

# Estudio mediante técnicas de Geo-radar del subsuelo y galerías de la mina de sal abandonada de Cardona para su habilitación como itinerario cultural

*GPR measurements to study an abandoned salt mine for touristical purposes*

J.A. Canas (\*), F. García (\*\*), J. Clapés (\*), R. Osorio (\*), V. Pérez (\*), L.G. Pujades (\*), O. Caselles (\*).

(\*) Servei de Geofísica, Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, Spain.

(\*\*) ETSI Geodésica, Gartoigráfica y Topográfica, Universidad Politécnica de Valencia, Valencia, Spain.

## ABSTRACT

The opening of abandoned salt mines whit the idea of prepare cultural routes requires the use of hard machinery in abandoned places. The erosion caused by salt disolutions damage the mine structure, being dangerous for restoration and visiting purposes. Planed jobs were the opening of a new gallery to prepare a round route and restoring the part of the salt mine that will be open to the public. Ground penetrating measurements have been used, first to locate the position and depth of underground scour holes and subsurface voids in the ground and in the solid salt mountain, and second, to study the vault and gables end in the salt mine galleries. Three antennas were used in his job, with 100 MHz, 300 MHz and 500 MHz center frecuencies.. Radar data has locate holes in the first meters under the floor of the mine galleries and into the contact between the salt mountain and the cover materials. The analisis of the anomalies also shows scour holes into the slag heap caused by the flowing water which eroses the soft materials. These areas are not safety places for mining jobs. This work try to provide safety measurements to the salt mine workers and try to assists to the tourist mine maintenance planning.

**Key Words:** georadar, salt mine

Geogaceta, 20 (4) (1996), 966-969  
ISSN: 0213683X

## Introducción

Las minas de sal de Cardona han sido explotadas para la extracción de sales de sodio y de potasa probablemente desde el neolítico, tal como parece demostrar la gran cantidad de instrumentos de esta época hallados en la zona. Hay referencias a la extracción de sales de Cardona ya en el siglo II a.C. y posteriormente existen referencias romanas y visigóticas, que parecen mostrar que las explotaciones mineras de sal se sucedieron sin interrupción a lo largo del tiempo hasta hoy en día. Los pozos y galerías de las últimas explotaciones de las sales potásicas en tiempos modernos se iniciaron en 1925. Estos pozos alcanzan los mil metros de profundidad. El elevado costo de las extracciones ha sido causa de las dificultades económicas que en los últimos años han provocado el cierre de las minas. El proyecto del Ayuntamiento del municipio de abrir las minas al público, ofreciendo itinerarios culturales y lúdicos hace necesaria una completa rehabilitación de las galerías y accesos, así como la perforación para crear nuevos accesos que facilitarán un cómodo itinerario para el público. Los problemas que puede presentar una mina abandonada se ven agravados por el material salino que con-

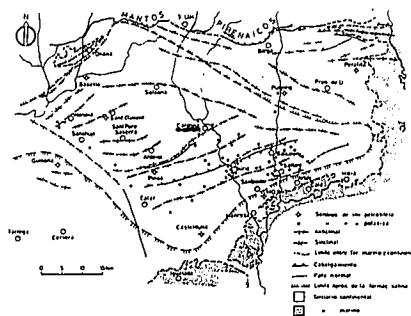


Fig. 1.- Mapa de la cuenca salina de Cataluña. Estructuras geológicas y sondeos efectuados.

Fig. 1.- Borehole locations and geological map of the Cardona area.

forma la montaña, fácilmente erosionable por el agua. Es importante evitar accidentes una vez abiertas al público, y también durante los trabajos para la rehabilitación. Un estudio previo con georadar ha permitido determinar huecos provocados por el arrastre de materiales por agua y la posible existencia de oquedades en el interior del macizo.

## Geología de la zona

La llamada Montaña de Sal de Cardona se sitúa en la zona Norte de la Depresión del Ebro, entre las cadenas montañosas de los Pirineos y el Sistema Costero Catalán. Esta zona queda caracterizada por sus estratos planos, donde todos los relieves existentes han sido excavados por las dos cuencas hidrográficas más importantes, la del Segre y la del Llobregat, que cortan perpendicularmente estas cadenas.

