

# El georrádar como técnica de diagnóstico de presas mineras abandonadas. El distrito de Linares (Jaén, España)

*The ground penetrating radar (GPR) as a tool for characterizing abandoned mining dams. The Linares district (Jaén, Spain)*

Julián Martínez<sup>1</sup>, Javier Rey<sup>2</sup>, Mari Carmen Hidalgo<sup>2</sup> y Juan Antonio Luque<sup>3</sup>

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

<sup>2</sup> Departamento de Geología. Escuela Politécnica Superior de Linares, Universidad de Jaén, 23700 Linares (Jaén). jrey@ujaen.es, chidalgo@ujaen.es

<sup>3</sup> IGME. Urb. Alcázar del Genil 4, 18006 Granada, España. ja.luque@igme.es

## ABSTRACT

In Linares (Jaen), there is a history of a large amount of mining activity associated to a vein network of metallic sulphurs. These ancient mining operations have generated large accumulations of mine wastes without any prior corrective action. In this work, two mining impoundments have been selected (La Cañada I y La Mejor 1<sup>a</sup>-2<sup>a</sup>). The internal characterization of these structures was performed with electromagnetic sensing techniques, specifically with Ground Penetrating Radar (GPR), using antennas of 100 and 250 MHz. The generated profiles have allowed the identification of the internal morphology of the mining dams: cross stratifications associated to the lateral growth of the dams have been observed, as well as several vertical sets corresponding to different stages in the historical development of the dam. In addition, the contact of the mining wastes with the substratum has been detected in the dam with lower thickness (2 m).

**Key-words:** Mining dam, ground penetrating radar (GPR), Linares, Spain.

## RESUMEN

En Linares (Jaén) existió una gran actividad minera asociada a un cortejo filoniano de sulfuros metálicos. Estas antiguas labores mineras generaron grandes volúmenes de residuos acumulados sin ningún tipo de actuación correctora previa. En este trabajo se han seleccionado dos presas mineras de finos de lavadero (La Cañada I y La Mejor 1<sup>a</sup>-2<sup>a</sup>). La caracterización interna de estas estructuras se ha realizado mediante técnicas de prospección electromagnética, en concreto, con georrádar (GPR), utilizando antenas de 100 y 250 MHz. Los perfiles realizados han permitido identificar la morfología interna de estas presas: se observan estratificaciones cruzadas que se asocian al crecimiento centrípeto de las mismas, así como distintos cuerpos en la vertical que corresponderían a distintas etapas históricas en su desarrollo. Además, en una de ellas que ofrece escasa potencia (2 m), en la parte inferior se detecta el contacto con el sustrato triásico.

**Palabras clave:** Presas mineras, georrádar, Linares, España.

Geogaceta, 55 (2014), 63-66.  
ISSN (versión impresa): 0213-683X  
ISSN (Internet): 2173-6545

Fecha de recepción: 28 de enero de 2013  
Fecha de revisión: 25 de abril de 2013  
Fecha de aceptación: 29 de noviembre de 2013

## Introducción

El distrito metalogénico de Linares-La Carolina (provincia de Jaén, Fig. 1) se caracteriza por la presencia de yacimientos filonianos de galena (PbS), con cierto contenido en plata (Azcárate, 1977). La abundancia de estas sustancias permitió el desarrollo de una importante minería subterránea durante siglos, cuya actividad produjo gran cantidad de estériles, que se iban depositando en la proximidad de las labores de explotación (Contreras y Dueñas, 2010). De forma paralela, se desarrolló una industria mineralúrgica, con la creación de numerosos lavaderos gravimétricos y de flotación. Esta actividad industrial generaba estériles, generalmente con alto contenido

en metales pesados (Martínez et al., 2008), que se depositaron en escombreras y presas situadas en el entorno de las plantas de concentración (Contreras y Dueñas, 2010).

En un trabajo anterior, mediante tomografía eléctrica (Martínez *et al.*, 2012), se realizó la caracterización interna de estas presas mineras. Ello permitió identificar la morfología de las estructuras, zonas de fracturas, zonas de recarga-descarga, así como la identificación del contacto del residuo con el sustrato donde se deposita. La técnica puso de manifiesto la ausencia de medidas de impermeabilización del terreno en las zonas de vertido, lo que justifica el alto riesgo de contaminación de los suelos, las aguas superficiales y subterráneas. En esta ocasión, pretendemos realizar un diagnós-

tico de más detalle, para lo que se utilizan técnicas de prospección electromagnéticas, en concreto, el georrádar.

