

Prospección geofísica en yacimientos arqueológicos con geo-radar en España.

Dos casos: Numancia y El Paular

Enrique LORENZO (*) y M.^a Carmen HERNÁNDEZ (**)

(*) Escola Universitaria Politécnica. Universidade da Coruña.

(**) Dpto. de Geofísica y Meteorología. Facultad de CC. Físicas. UCM

RESUMEN

En el presente trabajo se expone la aplicabilidad del método del geo-radar en investigaciones arqueológicas junto con dos trabajos de prospección realizados en los terrenos de la antigua Numancia (Soria) y en el Monasterio de El Paular (Madrid). En el primer estudio se trataba de obtener información de la muralla de la ciudad, de la que se conocen algunos tramos pero no su perímetro completo; en el diseño de la red se hicieron coincidir algunos perfiles de radar con calicatas eléctricas con el fin de comparar ambos tipos de registros. En el segundo lugar prospectado se pretendía delimitar la situación de unas antiguas celdas sobre las que se tenían ciertas referencias.

Palabras clave: Geo-radar, calicatas eléctricas, arqueología.

ABSTRACT

This article shows the applicability of ground penetrating radar (GPR) to archaeological investigations, with two study cases located in the old Numancia (Soria) and El Paular Monastery (Madrid). The first case was carried out to attain information of the old surrounding wall of the city, which has some known spans but not the whole perimeter. In the second case the problem was to locate some old cells referenced in books about the Monastery.

Key words: GPR, resistivity profiles, Archaeology.

1. INTRODUCCIÓN

Las circunstancias que rodean a los enclaves arqueológicos enterrados suelen ser similares: los antiguos habitantes confiaban la solidez de sus construc-

ciones a bloques de piedra más o menos trabajados, o simplemente piedras de dimensiones suficientes, con los que edificaban sus viviendas. Con el paso del tiempo estas construcciones se fueron desmoronando quedando como prueba de su existencia restos de sus estructuras, mejor o peor conservados, ocultos bajo la superficie del terreno por materiales depositados posteriormente que pueden haberlos cubierto desde algunos centímetros hasta varios metros.

El geo-radar se presenta como un método útil en la resolución de este tipo de problemas debido a sus características de técnica no destructiva, rapidez y alta resolución. Puesto que la mayoría de restos arqueológicos se encuentran enterrados cerca de la superficie, esto favorece la utilización de antenas de mayor frecuencia con la consiguiente mejora en la discriminación de los elementos del subsuelo.

2. APLICABILIDAD DEL MÉTODO

El geo-radar se basa en la emisión de impulsos electromagnéticos de muy corta duración (1-10 ns) en la banda de frecuencias de VHF-UHF (habitualmente centrados entre 100 MHz - 1 GHz). Cuando mediante una antena emisora se generan dichos impulsos, éstos en su trayectoria a través del subsuelo pueden encontrarse con un cambio de sustrato o algún tipo de objeto enterrado u obstáculo; en definitiva lo que detectan es un cambio en las propiedades eléctricas de los medios atravesados. Esto produce que parte de la energía sea reflejada de vuelta, mientras el resto continúa su camino. Disponiendo de una antena receptora en la superficie es posible detectar estas reflexiones, y con ellas generar una serie de registros espacio-tiempo de características similares a los registros clásicos de sísmica de reflexión. Al ir desplazando las antenas sobre la superficie se van registrando el conjunto de reflexiones producidas, con lo que se obtiene una imagen bidimensional de la historia de reflexiones bajo la línea de desplazamiento de la antena.

Para que el geo-radar sea capaz de detectar el contacto entre dos capas o simplemente localizar algún objeto enterrado deben coincidir una serie de condiciones que podrían ser resumidas en las siguientes:

- La potencia emitida por la antena del radar debe ser suficiente como para que la señal alcance el reflector y su reflexión realice el camino de vuelta hacia la superficie.
- El medio de propagación debe ser suficientemente resistivo como para evitar la total atenuación de la señal antes de completar su trayecto.
- El tamaño del reflector debe ser comparable con la longitud de onda de la señal emitida.
- El contraste entre las propiedades electromagnéticas del medio de propagación y el segundo medio debe ser suficiente como para que se produzca una reflexión apreciable en la antena receptora.

