

## **Capítulo 18**

### **Resultados y conclusiones.**

Con medio siglo de aplicaciones en distintos campos, la prospección mediante radar de subsuelo ha adquirido una relevante importancia dentro del campo de los estudios poco profundos del subsuelo. Ensayos, simulaciones y pruebas sobre diferentes aplicaciones son, en la actualidad, objeto de estudio.

Con el presente trabajo se ha evaluado la aplicación de estos métodos a estudios de patrimonio histórico-artístico y arqueológico, analizando diferentes problemáticas: la influencia de las construcciones modernas sobre las antiguas, los daños por humedad y fisuración, la investigación de yacimientos arqueológicos y el estudio del subsuelo de construcciones relevantes. Por otra parte, se han realizado ensayos de laboratorio para calibrar el equipo y para analizar efectos observados en los registros de campo y se ha propuesto un método para caracterizar medios electromagnéticamente, estudiando, también, aplicaciones a casos reales relacionados con los diferentes aspectos analizados.

En este capítulo se recopilan los resultados y conclusiones más relevantes de esta tesis, que se pueden separar en cuatro grupos: metodológicas, de calibración de equipos, experimentales y de casos prácticos.

## 18.1. Conclusiones metodológicas.

Dentro de este grupo se incluyen aquellos aspectos generales que se pueden aplicar a cada uno de los casos tratados y que hacen referencia al método de trabajo.

- Se ha analizado la dependencia de la velocidad con la frecuencia y se han calculado expresiones gráficas que permiten estimar, para cada frecuencia y para distintos valores de la conductividad, la velocidad de propagación. Se ha observado que, para conductividades por encima de los 0.1 S/m la dependencia de la velocidad con la frecuencia es importante dentro del rango de trabajo del radar de subsuelo. Para conductividades menores a 0.002 S/m no hay dependencia apreciable para frecuencias por encima de los 10 MHz.
- Se ha estudiado gráficamente la dependencia del factor de atenuación y de la profundidad nominal de penetración en función de la permitividad dieléctrica relativa y de la conductividad. Se ha observado que conductividades elevadas corresponden a factores de atenuación altos.
- Se han recopilado y analizado distintos modelos que permiten obtener la permitividad de un medio (y por lo tanto, en muchas ocasiones, la velocidad de propagación) partiendo de la porosidad, la composición y la saturación del medio. A partir de esta comparación se ha llegado a la conclusión de que, aunque hay modelos muy complejos que permiten obtener una mejor aproximación de la permitividad, para los estudios con radar de subsuelo es conveniente utilizar modelos más sencillos o modelos simplificados. Las diferencias entre los resultados son pequeñas y, en casi todas las ocasiones, se encuentran dentro de los límites de resolución característicos de este tipo de prospección. Para el caso de tres o cuatro fases, por ejemplo, es más sencillo utilizar un modelo CRIM que un modelo SSC, obteniendo con el primero unos resultados suficientemente satisfactorios. Para el modelo SSC se han calculado unas curvas patrón que permiten estimar, de forma rápida el valor de la permitividad en función de la porosidad, para distintos valores de la conductividad del medio.

- Durante la interpretación de los registros se ha observado que es importante un cuidadoso análisis de las señales. La aplicación incorrecta de los filtros puede llevar a interpretaciones erróneas. También es conveniente realizar un balance energético para determinar la amplificación más adecuada o para determinar la profundidad a la cual el ruido electrónico de las antenas tiene una amplitud similar a la de las reflexiones.

## **18.2. Calibración de antenas.**

Se agrupan en este apartado las conclusiones de los trabajos realizados para calibrar el equipo y conocer el comportamiento de las antenas utilizadas.

- Se han obtenido, para cada antena, los registros limpios de reflexiones en los que únicamente aparece el ruido interno (señal directa, reverberaciones y ruido electrónico). A cortas distancias el efecto interno más importante es la señal directa que llega cuando se trabaja con antenas monoestáticas que contienen un receptor y un emisor.
- Obtención del origen tiempos para cada antena. Se ha establecido para cada antena el cero de los radargramas. Se ha observado que esta posición depende de cada antena y del medio analizado. Para la antena de conmutación se ha observado que el cero coincide con el origen del registro cuando la posición de inicio es de 15 ns. Para la antena de 900 MHz se ha comprobado que el cero queda situado a 1.3 ns antes del inicio de la onda directa. En las antenas de 500 y 200 MHz este punto corresponde, aproximadamente, con el primer máximo de la onda directa.