## Contexto geológico

Geológicamente se diferencian dos grandes conjuntos de materiales: los correspondientes al zócalo paleozoico y los que integran la cobertera sedimentaria posthercínica. El zócalo está constituido por rocas metamórficas (filitas con intercalaciones de cuarcitas, predominantemente) intensamente replegadas durante la orogenia hercínica y afectadas por una intrusión granítica (Azcárate, 1977).

La cobertera posthercínica presenta una geometría subhorizontal y está integrada



Fig. 1.- Situación geográfica de sector estudiado.

Fig. 1.- Location of the study region.

alternan con lutitas. El tramo superior, con una potencia de aproximadamente 50-70 m, se caracteriza por el predominio lutítico. Los depósitos del Mioceno están constituidos sobre todo por margas. Generalmente hacia la base aparecen niveles de areniscas, limos y/o brechas. Los materiales cuaternarios se reducen prácticamente a los aluviones relacionados con los actuales cursos de agua.

### Materiales y métodos

*Descripción de los emplazamientos estudiados:* En este trabajo se han seleccionado dos presas mineras de finos de lavadero (La Cañada I y La Mejor 1ª-2ª; Fig 2A y Fig. 2B respectivamente), generadas con el material de rechazo (colas) en el proceso de concentración de mineral de galena mediante método de flotación. Para los dos casos, los filones encajaban en granito, lo que justifica que básicamente el residuo sea de naturaleza granítica. Durante la etapa de actividad minera, para ninguna de las dos zonas de vertido se realizaron tareas previas de impermeabilización (Martínez *et al.*, 2012).

por materiales triásicos, miocenos y cuaternarios. Los materiales del Triásico, predominantes en el sector, presentan

facies detríticas rojas, con un tramo inferior de 10-20 m de potencia e integrado por niveles de areniscas o conglomerados que

