de 4 m. Esta baja velocidad de propagación se

debe a los bajos valores de resistividad de los materiales de la balsa, lo que se traduce en poca profundidad de penetración y en una importante atenuación de la señal. Es por ello que el método aporta poca información sobre la estructura interna de la balsa, resultando de menor utilidad que la tomografía eléctrica. Como ejemplo, se muestra uno de los radargramas obtenidos. Se diferencian dos unidades: la primera y más superficial, de 0,5 a 1 m de profundidad, y la segunda desde el límite de la anterior hasta los 4 m, atenuándose la señal de manera importante. Esto se ha interpretado como un aumento en el contenido en agua a partir del primer metro de profundidad, disminuyendo por tanto la energía de propagación de las ondas electromagnéticas. Así, el segundo nivel descrito estará formado por materiales porosos con alto contenido en agua y el superficial por materiales más secos.



Perfil de georadar donde se muestra el límite entre las dos unidades identificadas.

Conclusiones

El estudio geofísico ha permitido conocer en detalle la estructura interna de la balsa y sus propiedades físicas, lo que resulta imprescindible a la hora de evaluar su riesgo potencial de contaminación y definir las posibles medidas de restauración a desarrollar en un futuro. Se ha obtenido un espesor máximo de relleno de lodos en torno a 12 m. Internamente, se han diferenciaron dos unidades de relleno, una superficial discontinua, que corresponde a materiales con una menor cantidad de agua intersticial, y otra inferior, de mayor espesor y común en todos los perfiles estudiados, que corresponde a los materiales de relleno de la balsa saturados en agua. Debido a la fuerte atenuación de la señal del georadar producida en estos materiales, la técnica de la tomografía eléctrica ha resultado de mayor utilidad.

Para saber más:

- Davis, J.L., Annan, A.P. 1989. Ground-penetrating radar for high-resolution mapping of soil and rock stratigraphy. *Geophysical Prospecting*, 37: 531-551.
- Gómez-Ortiz, D., Martín-Velázquez, S., Martín-Crespo, T., de Ignacio-SanJosé, C., Lillo-Ramos, F.J. 2010. Application of Electrical Resistivity Tomography (ERT) to the environmental characterization of abandoned massive sulphide mine ponds (Iberia Pyrite belt, SW Spain). *Near Surface Geophysics*, 8: 65-74.
- Martín Crespo, T., Gómez Ortiz, D., Martín Velázquez, S. 2008. Valor ecoturístico de la mina de San Quintín, Ruta de Don Quijote, Castilla-La Mancha. En: Congreso Nacional de Medio Ambiente 9, Grupo de trabajo "Rehabilitación de Espacios Mineros".
- Martín-Crespo, T., de Ignacio, C., Gómez-Ortiz, D., Martín-Velázquez, S., Lillo-Ramos, F.J. 2010. Monitoring study of the mine pond reclamation of Mina Concepción, Iberian Pyrite Belt (Spain). *Environmental Earth Sciences*. 59: 1275-1284.
- Martínez-Pagán, P., Faz-Cano, A., Aracil, E., Arocena, J.M. 2009. Electrical resistivity tomography revealed the spatial chemical properties of mine tailings ponds in the Sierra Minera (SE Spain). *Journal of Environmental & Engineering Geophysics*, 14: 63-76.
- Reynolds, J.M. 1997. *An Introduction to Applied and Environmental Geophysics*. Wiley, Chichester, 796 p.
- Sasaki, Y. 1992. Resolution of resistivity tomography inferred from numerical simulation. *Geophysical Prospecting* 40: 453-464.
- Telford, W.M., Geldart, L.P., Sheriff, R.E. 1990. *Applied Geophysics*. Cambridge University Press, 770 p.

Volver al Documento Principal