

# Aplicaciones de Geo-Radar para determinar oquedades en el futuro emplazamiento de las pilas de sostenimiento de un viaducto

## Study of bridge foundation with GPR

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

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

(\*\*) Dpto. Ingeniería Cartográfica, Geodesia y Fotogrametría. ETSIGCT. Universidad Politécnica de Valencia. Valencia, Spain.

### ABSTRACT

Ground penetrating radar is usually employed for non-destructive evaluations and maintenance of roads and bridges. This report describe the study of an embankment where a bridge will be built due to the construction of a new road.

The geology in this place, where the foundations of the bridge will be emplaced, are formed by thin sand layers between conglomerates ones. Flowing water erodes the sand causing holes and possible landslides, which could be damaging for the bridge.

The study of the embankment with a ground penetrating radar allows to know the thickness of the sand layers and the posible holes placed into them.

An antenna with center frequency 100 MHz was used attending the characteristics of the emplacement. The radar data shows among some other things, the different reflectors due to the conglomerate, the sand layers and their thicknesses. The presence and the emplacement of several holes in the layers are also observed. These results show where the foundations must be properly placed. A comparison with a geological profile was performed to assure the results.

**Key Words:** georadar, bridge foundation

Geogaceta, 20 (6) (1996), 1361-1364  
ISSN:0213683X

### Introducción

Muy frecuentemente situados en terrenos aluviales, puentes y viaductos quedan emplazados sobre una serie de estratos sedimentarios no enteramente consolidados, donde el arrastre de materiales por las aguas torrenciales puede ocasionar oquedades que afectan fuertemente a su estabilidad y seguridad.

El problema consiste en que tanto arenas como materiales poco compactados son erosionados fácilmente por el agua de lluvia y filtraciones, que generan de este modo oquedades por arrastre (Haeni *et al.*, 1992). La presencia de estos huecos en estratos intercalados con materiales más duros ocasiona serios problemas a las construcciones y obras que se asientan en ellos, no siendo generalmente detectados durante las tareas de construcción.

El presente trabajo trata de un estudio con detalle del terreno en el que se emplazará un viaducto de una importante red de comunicaciones. El objetivo es determinar la posible existencia de oquedades y su posición en los primeros estratos de materiales, en los que se asentarán las zapatas y las pilas de sostenimiento. El análisis con geo-radar se complementa con la existencia

de dos sondeos mecánicos que en puntos concretos determinan detalladamente la estratigrafía de los primeros treinta metros.

El método indica los lugares que pueden resultar conflictivos al detectar las posibles cavidades naturales excavadas en el subsuelo. Su aplicación no destructiva del medio hace que el geo-radar sea la herramienta más rápida y adecuada para estos problemas de Ingeniería Civil.

### Emplazamiento y geología del terreno

El terreno estudiado es parte de un torrente por donde debe pasar la carretera de Besalú a Figueres. En este en clave se proyectó la construcción de un viaducto.

En las zonas donde se proyectaba situar las pilas del viaducto se efectuaron varios sondeos mecánicos que permitieron conocer la estratificación geológica. Mediante estos sondeos se detectó una zona en la que podrían existir oquedades subterráneas. Dentro de esta zona se realizaron dos de los perfiles por geo-radar. El estudio detallado con técnicas de geo-radar de este terreno ha permitido confirmar la existencia de estas cavidades naturales y determinar la posición y profundidad a que se encuentran.

El corte geológico de la zona (figura 1)

muestra, en la vertiente donde se efectuaron los sondeos mecánicos SR-8 y SR-7 un recubrimiento de terreno vegetal en toda la superficie de potencia menor a medio metro. Bajo este primer estrato se pueden observar capas de arenas intercaladas con capas de conglomerados sobre un sustrato de margas. La disposición de estas capas hizo

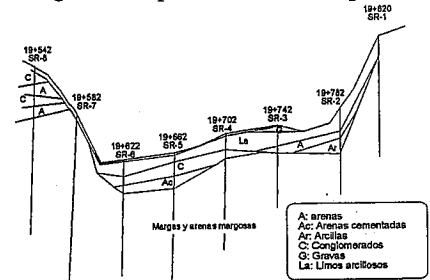


Fig. 1.- Esquema del perfil topográfico y estratigráfico del torrente, y situación de los dos sondeos realizados así como las zonas escogidas para el estudio mediante geo-radar.