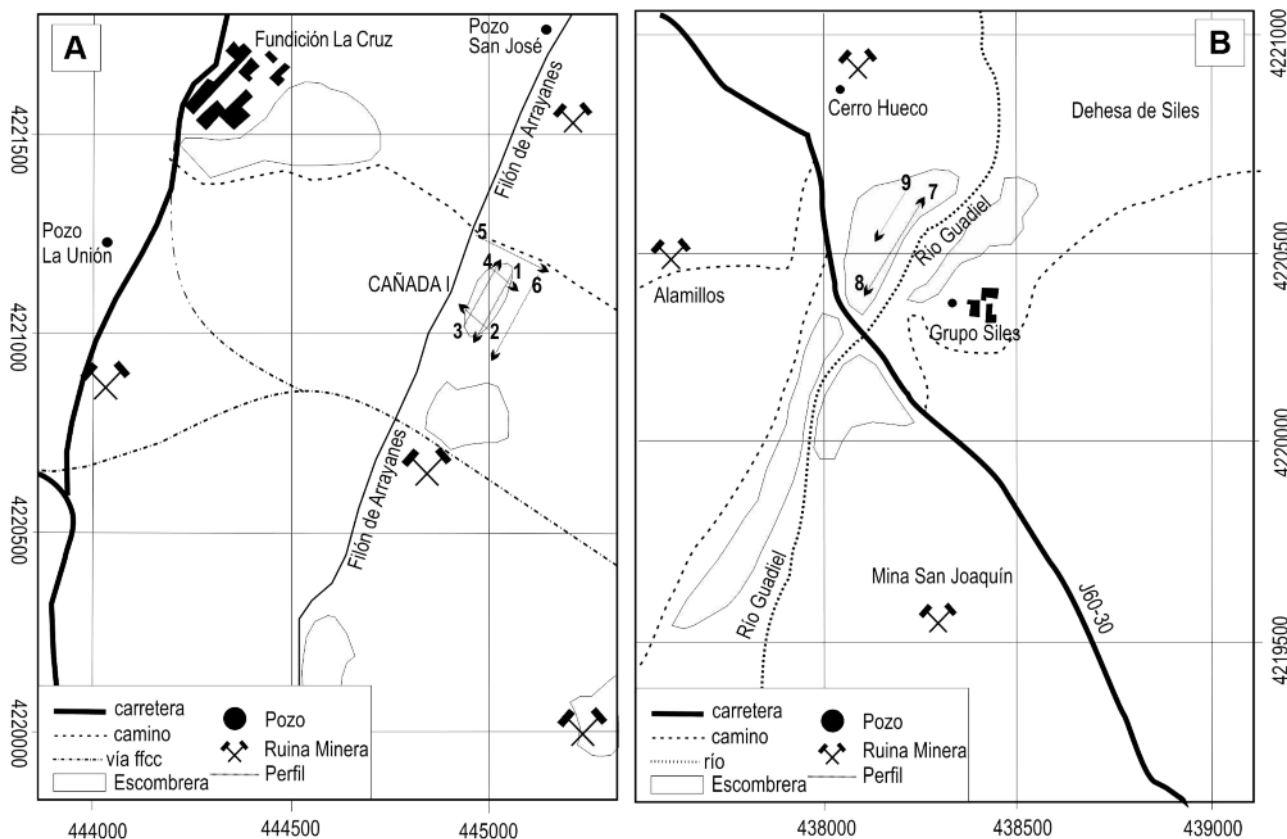


Fig. 2.- Localización de los radargramas realizados (1-9). A) Afloramiento de La Mejor 1ª-2ª. B) Afloramiento de La Cañada I.

Fig. 2.- Radargrames location (1-9). A) La Mejor 1ª-2ª outcrop. B) La Cañada I outcrop.



Sobre materiales lutíticos del Triásico, ambas estructuras fueron construidas "en valle" a partir de un pequeño dique de materiales sueltos, por recrecimiento aguas arriba. El sistema de vertido era mediante bombeo, siendo el punto de descarga una tubería perimetral que se iba desplazando conforme se producía el crecimiento centrí-

peto. El sistema de drenaje era mediante chimenea centrada, estructura que todavía se conserva.

La presa conocida como La Cañada I tiene unas dimensiones de 200 x 100 x 15 m, un volumen de 300.000 m<sup>3</sup> de residuos y está asociada al filón conocido como Arrayanes (Fig. 2A). La presa La Mejor 1<sup>a</sup>-2<sup>a</sup>, de

150 x 80 x 3 m, está asociada a la explotación y concentración de los filones San Gonzalo y La Juanita (prolongación del Siles), San Juan y El Cobre (Fig. 2B).

*Descripción del método geofísico utilizado:* Como método de trabajo se ha usado el Georradar o método GPR

