

Capítulo 2

Un poco de historia

Resumen.

Aunque el método de prospección con radar de subsuelo es relativamente reciente, han sido las últimas décadas posteriores a los años 70 las más fecundas en cuanto a diversidad de aplicaciones y a desarrollo del método de estudio, del tratamiento de datos y de los equipos. Dentro del tema de estudios aplicados a patrimonio, el tema más desarrollado es el referido a la parte de excavaciones arqueológicas. La primera aplicación de la que tengo noticia dentro de este campo es la de Vickers et al. (1976) en Nuevo México. El estudio se realiza en un medio sencillo y homogéneo, siendo la profundidad de estudio de 1 metro. Consiste en la localización de muros enterrados en un terreno seco. Otros estudios inmediatamente posteriores se aplican también a la localización de estructuras arquitectónicas enterradas a poca profundidad (muros, sótanos y plataformas correspondientes al piso de viviendas), generalmente en suelos secos. Las características del terreno hacen que los resultados de estos estudios sean satisfactorios. Posteriormente, el estudio de Vaughan (1986) en la península del Labrador, para localizar tumbas y elementos arquitectónicos, se aplica a un terreno húmedo y no homogéneo, formado básicamente por depósitos de playa y bloques rocosos. Es el primer estudio aplicado a arqueología que se realiza en un medio complejo. Las anomalías localizadas en este caso no superan los dos metros de profundidad. Las excavaciones que se realizan a continuación permiten calibrar los resultados, y se llega a conclusiones de cierto interés, como por

ejemplo, que los elementos del interior de las tumbas (huesos y adornos metálicos) no presentan suficiente contraste con los materiales del medio para que se puedan identificar como anomalías. Sin embargo, la alteración del terreno que produce un enterramiento sí que se observa claramente en los registros como una anomalía. También se puede comprobar que algunas anomalías se ocasionan en las inhomogeneidades del terreno y no tienen relación con los elementos buscados.

Sin embargo, la última década del siglo XX es la más fructífera en este tipo de estudios. Hay que destacar la creación de un congreso internacional monotemático sobre radar del subsuelo, que tiene lugar cada dos años y en el que cada vez se presenta un mayor número de contribuciones y al que acuden cada vez más participantes provenientes de muy distintos campos de estudio (arqueólogos, ingenieros, físicos, geofísicos, etc). El desarrollo que está alcanzando el método ha provocado que muchos investigadores se dediquen a la experimentación en laboratorio para determinar las características de propagación de las ondas en los distintos medios. Como ejemplo de esta línea de estudio están los trabajos de Knoll y Knigth (1994), Suman y Knight (1997) y Robert (1996 y 1998). Entre los trabajos experimentales apoyados por resultados reales, por ejemplo, tenemos los de Sutinen en 1992, los de Hänninen (1992 y 1997), los de Saarenketo (1998) y los de Fruhwirth et al. (1996).

Otra línea de investigación desarrollada esta década está referida al campo de la simulación por ordenador. Destacan los trabajos de Carcione (1996 y 1998), Goodman (1994), Grasmueck (1996) y Robert y Daniels (1997).

Junto a estas dos líneas de trabajo se han seguido desarrollando aplicaciones en arqueología (por ejemplo, Lorenzo et al., 1998, Pérez Gracia et al., 1998 y Conyers, 1996). Al mismo tiempo se han abierto otros campos de aplicación, los referidos a patrimonio y al estudio de edificios de interés histórico-artístico. Tenemos dentro de esta línea, por ejemplo, los trabajos de Maierhofer et al. (1998), Pérez Gracia et al. (2000, 1998 y 1997) y Papaioannou et al. (1996).

2.1 Introducción.

Cualquier tema o estudio que se emprende se sustenta sobre trabajos anteriores, sobre conocimientos previos y constituye un paso más en su evolución y progreso. La técnica de prospección con georradar aplicada a patrimonio y a arqueología no es una excepción. Los nuevos trabajos, las técnicas desarrolladas y, en general, toda la historia del método, de sus aplicaciones y de la teoría en la que se basa tienen que ser el punto de partida de cualquier estudio. Los resultados que se obtienen en cada uno de los casos estudiados y en cada uno de los ensayos realizados son una pieza más que forma parte de un mosaico más general. Conocer las otras piezas es una ayuda tanto para tener un claro punto de partida de los trabajos como para contrastar resultados y métodos.