Fig. 1.- Topography and stratigraphy of the embankment together with the situation of two boreholes and the radar profiles.

pensar en la posible existencia de oquedades. Por este motivo se realizó la prospección geofísica en la misma, entre los puntos kilométricos PK19+500 y PK19+600.

En este tipo de terreno es fácil que las aguas torrenciales arrastren parte del material arenoso intercalado entre los conglomerados, lo que origina oquedades en el subsuelo que pueden afectar a la seguridad y estabilidad del futuro viaducto que se pretende construir. El tamaño de estas oquedades y su posible número depende de los materiales que formen el subsuelo y del transporte de los mismos. En la zona de interés, los estratos de arena y su situación en la vertiente de un torrente donde el flujo de la corriente de agua a causa de las lluvias alcanza mayores velocidades, facilitan la aparición de estas oquedades en el subsuelo. La obstrucción que realizan las capas de conglomerado en estas corrientes originan turbulencias que aumentan la posibilidad de arrastre de las arenas. Este tipo de oquedades locales se generan durante avenidas de agua o lluvias torrenciales.

En el corte geológico presentado en la figura 1 se aprecia así mismo que la base del torrente presenta también la cobertera de terreno vegetal sobre limos arcillosos y gravas en algun punto. En la vertiente opuesta afloran los limos arcillosos que se observaban en el aluvial de la base.

Las dos columnas de sondeo estratigráficas procedentes de los sondeos mecánicos efectuados en la zona de estudio, una de ellas en el punto kilométrico PK19+542 y la otra en el punto PK19+582, detallan las capas existentes en esta zona.

La columna estratigráfica del sondeo SR-8 (figura 2) presenta la siguiente secuencia: existencia de un recubrimiento de terreno vegetal de 0.6 metros de potencia; una capa de conglomerados poco cimentados con una matriz arenosa hasta los 2.7 metros de profundidad; arenas cementadas hasta 6 metros; un estrato de dos metros de potencia de conglomerados cimentados con matriz arenosa; una capa de arenas cementadas de grano muy fino que finaliza a los 8,7 metros de profundidad, dentro de la cual se encuentra el nivel freático localizado a 7.5 metros de profundidad; una delgada capa de arcillas margosas; margas arcillosas que alcanzan hasta los 16.25 metros de profundidad; un poco más de tres metros y medio de arenas margosas de grano muy fino cimentadas con alternancia de arcillas margosas a partir de los 21 metros de profundidad; un nivel de arcillas margosas de tonalidad gris-negro; niveles de arenas arcillosas poco cimentadas sobre arcillas margosas.

El sondeo mecánico SR-7 se efectuó en una cota aproximadamente ocho metros por debajo del anterior (figura 1). La columna estratigráfica obtenida (figura 3) muestra la presencia de un primer nivel de cobertura vegetal de un espesor de 0.3 metros sobre una serie de finos niveles del alteración; un estrato de arcillas y arenas margosas que alcanza los 6.7 metros de profundidad; areniscas cimentadas de 2.5 metros de potencia, alcanzando los 9,2 metros de profundidad; una última capa detectada hasta el final del sondeo de arcillas y arenas margosas,

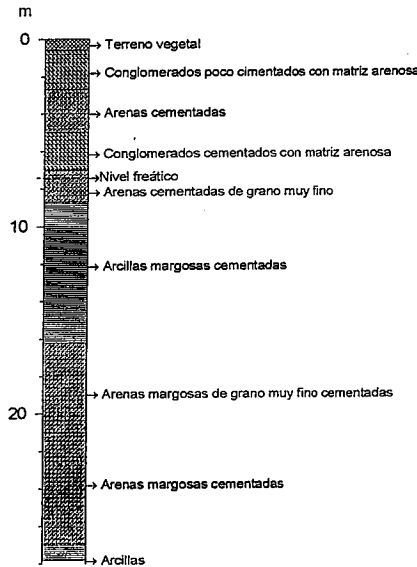


Fig. 2.- Esquema de la columna de sondeo SR-8 efectuado en el punto kilométrico PK19+542.