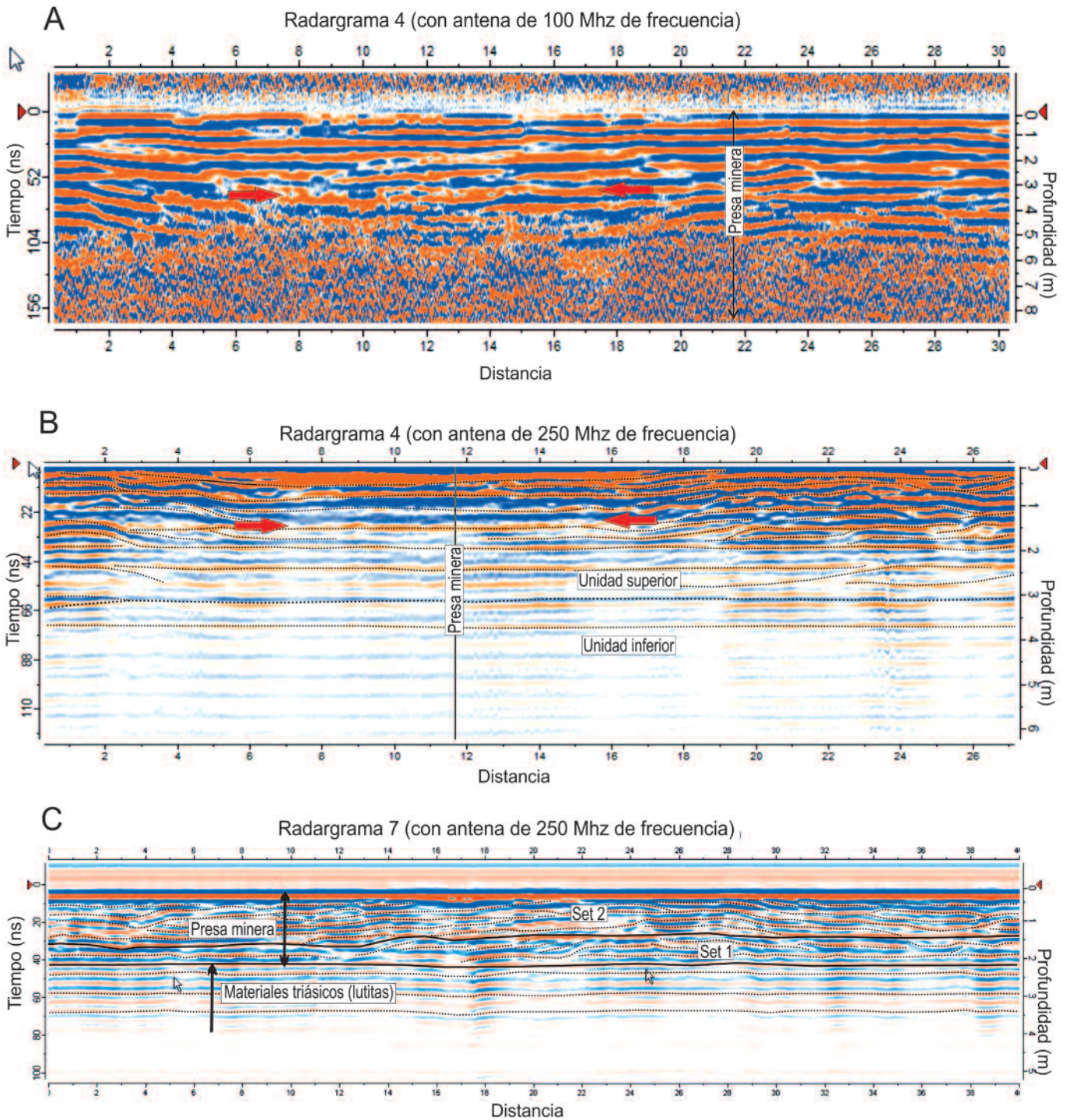


Fig. 3.- Detalles de partes de los radargramas 4 y 7, utilizando antenas de 100 y 250 MHz de frecuencia. La posición de cada perfil aparece en la Fig. 2.  
 Fig. 3.- Details of the 4 and 7 GPR profiles using 100 and 250 MHz antenna frequencies. The position of the profiles is shown in Fig. 2.

(*Ground Penetrating Radar*). Se trata de una técnica de investigación geofísica no destructiva que se basa en la emisión de impulsos electromagnéticos de muy corta duración (nanosegundos) en la banda de frecuencias entre 100 MHz - 1 GHz. Los cambios en las propiedades del subsuelo condicionan que parte de los impulsos generados por la antena emisora puedan reflejarse. El equipo dispone de una antena receptora que detecta estas reflexiones, generando una serie de registros espacio-tiempo. La profundidad de penetración y la resolución dependerán de las propiedades eléctricas-magnéticas de los materiales atravesados y de la antena utilizada. Así, la propagación de la onda en el subsuelo disminuye al aumentar la conductividad del terreno o al aumentar la frecuencia de la señal transmitida. Para un mismo perfil, si se emplean antenas de mayor frecuencia se obtiene más resolución y menor profundidad de penetración, y a la inversa al disminuir la frecuencia (Davis y Annan, 1989).

El equipo utilizado para realizar estos estudios ha sido un sistema RAMAC/GPR modelo Pro-Ex de la casa MALA GEOSCIENCE. Se han realizado seis perfiles en La Cañada I (Fig. 2A) y 3 en La Mejor 1<sup>a</sup>-2<sup>a</sup> (Fig. 2b). En todos los casos, con antenas apantalladas de 100 y 250 MHz. El filtrado e interpretación de la señal se ha llevado a cabo gracias al programa *RAMAC Ground-Vision*.

Tal como proponen otros autores (Neal, 2004) se han utilizado distintas herramientas de procesamiento. Así, para ampliar la señal se empleó un filtro de control automático de ganancia (*Automatic Gain Control*), con una ventana temporal de 60 ns y un factor de escala de 5500. Para realzar la señal también se utilizó ganancia temporal (*Time Varying Gain*), desde datos temporales de 60 ns, con un factor lineal de 5 y un factor exponencial de 10. Para eliminar de los radargramas los ruidos de bajas y altas frecuencias, se han utilizado filtros temporales. En concreto, se utilizó un filtro Pasa Banda (*Band Pass*) para frecuencias superiores a 500 MHz e inferiores a 50 MHz y el filtro *DC Removal*, a partir de la traza 70.

