

LA IMPORTANCIA DE LA GEOFÍSICA EN LA CONSERVACIÓN DEL PATRIMONIO

García García F.

E.T.S.I. Geodésica, Cartográfica y Topográfica, Dpto. Ingeniería Cartográfica, Geodesia y Fotogrametría. Universidad Politécnica de Valencia, Camino de Vera s/n, 46022 Valencia; fgarciag@trr.upv.es

1. INTRODUCCIÓN A LA TÉCNICA DE GEORRADAR

El estudio de las estructuras internas profundas de la Tierra se viene realizando con éxito históricamente mediante el empleo de técnicas geofísicas. Esto es debido a que, generalmente, a las profundidades que se encuentran, así como sus dimensiones, superan la resolución vertical de los métodos geofísicos empleados.

Sin embargo cuando se trata de investigaciones de las zonas superficiales del subsuelo, de estructuras u objetos de pequeñas dimensiones donde tienen lugar actividades y/o acciones antrópicas, la exigencia de incrementar la resolución vertical de los métodos de prospección adquiere una mayor transcendencia. Esta empresa en ocasiones no resulta del todo sencilla, incluso se ve agravada por las heterogeneidades y los fenómenos de atenuación propios de estos medios, especialmente en el estudio del primer o primeros metros. Un método de prospección geofísica no destructivo que permite realizar este tipo de estudios de alta resolución es el georradar. Su resolución supera notablemente a la de cualquier método geofísico clásico, como los geoeléctricos, sísmicos, magnéticos y gravimétricos (García Francisco et al., 2004).

La capacidad de penetración del georradar depende, esencialmente, de las características electromagnéticas del medio material y de su frecuencia de emisión al medio material. Esta capacidad comprende profundidades desde decenas de metros (aproximadamente unos 50 m) hasta escasos centímetros.

Además de poder registrar reflexiones en un medio material, la forma de las señales puede verse modificada o distorsionada en función de las variaciones de las características del medio penetrado, tales como la composición, distribución y relación volumétrica de cada uno de sus componentes; interacciones entre las diferentes fases presentes; intervalo de frecuencias empleadas en la emisión de ondas electromagnéticas; composición del fluido intersticial; condiciones térmicas y de presión.

La metodología de adquisición de datos en campo con georradar es sencilla y relativamente muy rápida. Estas mediciones se realizan desplazando las antenas del georradar en dispositivos/vehículos o manualmente.

El actual *modus operandi* del georradar puede originar: secciones verticales continuas (llamadas registros radar o radargramas) del subsuelo, similares en apariencia e interpretación a una sección sísmica, si se trata de GPR (*Ground Penetrating Radar*).

Esta serie de circunstancias permite emplear el georradar como técnica no destructiva en estudios de propiedades físicas, estado interno del subsuelo o de materiales y en análisis de patología constructiva (por ejemplo humedades en muros).

Históricamente la técnica de georradar se ha ido desarrollando y empleando durante estos últimos treinta años en investigaciones superficiales de alta resolución del subsuelo o de ciertos medios, fundamentalmente, en Ingeniería, Minería,

Glaciología y, en los últimos tiempos, en estudios del Patrimonio Histórico-Artístico.

Así pues, el georradar se ha ido aplicando en Glaciología (estudios de espesores de hielo, cartografiado del sustrato subglaciar, estructura interna, propiedades del hielo,...); en Ingeniería Civil (en la búsqueda de la roca base en terreno edificable, a la detección de armaduras en muros de hormigón, a la localización o cartografiado de tuberías, a la de fugas de agua, etc); en estudios geotécnicos y de control de calidad (como el control de calidad de diferentes tratamientos realizados en el terreno, el estudio del estado de túneles y firmes, así como la obtención del cubicaje de material necesario para su reparación, el análisis de un terreno buscando bolsas de arcillas, gravas u oquedades,...); en estudios ambientales (cubicaje de vertederos, localización de antiguos vertederos clausurados, etc.); en investigaciones mineras (estado de las galerías de las minas, cubicaje de materiales en canteras, estratigrafía en canteras,...); y en Patrimonio Histórico-Artístico (prospección arqueológica, para determinar lesiones en monumentos complementando estudios patológicos, como control de calidad en restauraciones, en determinación de niveles culturales,...).

Estas peculiaridades inherentes al georradar (la celeridad, la alta resolución, la direccionalidad, el rango de profundidades de penetración, el carácter no destructivo y la sencillez de los procedimientos de campo) lo convierten en una técnica idónea para estudios en el ámbito del Patrimonio Histórico-Artístico donde se ha de actuar en todo momento de forma respetuosa con el conjunto arquitectónico y sus elementos constructivos.

2. PRINCIPIOS TEÓRICOS

El radar es un sistema de detección que se empieza a utilizar durante la Segunda Guerra Mundial para la localización de aviones o barcos. Su funcionamiento básico consiste, en todos los casos, en la emisión de señales a determinadas frecuencias para detectar las

reflexiones que se producen en los objetos de interés. Un análisis posterior de las señales recibidas (que incluye el tratamiento de los datos mediante diversos tipos de filtrado), permite distinguir la señal de interés del ruido que puede generarse durante la propagación de la energía.

El georradar es un radar diseñado para que el medio por el que se propaga la energía sea el subsuelo o cualquier otro medio material. La prospección con georradar se basa en la emisión de una onda electromagnética que se propagará por un medio heterogéneo. La incidencia de esta energía en las heterogeneidades del medio provocará fenómenos de reflexión, refracción y de difracción, que podrán ser detectados por una antena receptora que captará la energía electromagnética tras su propagación por el medio material, que a menudo suele ser el subsuelo terrestre. De este modo, con este método de prospección lo que se detectará serán cambios en las propiedades electromagnéticas de los materiales del subsuelo, ya que serán los parámetros que definen estas propiedades los que, juntamente con las características de la onda emitida, determinarán la propagación de la energía por el medio.

El objetivo básico de este método de prospección es la determinación de estructuras superficiales y la detección de objetos enterrados, siendo su principal característica el ser un método de alta resolución no destructivo.

El método es similar a la sísmica de reflexión de pequeño ángulo, y los fenómenos asociados con la propagación de la energía son básicamente los mismos, diferenciándose en el rango de frecuencias de las ondas utilizadas (el georradar emplea ondas de frecuencias mucho mayores que las utilizadas en sísmica; mientras que con el primer método se trabaja dentro de un rango que se sitúa en el orden de entre los 10 MHz y los 1000 MHz, con el segundo, el rango de trabajo queda situado aproximadamente entre los 10 Hz y los 1000 Hz), así como en la naturaleza de la

emisión, que en el caso de interés es electromagnética. De esta forma, a diferencia de la prospección sísmica, en la cual son las propiedades mecánicas de los materiales las que rigen la propagación de las ondas, con el georradar, las propiedades del medio determinantes serán las electromagnéticas, es decir, la *permitividad dieléctrica*, la *conductividad* y la *permeabilidad magnética*. Produciéndose las reflexiones en los contrastes entre estas propiedades (discontinuidades). Por otro lado, las frecuencias que se utilizan en este método, mucho mayores que las empleadas en sísmica, permiten una resolución elevada en estudios superficiales de un medio (Stewart et al., 1994).

