

APLICABILIDAD DEL RADAR DE SUBSUELO PARA EL ESTUDIO DE LA ZONA NO SATURADA DEL SUELO: EJEMPLOS EN AMBIENTES ARENOSOS COSTEROS

K. Biskup¹, H. Lorenzo² y P. Arias²

¹ Departamento de Ingeniería de los Recursos Naturales y Medio Ambiente, Universidade de Vigo. ETSE Minas, Campus Lagoas-Marcosende, 36310 – Vigo; biskupka@uvigo.es

² Departamento de Ingeniería de los Recursos Naturales y Medio Ambiente, Universidade de Vigo. EUET Forestal, Campus A Xunqueira, 36005 – Pontevedra; hlorenzo@uvigo.es; parias@uvigo.es

RESUMEN. El geo-radar o radar de subsuelo, internacionalmente conocido como GPR, es una técnica de teledetección cercana y prospección basada en la emisión de un pulso electromagnético de muy corta duración (1-20 ns) caracterizado por una frecuencia nominal que puede oscilar entre los 10 MHz y los 2,5 GHz, en función de la antena seleccionada. Su objetivo final es la obtención de radargramas, pseudo-imágenes que se aproximan a una sección transversal del subsuelo bajo la línea de desplazamiento de las antenas, de modo similar a las obtenidas por los métodos clásicos de sismica de reflexión. En este trabajo se presentan algunos de los principios básicos de esta técnica, junto con un análisis sobre su utilidad, ventajas y limitaciones para el estudio de la zona no saturada del suelo. Para ilustrarlo se han incorporado algunos ejemplos de aplicación en entornos arenosos costeros, que incluyen información sobre la secuencia estratigráfica en sistemas dunares, así como la detección y profundidad del nivel freático y el manto rocoso. Asimismo, se ha incorporado un ejemplo para ilustrar las acciones llevadas a cabo para la detección de contaminantes ocultos bajo la arena en las playas, derivados del vertido de fuel del buque Prestige en noviembre de 2002.

ABSTRACT. Ground-penetrating radar, GPR, is a remote sensing and geophysical method based on the emission of a very short electromagnetic pulse (1-20 ns) in the frequency band of 10 MHz - 2,5 GHz to obtain cross-section images of underground features using in-situ sensors. GPR principles of operation are based in the ability of low frequency radar waves to penetrate into non-conductive medium, usually subsoil but also walls, bridges, etc. In this work some applications of GPR in the study of coastal sand environments are presented, where it was possible to recognize the stratigraphic sequence developed, mainly constituted by horizontal layers else with progradation sequences, together with the water table and bedrock depth. It also includes some examples of the research carried out for the detection of contamination levels buried in the sand of some beaches in Galicia, in relation with the Prestige fuel-oil spill.

1. Introducción

El geo-radar es una técnica no destructiva orientada al estudio del subsuelo superficial y que se fundamenta en la capacidad de las ondas de radar de baja frecuencia (10 MHz - 2,5 GHz) para propagarse a través de medios poco conductivos. El método emplea una antena emisora para dirigir pulsos electromagnéticos de 1-20 ns de duración hacia el interior del terreno. Este frente de ondas es parcialmente reflejado al encontrar una discontinuidad o un cambio de material en el subsuelo, pudiendo ser detectado en la superficie mediante una antena receptora dispuesta a tal efecto. Al ir desplazando el sistema sobre la superficie del terreno será posible registrar la historia de reflexiones detectadas en el subsuelo bajo la línea de desplazamiento del equipo. De esta forma se obtienen los llamados radargramas, similares a los registros clásicos de sismica de reflexión, pero con la gran diferencia de que, en el caso del radar, la propagación de las ondas está condicionada por las características electromagnéticas del medio de propagación.

El empleo del GPR se ha ido popularizando con el paso de los años desde que en la década de los 70 aparecen publicados los primeros trabajos centrados en el ámbito geológico y minero (Unterberger, 1974; Annan y Davis, 1976; Rubin y Fowler, 1977), cuyo objetivo principal perseguía estimar la capacidad de penetración máxima de las ondas en el subsuelo empleando antenas de 50-100 MHz. Posteriormente, en los años 80, el método comienza a ser aplicado para estudios más superficiales, y cobran protagonismo las antenas de 200-500 MHz, de penetración somera pero resolución submétrica, siendo posible destacar los trabajos doctorales de Ulriksen (1982) y Glover (1987), con aportaciones novedosas en estudios medioambientales y el campo de la geotecnia. A partir de los años 90, las antenas de 500 MHz - 1,5 GHz son prolíficamente utilizadas para el análisis de construcciones y estructuras en ingeniería civil tales como carreteras o puentes (Chung et al. 1994; Saarenko y Roimela, 1998; Lorenzo et al. 2001) y también en estudios arqueológicos (Goodman, 1994; Carcione, 1996; Pérez-Gracia et al. 2000). También ha sido en estos últimos 15 años cuando se ha multiplicado el empleo del sistema para investigaciones en entornos

costeros sedimentarios (Bristow, 1995; Jol et al. 1996; Harari, 1996; Fitzgerald y Van Heteren, 1999; Bristow et al. 2000; Van Dam et al. 2000; Jol et al. 2002). De singular interés en este ámbito es la selección de artículos resultado del congreso “Ground Penetrating Radar (GPR) in Sediments: Applications and Interpretation” editada por Bristow y Jol (2003), donde se pone de manifiesto el potencial del GPR para obtener información 2D y 3D de alta resolución en estructuras sedimentarias. Una completísima y actualizada revisión del estado del arte sobre el tema puede ser consultada en Neal (2004).