Por este motivo en este capítulo se introduce la historia del georradar aplicado a los temas que se tratan en la presente memoria y la historia de los ensayos que se han realizado con esta técnica así como las líneas de trabajo más importantes contempladas en la actualidad. No se pretende escribir la historia de la prospección mediante ondas de radio y microondas. Actualmente se ha recorrido ya suficiente camino como para que sea necesario limitar este capítulo. Además, en un gran número de trabajos el tema de los inicios de la prospección con georradar ha sido tratado con detalle (por ejemplo, Conyers y Goodman, 1997; García, 1997; Lorenzo, 1994). La intención es mostrar un esbozo de la historia que ayude a situar los trabajos y ensayos dentro de un contexto, permitiendo entender por qué se han desarrollado estos temas y qué interés tienen estos estudios y aplicaciones.

Hay que tener en cuenta que este método de prospección es relativamente reciente, ya que aunque los primeros ensayos que podemos asociar con el método datan de las primeras décadas del siglo XX, no se desarrolla como un método práctico de prospección hasta las décadas de los años 60 y de los 70. A partir de esta época los ensayos y aplicaciones se suceden cada vez con mayor rapidez. El abanico de casos estudiados utilizando este método y el número de pruebas en distintos campos crece rápidamente. De los estudios aplicados básicamente a geología y glaciología se pasa a los estudios en ingeniería civil y, posteriormente, a los estudios relacionados con la arqueología y con el patrimonio histórico y artístico. Los resultados en este campo son lo suficientemente buenos para que el método se

siga desarrollando, de manera que las aplicaciones en estos últimos temas se suceden con rapidez hasta el día de hoy.

Aunque los primeros ensayos de penetración de ondas de radio en materiales del subsuelo datan ya de principios del siglo XX y gran parte de la teoría en la que está basado este método ya está perfectamente desarrollada a mediados de este siglo, es a partir de la década de los años setenta cuando el método se extiende ampliamente. Entre los trabajos que se publican en esa época se pueden destacar los ensayos que realiza Cook sobre la penetración de ondas de radio en diferentes frecuencias y sobre diferentes materiales del subsuelo (Cook, 1975). Se realizan estudios en medios sencillos, como los realizados por Annan y Davis en permafrost, en Tuktoyaktuk (delta del río Mackenzie), para mostrar la utilidad de equipos de radar (Annan y Davis, 1976). Junto con estas aplicaciones, se suceden los ensayos destinados a determinar las propiedades electromagnéticas de los materiales del subsuelo o del hielo (por ejemplo, Jones, 1987; Balanis et al., 1976; Emslie y Lagace, 1976; Lytle et al., 1976). En 1978 Unterberger realiza el estudio de cuatro sistemas de radar diferentes, utilizando tres frecuencias distintas (230 MHz, 440 MHz y 4300 MHz), analizando su comportamiento en medio salinos en los que pretende detectar distintos elementos: los flancos de los domos salinos, el contacto superior entre los domos salinos y el medio, fallas, pozos (que pueden encontrarse llenos de agua) y fracturas en las rocas. También calcula la velocidad de las ondas en la sal. En su publicación, Unterberger (1978) presenta una amplia bibliografía sobre autores que han analizado la propagación de las ondas electromagnéticas en rocas. Algo más tarde, en 1989, aparece una publicación de Davis y Annan en la que describen con detalle el funcionamiento del sistema, diferentes métodos de adquisición de datos y uno de los equipos comerciales del momento (pulse EKKO) que es el que utilizan para ilustrar con ejemplos de prospección, tanto en suelos como en rocas, la manera de determinar elementos anómalos y secuencias estratigráficas (Davis y Annan, 1989).

Un método muy básico de estudios de prospección con ondas de radio aparece incluso en algún libro de texto (Iakubovskii y Liajov, 1980 edición española)¹ bajo el título de radiografías con ondas radiofónicas. Se trata de un método de eco de radio que no considera las reflexiones en anomalías, sino las ondas directas que

¹ Aunque no se ha podido encontrar la fecha exacta del libro original en ruso, es posible que date de finales de los años 60 o principios de los años 70.

llegan entre dos antenas, una de ellas situada en la superficie del terreno y la otra en el interior de una galería de mina o de un sondeo. Situando esta última en distintas posiciones, es posible detectar medios con distintas conductividades, así como su posición y una estimación de su tamaño mediante las sombras que se producen en el registro debido a la diferente atenuación de la señal, que depende de la conductividad del medio por el que se propaga la señal.