De este modo, la base de este método de prospección es la teoría de campos electromagnéticos, cuyas ecuaciones básicas fueron formuladas por Maxwell en 1867, relacionando los campos eléctrico y magnético con sus fuentes. Estas relaciones se completan con las denominadas ecuaciones de continuidad, que especifican el comportamiento de estos campos en las zonas en las que existen distribuciones superficiales de carga, es decir, ahí donde tenemos discontinuidades en el medio.

Estas ecuaciones para el campo eléctrico y magnético, se formulan (Lorrain y Corson, 1972; Carcione, 1996) como:

$$\begin{aligned}\nabla \vec{D} &= \rho_f \\ \nabla \vec{B} &= 0 \\ \nabla \times \vec{E} &= -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} + \vec{M} \\ \nabla \times \vec{H} &= -\frac{\partial \vec{D}}{\partial t} + \vec{J}\end{aligned}$$

Donde \vec{E} es el la intensidad del campo eléctrico (medido en voltios/metro), \vec{B} es la inducción magnética (medida en Webers/m²), \vec{M} es la imanación (en Amperios/metro), \vec{H} es la intensidad del campo magnético (Amperios/metro), \vec{D} es el vector de desplazamiento eléctrico (medido en

Coulombios/m²), ρ_f es la densidad de carga libre (Coulombios/m³) y \vec{J} (Amperios/m²) es la densidad de corriente debida al movimiento de cargas en la materia, y comprende tanto la densidad de corriente de cargas libres como la densidad de corriente de polarización y la densidad de corriente equivalente en materia imanada.

Las denominadas ecuaciones constitutivas relacionan la intensidad del campo eléctrico y magnético con el desplazamiento eléctrico y la inducción magnética, respectivamente. Para medios homogéneos e isótropos, las ecuaciones constitutivas tienen una expresión sencilla, relacionando estas magnitudes por medio de la permitividad dieléctrica, la conductividad y la permeabilidad magnética del material:

$$\begin{aligned}\vec{D} &= \varepsilon \vec{E} \\ \vec{H} &= \frac{\vec{B}}{\mu} \\ \vec{J} &= \sigma \vec{E}\end{aligned}$$

En general los medios que se estudiarán son medios anisótropos. En este caso, la relación que existe entre estas magnitudes se expresa a través de los tensores de la permitividad, permeabilidad y conductividad (Carcione, 1996):

$$\begin{aligned}\vec{D} &= \tilde{\varepsilon}^* \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \\ \vec{B} &= \tilde{\mu} \vec{H} \\ \vec{J} &= \tilde{\sigma}^* \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} + \vec{J}_m\end{aligned}$$

Donde \vec{J}_m es la densidad de corriente debida tanto a polarización como a magnetización del material a consecuencia de los campos eléctrico y magnético aplicados, y las expresiones $\tilde{\varepsilon}$, $\tilde{\mu}$ y $\tilde{\sigma}$ son tres tensores diagonales de dimensión 3x3.

Partiendo de las ecuaciones de Maxwell y de la ecuación de ondas, pueden obtenerse

las relaciones que rigen la propagación de una onda electromagnética en función de las propiedades del medio por el que se propaga. Con estas relaciones será posible determinar tanto la velocidad de propagación de la onda, como la longitud de onda en el medio material y la atenuación que sufre la energía durante la trayectoria.

2.1. Conductividad

Las propiedades electromagnéticas de un determinado material quedan descritas por tres parámetros: *la conductividad σ , la permitividad dieléctrica (o constante dieléctrica) ϵ , y la permeabilidad magnética μ .*

La conductividad de un medio nos proporciona una medida de la respuesta de sus cargas libres en presencia de un campo eléctrico externo, siendo el factor de proporcionalidad entre el campo libre aplicado y la densidad volúmica de corriente debido al movimiento de las cargas libres, es decir, que nos proporciona una medida de la capacidad de un material de conducir corriente eléctrica. Según la ley de Ohm:

$$\vec{J}_f = \sigma \vec{E}$$

Donde \vec{E} es el campo eléctrico externo aplicado, \vec{J}_f es la densidad volúmica de corriente debido a las cargas libres y σ es la conductividad del material que se expresa en Siemens/metro. En general, la conductividad eléctrica se presenta como un valor complejo:

$$\sigma = \sigma' - i\sigma''$$

donde σ' es la parte real de la conductividad compleja, y determina la amplitud de la corriente en fase con la intensidad del campo eléctrico externo, y σ'' es la parte imaginaria de la conductividad compleja, que determina la amplitud de la corriente desfasada respecto al campo eléctrico externo y considera el retardo en la respuesta de conducción que presenta el material en presencia de un

campo eléctrico variable con el tiempo (Sutinen, 1992).

En general podremos distinguir entre materiales conductores, semiconductores y aislantes. Pertenecen al primer grupo aquellos materiales cuya conductividad es mayor a 10^5 S/m, mientras que materiales que presentan una conductividad menor a 10^{-8} S/m se clasifican como aislantes, siendo los semiconductores aquellos cuya conductividad se encuentra entre estos dos valores.

En muchos medios nos encontraremos con que el contenido de agua en los poros del material y la composición química de ésta, son los que determinan su conductividad más que los granos minerales que lo componen.

2.2. Permitividad dieléctrica

La permitividad dieléctrica absoluta es una constante de proporcionalidad entre el campo externo aplicado y el vector desplazamiento eléctrico \vec{D} :

$$\vec{D} = \epsilon \vec{E}$$

La permitividad absoluta, ϵ (medida en el S.I. en Faradios/metro), se define como el producto entre una permitividad relativa del material, que es una constante adimensional y la permitividad dieléctrica del vacío ($\epsilon_0 = 8.854 \times 10^{-12}$ Faradios/metro):

$$\epsilon = \epsilon_0 \epsilon_r$$

La permitividad dieléctrica relativa es una constante que da una medida de la capacidad de polarización de un material en presencia de un campo eléctrico. Nos proporciona un valor de la respuesta estática de un material cuando está en presencia de un campo eléctrico externo. La constante dieléctrica relativa del vacío es 1.

La constante de proporcionalidad (adimensional) entre la polarización de un material y el campo externo es la susceptibilidad, χ .