Afortunadamente estos factores no suelen plantear problemas en el caso de investigaciones arqueológicas. La superficialidad de los restos (en muchas ocasiones a profundidades inferiores a 2-3 metros) contrarresta la limitada potencia de los equipos portátiles de geo-radar, favoreciendo la utilización de antenas de mayor frecuencia, con la mejora en la resolución del equipo. Una vez alcanzada la profundidad necesaria, el problema, en arqueología, se puede plantear como el clásico contraste entre suelos (material de depósito situado sobre los restos) y rocas (agrupación de bolos y piedras que constituyen los restos en sí), cuyos parámetros electromagnéticos se diferencian lo suficiente como para garantizar una reflexión detectable en la superficie del terreno.

3. PROSPECCIÓN EN NUMANCIA (SORIA)

El objetivo principal de la investigación llevada a cabo en Numancia consistió en la ubicación de la muralla defensiva de la ciudad, de la cual no se dispone de total continuidad a lo largo de su perímetro, así como sus posibles ampliaciones posteriores. Los trabajos de prospección fueron llevados a cabo en el mes de Junio de 1992, con un tiempo caluroso y seco lo que garantizaba la ausencia de agua en el subsuelo superficial que podría haber entorpecido las condiciones de penetración de la señal. Igualmente, la situación de la ciudad, *en lo alto de un cerro, permitía presuponer la presencia del nivel freático muy por debajo del rango de profundidades que iba a ser investigado*. Por su parte, la profundidad a la que debían encontrarse los restos de la muralla debía ser inferior a 2-3 metros, mientras que la anchura esperada, en función del aspecto de la muralla en sus tramos visibles y de las referencias existentes, debía ser del orden de 3 a 5 metros. Esta serie de motivos hicieron suponer que la antena indicada para el estudio era la de 500 MHz, ya que no se precisaba gran penetración y la longitud de onda del impulso propagándose por el terreno, aproximadamente 30 cm, aseguraba la resolución deseada.

Una vez elegida la antena que proporciona la penetración y resolución deseadas, se analizaron teóricamente las posibilidades de reflexión del impulso al alcanzar los restos de la muralla, esto es, la existencia de suficiente contraste entre los parámetros eléctricos de ésta y los del medio de propagación como para que el impulso se refleje.

Como se ha comentado anteriormente, el problema se puede plantear como el del contraste entre suelos y rocas. La muralla debió ser levantada a partir del apilamiento de piedras bien del mismo entorno de la ciudad u obtenidas de alguna cantera cercana creada a tal efecto. Numancia está localizada en un lo alto de un cerro (La Muela de Garray), sobre una formación geológica llamada precisamente Formación Numancia, que de acuerdo con la descripción del Mapa Geológico de España, carta 350 (Soria), escala 1:50.000, publicado por el Instituto Tecnológico Geominero de España, está constituido por «bloques de cuarcitas y areniscas en una matriz limo-arenosa. Entre los 1100 y 1200 m apa-

recen los restos de una cobertura detrítica con tamaño de grano que va desde los bloques (centil 1.5 m) hasta la fracción limo y arcilla. Tanto los bloques como los cantos son fundamentalmente de areniscas, cuarcitas, cuarzo y lópidas, en orden decreciente en abundancia.»

Por otra parte, las formaciones que rodean al cerro en cuestión están constituidas por calizas, carniolas y dolomías. Con estos datos, puede suponerse que los constituyentes de la muralla estarían formados por areniscas, cuarcitas, calizas y/o dolomías. El elemento en que están embebidos los restos está configurado por materiales que se han ido depositando con el paso del tiempo, posiblemente una mezcla entre arenas, arcillas y limos en mayor o menor proporción y con bolos entremezclados. Sin la presencia de agua, la resistividad de los constituyentes del suelo, en el rango de operación de las antenas del geo-radar, puede oscilar entre 100-10000 ohm-m mientras que la de las rocas en su estado puro alcanza los 10^6 - 10^8 ohm-m. Estas diferencias favorecen en principio el uso de los métodos eléctricos para este tipo de investigaciones.

