

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.

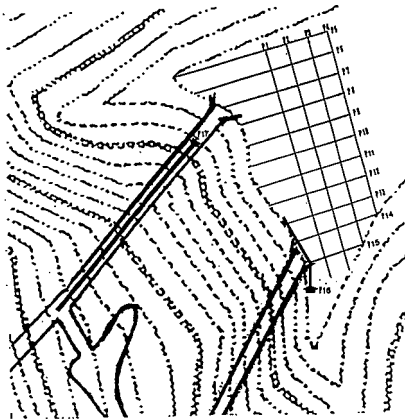


Fig. 4.- Mapa topográfico de la explanada y localización de los perfiles en la zona.

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-

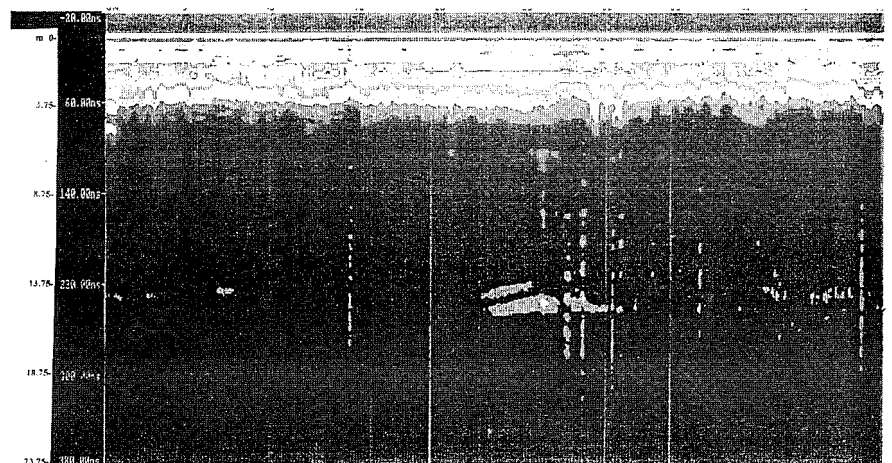
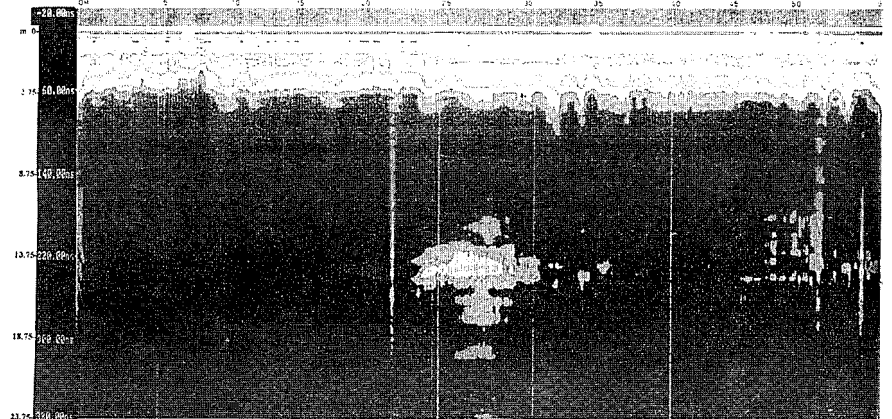
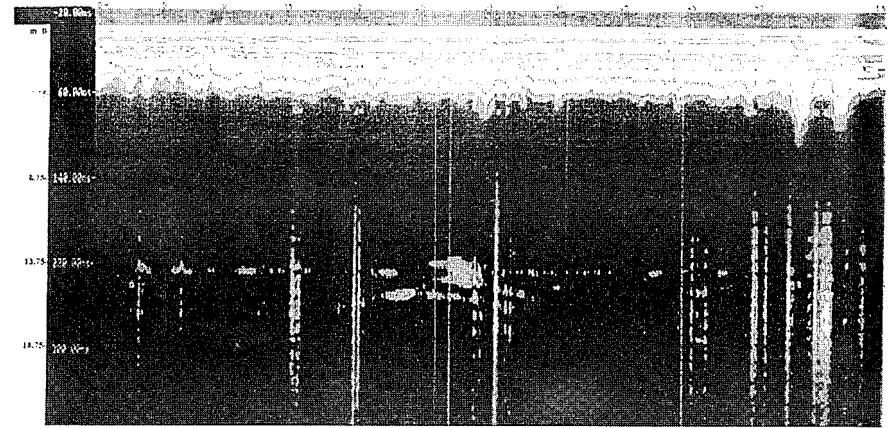


Fig. 5.- Radargramas de los perfiles 1, 2 y 3 realizados en la explanada. a) Perfil 1. b) Perfil 2. c) Perfil 3.

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/cm³ (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.

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 SIR10 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 en 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.