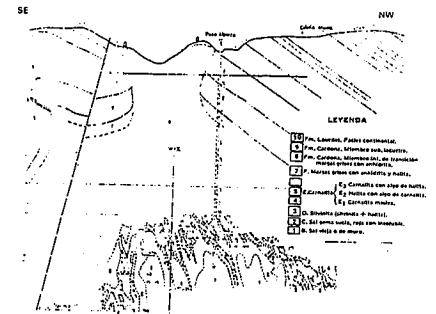


Fig. 2.- Estratigrafía de la Montaña de Sal de Cardona.

Fig. 2.- Stratigraphy of the Salt Mountain of Cardona.



Fig. 3.- Mapa topográfico de la zona de Cardona y la Montaña de Sal.

Fig. 3.- Topographic map of Cardona and a view of the Salt Mountain.

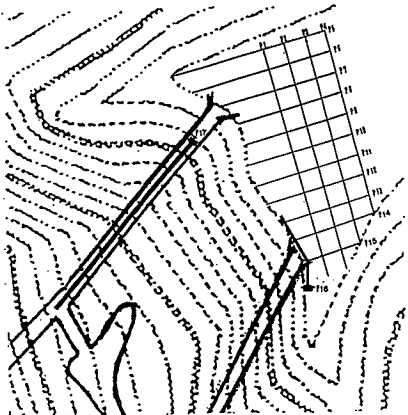


Fig. 4.- Mapa topográfico de la explanada y localización de los perfiles en la zona.

Fig. 4.- Topographic map of the site and the radar profiles position.

Los materiales que afloran en esta Depresión son materiales terciarios, que se extienden hacia el Oeste por toda la Depresión del Ebro. En general son materiales blandos, del tipo de arcillas o margas, aunque próximas a los Pirineos o a la Cadena Costero Catalana pueden verse de forma aislada calizas o conglomerados. Existen diversos afloramientos de rocas evaporitas, como son los yesos, o las sales en la zona de Cardona, un domo salino que aflora formando la Montaña de Sal.

Este diapiro salino forma parte de unos grandes depósitos de sal localizados al sur del Pirineo, dispuestos formando una franja paralela a la cadena montañosa desde la provincia de Barcelona hasta Navarra, siendo el más espectacular afloramiento pese a su pequeña superficie, tan sólo de 0.25 kilómetros cuadrados. La cuenca salina de Cataluña y sus estructuras geológicas más importantes pueden verse en la figura 1.