En lo que se refiere a los métodos electromagnéticos, la reflexión de la señal se produce por contraste entre impedancias de los dos medios. En la figura 1

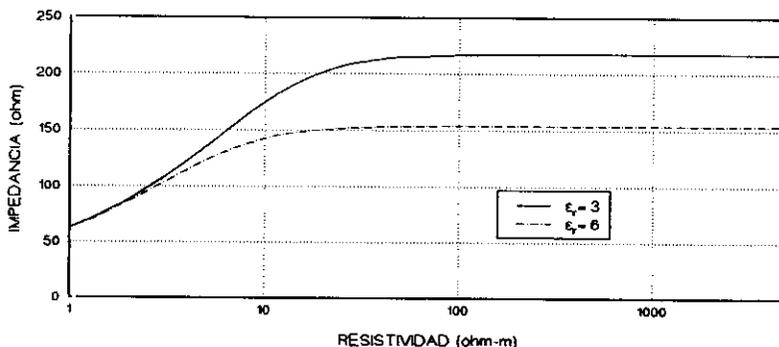


Fig. 1. Dependencia de la impedancia eléctrica respecto de la constante dieléctrica para una frecuencia de 500 MHz.

se muestra el comportamiento del valor de la impedancia, para una frecuencia de emisión de 500 MHz, en función de la variación de la resistividad para dos valores de la constante dieléctrica: el más bajo, $\epsilon_r=3$, representativo del comportamiento de suelos secos y el más alto, $\epsilon_r=6$, más propio del comportamiento de rocas. Es posible apreciar para ambos valores como el valor de la impedancia a partir de 100 ohm-m se puede considerar independiente de la resistividad del medio. Según esto, no cabría esperar reflexión del impulso en base al contraste entre resistividades y hay que buscarlo en el posible contraste entre constantes dieléctricas del suelo y de las piedras de la muralla. Además, por las

propias características de construcción de la muralla, formada por una agrupación de piedras y cantos de tamaño y geometría irregular cabe esperar no una reflexión aislada, sino posiblemente un conjunto de reflexiones múltiples entre los elementos del muralla debidas al apilamiento desorganizado de éstos.

Con el fin de comprobar el comportamiento esperado para la señal del radar, se procedió a un tarado sobre una zona parcialmente excavada. En la figura 2

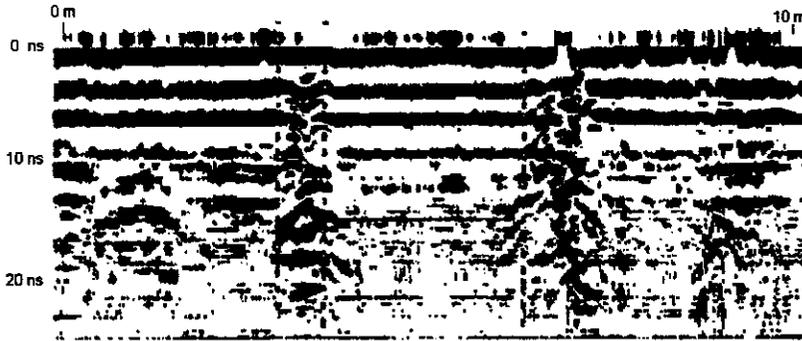


Fig. 2. Perfil de 10 metros realizado con la antena de 500 MHz, y un tiempo doble de reflexión de 25 ns, cortando transversalmente 2 pequeños muros enterrados que afloraban en superficie.

se muestra el resultado de uno de los perfiles realizados con la antena de 500 MHz sobre dos de estas estructuras de apenas 50 cm de ancho que afloraban en la superficie del terreno. Las reflexiones asociadas al paso sobre estos muros se diferencian con nitidez de su entorno dentro del perfil y resultan fácilmente identificables. La presencia de reflexiones múltiples en forma de pequeñas hipérbolas confirma el comportamiento esperado del impulso del radar al alcanzar un reflector de estructura heterogénea.