Una vez contextualizado el presente trabajo, es posible resumir sus principales objetivos de la siguiente manera: i) introducir los aspectos teóricos que faciliten la comprensión del método, ii) mostrar la forma de adquisición de los registros y su interpretación, iii) describir los componentes habituales de un sistema, debatiendo sobre sus ventajas y limitaciones, y iv) seleccionar un conjunto representativo de ejemplos que pongan de manifiesto la aplicabilidad del método en ambientes arenosos costeros.

2. Fundamentos del método

Las antenas GPR han sido diseñadas para emitir un pulso de muy corta duración con el fin de mejorar la resolución vertical del método. Habitualmente este pulso está constituido por $1\frac{1}{2}$ - 2 períodos de la frecuencia nominal que caracteriza la antena. Su corta duración en el dominio de los tiempos (Δt) lleva asociado un aumento inversamente proporcional de la aportación de sus componentes frecuenciales (Δf) según la relación $\Delta t = 1/\Delta f$. Así, la mayor parte de las antenas GPR han sido diseñadas para operar con un ancho de banda similar a su frecuencia central y una duración inversamente proporcional a su centro de frecuencias.

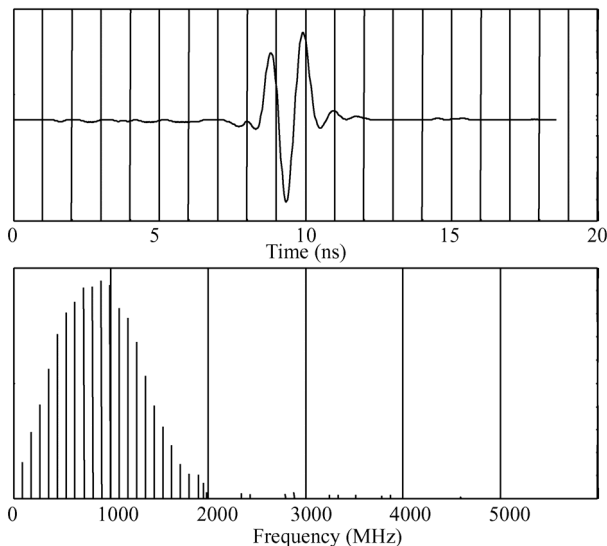


Fig. 1. Forma de la señal (arriba) y espectro (abajo) del impulso generado por una antena de geo-radar de 900 MHz.

Una descripción pormenorizada de las características de las señales GPR puede encontrarse en los trabajos de Annan (2003) y Daniels (2004).

La adquisición de datos con el geo-radar suele realizarse orientando la antena hacia el subsuelo y registrando las reflexiones detectadas tras la emisión del impulso electromagnético, obteniendo así una traza. Al desplazar la antena sobre la superficie del terreno se irán detectando y almacenando el conjunto de reflexiones existentes bajo la línea de desplazamiento de la antena. De esta forma, el eje de abscisas de los *radargramas*, o registros de geo-radar, representará el movimiento de la antena en una determinada dirección, mientras que el eje de ordenadas muestra el tiempo de retardo entre la emisión del pulso y la detección de las reflexiones en la superficie por parte de una antena receptora, siendo éste, por lo tanto, un viaje de ida y vuelta, tal y como se escenifica en la Fig. 2a.

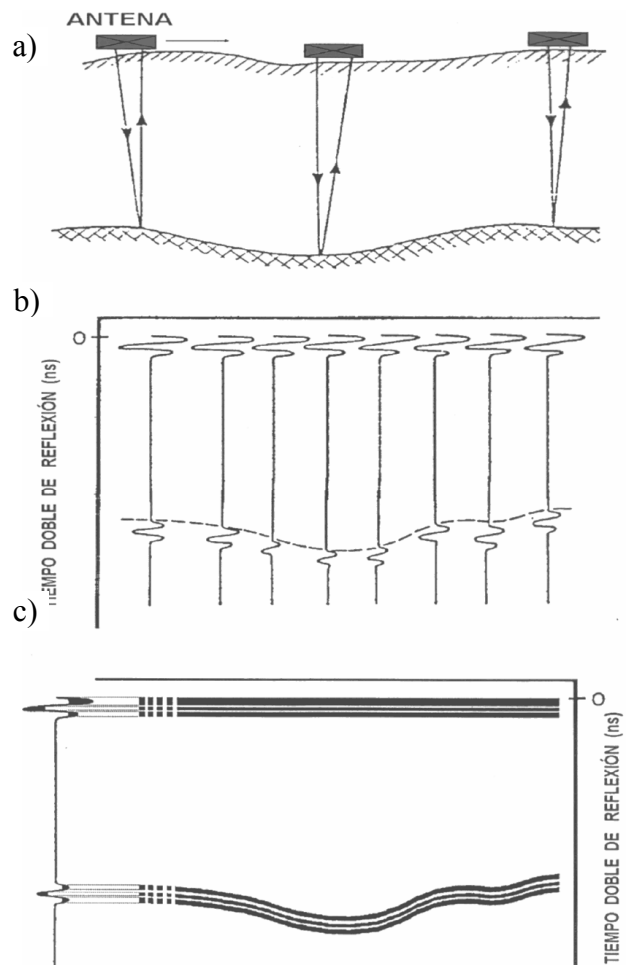


Fig. 2. Proceso de adquisición (a), radargrama en formato *wiggle* (b) y radargrama en formato *line scan* (c).

Si la velocidad (v) de propagación de las ondas en el medio es conocida, el eje temporal de ordenadas puede ser transformado a profundidades (z) a través de la simple relación $z = v \cdot twt / 2$. Por su parte, la velocidad puede ser deducida a partir de la siguiente ecuación:

$$v = \frac{I}{\sqrt{\frac{\mu\epsilon}{2} \left(\sqrt{I + \left(\frac{\sigma}{\omega\epsilon}\right)^2} + I \right)}} \quad (1)$$

donde ϵ es la constante dieléctrica del material, σ su conductividad, μ la permeabilidad magnética y ω es la frecuencia angular central del pulso emitido. En medios poco conductivos, aquellos en los que se pueda aceptar que $\sigma \ll \omega\epsilon$, la ecuación (1) admite una simplificación, pudiendo aproximarse la velocidad a través de la siguiente expresión

$$v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad (2)$$

donde c es la velocidad de propagación de las ondas en el vacío y ϵ_r es la constante dieléctrica relativa del material (variando entre 1-81). En la mayor parte de medios susceptibles de estudio con geo-radar la velocidad oscila entre los 0.3 m/ns (aire) y los 0.03 m/ns (agua dulce).