Fig. 2.- Stratigraphic column corresponding to the borehole SR-8 in the PK19-542.

dentro de la cual se halla el nivel freático, a una profundidad de 10 metros .

#### Técnicas de detección de oquedades

Para determinar la existencia y posición en el subsuelo de oquedades naturales pueden emplearse dos métodos. Uno de los más utilizados en Ingeniería Civil es la realización de sondeos mecánicos. Tiene la ventaja de dar una información cuantitativa y detallada de la estratigrafía, aunque con el inconveniente de ser un método lento y costoso y que ofrece una información local. Las columnas estratigráficas de los sondeos no siempre permiten extrapolar los resultados a todo el perfil que une los diferentes sondeos, especialmente en zonas aluviales. El otro método son las diferentes técnicas de prospección geofísica. En general, las técnicas geofísicas no permiten obtener la información de forma tan unívoca y detallada como un sondeo mecánico. Sin embargo permiten efectuar medidas continuas y tridimensionales, lo que posibilita el cubaje de las oquedades. El método más rápido y efectivo a las profundidades que interesa en Ingeniería Civil es el radar de subsuelo o georadar. Este sistema ha sido utilizado con éxito para determinar estratigrafía superficial en determinados suelos y como apoyo en obras de construcción ofrece la ventaja de obtener de forma rápida perfiles continuos en el campo, y tras un adecuado tratamiento en laboratorio puede dar una información también cuantitativa de estos perfiles.

El método de prospección geofísica mediante geo-radar, está basado en la emisión de pulsos electromagnéticos que se propagan por el subsuelo. La energía reflejada, en discontinuidades de las propiedades electromagnéticas de los materiales del subsuelo, es recibida por una antena. La propaga-

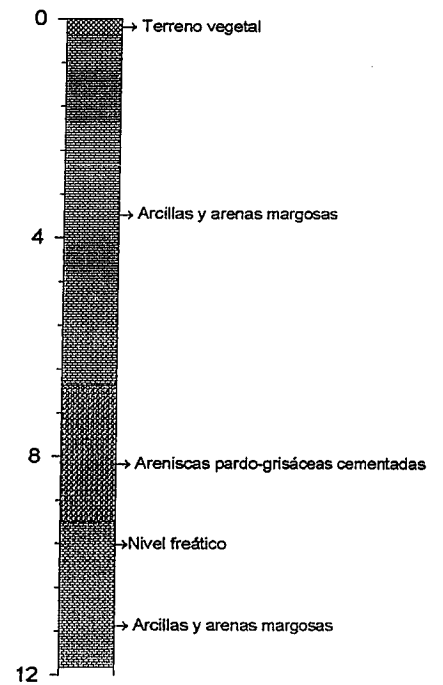


Fig. 3.- Esquema de la columna de sondeo SR-7 efectuado en el punto kilométrico PK19+582.

Fig. 3.- Stratigraphic column corresponding to the borehole SR-7 in the PK19-582.

ción de esta energía dependerá principalmente de la frecuencia central de la antena emisora, de la conductividad eléctrica de los materiales que atraviese y de su constante dieléctrica. Valores elevados de la conductividad harán que el medio atenue rápidamente la señal, disminuyendo la capacidad de penetración del sistema. La reflexión de la energía viene determinada por el contraste entre impedancias de los medios adyacentes. La impedancia de una onda se define como el cociente entre los módulos de los campos eléctrico y magnético. Este cociente es un parámetro que es característico de la frecuencia de emisión y de los parámetros electromagnéticos de los medios de propagación. La mayoría de los materiales que constituyen los suelos y rocas pueden considerarse, a efectos de estudios con georadar, como dieléctricos perfectos al presentar conductividades eléctricas muy bajas ( $< 10^{-4}$ ). Para una onda transversal electromagnética en un medio dieléctrico perfecto, la impedancia puede expresarse como una función del cociente entre la permeabilidad magnética del material y la constante dieléctrica del mismo (Lorrain y Corson, 1986), en concreto, llamando  $v$  a la impedancia,  $\mu$  a la constante de permeabilidad magnética y  $\epsilon$  a la constante dieléctrica del medio, tenemos:

$$v = \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}}$$

El coeficiente de reflexión de la energía,  $R$ , es una función que depende del contraste entre las impedancias de los dos medios,

$$R = \frac{V_2 - V_1}{V_2 + V_1}$$

Una variación importante en la constante dieléctrica del medio dará lugar a una fuerte reflexión, fácilmente observable.