La existencia y afloramiento de estos do-

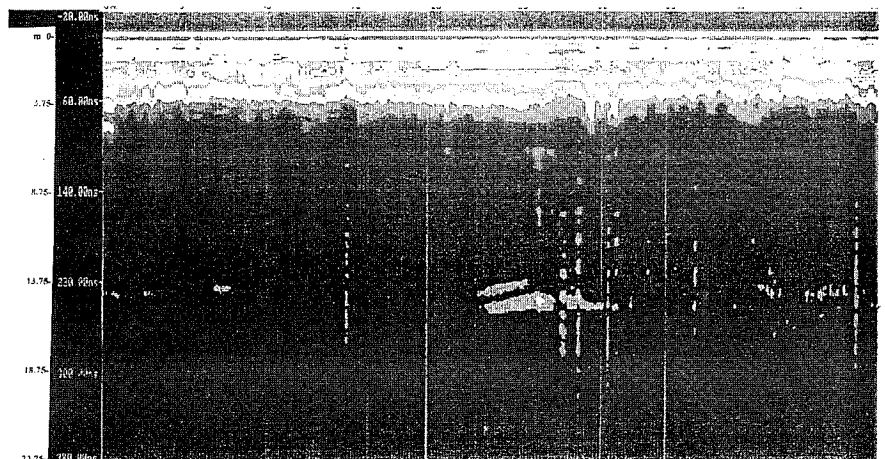
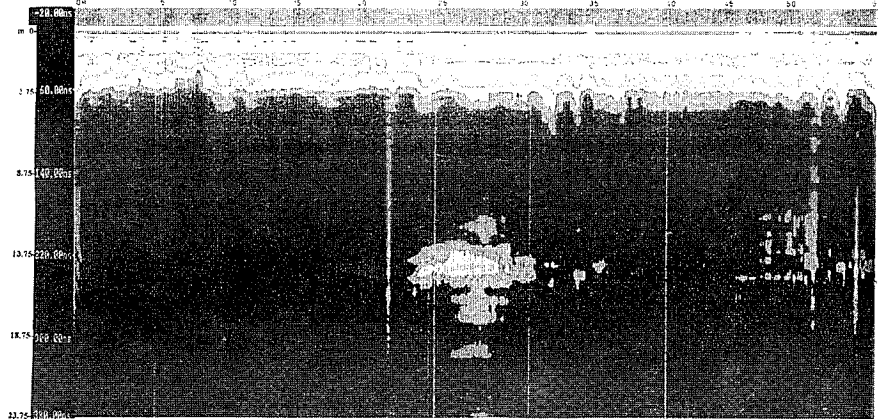
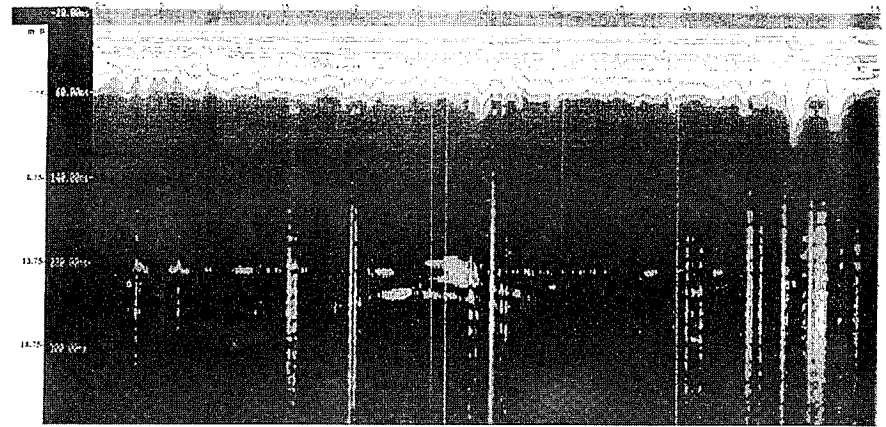


Fig. 5.- Radargramas de los perfiles 1, 2 y 3 realizados en la explanada. a) Perfil 1. b) Perfil 2. c) Perfil 3.

Fig. 5.- Radar data obtained in the profiles 1,2 and 3 in the raised area. a) Profile 1 images. b) Profile 2. c) Profile 3.

mos ocasionando las formaciones denominadas diapiros es debida a la baja densidad de la roca sedimentaria salina, aproximadamente de 2.2 g/cm<sup>3</sup> (Hobbs *et al.*, 1981) y su elevada plasticidad. El contraste entre la densidad de la sal y la de las rocas adyacentes ocasiona que la primera ascienda por flotabilidad. La estratigrafía de la zona, tal como puede observarse en la figura 2, presenta una base de margas, calcáreas y dolomías sobre la que se asientan diversos estratos salinos: anhidrita, sal gema (halita), sales con franjas de arcillas con un alto contenido de halita, sales potásicas (silvina) con franjas de halita y

franjas de carnalita intercaladas con otras de halita o láminas de arcilla, de grosor variable. Sobre estas formaciones salinas aparece una capa de margas salobres intercaladas con arcillas y limonita (Cardona, 1990). La sal aflora sobre una riera parcialmente recubierta de arcillas y gravas donde se abre una de las bocas de la mina.

**Problemática analizada**

Tras el cierre de las minas, el ayuntamiento de Cardona plantea el proyecto de rehabilitación de las mismas para ofrecer itinerarios públicos.