Como se ha comentado, la antena emisora genera un impulso de corta duración que es transmitido al terreno; mientras tanto, la antena receptora permanece activa tratando de detectar la energía reflejada en los elementos presentes en el subsuelo. La técnica es, en principio, similar a la del sonar o a los métodos de sísmica de reflexión -salvo el empleo de ondas electromagnéticas-, y en ocasiones los usuarios prefieren interpretar los radargramas con la misma apariencia de los perfiles sísmicos (*wiggle plot*, Fig. 2b). La velocidad de procesamiento de los sistemas radar permiten almacenar muchos más datos que los métodos sísmicos, que deben ser considerados puntuales. Los equipos de geo-radar disponen de relojes internos de 50-100 KHz que les permiten procesar gran cantidad de pulsos con los cuales generan varias trazas por segundo. Por este motivo, si la antena se desplaza a baja velocidad es preferible transformar las trazas individuales en un formato de áreas de barrido (*line scan*, Fig. 2c), el cual ofrece una sensación de continuidad que facilita la interpretación.

Cuando el pulso emitido detecta una discontinuidad electromagnética (por ejemplo un cambio en las propiedades del medio de propagación o una capa de material diferente), parte de la energía es reflejada de vuelta mientras que el resto continúa su camino a través del nuevo medio. La energía reflejada en la interfase de dos medios depende del contraste entre sus impedancias (η) que se manifiesta en el llamado coeficiente de reflexión (r), que puede expresarse según la siguiente ecuación, siempre y cuando pueda aceptarse incidencia normal:

$$r = \frac{\eta_2 - \eta_1}{\eta_1 + \eta_2} \quad (3)$$

La ecuación (3) admite una expresión simplificada cuando se trate de medios poco conductivos, tal y como

sucedía en la simplificación de la ecuación (1), obteniendo r en función del contraste entre constantes dieléctricas relativas de ambos materiales:

$$r = \frac{\sqrt{\epsilon_1} - \sqrt{\epsilon_2}}{\sqrt{\epsilon_1} + \sqrt{\epsilon_2}} \quad (4)$$

Así pues, para garantizar la obtención de buenos resultados al aplicar la técnica en un determinado entorno, será necesario que se den, de forma simultánea, dos factores externos e independientes del sistema y del equipo humano que lo maneje: que exista suficiente contraste electromagnético entre ambos medios y, sobre todo, que el medio de propagación sea suficientemente resistivo para no atenuar dramáticamente la señal emitida. Estos medios poco conductivos, aquellos donde $\sigma \ll \omega\epsilon$, son los susceptibles de ser estudiados mediante la técnica del geo-radar. Una discusión detallada sobre las posibilidades de empleo de la técnica puede consultarse en Lorenzo (1996) y Pérez-Gracia (2001).

3. Equipos y formas de trabajo

Un sistema de geo-radar está constituido, esencialmente, por los componentes que pueden observarse en la Fig. 3.

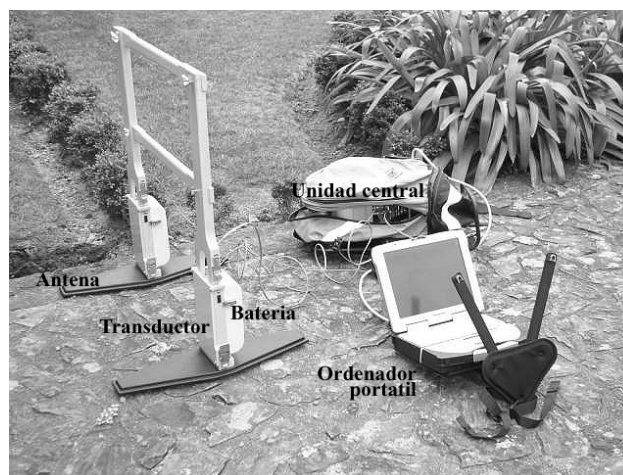


Fig. 3. Componentes habituales en un sistema de geo-radar, donde se muestra un par de antenas no apantalladas de 200 MHz.

Las antenas, que pueden operar en modo biestático (una antena emite y la otra recibe) o en modo monoestático (una sola antena hace de emisor y receptor), pueden estar situadas dentro de una estructura apantallada o bien carecer de la misma, tal es el caso de las antenas de 200 MHz mostradas en la Fig. 3. En cada antena está situado un transductor que es el encargado de interpretar las ordenes de emisión-recepción que le llegan de la unidad central a través de un cable coaxial o, en los equipos más modernos, a través de fibra óptica. Las antenas de un sistema son intercambiables y deben seleccionarse en función de la profundidad deseada para la prospección y de la resolución

demandada. Para alta penetración (10-30 m) se utilizan antenas de 50-200 MHz; para estudios de los primeros 3-5 m del subsuelo se emplean antenas de 500 MHz, que proporcionan un buen compromiso entre penetración y resolución; en estudios de alta resolución se emplean antenas de alta frecuencia (800 MHz - 1.5 GHz) que difícilmente penetran más allá de 1 m pero permiten localizar elementos centimétricos.

La unidad central es el corazón del sistema, desde el cual se configura la adquisición de datos, se gestionan las antenas y se da salida a los datos adquiridos. Por regla general, la unidad central se configura mediante un software instalado en un ordenador portátil; este ordenador sirve, además, para almacenar la información y para visualizarla en tiempo real, si bien también existen en el mercado equipos que integran un ordenador con un pequeño monitor a bordo de la unidad central.