Para las antenas formadas por emisor y receptor, independientes, se ha podido observar que existe una diferencia entre la distancia antena-reflector y la distancia calculada a partir del tiempo de propagación, debido a que se suele tomar el origen de la onda directa como el cero de los

registros. Este desfase se produce por la separación entre el emisor y el receptor. Cuando los medios presentan una velocidad característica elevada, esta diferencia es importante y puede introducir errores apreciables en la conversión de tiempos a distancias. Si la velocidad es pequeña este error es pequeño, no siendo necesario considerar el retardo. Se ha podido observar, también, que esta distancia es irrelevante en medios con permitividades superiores a 5 ( $\epsilon_r > 5$ ), porque para esta permitividad se corresponde con una distancia ligeramente superior a 8 cm, valor inferior a la resolución del equipo en muchas ocasiones. Este tiempo, sin embargo, sí que es importante en el caso de medios de baja permitividad, como por ejemplo el aire. En este caso se tiene una diferencia de 20 cm entre la distancia real y la distancia calculada, siendo esta última menor que la primera. Trabajando de esta manera, hay que sumar al tiempo total de cada reflexión medido desde el inicio de la onda directa) un tiempo de unos 0.67 ns para obtener el cero del registro.

- Separación mínima para que no se produzca acoplamiento. A partir de los registros de ruido interno se ha determinado la distancia mínima, medida en tiempo doble de propagación, entre la antena y la superficie del medio para que no se produzca acoplamiento entre la onda directa y la primera reflexión. Esta separación mínima queda determinada en cada medio por la duración de la señal inicial. La longitud temporal que se obtiene indica la zona donde el acoplamiento entre la reflexión y la primera señal impide determinar con exactitud la situación de la primera.

Para observar la señal interna característica de cada antena se ha obtenido un radargrama emitiendo hacia el aire, sin ningún reflector frente a la antena. Para la antena de 1 GHz, la señal inicial tiene una longitud inicial de 1.6 ns. Para la antena de 900 MHz, la señal inicial es principalmente la onda directa, que tiene una longitud de 2.6 ns. Para la antena de 500 MHz la onda directa presenta una longitud de unos 9.45 ns. Para la antena de 200 MHz la longitud de la onda directa es de 9.5 ns.

- Los errores aparentes (definidos como la diferencia entre el tiempo medido experimentalmente y el esperado teóricamente) son mayores cuando las distancias son pequeñas y se está, por lo tanto, dentro de la zona de

superposición con la onda directa. Éstos disminuyen conforme aumenta la distancia antena-reflector hasta alcanzar un valor mínimo, que en el caso del aire se produce a los 80 cm; a partir de esta distancia los errores aparentes observados son más pequeños que los errores de lectura en el aparato de medida.

- Expansión geométrica. Se ha calculado experimentalmente el factor de atenuación considerando que el aire es un medio no absorbente que se puede aproximar por el vacío. Los resultados para todas las antenas utilizadas son similares e indican que es posible ajustar el comportamiento observado para las amplitudes con la ecuación que determina la expansión geométrica de una onda interna, donde la amplitud medida es inversamente proporcional a la distancia.

### **18.3. Trabajos experimentales.**

Dentro de este apartado se presentan los resultados más relevantes de los trabajos experimentales en laboratorio. También se incluyen las conclusiones del procedimiento seguido para caracterizar electromagnéticamente suelos, así como los resultados particulares del análisis de un tipo de suelo concreto.

#### **El agua como medio de propagación.**

- Se ha calculado experimentalmente la velocidad promedio de propagación y la permitividad efectiva del agua a partir de diversos ensayos de laboratorio. Se ha observado una gran variabilidad de la permitividad efectiva, que, en una primera serie de ensayos, fue de 78.7 con la antena de 900 MHz (3101) y de 79.4 con la de 1 GHz (3100). En un segundo grupo de ensayos el resultado fue de 88.4. En el primer caso, para las dos antenas se obtiene una velocidad de propagación de 3.4 cm/ns, mientras que en el segundo la velocidad resultante es de 3.2 cm/ns. La conductividad también presenta variaciones considerables. Las medidas experimentales de la conductividad del medio dan un resultado promedio de 400 mS/m.