Ya en el tema concreto de los estudios arqueológicos, una de las primeras aplicaciones de las que se tiene noticia es la de Vickers (Vickers et al., 1976), en el yacimiento de Chaco Canyon, en New Mexico. El medio de estudio era un terreno seco y bastante homogéneo, en el que se intentaban localizar posibles muros enterrados a profundidades inferiores a 1 metro. En la misma década se realizan también otros estudios en Estados Unidos en los que se pretenden detectar, mediante ondas electromagnéticas, restos de muros y sótanos (Kenyon, 1977; Bevan y Kenyon, 1975), así como detectar anomalías que permitan localizar muros enterrados y plataformas que se corresponden con el suelo de viviendas (Sheets et al., 1985; Fisher et al., 1980). En todos estos casos se trata de estudios en terrenos básicamente secos, de forma que la penetración de las ondas de radar es buena y se alcanzan resultados satisfactorios. En la década de los 80 los análisis con georradar se multiplican, y hay que destacar, por ejemplo, los estudios que se realizan en Red Bay, en la península del Labrador (Canadá) en los que se determina el emplazamiento de tumbas y de elementos enterrados y muros asociados con las viviendas de un poblado vasco del siglo XVI (Vaughan, 1986). El estudio se realiza en este caso sobre terreno húmedo no homogéneo en el que existen bloques rocosos y otros elementos entre el terreno formado básicamente por depósitos de playa. Los análisis, para los cuales se realizan pruebas de velocidad de propagación de las ondas electromagnéticas con objeto de poder convertir el tiempo doble de propagación en profundidades, permiten determinar anomalías siempre por encima de los dos metros de profundidad. Las excavaciones que se realizan posteriormente en la zona permiten identificar los elementos que han ocasionado los distintos eventos y las anomalías en los radargramas, comparando de este modo los resultados del estudio geofísico con los elementos existentes en el subsuelo. Gracias a estas comparaciones pueden determinar que los elementos que se encuentran en el interior de las tumbas (huesos y algunos artefactos metálicos) no contrastan lo suficiente con el medio para aparecer en los registros como anomalías características. Sin embargo, el

suelo alterado que existe en la zona de algunas tumbas sí que puede observarse como zonas claramente anómalas en los registros de georradar. Se observa también que los bloques naturales de rocas son la causa de varias de las anomalías detectadas. Otras anomalías están ocasionadas por la existencia de muros, formados por pilas de los bloques de rocas naturales que se encuentran en el terreno. Este estudio es uno de los primeros que se realizan en arqueología en un terreno complicado en el cual las ondas de radio no pueden alcanzar una gran penetración. Además presenta, como elemento interesante, la comparación de los resultados que ofrece la prospección geofísica con los resultados que se obtienen a partir de excavaciones. Otros análisis pioneros en este campo son los estudios realizados en Japón a mediados de la década de los 80. Consisten en determinar la situación de antiguas casas con suelos de arcilla en terrenos volcánicos (Imai et al., 1987). Estos autores, además de determinar el contraste entre la roca volcánica y la arcilla de los suelos de las antiguas viviendas, determinan también lo que se denominan estratos culturales, es decir, estratos en los que se encuentran los restos de una única cultura o época. Ya a finales de esta década son muy numerosos los estudios de arqueología en los que se utiliza georradar como método novedoso a investigar. Al inicio de la siguiente década los estudios extienden sus objetivos y algunos arqueólogos utilizan esta técnica para un estudio de la zona previo a las excavaciones. Esta última etapa de los estudios la desarrollo con mayor detalle en el siguiente apartado.

2.2. La última década (los años 90).

En estos últimos años se han multiplicado tanto las aplicaciones de la prospección con georradar como los estudios y ensayos que pretenden determinar su funcionamiento en distintos medios. Es ya patente la presencia de esta metodología en muchos congresos de geología y geofísica, alcanzando últimamente la importancia suficiente para ser protagonista de una sesión propia, como es el caso de los dos últimos congresos de la European Geophysical Society (EGS 1998 y 1999) o del último congreso de la European Union of Geosciences (EUG 1999). Existe, incluso, un congreso dedicado exclusivamente al georradar, denominado International Conference on Ground Penetrating Radar (GPR) que,