Respecto a las formas de operación con un sistema geo-radar, las más habituales son las conocida como *common-offset* y *common-midpoint* (Zhou y Sato, 2001). La primera es aquella donde la distancia entre las antenas emisora y receptora permanece constante a lo largo de los perfiles estudiados, tal y como se esquematizó en la Fig. 2, mientras que la segunda es una adaptación del método habitualmente empleado en sismica y cuyo objetivo final no es la obtención de un radargrama sino conseguir una estimación fiable de la velocidad de propagación de las ondas en el medio.

4. Aplicabilidad

En este apartado se resumen algunos de los campos de aplicación donde el geo-radar ha demostrado ser una técnica de gran utilidad de forma, junto con las ventajas y limitaciones del método frente a otras alternativas en prospección del subsuelo.

Aplicaciones medioambientales: detección de plumas de contaminación, delimitación de vertederos, localización de bidones y/o depósitos enterrados

Geología y geotecnia: estratigrafía del subsuelo, profundidad de la roca, localización del nivel freático, detección de cavidades, fracturas y fallas.

Obra civil: localización de servicios enterrados (metálicos y no metálicos), evaluación de estructuras de hormigón, control del pavimento en firmes de carreteras, patologías en la construcción.

Arqueología: localización de estructuras enterradas, posicionamiento de túneles y/o galerías ancestrales, estudios in-situ en edificios históricos.

Cartografía: batimetrías en agua dulce (y espesor de la capa de sedimentos depositados), mapeado de glaciares.

Desde una perspectiva numérica, es posible destacar como del análisis espectral de los impulsos reflejados es posible extraer información cuantitativa adicional acerca de los materiales atravesados, tal es el caso de la evaluación de la porosidad en materiales de construcción o la estimación del contenido de humedad en suelos.

4.1. Ventajas

El geo-radar genera una imagen del subsuelo que supera en resolución a cualquier otro método de prospección, permitiendo tanto la identificación de elementos singulares como la caracterización del entorno. En un método no destructivo y no invasivo, por lo que no produce ningún efecto secundario sobre el medio estudiado. Es una técnica rápida en su ejecución y aplicable en la mayoría de situaciones, destacando en especial su aplicabilidad en entornos urbanos. Por último, destacar la posibilidad de interpretación en tiempo real, pues los radargramas se generan a la vez que se adquieren los datos, lo que permite aportar información instantánea sobre el propio terreno.

4.2. Limitaciones

El principal condicionante del geo-radar se refiere a su penetración limitada en el subsuelo. Por una parte los equipos han sido diseñados para ser ligeros y poder ser manejados por 1-2 personas, lo que implica una reducción del tamaño de las fuentes de alimentación y que redundan en una potencia limitada en cuanto al impulso emitido y, por lo tanto, su penetración en el medio. Por otra parte, la naturaleza del suelo juega un factor decisivo en ese aspecto, ya que los medios conductivos (por ejemplo, arcillas húmedas) pueden llegar a atenuar totalmente la señal, haciendo inútil la aplicación del método. Por otra parte el método presenta cierta dependencia de las condiciones superficiales, que pueden llegar a enmascarar los registros provocando interpretaciones erróneas; esto suele suceder cuando el contacto entre las antenas y el suelo no es el idóneo (provocando reflexiones adicionales relacionadas con la variación del contraste de impedancias antena-suelo), o cuando en la superficie estén presentes elementos metálicos que enmascaran parcialmente las reflexiones del subsuelo (por ejemplo las armaduras en un forjado de hormigón). Otros factores que pueden originar distorsiones y/o interpretaciones erróneas se relacionan con la presencia cercana de fuentes emisoras de campos electromagnéticos intensos (líneas de alta tensión) y el empleo de teléfonos móviles o, especialmente, radiocomunicadores tipo walkie-talkie por parte de los operarios.

Con todo, el principal inconveniente del geo-radar no se deriva de las razones anteriores, sino de su empleo inadecuado; su uso sin el conocimiento adecuado de sus capacidades impide el aprovechamiento óptimo de sus ventajas y puede llevar a incurrir en errores que perjudican el prestigio de la técnica al presentar resultados no acordes con el alcance real de la técnica.

5. Ejemplos de aplicación

En este último apartado se presentan un conjunto de ejemplos de aplicación de las técnicas de geo-radar principalmente orientados al estudio de la zona no saturada de suelo, y más concretamente a resultados obtenidos en diversos estudios e investigaciones llevadas a cabo en entornos arenosos costeros. Por regla general, es posible

afirmar el excelente funcionamiento del sistema en medios arenosos como playas o dunas, tanto si éstas están secas, húmedas o saturadas (Harari, 1996), siempre y cuando permanezcan al margen de la influencia del agua salada del mar, cuya presencia modifica drásticamente las propiedades electromagnéticas del suelo, provocando la atenuación total de la señal.

5.1. Nivel freático

Como ejemplo de la capacidad de detección de la profundidad del nivel de las aguas subterráneas se ha seleccionado un radargrama representativo de un estudio llevado a cabo en las dunas de la Praia de Rodas, en las Islas Cíes, barrera natural de arena que une dos de esas islas a la entrada de la Ría de Vigo y que está flanqueada al este por el llamado Lago dos Nenos, tal y como se puede apreciar en la Fig. 4.



Fig. 4. Fotografía aérea de la Praia de Rodas en las Islas Cíes (Vigo).

La presencia del *lagoon*, al oeste, y la ría propiamente dicha, al oeste, limitan la longitud de los perfiles transversales, viéndose afectada la capacidad de penetración del sistema al comienzo y final de los perfiles debido a la influencia del agua salada. La Fig. 5 recoge un radargrama representativo de los registros obtenidos, una vez efectuada la corrección topográfica relacionada con las variaciones altimétricas a lo largo del perfil.