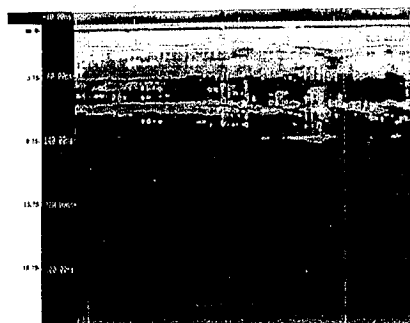


Fig. 6.- Detalle del registro obtenido en el perfil 16.

Fig. 6.- Detail of the radar record obtained in the Profile 16.

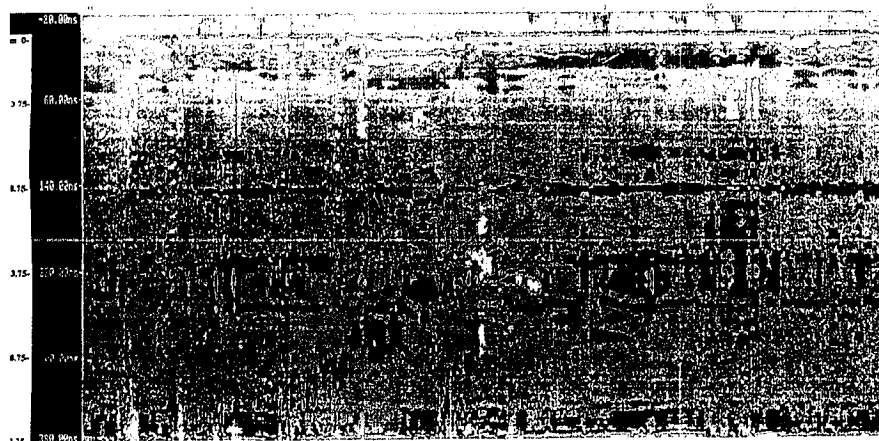


Fig. 7.- Detalle del radargrama correspondiente con el perfil 17. Las flechas señalan las oquedades más importantes.

Fig. 7.- Profile 17. Radar images. Arrows indicate the most important buried holes.

La seguridad durante los trabajos de rehabilitación es un importante factor a tener en cuenta, ya que se debe utilizar maquinaria pesada para abrir una nueva galería de salida de los itinerarios y para efectuar las reparaciones necesarias en saneo de la roca y sostenimiento de la bóveda y hastiales del resto de galerías.

La acción erosiva de la lluvia y de los cursos de agua existentes en la zona sobre las formaciones salinas, puede ser causada por la excavación de rieras por disolución que quedarían bajo las arcillas de la base, en la que se abre una de las bocas de la mina y donde se pretende abrir otra. Estas oquedades resultantes de la disolución de las sales pueden ceder bajo el peso de la maquinaria minera. Por otro lado, en un material tan blando puede fácilmente haber desperfectos ya que hace varios años, desde el cierre de las minas, que no se efectuaban labores de mantenimiento en las mismas. Con miras a evitar accidentes y aumentar la seguridad tanto durante la habilitación de las minas como tras su apertura, se ha procedido a una exploración geofísica mediante el uso de radar, previa al inicio de los trabajos de acondicionamiento y rehabilitación de las galerías. Estos métodos ya han sido aplicados en otras ocasiones para la búsqueda de galerías y túneles en explota-

ciones mineras, como forma de aumentar la seguridad en los tajos (Daniels *et al.*, 1992). Antes de aplicar las técnicas de geo-radar, se realizaron dos experimentos para aumentar la precisión en la interpretación de los datos. El primero de ellos consistió en la determinación del valor medio de la constante dieléctrica del medio salino, obteniéndose un valor de 5.5. Las ecuaciones del radar (Lorenzo, 1994; Cai y McMechan, 1995; Peters *et al.*, 1992), partiendo de esta constante conocida, permitieron saber la velocidad de transmisión en este medio de la onda generada por la antena del geo-radar que, en términos de tiempo doble de reflexión, resulta de un valor aproxima-

donde  $v$  es la velocidad que interesa conocer,  $c$  es la velocidad de la onda electromagnética en el vacío,  $\epsilon_r$  es la constante dieléctrica relativa del medio,  $\sigma$  es la conductividad eléctrica del medio,  $\epsilon_0$  es la constante dieléctrica del material y  $\omega$  la pulsación de la onda.