- El análisis frecuencial muestra claramente el efecto de filtrado que produce el medio sobre la señal, desplazando el espectro hacia las bajas frecuencias y estrechando la banda. Este efecto es mayor para mayores espesores del medio; así, para un espesor de 40 cm se obtiene un desplazamiento que llega a alcanzar los 400 MHz con las dos antenas utilizadas (de 900 y 1000 MHz). A pesar de todo no se observa dispersión cromática, fenómeno que, para este medio (considerando los parámetros electromagnéticos medidos experimentalmente), se ha calculado que puede presentarse para frecuencias inferiores a los 200 MHz. El desplazamiento hacia las bajas frecuencias es rápido al tratarse de un medio bastante conductor.
- Se ha caracterizado el medio (agua) a partir de los resultados experimentales y a partir de valores hallados en la literatura. Se observan diferencias significativas, aunque no importantes. Sin embargo, para trabajos de precisión es conveniente realizar análisis de caracterización del medio en laboratorio. El parámetro que presenta mayor variación es la resolución, que resulta más desfavorable que la calculada a partir de las frecuencias de la emisión (frecuencias no filtradas).

### **Caracterización electromagnética de suelos.**

- Se ha presentado un procedimiento para caracterizar el comportamiento electromagnético de suelos, relacionando los resultados obtenidos en un suelo concreto con sus características físicas (pesos específicos, porosidad, humedad y saturación, principalmente).
- Para aplicar el procedimiento, en primer lugar se caracteriza el suelo mineralógica y físicamente. Para ello se realizan ensayos de difracción, de granulometría, de peso específico y un análisis del contenido de agua.
- Posteriormente se procede a caracterizar electromagnéticamente el medio utilizando una muestra del mismo. Mediante un ensayo estático se obtienen los espectros de amplitud de los radargramas y los tiempos dobles de propagación que permiten determinar las velocidades características promedio. La medida de la amplitud de la reflexión para diferentes

espesores de un mismo medio permite obtener la atenuación por absorción que se produce durante la propagación de la señal.

Aunque en muchos casos las interpretaciones de los registros realizadas a partir de parámetros hallados en la literatura para suelos similares proporcionan resultados satisfactorios, en estudios de mayor precisión es conveniente efectuar esta caracterización previa del medio.

- A partir de los tres casos concretos estudiados se observa que:
  1. La velocidad de propagación disminuye al aumentar la conductividad de la muestra y su saturación. Sin embargo, aumenta con la porosidad. La permitividad efectiva aumenta con la conductividad, la saturación y la compactación.
  2. Se observa, tal como era de esperar, la importante dependencia entre la saturación de una muestra y la velocidad de propagación en la misma. Para un mismo medio, si se analiza la velocidad para diferentes valores de la saturación, la tendencia es presentar una velocidad característica menor cuanto mayor es el contenido de agua.
  3. El análisis de la atenuación de la señal muestra que este efecto también tiene una fuerte dependencia con la saturación ( $S_a$ ) y la porosidad ( $n$ ) de la muestra. En general se observa que la atenuación de la amplitud por absorción del medio aumenta con la conductividad, la saturación y la compactación. Para valores mayores de  $S_a$  y menores de  $n$ , el factor de atenuación es más elevado. Para la antena de 900 MHz se han obtenido valores de  $\alpha=1.33$  con la mínima saturación y la mayor porosidad. Al disminuir la porosidad y aumentar ligeramente la saturación este valor aumenta a  $\alpha=1.82$ . Para la máxima saturación y una porosidad similar a la del caso anterior se obtiene que  $\alpha=2.04$ . Estos resultados son similares para la antena de 1 GHz. En los dos casos se alcanzan valores por encima de 2 para el factor de atenuación cuando la saturación es mayor a 0.69, lo que indica que, en suelos similares a los de la muestra, la penetración será pequeña si el contenido de agua es elevado.