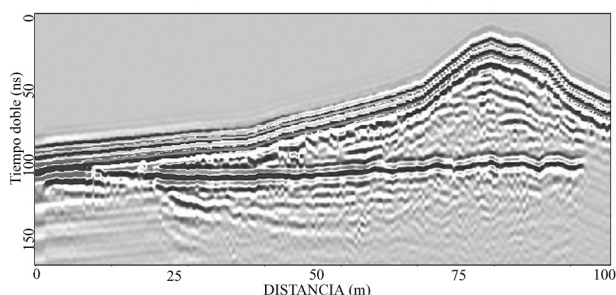


Fig. 5. Registro de 100 m de longitud efectuado con un par de antenas de 200 MHz y corregido por topografía. El reflector plano se identifica con el nivel de las aguas subterráneas bajo la duna, situado a una profundidad máxima de 4,5 m desde lo alto de la duna.

El registro tiene una longitud de 100 m y fue obtenido con un par de antenas no apantalladas de 200 MHz, seleccionando una ventana de tiempos de unos 150 ns. La velocidad estimada de las ondas es de 14 cm/ns, lo que podría permitir alcanzar una profundidad máxima estimada de aproximadamente 10 m. En el registro llama la atención la presencia de un reflector continuo que se manifiesta como sensiblemente plano tras haber efectuado la corrección topográfica. Este reflector se relaciona con la presencia de aguas subterráneas (no marinas), siendo muy superficial al comienzo del perfil para prolongarse por debajo de la duna según avanza la toma de datos en el registro. Su profundidad en la cota máxima de la duna se ha estimado en 4,5 m, utilizando para el cálculo el valor de la velocidad indicado anteriormente.

El radargrama presenta, además, unos efectos de atenuación que están perfectamente documentados en textos especializados y que suelen identificarse con la presencia de suelos conductivos en la zona de prospección (Daniels et al. 1995; Carcione et al. 2003). En el caso que nos ocupa, la atenuación que se manifiesta en los 25 primeros metros (por debajo del nivel detectado) estaría relacionada con la presencia de agua marina procedente del *lagoon*. A partir del metro 95 el registro se prolonga hacia la ría sobre la arena directamente influenciada por el efecto de las mareas, atenuándose totalmente e impidiendo dar continuidad al reflector.

5.2. Estratigrafía

En el registro de la Fig. 5 también es posible apreciar algunas reflexiones en el interior de la duna (especialmente entre los metros 75 a 90) que están relacionadas con su estratigrafía interna. Sin embargo la baja resolución de las antenas de 200 MHz impide delimitarlas con claridad, motivo por el cual se efectuó un nuevo perfil cercano al anterior pero empleando en este caso una antena monoestática de 500 MHz (Fig. 6), que ha demostrado su idoneidad para este tipo de estudios estratigráficos, tal y como han puesto de manifiesto autores como Bristow et al (2000). Las antenas de 500 MHz se caracterizan por mejorar la resolución vertical del método y, aunque habitualmente presentan mayores limitaciones en cuanto a su penetración, fue perfectamente capaz de salvar el espesor de arena hasta el nivel del agua, incluso en la cota máxima de la duna.

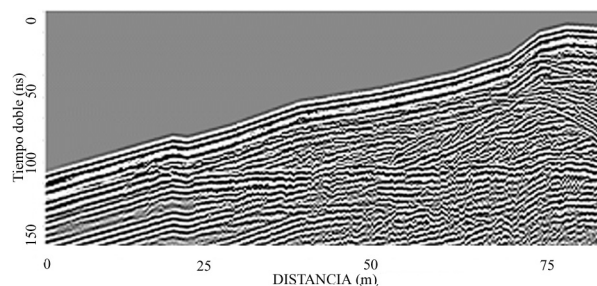


Fig. 6. Registro de 80 m cercano al de la Fig. 5 pero efectuado con una antena apantallada de 500 MHz. Se aprecian reflectores inclinados relacionados con la secuencia estratigráfica de la duna.

En el radargrama de la Fig. 6 se muestran los 85 primeros metros del perfil mencionado, prácticamente coincidentes con el incluido en la Fig. 5. El aumento en la resolución vertical del registro facilita la identificación de reflectores indicativos de su interior. Estos reflectores son representativos de la estructura interna de la barrera de arena, cuya zona hacia tierra estaría dominada por depósitos con suave inclinación, si bien el objeto de este trabajo no pretende aportar una interpretación detallada de este tipo de reflectores (que se someten al estudio de especialistas sedimentólogos) como mostrar el potencial del sistema para obtener información complementaria del subsuelo que pueda ser utilizada por expertos en la materia para avanzar en un mejor conocimiento de estas estructuras arenosas.

5.3. Manto rocoso

Las posibilidades de detección de la roca están muy condicionadas por su profundidad, su grado de meteorización y el tipo de material sedimentario que las cubre. En entornos arenosos costeros la profundidad de la roca puede ser muy variable, pero la penetración de las ondas dentro de los 10-20 primeros metros de la arena que la cubre está casi garantizada siempre que se elija la antena adecuada y no exista influencia del agua salada.

Para ilustrar este tipo de estudios se muestran dos registros obtenidos durante una campaña efectuada también

en las Islas Cíes, pero cuyo cometido era obtener información sobre la profundidad y continuidad de la roca en determinados puntos. La Fig. 7 plasma las tareas de adquisición de datos donde se emplearon dos tipos de antenas: una de ellas de 250 MHz, apantallada, con toma de datos continua, y un par de antenas no apantalladas de 100 MHz, con adquisición punto a punto. Sus correspondientes radargramas se muestran en la Fig. 8.



Fig. 7. Toma de datos en las Islas Cíes con una antena apantallada de 250 MHz. La flecha indica el eje del vial sobre el que se efectuó el estudio, constituido por losas de hormigón que permanecen ocultas bajo la arena.