Generalmente, los materiales que forman el subsuelo tienen una baja conductividad eléctrica, que puede considerarse nula a efectos de cálculo, de manera que podemos aproximar el comportamiento de estos materiales al de los dieléctricos perfectos ( $\sigma = 0$ ). Esta consideración simplifica la ecuación anterior, expresando la velocidad de la onda en el medio como el cociente entre la velocidad de la onda en el vacío y la raíz de la constante dieléctrica relativa del medio,

$$v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r}}$$

El experimento de laboratorio se planteó para poder obtener un valor de  $\epsilon_r$  adecuado a la zona de estudio. Para ello se preparó una muestra de sales potásicas del diapiro de Cardona. Esta muestra, de espesor conocido, presentaba dos caras paralelas entre sí. Sobre una de las caras se aplicaron diversas antenas, mientras que en la otra se aplicaba una barra metálica. Una importante reflexión marcaba la entrada de la señal en la muestra salina. La barra era un fuerte reflector que se situaba a la salida de la señal de la muestra. Se comparó la señal con el reflector de salida y sin reflector de salida, obteniendo en el registro del radar un espesor que se correspondía con el espesor real de la muestra. Esta calibración permitió ajustar la constante dieléctrica relativa de la muestra con un valor de  $\epsilon_r = 5.5$ . Los registros realizados utilizando esta constante darán una perfecta determinación de profundidades.

### Técnicas de radar aplicadas

La utilización del radar para determinar huecos y cavidades naturales formadas por la erosión y, en este caso en concreto, por la disolución por agua del material, tiene una fuerte utilidad para la Ingeniería Civil, ya sea antes de efectuar la obra (García *et al.*, 1996), para evitar accidentes y pérdidas económicas, ya sea en una obra finalizada, para planificar el mantenimiento y la rehabilitación de la misma, como en el caso de estudios de firmes de carreteras y de los asentamientos de las pilas en los puentes (Parry y Davis, 1992; Haeni *et al.*, 1992). Se ha comprobado, tanto en trabajos prácticos como en simulaciones teóricas la idoneidad del radar de subsuelo para este tipo de trabajos, en los que las constantes electromagnéticas difieren fuertemente entre los dos medios: la roca del entorno y el aire de las oquedades o bien los materiales de relleno posteriores (Goodman, 1994; Turner, 1994). En el caso estudiado, el macizo salino permitirá una buena penetración

do a 16 m/ns. La segunda experiencia realizada consistió en confirmar esta velocidad calculada a partir de la constante dieléctrica del medio. Para ello se preparó en laboratorio un dispositivo que, aplicado a una roca salina de la zona de estudio, emitía ondas electromagnéticas y calculaba el tiempo de propagación hasta su recepción por una antena.

### Ensayo en laboratorio

El ensayo planteado en laboratorio tenía como objetivo la determinación de la constante dieléctrica del diapiro de Cardona. Un buen ajuste de esta constante es importante para determinar con la mayor exactitud posible la profundidad de las anomalías registradas y su tamaño. Conocido el tiempo de propagación de la señal desde el reflector hasta la antena receptora, es posible determinar la profundidad de este reflector si se conoce la velocidad media a la que se ha propagado la onda. La velocidad depende de los parámetros electromagnéticos del medio por el que se propaga (Lorenzo, 1994), pudiendo expresarse como

$$v = \frac{c}{\sqrt{\frac{\epsilon_r}{2} \left( \sqrt{1 + \left( \frac{\sigma}{\omega \epsilon_r} \right)^2} + 1 \right)}}$$

de la señal electromagnética, siendo la presencia de agua el factor que limitará, en este caso, la profundidad a investigar. El equipo utilizado en el campo ha sido un radar de subsuelo SIR.10 de GSSI, para el que se han empleado tres antenas diferentes, una de ellas de frecuencia central 100 MHz, otra de 300 MHz y la tercera de 500 MHz. Esta gama de frecuencias permite analizar exhaustivamente el subsuelo. En el experimento de laboratorio se han utilizado las antenas de 1000 MHz y 900 MHz y para el tratamiento y análisis de las señales, se ha utilizado el software RADAN III de GSSI para PC.