$\vec{D} = \vec{P} + \epsilon_0 \vec{E} = \chi \epsilon_0 \vec{E} + \epsilon_0 \vec{E} = (1 + \chi) \epsilon_0 \vec{E} = \epsilon_r \epsilon_0 \vec{E}$ La relación entre la permeabilidad magnética en el vacío y la permitividad dieléctrica en el vacío se expresa como:

La constante dieléctrica relativa se representa en forma compleja (Marshall, DuBroff y Skitek, 1982; Turner y Siggins, 1994) como una expresión en la cual donde la componente real produce una corriente desfasada respecto al campo eléctrico externo, y la componente imaginaria provoca una corriente en desfase respecto a dicho campo eléctrico, siendo:

$$\epsilon = \epsilon' - i\epsilon''$$

2.3. Permeabilidad magnética

Este parámetro (μ) es el que relaciona la inducción magnética \vec{B} con la intensidad de campo magnético \vec{H} . Se mide en Henri/metro y se puede escribir como el producto entre la permeabilidad magnética del vacío ($\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ H/m) y la permeabilidad relativa del material:

$$\vec{B} = \mu_0 \mu_r \vec{H} = \mu_0 (1 + \chi_m) \vec{H} = \mu \vec{H}$$

Siendo μ_r la permeabilidad relativa del material, que depende a su vez de la susceptibilidad magnética del mismo, χ_m , que a su vez es la constante de proporcionalidad entre la imanación de un material y la intensidad de campo magnético externo:

$$\vec{M} = \chi_m \vec{H}$$

La permeabilidad compleja magnética relativa se puede escribir en forma compleja como:

$$\mu_r = \mu' - i\mu'' = 1 + \chi_m$$

En la mayor parte de los materiales que nos encontraremos en los estudios con georradar (excepto en aquellos que contengan materiales ferromagnéticos) se cumple que la permeabilidad magnética es próxima a 1, y no depende de la frecuencia del campo magnético.

$$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} = 2.998 \times 10^8 \text{ m/s}$$

Siendo c la velocidad de propagación de una onda electromagnética en el vacío.

2.4. Parámetros efectivos

Los campos observados se determinan por una serie de parámetros efectivos, que definiremos como permitividad dieléctrica efectiva real ϵ'_e y la conductividad eléctrica efectiva real σ'_e (Ulriksen, 1982; Turner y Siggins, 1994; Carcione, 1996):

$$\epsilon'_e = \epsilon' - \frac{\sigma''}{\omega}$$

$$\sigma'_e = \sigma' + \omega \epsilon''$$

Así pues, la permitividad dieléctrica compleja efectiva $\hat{\epsilon}_e$ la podemos expresar como (Carcione, 1996):

$$\hat{\epsilon}_e = \epsilon'_e - j \frac{\sigma'_e}{\omega}$$

2.5. Velocidad de propagación de una onda electromagnética

Considerando el caso de una onda plana que se propaga en la dirección \vec{r} , se obtiene la siguiente ecuación, habiendo supuesto una variación del campo armónica respecto al tiempo, es decir, dependiente de $e^{i\omega t}$:

$$\vec{E}(\vec{r}) = E_0 e^{(i\omega t - \gamma \vec{r})}$$

$$\vec{H}(\vec{r}) = H_0 e^{(i\omega t - \gamma \vec{r})}$$

El término γ es el denominado *constante de propagación o número de onda complejo*, que puede expresarse en función de los parámetros electromagnéticos característicos de cada medio (Stewart et al., 1994; García, 1997):

$$\gamma = i\omega\sqrt{\varepsilon_0\varepsilon_r\mu_0\mu_r} = i\frac{\omega}{c}\sqrt{\varepsilon_r\mu_r} = i\frac{2\pi}{\lambda}\sqrt{\varepsilon_r\mu_r} \quad \mu_r = 1$$

Donde c es la velocidad de una onda electromagnética en el vacío, es decir, una constante, λ es la longitud de la misma onda también en el vacío, ε_0 la constante dieléctrica del vacío, ε_r la constante dieléctrica relativa del medio, μ_0 la permeabilidad magnética del vacío y μ_r la permeabilidad magnética del medio.

Suponiendo las componentes real e imaginaria de la constante de propagación:

$$\gamma = \alpha + i\beta$$

Las expresiones del factor de atenuación de la onda α , y de la constante de fase β , pueden escribirse como (Turner y Siggins, 1994; García, 1996):

$$\alpha = \frac{\omega}{c} \operatorname{Im} \sqrt{\varepsilon_r \varepsilon_0 \mu_r \mu_0}$$

$$\beta = \frac{\omega}{c} \operatorname{Re} \sqrt{\varepsilon_r \varepsilon_0 \mu_r \mu_0}$$

El segundo parámetro β permitirá determinar la velocidad de la onda en el medio material en el cual se está propagando, ya que:

$$\beta = \frac{\omega}{v}$$

Donde v es la velocidad de fase de la onda electromagnética. De esta forma, la expresión que se obtiene para la velocidad de propagación de la onda es la siguiente:

$$v = \frac{\omega}{\beta} = \frac{\omega}{\frac{\omega}{c} \operatorname{Re} \sqrt{\varepsilon_r \mu_r}} = \frac{1}{\sqrt{\frac{\mu\varepsilon}{2} \left(\sqrt{1 + \left(\frac{\sigma}{\omega\varepsilon} \right)^2} + 1 \right)}}$$

En medios no magnéticos, que es el caso que tendremos para la mayoría de medio con los cuales nos encontraremos en los estudios con georradar, la expresión se simplifica ya que:

De forma que la expresión que comúnmente se podrá utilizar es:

$$v = \frac{c}{\operatorname{Re} \sqrt{\varepsilon_r}}$$

Las medidas que se realizarán con georradar nos darán un parámetro denominado constante dieléctrica efectiva del material, y que consiste en un promediado de las partes reales de las diferentes permitividades dieléctricas de una capa.

2.6. Longitud de onda

La longitud de onda del pulso en un medio dado, λ_m , dependerá tanto de la velocidad de fase (e indirectamente de la constante dieléctrica efectiva del mismo) y de la frecuencia de la onda emitida. Como en la expresión aparecerán parámetros de la propagación en el vacío, podremos relacionarla con la longitud de onda en el vacío:

$$\lambda_m = \frac{2\pi}{\beta} = \frac{2\pi}{\omega} v = \frac{2\pi}{\omega} \frac{c}{\operatorname{Re} \sqrt{\varepsilon_r \mu_r}} = \frac{\lambda}{\operatorname{Re} \sqrt{\varepsilon_r \mu_r}}$$

Donde λ es la longitud de la onda en el vacío.

En medios no magnéticos, la expresión se simplifica, quedando:

$$\lambda_m = \frac{\lambda}{\operatorname{Re} \sqrt{\varepsilon_r}}$$

La longitud de onda determinará la resolución vertical del georradar, que dependerá tanto de ésta como de la frecuencia utilizada y de la constante dieléctrica efectiva del material.