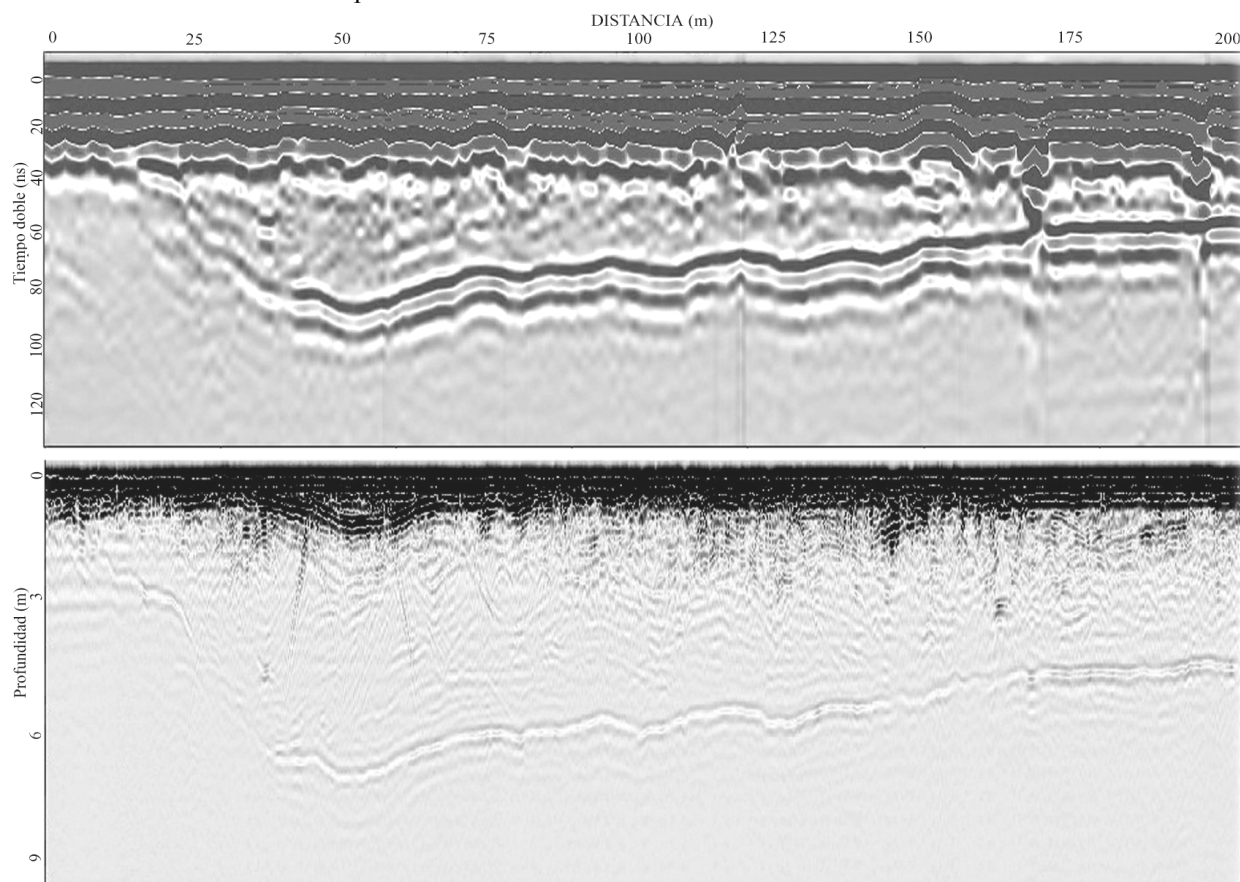


Fig. 8. Perfiles de 200 m efectuados con una antena no apantallada de 100 MHz (superior, a) y otra apantallada de 250 MHz (inferior, b) donde se detectan las reflexiones relacionadas con la roca madre. En ambos casos la ventana de tiempos fue fijada en 120 ns, equivalentes a unos 9 m de profundidad.

La longitud de ambos registros fue de 200 m, mientras que la elección de antenas de baja frecuencia se realizó bajo la hipótesis de alcanzar una profundidad máxima del orden de 20 m, por lo que la ventana de tiempos fue establecida inicialmente en 250 ns. La interpretación de los registros en tiempo real, es decir, durante las tareas de adquisición, permitió apreciar in-situ que la profundidad máxima de la roca en las áreas estudiadas no superaba los 10 metros. Así, se rediseñó la configuración del sistema reduciendo la ventana de tiempos a la mitad (120 ns) dando como resultado la obtención de los registros incluidos en la Fig. 8, y que facilitan una interpretación comparativa entre ambas antenas.

El radargrama de la antena de 100 MHz (Fig. 8a) muestra con claridad un reflector continuo a profundidad variable que se identifica como el contacto arena-roca. La roca desciende bruscamente hasta alcanzar una profundidad máxima en el metro 50 del registro; la reflexión asociada a este punto se localiza tras un retardo (tiempo doble de reflexión) de unos 90 ns que equivalen a una profundidad aproximada de 7 metros. A partir de este punto, la roca manifiesta ascensos y descensos locales pero con tendencia a subir su cota hasta los 5 metros de profundidad. Es necesario señalar que la señal directa que se produce entre los dipolos emisor y receptor de esta antena provoca un fenómeno de sobresaturación de la señal que impide reconocer las reflexiones que pudieran tener lugar en los primeros 40 ns del registro (aproximadamente unos 3 metros).