En la figura 3 se observa el terreno estudiado, en la zona de la Montaña de Sal de Cardona. Se efectuaron casi todos los perfiles en la zona de la explanada, formada tal como se explica anteriormente por un subsuelo salino y una cobertura arcillosa, por ser esta la zona donde se proyecta abrir la nueva entrada a la mina, y por lo tanto por donde deberá pasar gran parte de la maquinaria pesada para los trabajos necesarios. Once de los perfiles se realizaron aproximadamente perpendiculares a la base salina, mientras que otros cuatro se realizaban paralelos aproximadamente a la misma, formando con los primeros una red simétrica (figura 4). Se efectuaron otros dos perfiles, uno de ellos en el interior de una de las galerías y el otro sobre el macizo salino, en el lugar donde se pretende abrir la nueva galería de acceso. En total se planificaron y efectuaron 17 perfiles y se alcanzó una profundidad de penetración de unos 24 metros.

### Resultados obtenidos

Se presentan en este trabajo, como ejemplo, cuatro de los perfiles realizados, ya filtrada la señal, comentando las anomalías que se observan en los mismos. El perfil 1 se caracteriza por una anomalía superficial y continúa a lo largo de toda la superficie que llega hasta algo más de tres metros de profundidad en algunos puntos y con potencias variables a lo largo de la línea estudiada, correspondiente al contacto entre los materiales salinos del subsuelo y las arcillas y gravas de cobertura. Muy superficiales también, y para una distancia entre 51 y 54 metros, se observan dos anomalías que corresponden a dos oquedades del terreno. Otra anomalía se observa entre los 22 y los 32 metros del perfil situándose la parte superior a los 13.5 de profundidad y la parte inferior a 15.6 metros de profundidad. El perfil 2, es paralelo al anterior aunque un poco más alejado del domo salino. Este perfil también presenta la reflexión debida al contacto entre los materiales de la cobertera y el subsuelo, también con una potencia variable. La anomalía que se observaba en el anterior perfil entre los 22 y los 32 metros de distancia, se hace más evidente. Se observa claramente que se trata de una gran oquedad situada entre los 12 y los 19 metros de profundidad. Es posible observar también otras anomalías corres-

pondientes a oquedades superficiales a unos tres metros de profundidad a unas distancias de 0 metros, de 8 m, de 11 m, de 20 a 35 metros y de 50 a 55 metros. En el perfil 3 se vuelve a apreciar la reflexión por cambio de material y las oquedades superficiales situadas entre la capa arcillosa y la salina, probablemente surcos provocados por disolución de la base sana por agua. Se vuelve a detectar, aunque en menor medida, la anomalía que se observaba en los perfiles 1 y 2 entre los 22 y los 32 metros de distancia. En la figura 5 se pueden observar los radargramas obtenidos en estos tres perfiles consecutivos.