En una zona no excavada cercana a la anterior se ejecutó un nuevo perfil

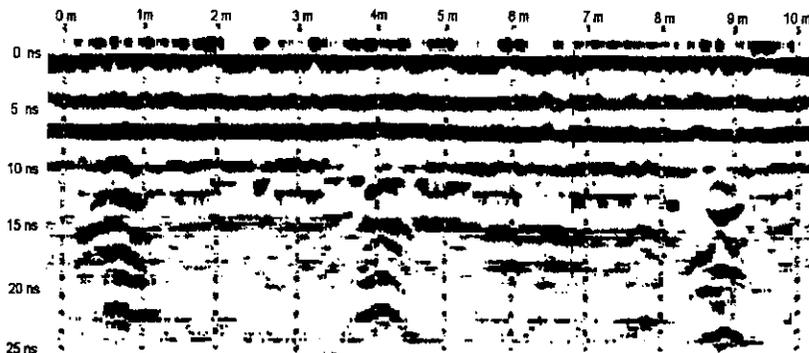


Fig. 3. Perfil de 10 metros (antena de 500 MHz) en el que aparecen 3 anomalías hiperbólicas asociadas a otros tantos muros enterrados a unos 60 cm de profundidad (rango de tiempos 25 ns).

con el resultado que se aprecia en la figura 3. La similitud con el registro de la figura 2 es considerable. En este caso se aprecian 3 reflectores aislados, centrados en los metros 0.5, 4 y 9, de dimensiones aproximadas a los anteriores, representados por unas nítidas reflexiones hiperbólicas a escasa profundidad de la superficie (asignándole al terreno una $\epsilon_r = 4$ se obtienen aproximadamente unos 60 cm de profundidad), que se corresponderían con la presencia de 3 pequeños muros de espesor inferior a 50 cm.

Una vez confirmada mediante estas pruebas la existencia de suficiente contraste entre los parámetros electromagnéticos del suelo y los materiales que constituyen los muros y murallas, se llevaron a cabo con el mismo tipo de antena una serie de perfiles, coincidentes con perfiles de calicatas eléctricas con dispositivo Wenner, ejecutadas por el Departamento de Geofísica y Meteorología de la Facultad de Físicas de la Universidad Complutense, en el que la distancia entre electrodos (la misma que la utilizada para avanzar el dispositivo) fue de 0.5, 1 y 1.5 metros. El rango de tiempos elegido en los registros de georadar fue de 40 ns; aceptando de nuevo $\epsilon_r = 4$ como valor de la constante dieléctrica del terreno, se estarían cubriendo aproximadamente los 2.5 - 3 primeros metros del terreno.

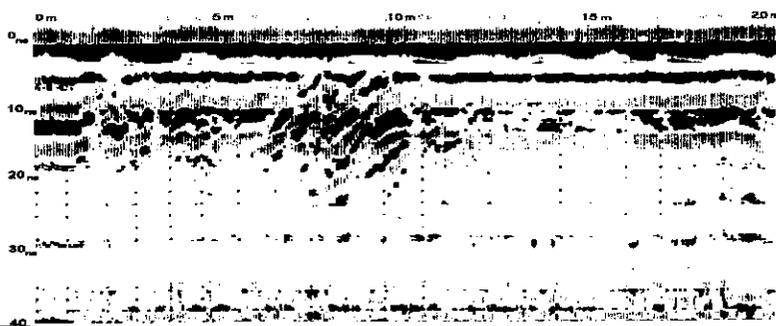


Fig. 4. Registro de geo-radar de 20 metros y rango de tiempos de 40 ns realizado con la antena de 500 MHz.

La figura 4 muestra un registro de radar de 20 metros de longitud, correspondiendo la figura 5 a la calicata eléctrica coincidente con él. Entre los metros 6.5 y 10.5 se manifiesta una clara anomalía que rompe la continuidad del registro, situándose la profundidad de la parte superior del reflector dentro del primer medio metro del subsuelo; dadas sus dimensiones y la característica forma de las reflexiones múltiples podría tratarse de la muralla buscada. La interpretación del perfil eléctrico de la figura 5 (Hernández, 1992) señala una anomalía entre 5 y 13 metros, considerablemente más extensa que la señalada por el radar.

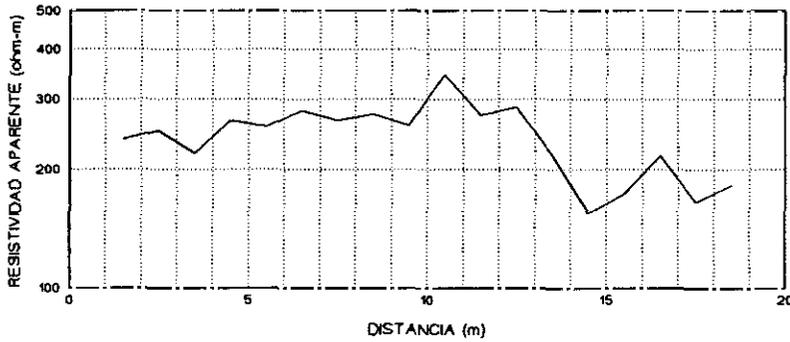


Fig. 5. Resultado de los 20 primeros metros de la calicata eléctrica, paso 1,5 m, llevada a cabo sobre el perfil de la figura 4.