Con respecto al registro obtenido con la antena de 250 MHz (Fig. 8b) se pueden destacar los siguientes aspectos: al ser una antena de mayor frecuencia su penetración en el subsuelo es menor, lo que -en este caso- no le ha impedido ser capaz de atravesar la capa de arena y reflejarse en el contacto sedimento-roca, si bien la amplitud de las reflexiones asociadas se ve fuertemente atenuada con respecto al registro anterior. Su mayor resolución vertical hace que en el registro sea posible apreciar algunas reflexiones internas relacionadas con la estructura interior de la capa de sedimentos, aunque para obtener un registro exhaustivo de los depósitos de arena sería necesario recurrir a antenas de frecuencia superior, las cuales podrían no penetrar en el subsuelo lo suficiente como para traspasar totalmente la arena y alcanzar la roca. Esta situación pone de manifiesto el interés -o casi la necesidad- de efectuar los estudios de geo-radar con al menos 2 tipos de antenas, dado que su información es complementaria y favorece una completa interpretación de la historia de reflexiones bajo la línea de desplazamiento de las antenas.

5.4. Hidrocarburos enterrados

Con motivo del hundimiento del buque Prestige en noviembre de 2002 varias mareas negras cubrieron de fuel la costa de Galicia. Uno de los principales problemas relacionados con las tareas de limpieza residía en la localización de las placas de fuel enterradas que, tras ser depositadas en la orilla, eran tapadas por la arena limpia de mareas posteriores. Estas capas permanecían ocultas a una profundidad que oscilaba entre unos pocos centímetros

hasta, en ocasiones, 1-2 metros, mientras que su espesor podía ser también muy variable, desde 1 cm hasta cerca de 1 metro.

Desde el punto de vista del GPR el problema puede ser planteado como el de las posibilidades de detección del contraste entre las propiedades electromagnéticas del fuel y la arena que lo cubre, pero teniendo en cuenta que la prospección sólo puede tener éxito siempre y cuando se efectúe en zonas suficientemente alejadas de la influencia de las mareas, ya que la presencia de agua salada en el medio imposibilita totalmente la aplicabilidad del método, tal y como se ha comentado en apartados anteriores.

Si bien las características electromagnéticas de la arena están perfectamente documentadas en la bibliografía especializada (Annan, 2003; Daniels, 2004), apenas existe información sobre las características de este tipo de fuel pesado, conocido como de tipo 6 en la escala internacional. Aun así, todas las referencias consultadas coinciden en señalar a los hidrocarburos como materiales muy dieléctricos y con una conductividad muy baja (Daniels et al. 1995; Carcione et al. 2003), por lo que el contraste entre ambos medios parecía garantizado. Sin embargo, el modelo de contraste entre ambos medios se complica debido al hecho de que el fuel emulsiona al contacto con el agua, llegando a duplicar su volumen y variando drásticamente sus propiedades electromagnéticas.

Esta situación recomendó realizar una serie de pruebas en las playas con el fin de analizar in-situ las posibilidades de empleo del equipo. A tal efecto se realizaron un conjunto de enterramientos controlados de fuel en una zona de pruebas en la que se ensayaron registros con diversas antenas. En la Fig. 9 se muestra el radargrama obtenido con una antena de 800 MHz, donde se aprecia una placa de fuel menor de 1 m de extensión centrada en el metro 3 del perfil y enterrada a medio metro de profundidad.

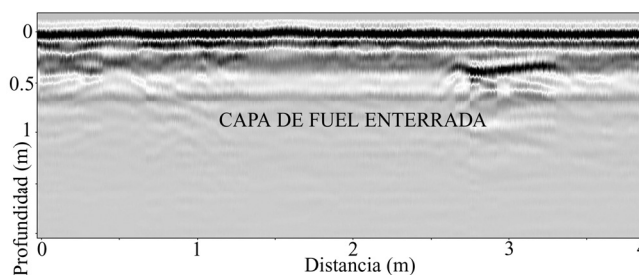


Fig. 9. Radargrama obtenido en una zona de pruebas donde se aprecia la presencia de una pequeña placa de fuel enterrada a 0,5 m de profundidad.

Los buenos resultados obtenidos permitieron ser optimistas en cuanto al empleo exitoso de la técnica para detectar el fuel enterrado. Para la toma de datos en condiciones reales de campo fue necesario efectuar diversas adaptaciones al equipo. Se incorporó un patín de ruedas anchas para el desplazamiento de las antenas por la arena; se empleó un ordenador robusto dotado de pantalla transreflectiva para mejorar la visualización e interpretación de los registros en tiempo real; finalmente, para facilitar el posicionamiento del sistema, se incorporó un equipo GPS sincronizado con el radar, de forma que aquellas capas que

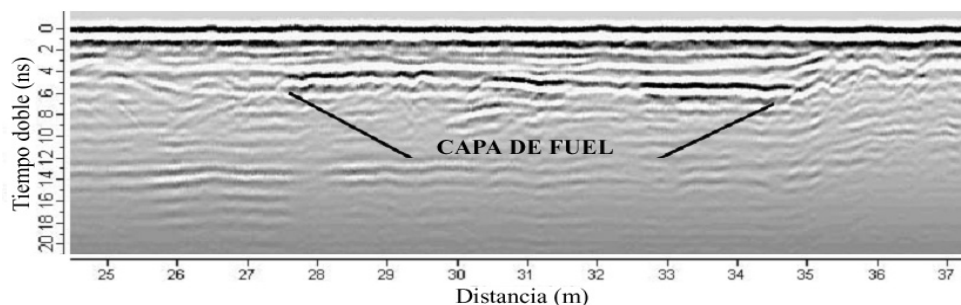


Fig. 10. Registro de 12 m obtenido con una antena de 800 MHz donde se detecta la presencia de una capa de fuel oculta bajo la arena

no pudiesen ser detectadas en tiempo real quedasen localizadas tras su identificación como tales durante las tareas de postproceso en laboratorio.