2.7. Coeficientes complejos de refracción y transmisión

Los coeficientes complejos de refracción y transmisión en el contacto de dos medios no

conductores en el supuesto de que ocurra una incidencia normal, como se puede aproximar en la mayoría de los casos cuando se aplica georradar, tienen las siguientes expresiones:

$$R_{1-2} = \frac{\sqrt{\hat{\epsilon}_2} - \sqrt{\hat{\epsilon}_1}}{\sqrt{\hat{\epsilon}_1} + \sqrt{\hat{\epsilon}_2}}$$

$$T_{1-2} = \frac{2\sqrt{\hat{\epsilon}_1}}{\sqrt{\hat{\epsilon}_1} + \sqrt{\hat{\epsilon}_2}}$$

2.8. Atenuación

La componente real del factor de atenuación caracteriza el grado de disminución de la amplitud de la onda conforme se aumenta la distancia al punto en el cual se ha generado. A este parámetro se le denomina factor de atenuación (Cai y McMechan, 1995; García, 1997), siendo sus unidades Np/m:

$$\alpha = \frac{\omega}{c} \operatorname{Im} \sqrt{\epsilon_r \mu_r}$$

Puede observarse que la atenuación dependerá de la componente imaginaria de la permitividad dieléctrica relativa del medio y de su permeabilidad magnética relativa.

El grado de atenuación de una onda electromagnética se define como el cociente entre las amplitudes de las oscilaciones de la onda en dos puntos separados una distancia r . Si tomamos la ecuación de propagación de ondas, esta relación queda como:

$$\frac{\vec{E}_0}{\vec{E}(\vec{r})} = e^{\alpha \vec{r}}$$

Si se toman logaritmos de esta expresión, podremos medir el grado de atenuación en nepers (en el caso de considerar logaritmos neperianos):

$$L = \ln \left(\frac{\vec{E}_0}{\vec{E}(\vec{r})} \right) = \alpha \vec{r}$$

Siendo la atenuación específica el grado de atenuación de una onda por unidad de longitud:

$$\Gamma = \frac{1}{\vec{r}} L = 8.686 \alpha = \frac{54.6}{\lambda} \operatorname{Im} \sqrt{\epsilon_r \mu_r}$$

Este parámetro permite obtener el grado de decaimiento de la amplitud de la onda conforme ésta se propaga por el medio material.

2.9. Profundidad de penetración

El concepto de profundidad de penetración está ligado al de atenuación de la señal durante su propagación. El factor de atenuación es tal que la onda se reducirá en amplitud por un factor e en una distancia d que se denomina distancia de atenuación o profundidad de penetración (Ulriksen, 1982):

$$d = \frac{1}{\alpha}$$

Esta profundidad de penetración depende de α , es decir, que lo hace tanto de la conductividad del medio como de su constante dieléctrica, decreciendo si aumenta la conductividad, la permeabilidad relativa del material o bien la frecuencia de la onda emitida. Esto indica que medios muy conductores serán fuertemente atenuantes, y en ellos la onda sólo podrá penetrar en una película extraordinariamente delgada, pudiendo ser considerados como opacos o totalmente reflectores de la energía electromagnética. También se puede observar que para sistemas que emitan en frecuencias elevadas, la penetración en el medio será menor que si lo hacen a frecuencias más bajas.

3. INSTRUMENTACIÓN DE GEORRADAR

Los equipos de georradar se componen, generalmente, de una unidad central (sistema de registro) y de antenas monoestáticas o biestáticas de diversas

frecuencias, generalmente de 1.5 GHz, 900 MHz, 500 MHz, 400 MHz, 200 MHz y 100 MHz.

3.1. Unidad central y accesorios

En los equipos de georradar, la unidad central es donde se realiza toda la coordinación y control de las antenas y de los demás componentes y accesorios del equipo y de la señal emitida, donde se realiza el tratamiento de la señal recibida y donde se efectúa su almacenamiento en algún tipo de soporte (magnético). Esta unidad lleva implementado un programa informático que realiza el procesado básico de la señal y en algunas ocasiones puede incorporar diversas utilidades que permiten actuar sobre la señal emitida y sobre los registros que se adquieren. En estos casos se pueden realizar diferentes filtrados sobre los registros que se van adquiriendo o bien se puede modificar la ganancia, obteniendo una amplificación de la señal, dependiendo del tiempo de propagación, es decir, que puede ser mayor para reflexiones registradas a profundidades mayores. También se puede seleccionar la visualización del registro en campo, pudiendo optar por un registro de trazas de amplitud o bien por una serie de escalas de colores o de tonos grises, cada uno de los cuales engloba un intervalo de amplitud de la onda registrada (Lorenzo, 1994). En los casos de radares más sencillos únicamente se podrá visualizar la señal, sin ningún tipo de tratamiento para mejorar la calidad de imagen. En general podemos decir que la unidad central de georradar es la unidad de control de los pulsos, de cálculo y de almacenamiento de datos, pudiendo tratarse de un ordenador personal.

Con la unidad central se suele incluir un monitor o una pantalla (en algunas ocasiones el radar va conectado a un ordenador personal portátil) en la que se visualiza el registro obtenido en cada momento, pudiendo obtener de una forma rápida aunque aproximada resultados del estudio en campo. Esta pantalla suele disponer de un teclado de comandos que hace efectivo el tratamiento de la señal que se pueda desear

durante la adquisición de datos, en el caso de aquellos equipos que permitan realizar estas operaciones.

La unidad de control se une a las antenas mediante un cableado que puede ser metálico o bien óptico.

Los accesorios que pueden implementarse en los equipos son diversos, y pueden ir desde un odómetro para obtener distancias con precisión hasta una impresora para tener en campo un registro en papel de las señales detectadas. Entre estos accesorios no debemos olvidar la fuente de alimentación del equipo, que en muchos casos puede consistir en una batería seca de 12 V, y tampoco una batería de recambio para el caso de que un estudio tuviese una duración mayor que la planeada.



Figura 1. Ejemplo de equipo de georradar: (1) unidad central sistema SIR3000; (2) antena 400 MHz; (3) antena 900 MHz; (4) antena 1,5 GHz

3.2. Antenas

Las antenas son una parte fundamental del equipo ya que son la parte encargada tanto de emitir el pulso electromagnético al medio como de recibir la energía que regresa a la superficie tras haber sufrido una reflexión.