La figura 6 muestra un registro de 20 metros, desplazado 10 metros en paralelo con respecto al perfil anterior. Entre 9 y 12 metros aparece nuevamente un reflector de similares características al localizado en el perfil de la figura 4 y que se correspondería con la continuación de la muralla. A la altura del séptimo metro de este registro se localiza otra anomalía de dimensiones inferiores y de difícil identificación, aunque podría tratarse de algún bolo de considerable tamaño o de restos provenientes de la propia muralla. Por su parte, la interpretación de la calicata de la figura 7 señala una amplia anomalía entre los metros 3 y 15,5, más marcada entre 8,5 y 15,5, que se correspondería con una respuesta más global a las dos zonas localizadas con radar.

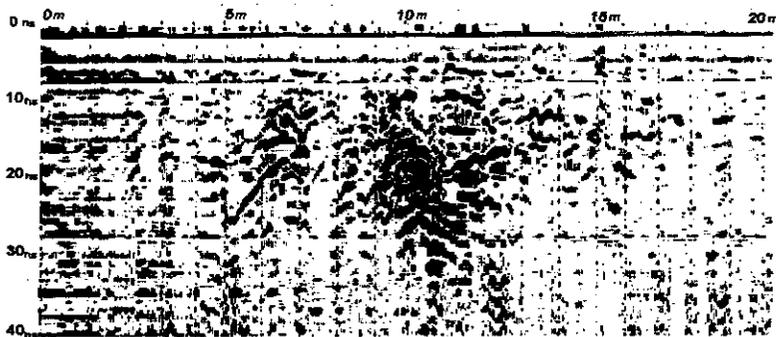


Fig. 6. Registro de geo-radar de 20 m, paralelo al de la figura 4, realizado con la antena de 500 MHz (rango de tiempos 40 ns).

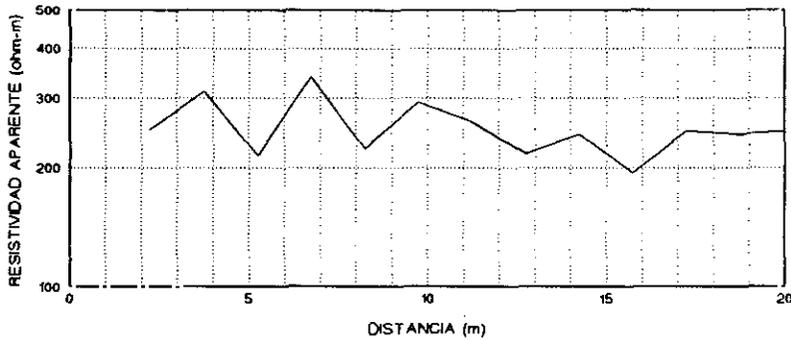


Fig. 7. Calicata eléctrica de 20 m, con paso 1 m, efectuada sobre el perfil de la figura 5.

El último perfil seleccionado, figura 8, está desplazado 10 metros en paralelo con respecto al de la figura 6. En este registro de radar vuelve a encontrarse un reflector cercano a la superficie de similares características a los de los dos perfiles anteriores; su situación sobre el perfil está entre los metros 11 y 13.5 aproximadamente, continuando el alineamiento de las anomalías de los perfiles anteriores. Entre los metros 4 y 7 se localiza otra anomalía de características diferentes de las anteriores y cuya identificación resulta compleja a priori sin disponer de información adicional, aunque podría tartarse de una solera por su similitud con los registros de las figuras 10 y 12, correspondientes a la prospección realizada en El Paular. En los perfiles eléctricos de la figura 9 es posible identificar un aumento de resitividad entre los metros 9 y 15.5, centrado en la anomalía detectada con radar.