La prospección mediante técnicas de geo-radar es efectiva en este tipo de problemas geotécnicos porque las propiedades dieléctricas del medio en el que se pueden haber ocasionado las oquedades son muy diferentes de las propiedades del aire o de los rellenos que pudieran haberse introducido en la oquedad. En el caso de pequeños huecos en el subsuelo, se tienen además, zonas de alta velocidad de propagación de ondas electromagnéticas, que son detectadas por la antena antes que las que se propagan por el medio en el que se encuentran las oquedades. La propagación de la energía electromagnética emitida por la antena por el medio depende de las constantes electromagnéticas de los materiales que atraviesa y de los ángulos de incidencia en las superficies de separación. Estas técnicas permiten adquirir una gran cantidad de datos continuos del subsuelo con alta resolución, siendo más rápidas y económicas que los métodos de sondeo. Han sido utilizadas con éxito para el estudio y clasificación de suelos (Doolite y Asmusen, 1992) estimando las propiedades de éstos y su composición a partir de los reflectores observados. Se han determinado texturas, cementación, contenido en agua y espesor de las capas de materia orgánica, así como la penetración con el tiempo de vertidos contaminantes en suelos y acuíferos. (Brewster y Annan, 1994). Cada uno de los reflectores observados corresponde a un cambio en las propiedades dieléctricas o en la conductividad eléctrica en los materiales del subsuelo, asociado a condiciones naturales hidrogeológicas, como presencia de cavidades naturales, nivel freático, cambios en el contenido de agua, porosidad, fracturas, contactos entre roca y suelo o entre diferentes materiales, etc.

Otras aplicaciones han sido la determinación del estado del terreno bajo pavimentos de hormigón o firmes de carreteras y cavidades ocasionadas (Lorenzo, 1994). Las reflexiones obtenidas debidas a estas pequeñas caviades son similares a las que se observan en la figura 6. En esta figura se presentan los registros de geo-radar obtenidos en el kilómetro 19+600, que es la única zona donde se identifican oquedades a una profundidad de unos cinco metros bajo la superficie. La profundidad a la que estas oquedades pueden afectar a obras civiles, queda dentro del rango de distancias para las que el geo-radar ofrece una alta resolución.

**Equipo utilizado y métodos de campo**

El terreno sometido a estudio es una de las vertientes del torrente en la que se asentará el viaducto en proyecto de la carretera de Besalú a Figueres.

Las medidas se han planteado en tres tramos que cubren la zona crítica. La prime-