Las antenas se utilizan para realizar dos funciones básicas en la prospección con georradar. Por un lado deben radiar la

energía que se les suministra en forma de potencia con la direccionalidad y las características adecuadas a la aplicación pensada. Cuando utilizamos las antenas en estudios de prospección es interesante que la mayor parte de la energía radiada lo haga en una única dirección. De este modo podremos alcanzar a estudiar objetos más profundos porque tendremos una mayor densidad de energía que penetrará en el medio que será nuestro objeto de estudio y por otro lado se evitarán reflexiones en objetos que queden situados en el resto del espacio, con lo cual eliminaremos parte del ruido que se le introduce en el registro, haciendo más clara la interpretación de los datos. Por otro lado deben recibir la energía que se refleja en las discontinuidades electromagnéticas del medio y regresa hacia la superficie sobre la que se coloca la antena.

Las antenas se caracterizan por su frecuencia o bien por su longitud de onda. La relación entre estos dos parámetros es por medio otro parámetro: la velocidad de los pulsos electromagnéticos en el medio donde se produce la propagación.

Las antenas que se utilizan en prospección quedan determinadas totalmente por la frecuencia del pulso que emiten al radiar, ya que la longitud de onda de la energía radiada dependerá de las características del medio por el que se propague. De esta forma, podremos definir una antena dando únicamente la frecuencia central a la que está emitiendo y, por otro lado, la anchura de banda de frecuencias en las que emite (Lorenzo, 1994).

Las antenas se dividirán dependiendo de las frecuencias de emisión. Y cada tipo de antena se escogerá debidamente de acuerdo con las necesidades de su utilización.

Cada tipo de aplicación o problema requiere un determinado tipo de antena cuyas características sean adecuadas al mismo.

Las antenas utilizadas normalmente en un georradar suelen consistir en espiras de media onda que funcionan como dipolos. La longitud de estas espiras determina la

frecuencia central de la emisión, ya que la onda emitida, en el vacío, tiene una longitud doble a la de la espira.

4. APLICACIONES DE GEORRADAR EN EL PATRIMONIO HISTÓRICO-ARTÍSTICO

En este apartado se tratarán diferentes ejemplos de aplicaciones de georradar al Patrimonio Histórico-Artístico, entendiendo por tales edificaciones que presenten algún tipo de interés, ya sea histórico o bien artístico (arquitectónico, debido a pinturas murales, etc.), monumentos, o emplazamientos que tengan una relevante importancia (emplazamientos arqueológicos).

Los estudios por georradar se pueden dividir en dos vertientes en el ámbito del Patrimonio. Por un lado se dedican a la exclusiva búsqueda de los asentamientos o de los restos que pudieran quedar soterrados o por debajo de otros edificios (de interés histórico-artístico o no). Por otro lado se enfocan al estudio de elementos o de edificaciones. Esta segunda vertiente de los trabajos consiste en el análisis de muros, suelos o techos para determinar la presencia de algún tipo de problema (humedad, despegues en los materiales constructivos, fisuras, etc.) o bien para diferenciar épocas constructivas distintas. En este segundo caso el estudio con georradar puede ayudarnos a realizar controles de calidad de las intervenciones que sufren este tipo de edificaciones (Pérez, 2001).

Así pues, se puede acometer estudios de sobre la patología en las construcciones, abarcando la detección de humedades, oquedades, fisuras y despegues entre materiales constructivos distintos. Los análisis se centran en los muros de las edificaciones, de forma que los medios a estudiar tienen poco espesor. También pueden aplicarse estos estudios a los suelos y a los techos y bóvedas y a las columnas de las edificaciones. La precisión y la resolución requerida en este tipo de

estudios son elevadas, lo que obliga a trabajar con antenas de alta frecuencia (Pérez et al., 1996).

El georradar aplicado en la búsqueda arqueológica propiamente dicha se presenta como una herramienta previa para determinar la situación de zonas de mayor interés a la hora de realizar las excavaciones. La aplicación de estos métodos puede apoyar estudios de zonas de cierto interés, tanto para comprobar las zonas en las que un número más elevado de anomalías determinan como de mayor interés, reduciendo en muchos casos el costo de las excavaciones, como para poder determinar la potencia máxima a excavar, pudiendo elaborar un presupuesto de los trabajos posteriores, o bien para confirmar la presencia de elementos por debajo de edificios o monumentos que impiden la excavación (restos bajo una catedral, por ejemplo).

En los estudios de conjuntos monumentales a los que se les ha efectuado algún tipo de intervención o restauración, el uso del georradar permite determinar diferencias entre los materiales constructivos antiguos y los modernos, así como el estado de los primeros.

4.1. Estudios de humedad

Este problema afecta a un gran número de construcciones. Puede presentarse tanto debido a causas naturales (agua de lluvia o humedad ambiente del emplazamiento, así como humedad del subsuelo) como debido a causas artificiales (fugas de agua, construcciones posteriores que ayuden a la acumulación de agua junto al edificio en cuestión, etc.). Básicamente, las causas de una patología en una edificación pueden dividirse en directas e indirectas. Las primeras son las condiciones ya nombradas poco antes, es decir, todo aquello que pueda provocar un problema en la construcción. Las segundas son aquellas características constructivas del edificio que pueden favorecer a las primeras.

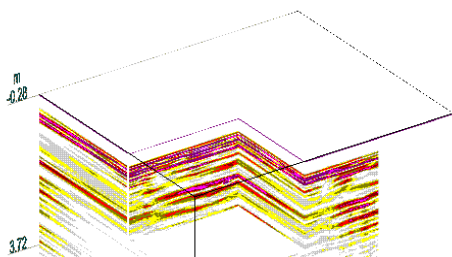


Figura 2. Modelo tridimensional (3D) donde se detectan dos zonas de humedad que afectan a la cimentación las Torres de Serranos de Valencia.

Los problemas de humedad que se presentan en edificios pueden afectar a las construcciones ocasionando daños como despegues en los muros y deterioro de los elementos constructivos. También, en el caso de existir ornamentaciones tipo frescos, habituales en el caso de edificios religiosos o de cierta importancia histórica, estas pinturas pueden verse seriamente dañadas.

Las reconstrucciones y las soluciones de estos problemas deben ser minuciosamente analizados antes de ser efectuados. Un exceso de información acerca del edificio y de la patología que sufre nunca será perjudicial a la hora de realizar la restauración.

El georradar puede darnos información acerca de la extensión de la zona dañada, del espesor del muro afectado por la humedad y, en algunos casos, puede ayudarnos a determinar las causas de la lesión (Francisco García et al., 2004).

Los estudios que se realizan con georradar de zonas dañadas o que pudieran encontrarse dañadas por causas de humedad, se realizan en dos fases importantes. En primer lugar se intenta determinar con precisión la extensión del área afectada, y en segundo lugar se realiza una prospección de la zona para determinar la posible procedencia de la humedad. La

información que puede obtenerse de estos dos análisis puede ayudar junto con la obtenida por otros métodos a la planificación de una restauración adecuada del edificio.