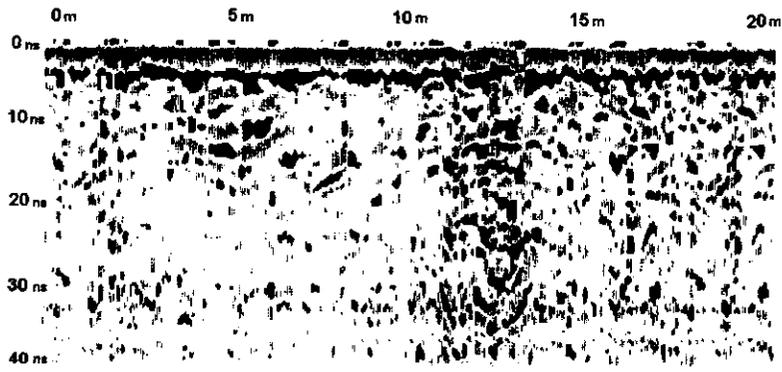


Fig. 8. Registro de radar de 20 metros, paralelo al de la figura 6, realizado con la antena de 500 MHz (rango de tiempos 40 ns).

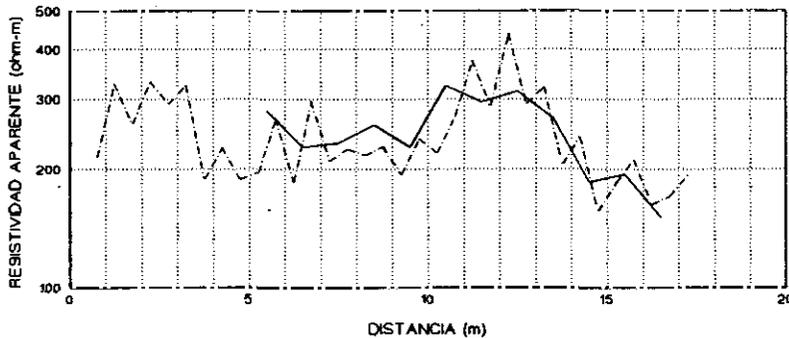


Fig. 9. Calicatas realizadas sobre el perfil de la figura 8 con pasos 0,5 (línea discontinua) y 1 m (línea continua).

4. PROSPECCIÓN EN EL PAULAR

Con motivo de unas excavaciones que iban a ser realizadas en el entorno del Monasterio de El Paular (Madrid), destinadas a localizar unas antiguas estancias que habían formado parte del propio monasterio, se llevó a cabo en dicho lugar una prospección con métodos eléctricos y electromagnéticos, entre ellos el geo- radar.

Salvo el entorno geológico, que en este caso está formado por rocas graníticas, todo lo expuesto en el apartado dedicado a la prospección en Numancia sobre las condiciones de aplicabilidad del radar es extrapolable a la zona estudiada en los terrenos del Monasterio de El Paular, tanto en el contraste esperado entre los materiales que iban a ser investigados (suelo constituido por materiales que se han depositado con el paso del tiempo frente a los bolos y piedras de dimensiones suficientes para construir los muros que delimitaban las estancias) como en las favorables condiciones de propagación al realizarse el trabajo en el mes de Julio de 1993, con lo que el subsuelo no presentaba gran cantidad de humedad. Además era posible suponer que la mayoría de los pequeños muros que se trataban de localizar se encontraban muy superficiales, puesto que dos de ellos eran visibles en superficie.

Se eligió como óptima la antena de 500 MHz, ya que había dado buenos resultados en la prospección efectuada en Numancia y por sus características de manejabilidad y suficiente resolución. La zona de estudio era de reducidas dimensiones, unos 300 m², y en ella se realizaron una serie de perfiles de geo-radar que pudieron ser contrastados con la presencia real de estructuras enterradas tras la excavación realizada en parte de la zona.