## Resultados y discusión

**LA CAÑADA I:** En primer lugar, se realizaron 6 perfiles con la antena de 100 MHz, tanto longitudinales como transversales a la estructura (ver Fig. 2A). En la presa de finos se detectaron dos unidades: la inferior, por debajo de los 4 m de profundidad, ofrece una señal muy atenuada. La unidad superior ofrece una señal mejor (Fig. 3A). La rápida atenuación de la señal con la profundidad se relacionaría con la naturaleza de los finos acumulados. Para centrar el estudio en el cuerpo superficial se repitió el trabajo de campo con la antena de 250 MHz, capaz de llegar a los 5 m de profundidad pero con mucha más resolución.

En esta unidad superior, con la antena de 250 MHz, se observan montículos en la parte periférica de la presa, desde los cuales existen unas estratificaciones cruzadas hacia el centro de la misma (Fig. 3B). Este crecimiento centrípeto de la estructura estaría justificado por el modelo de construcción de la misma: los lodos se vertían desde una canaleta periférica y el drenaje se realizaba en la parte central.

**LA MEJOR 1<sup>a</sup>-2<sup>a</sup>:** También en este sector, en los tres perfiles realizados con la antena de 100 MHz, se detectaron dos unidades: la inferior, por debajo de los 2 m, correspondería al sustrato triásico (lo que se puede confirmar en las observaciones de campo). A partir de los 3 m de profundidad la señal aparece muy atenuada, lo que se relaciona con la posición del nivel freático. La unidad superior, de unos 2 m de potencia correspondería a la presa minera.

Con la antena de 250 MHz es posible observar una disposición subhorizontal para los materiales triásicos, que contrasta con las progradaciones señaladas en la unidad superior (presa de finos). Como se observa en la Fig. 3C, en la presa es posible realizar una división interna en dos cuerpos superpuestos (*sets*), que podrían corresponder a distintas etapas en el crecimiento de la misma.

## Conclusiones

Las acumulaciones de estériles en el antiguo distrito de Linares (Jaén) se realizaron sin tareas previas de impermeabilización, por

lo que existe un alto riesgo de contaminación de los suelos y de las aguas tanto subterráneas como superficiales. Los resultados de este trabajo demuestran la utilidad de la técnica GPR para estudiar la estructura interna de estas presas mineras y, por tanto, la viabilidad de su utilización en aquellos trabajos relacionados con la caracterización del potencial contaminante de las mismas. Las principales limitaciones encontradas durante este estudio corresponden a las atenuaciones de señal observadas, lo que hace muy difícil la interpretación en profundidad. Por ello, las antenas de 250 MHz, con gran resolución para los primeros metros, dieron muy buenos resultados. Con ellas se observan las estructuras internas de migración lateral de cuerpos así como la diferenciación de etapas de crecimiento de la estructura.

## Agradecimientos

Este trabajo ha sido realizado gracias a la financiación del Ministerio de Ciencia e Innovación (Proyecto CGL2009-12396, cofinanciado con fondos FEDER) y de la Junta de Andalucía (Proyecto RNM 05959). Los autores agradecen la revisión del manuscrito al Dr. Antonio Casas Sainz y a un revisor anónimo.

## Referencias

- Azcárate, J.E. (1977). *Mapa Geológico de España* 1:50.000, hoja 905 (Linares) y memoria explicativa. IGME. Madrid. 35 p.
- Davis, J.L. y Annan, A.P. (1989). *Geophysical Prospecting* 37, 531–551.
- Contreras, F. y Dueñas, J. (2010). *La minería y la metalurgia en el Alto Guadalquivir: desde sus orígenes hasta nuestros días*. Instituto de Estudios Giennenses. Diputación de Jaén, 422 p.
- Gómez-Ortiz, D., Martín-Crespo, T., Rodríguez, I., Sánchez, M.J. y Montoya, I. (2009). *Journal of Applied Geophysics* 68, 159–170.
- Martínez, J., Llamas, J., De Miguel, E., Rey, J. y Hidalgo, M.C. (2008). *Journal of Geochemical Exploration* 94, 19–29.
- Martínez, J., Rey, J., Hidalgo, C.H. y Benavente, J. (2012). *Water Air Soil Pollution* 223, 2955–2968.
- Neal, A. (2004). *Earth-Science Reviews* 66, 261–330.