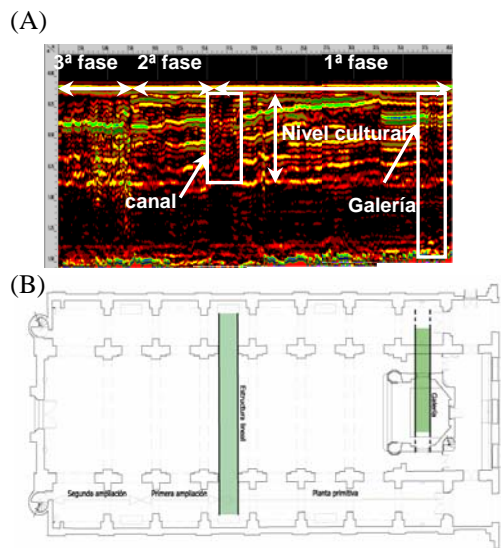


Figura 3. (A) Radargrama al que se le ha aplicado filtros, realizado en la nave de la Iglesia de San José de Valencia (B), para la detección de la causa de humedad que afecta a una zona del pavimento del edificio. Se observa: las tres fases de construcción del edificio; una estructura rectangular, una estructura rectangular, una eventual acequia (causa de humedad), entre los metros 15 y 18,5 del perfil; una galería entre los metros 37,50 y 39 del perfil; un nivel cultural hasta 1 m de profundidad.

4.2. Estudio de tipos de patología en conjuntos arquitectónicos: fisuras, despegues y oquedades

La aparición de grietas en los muros o de despegues de los materiales que los recubren es una patología muy común a los edificios. La aparición de grietas y de fisuras en construcciones puede estar ocasionada por diversos problemas. Entre ellos cabe destacar problemas de asentamientos de las cimentaciones y problemas constructivos de las estructuras. Se diferencia entre grietas y fisuras, siendo las primeras aquellas que afectan a un elemento constructivo (muro, columna, bóveda, etc.) en su totalidad, mientras que las segundas únicamente afectan a su superficie. La evolución de las grietas o fisuras puede llevar a la presencia de despegues, es decir, de desprendimientos de parte de una estructura o bien del material que la recubre.

La presencia de grietas es una patología grave ya que puede afectar a la estructura del edificio. Las fisuras son también un problema serio en estos edificios histórico-artísticos, ya que pueden llegar a dañar seriamente pinturas murales y ornamentos que hubiere en los muros o techos. Los métodos constructivos utilizados antaño pueden favorecer la aparición de estos problemas debido a la gran diferenciación que se presenta entre los materiales que forman los elementos constructivos.

El estudio con georradar de fisuras, despegues y oquedades interiores a materiales permite determinar la posición horizontal de la anomalía y, en el caso de conocer las características del medio en el que se localiza el hueco, es posible también determinar la profundidad a la que se encuentra. Este tipo de técnica es muy adecuada para este tipo de problemas por su característica de ser no destructiva, pudiendo aplicarse incluso sobre frescos sin que éstos resulten alterados ni dañados (F. García et al., 2005).

4.3. Utilización del georradar en estudios arqueológicos

Una de las aplicaciones que tiene el georradar es la de apoyo en estudios arqueológicos para detectar las zonas que pueden presentar un mayor interés, en las que pueden existir restos o elementos, previamente a la planificación de la excavación. Esto permite disminuir los costos y el tiempo del estudio arqueológico. La mejor resolución que presenta este tipo de prospección frente a los demás métodos geofísicos hace que sea una de las técnicas más adecuadas para estos trabajos. Sin embargo, tal como ya se pudo comprobar en algunos de los primeros estudios de este tipo (Goodman y Nishimura, 1992; Kong, Kistiansen y By, 1992), el análisis con georradar de una zona no aporta una información útil que pueda ser interpretada si no se comparan los resultados obtenidos con otro tipo de fuentes, tales como conocimientos históricos o estudios previos arqueológicos.

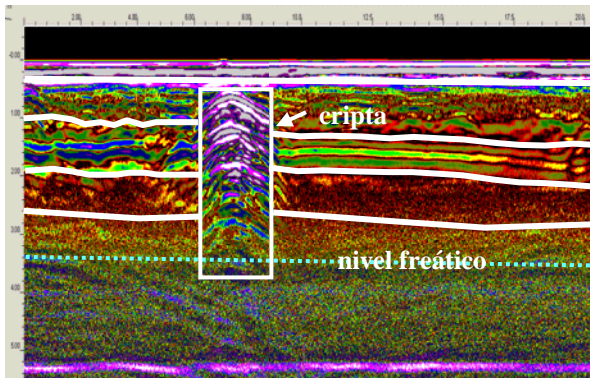


Figura 4. Localización del emplazamiento de una cripta en una iglesia del Maestrazgo castellanense, donde se observa los diferentes niveles culturales y geológicos, así como el freático.

Los trabajos realizados con georradar sirven de apoyo a las excavaciones arqueológicas, realizados por motivos diferentes: en primer lugar, la localización de zonas que posiblemente tengan un mayor interés arqueológico, de cara a la planificación de la excavación; y en segundo lugar, la localización del posible emplazamiento de elementos constructivos que están documentados en antiguas cartografías pero que no se conoce su exacta localización, realizando de este modo una confirmación de la documentación y la cartografía antigua y localización de la existencia de restos y de antiguas construcciones por debajo de edificios actuales en los cuales es difícil o perjudicial realizar una excavación convencional.

La localización de zonas que posiblemente tengan un mayor interés arqueológico por georradar se realiza generalmente previamente a las excavaciones, para delimitar las zonas que pueden presentar un mayor interés de estudio. En ocasiones, estos estudios se realizan en lugares en los que, por sus características arquitectónicas o por su interés histórico, es necesario un estudio no destructivo. Estudios del subsuelo de monumentos (catedrales, edificios históricos, etc...) pueden realizarse sin afectar a los mismos, localizando las zonas en las que pudieran existir elementos más antiguos, y

determinando en ocasiones los estratos culturales subyacentes al actual monumento.

Para la planificación de este tipo de estudios, es necesario tener unos datos o conocimientos previos de la zona, para poder delimitar la penetración necesaria. Es decir, que se precisa conocer, por un lado, la profundidad máxima a la que se podría esperar hallar algún elemento de interés y la extensión mínima que pudiera ocupar, y por otro lado, conocer la composición del subsuelo.

En el caso de estudios para verificación de cartografía antigua, la prospección con georradar puede utilizarse también en el área de la arqueología, para confirmar su existencia en una zona. Con frecuencia la documentación sobre la localización de antiguos elementos arquitectónicos suele ser inexacta, aunque a menudo incluyen dibujos y descripciones detalladas del elemento que tratan. Por ello, aunque es posible situar aproximadamente la posición del mismo, es difícil conocerla con exactitud. En otras ocasiones están documentadas obras realizadas en monumentos, describiendo con detalle qué partes del edificio se demolieron y qué nuevas partes se levantaron, pero sin situar ni las unas ni las otras. Es el caso de importantes edificios que han sido agrandados en épocas de mayor esplendor económico, o de torres y campanarios que se han demolido, levantando otros mayores pero en una localización diferente.