iniciado a finales de los años 80 -el primer congreso se realizó en Tifton, Georgia (USA) en 1986-, se realiza cada dos años, celebrándose en 1998 el séptimo evento. En estos pocos años ha ido aumentando su importancia, lo que se demuestra en el fuerte incremento del número de presentaciones y participantes de diferentes países (en el último congreso participaron investigadores y empresas de un total de 24 países), así como la gran cantidad de campos asociados con el congreso. Este último evento se dividió en 21 sesiones diferentes, además de una sesión de presentaciones en pósters, dedicadas a muy diversos temas: antenas (5 comunicaciones), aplicaciones medioambientales (4 comunicaciones), arqueología (10 comunicaciones), construcción e inspección (8 comunicaciones), detección de minas (4 comunicaciones), evaluación de materiales (4 comunicaciones), funcionamiento de sistemas de GPR (5 comunicaciones), glaciología (4 comunicaciones), hidrología (6 comunicaciones), ingeniería (5 comunicaciones), minería (2 comunicaciones), modelado numérico (8 comunicaciones), modelado de radar (5 comunicaciones), pavimentos y puentes (10 comunicaciones), problema inverso (5 comunicaciones), procesado de imágenes (4 comunicaciones), radar aplicado a sondeos (5 comunicaciones), sistemas de radar (2 comunicaciones), técnicas de procesado de señales (5 comunicaciones) y tomografía (4 comunicaciones).

Sirve este congreso de ejemplo de la importancia que está alcanzando el georradar en la actualidad como método de estudio no destructivo, así como de la gran variedad de campos asociados con este método y de aplicaciones en los que hoy en día se utiliza como método complementario o incluso como único método de estudio.

El área que trata de los ensayos de laboratorio con georradar también es amplia. Algunos de los ensayos utilizan modelos de laboratorio de diferentes materiales y mezclas para determinar sus propiedades y definir el comportamiento de las ondas de radio o de las microondas en su interior. Se realizan medidas para diferentes frecuencias variando el contenido de agua, la compactación, el contenido en arcillas y la mezcla de materiales (Lebedeva, 1998; Suman y Knight, 1997; Knoll y Knight, 1994; Campbell, 1990). Otros ensayos están basados en pruebas sobre materiales de la construcción (Maierhofer et al., 1998(a); Robert, 1998; Robert, 1996).

También hay ensayos que consisten en trabajos de campo apoyados por pruebas de laboratorio para explicar los resultados obtenidos (Saarenketo, 1998; Hänninen, 1997; Hänninen, 1992; Sutinen, 1992). Otros ensayos consisten en la realización de pruebas para determinar algunos parámetros del medio en estudio (permitividad dieléctrica, velocidad de propagación, conductividad, etc.) o para cuantificar las respuestas esperadas (Lesmes et al., 1998; Saarenketo, 1998; Fruhwirth et al., 1996; Wakita y Yamaguchi, 1996; Petinelli et al., 1994a; Petinelli et al., 1994b). De este modo se pueden ajustar con mayor exactitud los resultados obtenidos en los trabajos en campo, permitiendo una interpretación más sencilla y ajustada al medio real en el que se realizan las medidas.

Otro de los campos tratados en lo que se podrían denominar ensayos y trabajos experimentales ha sido el de comprensión de los equipos comerciales con los que se trabaja y el análisis de la respuesta del radar frente a distintos problemas (Pettinelli et al., 1994a; Pettinelli et al., 1994b). Para ello se realizan experimentos de laboratorio con las antenas, con objeto de llegar a conocer lo mejor posible su comportamiento (Moriyama et al., 1996; Lorenzo, 1994; Duke, 1990). También hay trabajos que exponen el desarrollo de un equipo determinado y su funcionamiento, siempre acompañado de ejemplos de aplicaciones en los medios para los que ha sido diseñado (Narod y Clarke, 1994; Davis y Annan, 1989).

Aunque no se trata de ensayos de laboratorio o de campo propiamente dichos, hay que mencionar los estudios de simulación, desarrollo de algoritmos y modelos matemáticos para explicar los fenómenos que se producen durante la propagación de las ondas por el medio. El objetivo de estos trabajos es predecir las respuestas del medio, obteniendo radargramas sintéticos que se comparan con los resultados obtenidos en el medio real o bien en pruebas de laboratorio. Las áreas de simulación y desarrollo de modelos matemáticos han experimentado un gran empuje, siendo quizá las más rápidamente desarrolladas durante estos años. Hay que tener en cuenta que los trabajos de modelado numérico anteriores a los que se producen durante esta década (por ejemplo los de Sen et al., 1981) han sido escasos, mientras que en los últimos años el número de estos trabajos se ha visto fuertemente incrementado, siendo posiblemente el campo que más se ha desarrollado. En algunos casos se han realizado estudios comparativos entre las ondas electromagnéticas y las ondas sísmicas, considerando sus analogías y las diferencias existentes (Carcione y Cavallini, 1995) para poder posteriormente