En general, en todos los perfiles efectuados en la explanada frente a la boca de la mina se detecta la anomalía debida al contacto de las arcillas con el domo salino como una reflexión continua a una profundidad que varía entre 1 metro y 6 metros. En el contacto entre la cobertera arcillosa y la sal aparecen anomalías que se corresponden con oquedades probablemente ocasionadas por disolución de las sales. Estas anomalías terminan al pie del talud que forma la antigua escombrera de la mina. Queda comprobado que, en general, las oquedades son debidas a la acción del agua de lluvia, ya que la mayoría se detectan al pie del diapiro salino y de la escombrera de la mina. A mayor profundidad se han detectado anomalías, algunas de las cuales parecen indicar la presencia de oquedades. El perfil 16 se realizó sobre la pared del domo salino, en la zona donde se proyecta la apertura de un nuevo acceso a la mina. En él pueden observarse anomalías continuas en los primeros metros de profundidad. Estas anomalías denotan plegamiento, debidas a alteraciones de las capas de material más superficiales, hasta unos ocho metros de profundidad. No se observa en el mismo la presencia de oquedades en los veinticuatro metros de potencia analizados. El radargrama obtenido es este perfil se muestra en la figura 6. El perfil 17 se realizó dentro de la mina de sal, en la galería de ventilación que se abre a la explanada. En los registros obtenidos en este caso, pueden observarse anomalías que indican oquedades muy próximas a la superficie y alguna oquedad profunda. En la figura 7 se presenta el registro, donde pueden apreciarse las oquedades (señaladas por flechas). La primera se sitúa aproximadamente a los dos metros de iniciarse el perfil y se localiza a una profundidad de 3.5 metros. Otras dos oquedades superficiales, a la misma profundidad que la anterior, se localizan entre los 15 y 20 a partir del inicio del perfil. Y una cuarta oquedad algo más profunda, entre 13.5 y 17.5 metros, se sitúa entre los 20 y 25 metros desde el inicio del perfil.

### Conclusiones

El fuerte contraste entre las propiedades electromagnéticas de las rocas y las del aire-agua hacen que el radar del subsuelo sea una eficaz herramienta para la detección de oquedades natu-

rales subterráneas. La localización de estas cavidades es de gran importancia en Ingeniería Civil por los efectos que pueden producir sobre las construcciones o bien por el peligro de accidentes que pueden ocasionar.

En el caso estudiado, la rehabilitación de unas minas de sal como itinerario cultural, el georadar resulta eficaz para identificar las oquedades del subsuelo tanto en posición como en profundidad, evitando de este modo el riesgo de accidentes durante las obras. El alcance de las antenas utilizadas en este estudio ofrece una buena resolución hasta los veinticuatro metros de profundidad, pudiendo detectar con ellas todas aquellas cavidades que pudieran afectar a los trabajos en la mina. También ha sido posible detectar la potencia de las capas alteradas, las más superficiales de la montaña de sal, y el contacto entre la cobertera de arcillas y gravas y la capa salina inferior, obteniendo la potencia de esta cobertera. Las experiencias analizadas en laboratorio han ayudado en la interpretación correcta de los datos obtenidos con el geo-radar.

### Referencias

- Cai, J. y McMechan, G.A. (1995), *Geophysics* 60, 87-96
- Cardona, F. (1990), *Grans cavitats de catalunya*, Barcelona
- Daniels, J.J., Harris, D., Roberts, R. y Schilling, B. (1992) 4th Int. Conf. on G.P.R., Rovaniemi, Finland. *Geol. Surv. of Finland, Special Paper 16*, p. 237-245.
- García, F., Canas, J.A., Clapeés, J., Osorio, R., Pujades, L.G., Pérez, V., Caselles, O. (1995) (en prep-)
- Goodman, D. (1994) *Geophysics*, 59, 224-232.
- Haeni, F.P., Placzek, G. y Trent, R.E. (1992) 4th Int. Conf. on G.P.R., Rovaniemi, Finland. *Geol. Surv. of Finland, Special Paper 16*, p. 285-292.
- Hobbs, B.E., Means, W.D. y Williams, P.F. (1981), *Geología estructural*, Barcelona.
- Lorenzo, E. (1994) Tesis Doctoral. Univ. Pol. de Madrid. 200 p.
- Parry, N.S. y Davis, J.L. (1992) 4th Int. Conf. on G.P.R., Rovaniemi, Finland. *Geol. Surv. of Finland, Special Paper 16*, p. 247-257.
- Peters, L., Poirier, M. y Barnes, M. (1992) 4th Int. Conf. on G.P.R., Rovaniemi, Finland. *Geol. Surv. of Finland, Special Paper 16*, p. 7-12.
- Turner, G. (1994) *Geophysics*, 59, 215-223. Fig. 1.- Mapa de la cuenca salina de Cataluña. Estructuras geológicas y sondeos efectuados.