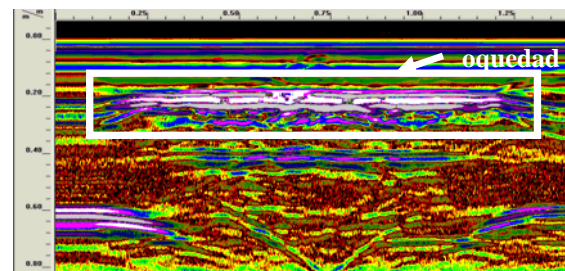


Figura 5. Radargrama realizado en mausoleo de la Reina Germana, Monasterio de San Miguel Reyes de Valencia, donde se observa la existencia de una zona hueca.

En los estudios de monumentos importantes que han variado su forma y tamaño a lo largo del tiempo, esta antigua cartografía juega un papel importante ya que constituye una hipótesis de partida para un estudio. Una forma de confirmar o refutar estas hipótesis es efectuar excavaciones con las que se pudieran localizar los restos de los antiguos elementos, muros, torres o edificios anexos que existieron antes de las reformas. Sin embargo es difícil realizar este tipo de trabajos en estos monumentos ya que suelen estar ya integrados en el patrimonio histórico-artístico actual, pudiendo los trabajos convencionales arqueológicos llegar a afectarlos. Así pues, a menudo estas hipótesis sobre la historia de estos edificios pueden quedarse sin confirmar. La prospección con georradar es un sistema que puede servir en algunos casos para el mismo fin, con dos importantes peculiaridades. La primera de ellas es que no serán unos estudios tan precisos como los arqueológicos, y la segunda es que son un tipo de estudios de los que se denominan no destructivos, es decir, que no alteran ni el estado ni el aspecto del monumento bajo el cual se esperan encontrar los restos.

Un estudio habitual de este tipo de trabajos consiste en confirmar los documentos que describían tanto la localización de las antiguas criptas y los osarios, como de las modificaciones en la estructura del edificio que fueron teniendo lugar a lo largo de los siglos (Pérez et al., 1996; Pérez et al., 2000, F. García et al., 2005)

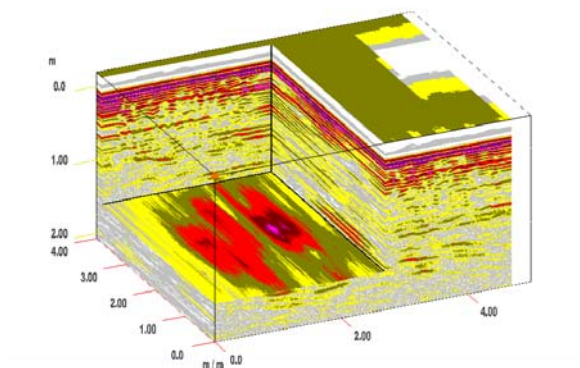


Figura 6. Modelo tridimensional (3D) de la cripta del Monasterio de San Miguel de los Resyes de Valencia: localización de enterramientos de los Duques de Calabria (contrastación con documentación histórica y arqueológica).

4.4. Localización de elementos constructivos en el subsuelo que pueden afectar a los edificios actuales

En el marco de las aplicaciones de prospección con georradar a la arqueología, la localización de elementos constructivos o niveles culturales subyacentes a un edificio histórico puede representar una de las piezas clave para estudiar el deterioro del mismo por problemas de asentamiento diferencial. En este caso es probable que aparezcan de fisuras cada vez mayores en los muros y el techo del edificio en cuestión. Este proceso de fisuración puede llegar a afectar importantes frescos y elementos ornamentales que decoran normalmente a este tipo de edificios. Lo que puede forzar a plantearse un estudio del subsuelo, y además, en la mayoría de los casos, debido a las condiciones de los edificios de interés histórico-artístico un estudio arqueológico convencional es inviable. Sin embargo la prospección con georradar parece ser una de las mejores opciones debido a su carácter no destructivo y a la resolución que se puede alcanzar (Francisco García et al., 2004).

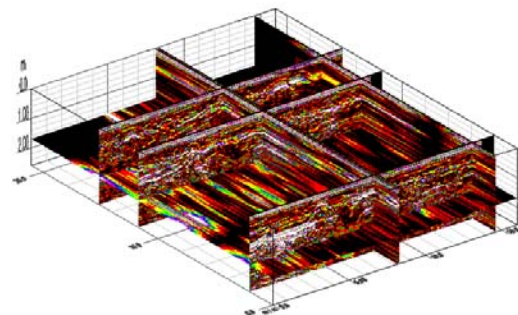


Figura 7. Detección de elementos diferentes constructivos (galería, tumbas, muros, acequias) en el subsuelo de la Iglesia Nuestra Señora del Don el Alfajar, Valencia.

4.5. Estudios con georradar en elementos arquitectónicos restaurados

Las actuaciones o restauraciones en monumentos o edificios de cierta relevancia o de interés histórico-artístico son acciones que a lo largo del tiempo precisan ser llevadas a cabo tanto para arreglar desperfectos y solventar lesiones como para reconstruir determinadas piezas o partes de ellas.

El enfoque que se les puede dar a estas obras es muy diverso. Hay trabajos que se dirigen a conservar y reforzar las partes que aún se conservan, y por otra parte existen otros trabajos con los que se intenta recrear el aspecto que antaño tuviera el monumento. En algunas ocasiones, con las actuaciones más intensas se pretende dotar al monumento de una serie de funciones que no podría poseer únicamente con un refuerzo y consolidación de las partes existentes. Tal es el caso, por ejemplo, de algunos castillos que, tras unas fuertes intervenciones han pasado a poseer cierta funcionalidad, siendo utilizados actualmente de museos, paradores, ..., o el caso de los restos de teatros (o anfiteatros) griegos o romanos preparados tras la intervención arquitectónica para ser utilizados en representaciones actuales. Sin embargo, sea cual sea el enfoque de la reconstrucción, siempre se actúa sobre una base antigua que se pretende conservar, ya sea intentando darle al conjunto una cierta funcionalidad o únicamente conservarlo con el aspecto con el que ha llegado a nuestros días.

Una vez realizadas las actuaciones sobre monumentos, uno de los problemas con el que nos encontramos es que no es posible comprobar el estado en el cual se encuentran los restos antiguos que han quedado tapados por los materiales nuevos, no pudiendo saber en ocasiones si los primeros se han respetado durante las obras como se indicaba en los proyectos. Posibles problemas de humedad o de deterioro de estos materiales subyacentes pudieran quedar ocultos por las obras realizadas.