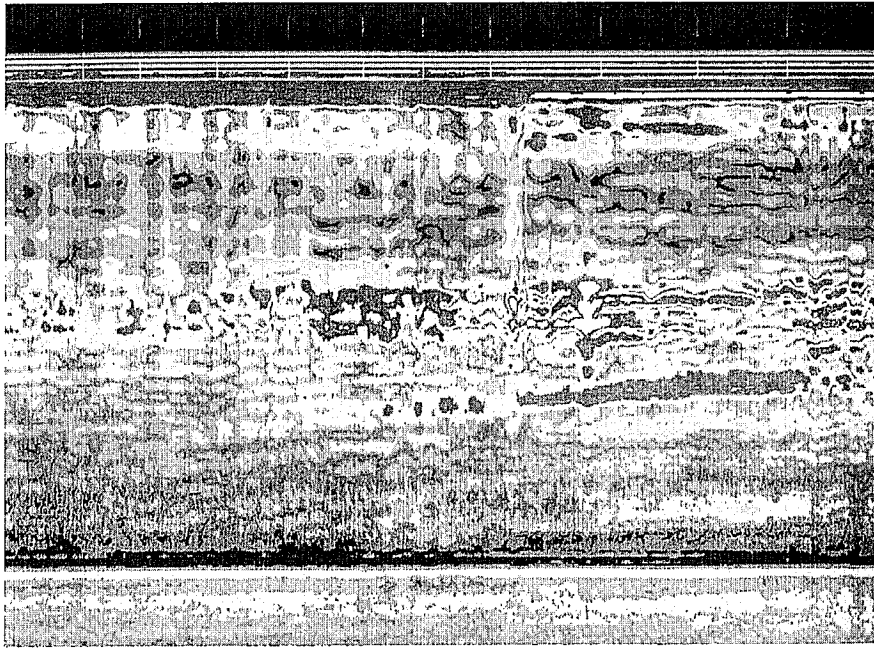


Fig. 4.- Perfil de geo-radar entre los puntos kilométricos 19+500 a 19+550 de 400 ns.

Fig. 4.- Radar data from the profile carried out between the points PK19-500 and PK19-550 with 400 ns range.

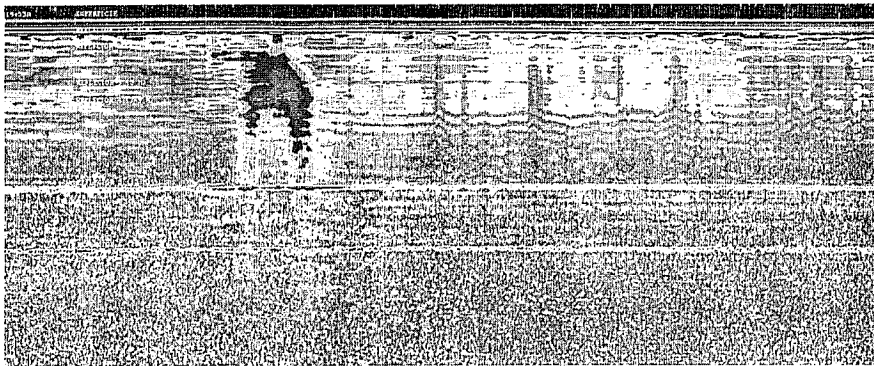


Fig. 5.- Perfil de geo-radar de 700 ns entre los puntos kilométricos PK19+550 a PK19+586.

Fig. 5.- Radar data from the profile carried out between the points PK19+550 and PK19+586 with 700 ns range.

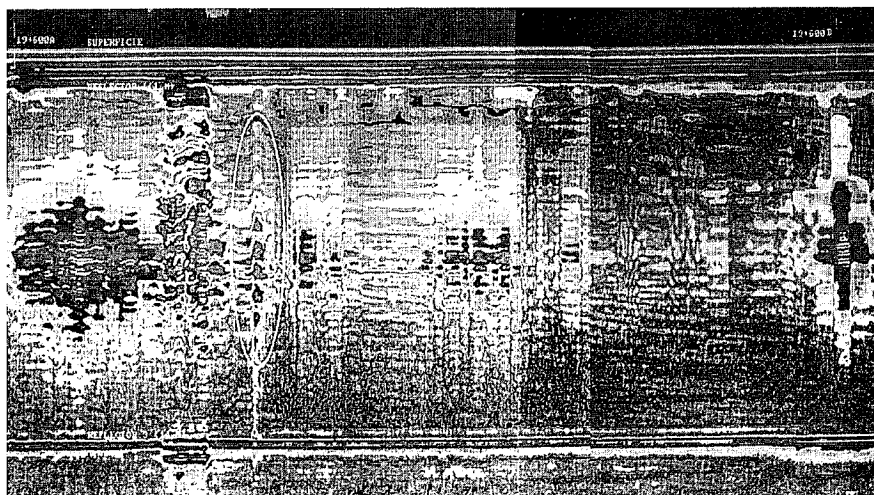


Fig. 6.- Perfil del geo-radar realizado en el kilómetro 19.600, con una reflexión típica de pequeña cavidad, marcada con un óvalo blanco.