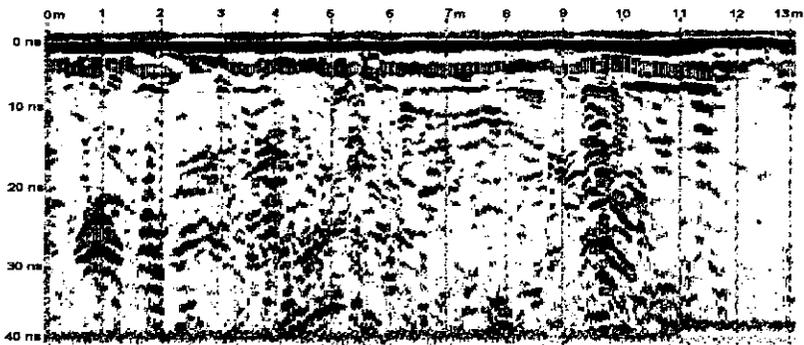


Fig. 10. Perfil de 13 m realizado en el Monasterio de El Paular con la antena de 500 MHz y un rango de tiempos de 40 ns.

La figura 10 muestra un primer perfil de 13 metros realizado con la antena de 500 MHz y un rango de tiempos de 40 ns, y en la figura 11 se proporciona

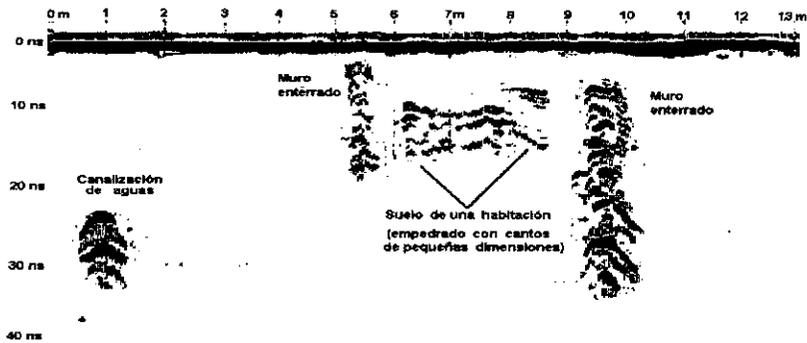


Fig. 11. Interpretación de las anomalías de la figura 10.

la interpretación de las anomalías detectadas teniendo en cuenta las excavaciones efectuadas. La reflexión hiperbólica del primer metro se contrastó con un plano de las canalizaciones de aguas del entorno del Monasterio coincidiendo con una de ellas; su profundidad estimada es de 1 metro, aunque este dato no pudo ser comprobado al no coincidir ese punto con alguna de las zonas de excavación. El pequeño muro situado en el metro 5.5 afloraba ligeramente en superficie, mientras que la anomalía situada entre los metros 6 y 8 se diferencia de las anteriores, resultando más llamativa por su geometría. Las excavaciones

posteriores revelaron una base formada con pequeños cantos relacionada con el suelo de una de las celdas. Por último, entre 9.5 y 10 metros se localiza un nuevo muro que también fue confirmado por la excavación.

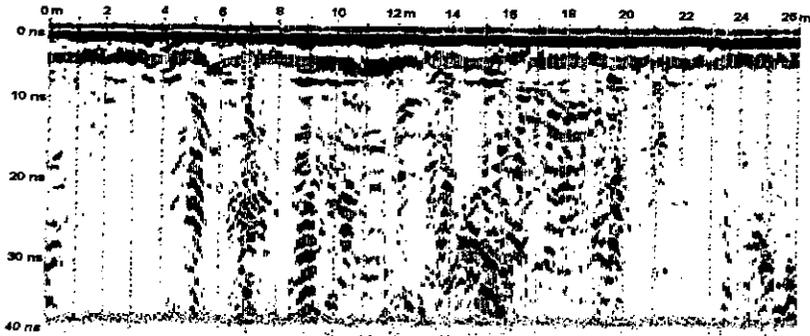


Fig. 12. Registro de geo-radar de 26 metros, transversal al de la figura 10, realizado con la antena de 500 MHz y un rango de tiempos de 40 ns.

En la figura 12 se muestra un perfil transversal al anterior con una longitud de 26 metros; su interpretación se realiza en la figura 13. La anomalía señalada en el

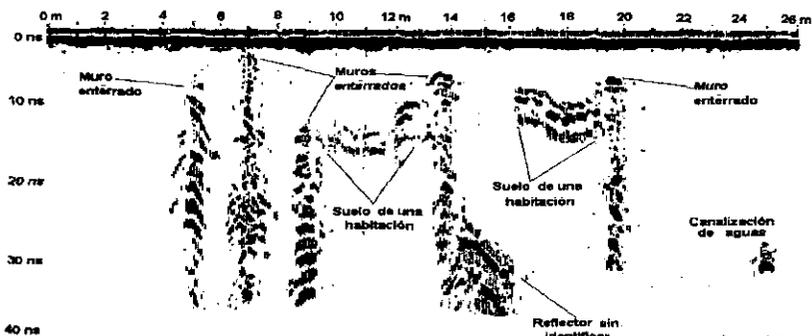


Fig. 13. Interpretación de la figura 12.