Para poder efectuar estos estudios no se pueden emplear medios mecánicos de los denominados destructivos (catas, por ejemplo), ya que alteran tanto los nuevos como los antiguos elementos.

La prospección geofísica con georradar es una de las soluciones que existen para ello, ya que numerosos métodos (consistentes en el estudio del interior del medio a partir de los datos y medidas efectuadas sobre la superficie) pueden aplicarse sin alterar el medio estudiado. De los diferentes estudios de geofísica el georradar es quizá el más adecuado para estos problemas. Por un lado es un método con el cual podremos detectar tanto cambios en los materiales como, por ejemplos presencia de humedad en los mismos. Por otro lado, la resolución de este método permite que se utilice en estudios de cierta precisión.

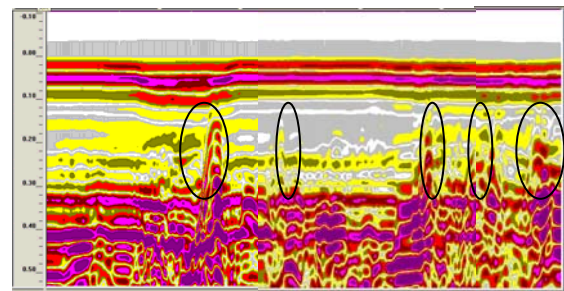


Figura 8. Radargrama de una de las vigas de madera del Consulado del Mar, Lonja de la Seda de Valencia, en el que se observa intervenciones anteriores con resinas en la viga.

Como conclusión, el georradar aplicado al estudio del Patrimonio Histórico-Artístico, por una parte, es una herramienta útil en prospecciones arqueológicas convencionales, y por otra parte, representa una técnica de estudio potente que permite determinar en muros, suelos, columnas, techos y de más elementos constructivos variaciones de materiales, tanto lateralmente como en profundidad, permitiendo también determinar la presencia de elementos diferentes, que pudieran servir de cohesión. Esto, unido a su carácter no destructivo, permite trabajar en edificios y monumentos que hayan sufrido algún tipo de intervención o no,

tanto para realizar un control de calidad del trabajo efectuado, como para determinar la existencia y la situación de los elementos constructivos anteriores por debajo de construcciones o reconstrucciones posteriores no documentadas, o no lo suficientemente documentadas, pudiéndose determinar el contacto entre los materiales antiguos y los de las construcciones o reconstrucciones, y al mismo tiempo el estado de los mismos (humedad, desgaste en algunas zonas, fisuración, oquedades y deterioro).

Bibliografía

- Cai, Jun y McMechan, George A., 1995 : *Ray-based synthesis of bistatic ground-penetrating radar profiles*, Geophysics, Vol. 60, N. 1 (January-February, 1995), pp. 87-96.
- Carcione, José M., 1996: *Ground - penetrating radar: Wave theory and numerical simulation in lossy anisotropic media*, Geophysics, Vol. 61, N. 6 (November-december, 1996), pp. 1664-1677.
- F. García, I. Rodríguez, I. Tort, J.L. Montalvá, M. Ramirez, R. Capuz, R. Martínez, J. Benlloch, 2005, GPR technique as a tool for archeological prospection: exact detection of the Dukes of Calabria tombs (16th century) at San Miguel de los Reyes hieronymite monastery (Valencia, Spain), Proceedings 6th International Conference on Archaeological Prospection, pp. 197-200.
- Francisco García García, Manuel Ramírez Blanco, Javier Benlloch Marco, Carmen Ballester Bernal, 2004, Study of archaeological structures of the subsurface in churches of the Society of Jesús, city of Valencia (Spain), derived from the GPR technique, Proceedings of the Tenth International Conference on Ground Penetrating Radar, v. II, pp. 467-470.
- García Francisco, Benlloch Javier, Ramírez Manuel, 2004, Integration study of geotechnical sounding and GPR for evaluating shallow alluvial formations in construction foundations for their conservation and maintenance (Valencia, Spain), Proceedings 32nd International Geological Congress, pp. 89-90.
- García García, Francisco, 1997, *Aplicaciones de la técnica geofísica de prospección por geo-radar en glaciología e ingeniería civil*, Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Cataluña. España, 219 pp.
- Lorenzo Cimadevila, Enrique, 1994, *Prospección geofísica de alta resolución mediante geo-radar. Aplicación a obras civiles*, Tesis doctoral, Universidad Complutense de Madrid, 201 pp.
- Lorrain, Paul y Corson, Dale R., 1972, *Campos y ondas electromagnéticos*, Ed. Selecciones científicas, 702 pp.
- Marshall, Stanley V., DuBroff, Richard E. y Skitek, Gabriel G., 1982, *Electromagnetic concepts and applications*, Ed. Prentice Hall International (USA), 734 pp.
- Pérez Gracia, V., Canas, J.A., Pujades, Ll., Clapés, J., García, F., Caselles, O., Osorio, R., 2000: *GPR survey to confirm the location of the ancient structures under the Valencian Cathedral (Spain) and detection of humidity problems*, Journal of Applied Geophysics, 43, Ed. Elsevier, pp. 167-174.
- Pérez Gracia, V., García García, F., Clapés, J., Osorio, R., Caselles, J.O., Canas, J.A. y Pujades, Ll., 1996: *Ground Penetrating Radar in cultural heritage*, OWLS IV Conference Proceedings, Optical Technologies in the humanities, Vol. IV of International Series on Optics Within Life Sciences (OWLS), Ed. Springer-Verlag, ISBN: 3-540-63280-8, pp. 65-73.
- Pérez Gracia, Vega, 2001, *Radar del subsuelo. Evaluación en arqueología y en patrimonio histórico-artístico*. Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Cataluña. España, 971 pp.
- Stewart, Duff C., Anderson, Walter L., Grover, Thomas P. y Labson, Victor F., 1994: *Shallow subsurface mapping by electromagnetic sounding in the 300 kHz to 30 Mhz range: Model studies and prototype*

system assessment, Geophysics, Vol. 59, N. 8 (August, 1994), pp. 1201-1210.

Sutinen, Raimo, 1992, *Glacial deposits, their electrical properties and surveying by image interpretation and ground penetrating radar*, Geological Survey of Finland, Bulletin 359, Geologian tutkimuskeskus. Espoo 1992, 123 pp.

Turner, Greg y Siggins, Anthony F., 1994 : *Constant Q attenuation of subsurface radar pulses*, Geophysics, vol. 39, N. 8 (august 1994), pp. 1192-1200.

Ulriksen, C.P.F., 1982, *Application of impulse radar to civil engineerig*, Ph.D. Thesis, Dept. of Eng. Geology, Lund University of Technology, Sweeden, 175 pp.