Con esta configuración se rastrearon diversas playas en las cuales fue posible detectar varias placas de fuel como la que se muestra en la Fig. 10, obtenida en los canales interdunales de la playa de Carnota (A Coruña). El radargrama fue obtenido con una antena de 800 MHz y en él es posible apreciar un reflector entre los metros 28 y 35 que se identificó, en tiempo real, como una placa de fuel enterrada dentro del primer medio metro del subsuelo. La ejecución de una malla de perfiles de detalle en esa zona permitió delimitar la zona contaminada, la cual abarcaba una superficie aproximada de unos 40 m². La precisión en el posicionamiento de la placa fue confirmada sobre el terreno mediante la excavación de catas puntuales como la que se muestra en la Fig. 11, coincidiendo con el metro 28 del radargrama de la Fig. 10.



Fig. 11. Cata realizada en el metro 28 del perfil de la Fig. 10 donde se aprecian la profundidad y los límites de la placa de fuel detectada.

Referencias

- Annan A.P. y J.L. Davis, 1976. Impulse radar sounding of permafrost. *Radio Science* 11 (4):383-394 pp.
- Annan, A.P., 2003. *Ground Penetrating Radar: Principles, Procedures & Applications*. Sensors & Software Inc, Mississauga.
- Bristow, C.S., 1995. Facies analysis in the Lower Greensand using ground-penetrating radar. *J. Geol. Soc.* 152: 591- 598 pp.
- Bristow, C.S., Bailey, S.D. y N. Lancaster, 2000. The sedimentary structure of linear sand dunes. *Nature* 406: 56-59 pp.
- Bristow, C.S. y H.M. Jol (Eds.), 2003. *Ground Penetrating Radar in Sediments*. Geol. Soc. London Spec. Publ., vol. 211. London.
- Bristow, C.S., Croston, P.N. y S.D. Bailey, 2000. The structure and development of foredunes on a locally prograding coast: insights from ground-penetrating radar surveys, Norfolk. *Sedimentology* 47: 923-944 pp.
- Carcione, J.M., 1996. Ground radar simulation for archaeological application. *Geophysical Prospecting* 44: 871-888 pp.
- Carcione, J.M., Géza, S. y G. Davide, 2003. Acoustic and electromagnetic properties of soils saturated with salt water and NAPL. *Journal of Applied Geophysics*, 52 (4): 177-191 pp.
- Chung, T., Carter, C.R., Masliwec, T. y D.G. Manning, 1994. Impulse radar evaluation of concrete, asphalt and waterproofing membrane. *IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems*, 30 (2): 404-415 pp.
- Daniels, J.J., Roberts, R. y M. Vendl, 1995. Ground penetrating radar for the detection of liquid contaminants. *Journal of Applied Geophysics* 33: 195-207 pp.
- Daniels, D., 2004. *Ground Penetrating Radar, 2nd edition*. IEE, London.
- Fitzgerald, D.M. y S. van Heteren, 1999. Classification of paraglacial barrier systems: coastal New England. *Sedimentology* 46: 1083-1108 pp.
- Glover J.M., 1987. *The use of sub-surface radar for shallow site investigations*. Ph. D. Thesis, Kings College, University of London.
- Goodman, D., 1994. Ground-penetrating radar simulation in engineering and archaeology. *Geophysics* 59: 224-232 pp.
- Harari, Z., 1996. Ground-penetrating radar for imaging stratigraphic features and groundwater in sand dunes. *Journal of Applied Geophysics*, 36: 43-52 pp.
- Jol, H.M., Smith, D.G. y R.A. Meyers, 1996. Digital Ground Penetrating Radar (GPR): a new geophysical tool for coastal barrier research. *J. Coast. Res.* 12: 960-968 pp.
- Jol, H.M., Lawton, D.C. y D.G. Smith, 2002. Ground penetrating radar: 2-D and 3-D subsurface imaging of a coastal barrier spit, Long Beach, WA, USA. *Geomorphology* 53: 165-181 pp.
- Lorenzo, E., 1996. *Prospección geofísica de alta resolución mediante georadar. Aplicación a obras civiles*. Monografías CEDEX, Madrid.
- Lorenzo, H., Cuéllar, V. y M.C. Hernández, 2001. Close range radar remote sensing of concrete degradation in a textile factory floor. *Journal of Applied Geophysics* 47: 327-336 pp.
- Neal, A., 2004. Ground-penetrating radar and its use in sedimentology: principles, problems and progress. *Earth-Science Reviews* 66: 261-330 pp.
- Pérez-Gracia, V., Canas, J.A., Pujades, L., Clapes, J., Caselles, O., García, F. y R. Osorio, 2000. GPR survey to confirm the location of ancient structures under the Valencian Cathedral (Spain). *Journal of Applied Geophysics* 43: 167-174 pp.
- Pérez-Gracia, V., 2001. *Radar de subsuelo. Evaluación para aplicaciones en arqueología y en patrimonio histórico-artístico*. Tesis Doctoral, Universitat Politècnica de Catalunya.
- Rubin, L.A. y Fowler J.C., 1977. Ground probing radar for delineation of rock features. *Engineering Geology* 12: 163-170 pp.
- Ulriksen, C.P., 1982. *Application of impulse radar to civil engineering*. Ph. D. Thesis, Lund University of Technology.
- Unterberger, R.R., 1974. Electromagnetic wave propagation in salt, probing into salt with radar. *4th Symposium on Salt, v.2, Rock Mechanics & Geophysics*: 11-26 pp.
- Saarenko, T. y P. Roimela, 1998. Ground penetrating radar technique in asphalt pavement density quality control. *Proceedings of 7th International Conference on GPR*: 461-466 pp.
- Van Dam, R.L. y W. Schlager, 2000. Identifying causes of ground-penetrating radar reflections using time-domain reflectometry and sedimentological analyses. *Sedimentology* 47: 435-449 pp.
- Zhou, H. y Sato, M., 2001. Archaeological Investigation in Sendai Castle using Ground-Penetrating Radar. *Archaeological Prospection* 8: 1-11 pp.