Fig. 6.- Radar data from the profile carried out in the point PK19-600. A typical reflection caused by a hole is recorded.

ra de estas zonas está comprendida entre los kilómetros 19+500 y 19+550. La segunda entre los puntos kilómetros PK19+550 y PK19+586. La tercera se sitúa en el punto kilómetro PK19+600. Los datos obtenidos con el geo-radar han podido ser comparados con dos sondeos mecánicos efectuados en los puntos donde se proyectan situar una de las pilas y un estribo del viaducto. Uno de estos sondeos está dentro de la segunda zona, mientras que el otro se sitúa entre la segunda y la tercera zona.

En la figura 1 se muestra el perfil topográfico del torrente y se sitúan los dos sondeos realizados así como los perfiles escogidos para el estudio mediante geo-radar.

En cada una de las zonas se realizaron perfiles con geo-radar directos e inversos. Con ellos se consigue corregir efectos debidos a buzamiento en los estratos del medio.

Cada uno de estos perfiles se ha efectuado dos veces, una con un rango máximo de 700 ns, que ha permitido alcanzar una profundidad de unos veinticinco metros, detectando un mayor número de reflectores. El otro se efectuó con un rango de 400 ns, con el que se ha alcanzado una profundidad de, aproximadamente, quince metros, que permite observar con mayor detalle la zona superior, de más interés para el proyecto del viaducto.

El equipo utilizado ha sido un geo-radar modelo SIR10 de GSSI (Geophysical Survey Systems Inc.) y una única antena emisora y receptora cuya frecuencia central se situaba en 100 MHz, adecuada para alcanzar la profundidad necesaria para el presente estudio.

Posteriormente se ha efectuado en el laboratorio un tratamiento de los datos obtenidos con el software RADAN III que ha permitido una correcta interpretación de los resultados. Los filtros aplicados han sido filtros verticales tanto pasobajas como pasobajas y un filtro pasobaja horizontal. Con el filtro pasobaja vertical se pretende reducir el ruido de la señal producido por anomalías de alta frecuencia, mientras que con el filtro pasobaja vertical se intenta reducir los efectos provocados por anomalías de baja frecuencia o bien efectos de línea base. Con el filtro pasobaja horizontal, se promedian los pulsos recibidos, no siendo representados todos ellos gráficamente, sino estos promedios.

### Interpretación de los resultados obtenidos

En la prospección llevada a cabo con geo-radar entre los kilómetros 19.500 y 19.550 tanto a 400 ns como a 700 ns se aprecia una clara estratigrafía que se corresponde con la columna de sondeo SR-8 efectuada en el kilómetro 19+542, como puede observarse en las figuras 2 y 4. Cabe destacar un primer reflector situado a 0.6 metros de profundidad, que corresponde en la columna de sondeo al contacto de la cobertera vegetal con el primer estrato de conglomerados. Un potente reflector se sitúa a una profundidad de 7 metros, que en la columna de sondeo corresponde a la profundidad a

la que se encuentra en esta zona el nivel freático, dentro de un estrato de arenas. La salida de este estrato queda reflejada en los registros como otro reflector a unos 9 metros de profundidad. Puede apreciarse el buzamiento del reflector. A 17 metros de profundidad se observa otro reflector que corresponde al contacto entre arcillas margosas y arenas margosas que se detecta en la columna de sondeo a una profundidad de 16.2 metros. En el perfil efectuado a 700 ns se alcanza a detectar un reflector más situado a una profundidad de 21 metros, que equivale al contacto entre las arenas margosas y las arenas margosas alternadas con arcillas que se observa en la columna de sondeo a esta misma profundidad. En estos perfiles no se aprecian reflectores que pudieran corresponder a oquedades o cuerpos anómalos bajo la superficie estudiada. En el perfil realizado con geo-radar en esta zona (figura 4) se alcanza una profundidad de unos 18 metros, y pueden observarse diversos reflectores. El más superficial corresponde con la capa de material vegetal que se observaba en el sondeo SR-8. Los demás reflectores se corresponden en profundidad con las capas determinadas con el sondeo mecánico efectuado en la misma zona. Destaca el fuerte reflector debido al nivel freático, a unos siete metros de profundidad aproximadamente. En este perfil se observa un último reflector a 17 metros de profundidad, que se corresponde con la discontinuidad que se aprecia en el sondeo SR-8 entre las arcillas margosas y las arenas margosas.