metro 5 coincide con la prolongación de un muro localizado en las excavaciones cercanas a esa zona, mientras que el muro situado en el séptimo metro se apreciaba en la misma superficie del terreno. En el metro 9 se marca otra anomalía que se podría corresponder con un nuevo muro, sin embargo no fue posible confirmar esta hi-

pótesis con datos de las excavaciones. A partir de este posible muro se localiza una zona de unos 3.5 m de longitud de características similares a la reflexión de los metros 6 a 8 del perfil de la figura 10. Este supuesto suelo pavimentado finaliza en el metro 16 con la presencia de un nuevo murillo, confirmado por excavación, cuya parte superior está adaptada como un conducto para que discurriese el agua.

En el metro 15 se centra una anomalía, situada a una profundidad del orden de los 1.5 metros, que no fue posible relacionar con ningún elemento conocido. Entre los metros 16 y 19 la excavación de la zona mostró de nuevo un suelo empedrado con pequeños cantos y limitado por el muro localizado por el radar entre los metros 19 y 20. Finalmente, a la altura del metro 25 se ha marcado una última anomalía que fue posible identificar dentro del mapa de conducciones de agua mencionado a propósito del reflector del primer metro del perfil de la figura 10. En este caso la conducción de agua se encuentra a mayor profundidad que la anterior, aproximadamente a 1.5 m.

5. CONCLUSIONES

El geo-radar se presenta como una técnica idónea de apoyo a las investigaciones arqueológicas. La manejabilidad de sus equipos, junto con la rapidez de operación y la posibilidad de interpretación de resultados en tiempo real pueden ser utilizados para facilitar enormemente las labores de excavación, al situar sobre el terreno las zonas donde se detecten los distintos elementos reflectores presentes en el subsuelo.

En el estudio realizado en Numancia fue posible situar unas anomalías identificables como las murallas buscadas; las alineaciones propuestas se encuentran en el presente momento pendientes de excavación. En términos generales se puede afirmar que las anomalías detectadas por el radar son confirmadas por un aumento de resistividad en las curvas de calicatas eléctricas, manifestándose más definidas las anomalías en los registros de geo-radar, lo cual no es de extrañar teniendo en cuenta el carácter más global de las calicatas eléctricas. Ello realza el avance que supone la utilización del geo-radar dentro de los trabajos de prospección geofísica en los que se requiera una alta resolución.

Con respecto al estudio realizado en El Paular, los registros son mucho más ricos en información y las excavaciones posteriores permitieron comprobar como el geo-radar fue capaz de detectar y discriminar muchos de los elementos enterrados en el subsuelo, a pesar de estar situados en una superficie muy reducida y el pequeño tamaño de muchos de ellos.

6. AGRADECIMIENTOS

Nuestro agradecimiento al Dr. D. Carlos Oteo Mazo, Director del Laboratorio de Geotecnia del CEDEX (MOPTMA), que cedió el equipo de geo-radar

del citado centro, un modelo SIR-8 de la casa GSSI, para los estudios llevados a cabo en Numancia y El Paular.

Queremos también mostrar nuestro sincero agradecimiento al Dr. D. Vicente Cuéllar Mirasol del Laboratorio de Geotecnia, codirector de la Tesis Doctoral de Enrique Lorenzo de la cual están extraídos los trabajos presentados en el presente artículo.

REFERENCIAS

- HERNÁNDEZ, M. C. (1992): *Estudio Geofísico en Numancia (Soria)*. Informe Técnico para la Junta de Castilla y León. Instituto Tecnológico Geominero de España. Mapa Geológico de España, carta 350 (Soria). Escala 1:50.000.
- LORENZO, E. (1994): *Prospección Geofísica de Alta Resolución Mediante Geo-radar. Aplicación a Obras Civiles*. Memoria presentada para la obtención del grado de Doctor en Ciencias Físicas. UCM.