adaptar los abundantes programas que hay de simulación y de procesado de datos para los estudios sísmicos (Maijala, 1992). Se han desarrollado modelos y algoritmos de radiación (Carcione, 1998), atenuación (Xu y McMechan, 1997), teoría de rayos (Cai y McMechan, 1995) y reflexión de las ondas (Lázaro-Mancilla y Gómez-Treviño, 1994) para poderlos aplicar en los trabajos de simulación (Carcione, 1998) dirigidos a muy diferentes medios y problemas: medios anisótropos absorbentes (Carcione, 1996(a); Casper y Kung, 1996), medios estratificados (Wakayama et al., 1994), medios dispersivos (Zonghou y Tripp, 1997; Powers, 1996), estructuras de hormigón (Goodier y Matthews, 1998; Matthews et al., 1998); en problemas concretos de ingeniería (Carcione, 1996(c); Goodman, 1994), en trabajos de arqueología (Carcione, 1996(b); Goodman, 1994) y en análisis para la localización de objetos de dimensiones finitas enterrados (Baumgartner et al., 1998; Carcione, 1996(b); Carcione, 1996(c); Miyazaki et al., 1996; Goodman, 1994), en los que se simulan los efectos de reflexión y de difracción que se producen en estos elementos, obteniendo unos radargramas sintéticos que a menudo se comparan con los obtenidos en casos reales.

Si bien la mayor parte de los procesos de simulación y de modelado numérico se han realizado en una dimensión (por ejemplo, Goodman, 1994) y en dos dimensiones (por ejemplo, Chen y Huang, 1998; Casper y Kung, 1996; Carcione, 1996(a); Carcione, 1996(b); Carcione, 1996(c); Cai y McMechan, 1995), también se trabaja en simulaciones tridimensionales (Fan y Liu, 1998; Grasmueck, 1996), incluso en análisis de campo cercano (Roberts y Daniels, 1997).

En el campo concreto de las aplicaciones en arqueología y en los estudios de patrimonio, la utilización del georradar está cada vez más extendida. Tras el importante incremento de trabajos aplicados a yacimientos arqueológicos que se produce durante la década de los 80, se suceden aplicaciones cada vez más variadas, principalmente por ser un método no destructivo, con un sencillo manejo en campo y que ofrece interesantes resultados ya que permite limitar zonas anómalas y por lo tanto disminuir la extensión que debe investigarse posteriormente. Este resultado es importante ya que permite mejorar el desarrollo de las tareas posteriores, ahorrando tiempo y dinero. Por este motivo, el objetivo principal de muchos de los trabajos es el localizar zonas anómalas que permitan delimitar las excavaciones en un emplazamiento arqueológico concreto (Conyers, 1998; Ivashov et al., 1998; Tohge et al., 1998; Goodman, 1996; Sternberg y

McGill,1995; Butler et al., 1994; Mellet, 1992) e incluso el determinar zonas de posible interés aunque no se haya planificado una inmediata excavación, en ocasiones intentando obtener pruebas no destructivas que verifiquen la existencia de elementos conocidos gracias a la documentación antigua (Pérez Gracia et al., 2000; Lorenzo et al., 1998; Pérez Gracia et al., 1998; Sauck et al., 1998; Pérez Gracia et al., 1997(a); Pérez Gracia et al., 1997(b); Conyers, 1996; Lorenzo, 1994; Kong et al., 1992). A menudo se comparan los resultados de los registros en el emplazamiento con los radargramas sintéticos que proporcionan modelos numéricos que pretenden corresponderse con las características del emplazamiento real (Carcione, 1996; Goodman et al., 1995; Goodman, 1994; Goodman et al., 1994; Goodman y Nishimura, 1992). En algunos casos se utiliza más de un método de prospección geofísica para realizar el análisis del medio, obteniendo un modelo resultante de la comparación de los resultados obtenidos en cada uno de los métodos (Bauman et al., 1994; Imai et al., 1987). En algunos casos estos métodos se complementan, mientras que en otro sirven para confirmar los resultados.

Otra aplicación que es posible encontrar en este campo relacionado con la arqueología y el patrimonio histórico y artístico es la localización de zonas anómalas debidas a humedad en suelos y en muros de edificios históricos o artísticos (Pérez Gracia et al., 2000; Maierhofer et al., 1998(b); Pérez Gracia et al., 1998; Pérez Gracia et al., 1997(b)) o bien zonas anómalas que determinan áreas afectadas por grietas y fisuras (Liu et al., 1998; Pérez Gracia et al., 1997; Papaioannou et al., 1996).

El hecho es que este método está cada vez más extendido en áreas relacionadas tanto con la arqueología como con la conservación y restauración del patrimonio, siendo ya habitual su aplicación en los más variados trabajos.