En la zona entre el kilómetro 19+550 y 19+586 se han efectuado otros dos perfiles en los que aparecen reflectores que coinciden con la estratigrafía que muestra la columna de sondeo SR-7 (figura 3). Se observan dos claros reflectores a 15 y a 21 metros de profundidad y otros más superficiales que se corresponden con el nivel freático y con las discontinuidades más superficiales. No se observan en estos perfiles indicios de oquedades en la profundidad estudiada. Como ejemplo de los perfiles efectuados en esta zona, se presenta en la figura 5 un tramo de rango 700 ns, lo que permitió alcanzar una profundidad de unos 22 metros, situado entre los sondeos SR-8 y SR-7.

Se efectuó este perfil en una zona próxima al sondeo SR-7 que se presenta en la figura 3. El tramo presentado en esta figura se sitúa entre los sondeos SR-8 y SR-7. Se observa el reflector superficial que corresponde con la cobertera vegetal, una serie de reflectores en los cinco primeros metros de profundidad, que serían los correspondientes con las capas de conglomerados y arenas que se observan en el perfil SR-8. El reflector a unos 9 metros de profundidad que probablemente sea debido al nivel freático, y dos claros reflectores paralelos a la superficie que se sitúan a 15 y 21 metros de profundidad.

El quinto perfil se ha efectuado en la zona de aluvial, en el punto kilómetro PK19+600. Los registros obtenidos se presentan en la figura 6. En esta zona el terreno

es más irregular que en las dos anteriores y los obstáculos existentes para el paso de la antena han generado un ruido en los registros que se aprecia en forma de reflexiones cuyo origen es superficial. En este perfil se observan reflectores característicos de oquedades naturales, localizados entre un metro y cinco metros de profundidad, en la discontinuidad del terreno marcada por otro reflector continuo a lo largo de todo el perfil. Las señales que muestran los registros de radar en este caso son similares a estudios efectuados mediante generación de radargramas sintéticos en casos de diversas capas de asfalto y suelo con una oquedad entre ellas (Goodman, 1994).

En ninguno de los perfiles realizados se han detectado posibles oquedades a profundidades mayores a estos cinco metros.

### Conclusiones

La zona estudiada se caracteriza por ser el aluvial de un torrente con un sustrato de arenas y arcillas margosas sobre las que se encuentran diversas capas alternadas de conglomerados y arenas. Mediante la prospección de la zona se pretendía efectuar un estudio exhaustivo previo a la construcción de un viaducto. La detección de posibles oquedades bajo la superficie analizada se llevó a cabo con técnicas de geo-radar. Los resultados indican que el método es adecuado en este tipo de terrenos, pudiendo incluso determinar la estratigrafía geológica. La comparación de los reflectores observados con las columnas de sondeo efectuadas en cada uno de los tramos muestran la alta correlación existente entre los dos tipos de estudio.

En los radargramas se observan reflectores a 21 metros de profundidad comunes a todos los perfiles efectuados. A siete metros de profundidad aproximadamente, se detecta un fuerte reflector que corresponde al nivel freático.

La zona más crítica se sitúa en el kilómetro 19.600, en la que se detectan reflectores que corresponden a oquedades situadas entre uno y cinco metros de profundidad.

### Referencias

- Brewster, M. y Annan, A. P. (1994), *Geophysics*, 95, 1211-1221
- Doolite, J.A. y Asmussen, L. (1992), 4th Int. Conf. on G.P.R., Rovaniemi, Finland. *Geol. Surv. of Finland, Special Paper*, 16, 139-147.
- 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, 285-292.
- Lorenzo, E. (1994), *Tesis Doctoral*. Univ. Pol. de Madrid. 200 p.
- Lorrain, P. y Corson, D. (1986), *Campos y ondas electromagnéticos*, Madrid. p. 490-627