4. El máximo del espectro de frecuencias (que se corresponde con la frecuencia central) se desplaza hacia frecuencias más bajas, siendo más marcada esta tendencia cuanto más elevada es la saturación y la compactación del medio. También es mayor el desplazamiento si la distancia de propagación aumenta. El espectro de la señal reflejada presenta las siguientes características:
- Una frecuencia central desplazada hacia frecuencias más bajas que en el caso del aire. Comparando estos registros con los que se obtienen en los ensayos con agua se advierte que en estos últimos el efecto de filtrado del medio es más importante. Las frecuencias centrales de los registros en los suelos son mayores que las de los registros en agua: unos 600 MHz en el primer caso frente a los 400 MHz en el segundo, por ejemplo, para las dos antenas utilizadas (1000 y 900 MHz).
  - El ancho de banda, tal como ya se había observado en el caso del agua, es más estrecho que en el caso del aire, aunque no tanto como en los registros obtenidos en agua. En los dos casos se aprecia que el comportamiento del espectro depende en gran manera de la conductividad del medio. El filtrado es mayor para conductividades más elevadas.
  - La tendencia que se observa en función de la saturación indica que la frecuencia central de un espectro es menor cuanto mayor es el porcentaje en agua (muestra más conductora).

### **Velocidad y permitividad relativa.**

- Se han analizado diferentes métodos para determinar la velocidad de propagación en un medio o su permitividad relativa. Los dos métodos más sencillos que se pueden realizar con los datos obtenidos con antenas monoestáticas, y que permiten obtener mejores resultados, son los basados en profundidades y tiempos dobles conocidos y los que utilizan eventos hiperbólicos de los radargramas.

- En general, cualquiera de los métodos es adecuado para determinar los parámetros del medio, aunque es importante controlar la calidad de los registros en cada caso y las limitaciones de cada técnica. Para una mejor interpretación, es útil emplear más de un método para analizar la velocidad del medio y comprobar los resultados con los obtenidos por otros autores.

### **Calidad de los registros.**

- Cuando se trabaja con un radar de subsuelo hay una serie de problemas que pueden surgir durante la adquisición de datos que han de tenerse en cuenta: reflexiones múltiples, reflexiones externas, efectos de borde y problemas de resolución y filtrado frecuencial.
  1. Reflexiones externas en los radargramas. Se registran cuando se trabaja con una antena poco apantallada o sin apantallar. Para identificarlas, se puede modelar la reflexión producida en los elementos externos al medio y comparar este modelo con el registro de campo. Por las características de radiación de las antenas se pueden detectar como reflexiones externas tanto elementos situados justo por encima de la antena como elementos laterales a la antena que se encuentran en el exterior del medio que se está estudiando.
  2. Las variaciones bruscas de la velocidad de propagación en el interior de un medio permiten una zonificación del medio, donde cada sector se caracteriza por una velocidad de propagación distinta, que determina la conversión de tiempos dobles en profundidades. Es importante considerar la posible zonificación de los medios para realizar una correcta interpretación de los datos de radar de subsuelo.
  3. Los efectos de borde que se producen en medios limitados son un caso particular de variaciones laterales de velocidad de propagación, de especial interés en el caso de ensayos de laboratorio, debido a las dimensiones de las muestras utilizadas. Para evitar el ruido que introducen estos efectos conviene calcular la huella de la antena para el reflector más profundo que se desee determinar. El radio de esta

huella proporciona la mínima distancia a la que se puede situar la antena del borde del medio sin que se produzcan los mencionados efectos de contorno. De esta manera se puede determinar el tamaño mínimo que debe tener la muestra utilizada en laboratorio.

4. La huella de la antena se puede aproximar por la primera zona de Fresnel; los resultados experimentales son consistentes con esta aproximación.
5. Los efectos que se producen por reflexiones múltiples se pueden tratar mediante una deconvolución predictiva. A pesar de todo, este tratamiento no da grandes resultados si el medio es complejo, el ruido generado por las múltiples elevado y el rango del registro alto. Los mejores resultados se obtienen en el caso de rangos pequeños y medios sencillos.
6. Cuando se estudian elementos de pequeño tamaño, inmersos en un medio, y próximos entre sí, es necesario efectuar un cuidadoso cálculo de la resolución del equipo, considerando al mismo tiempo el desplazamiento del espectro hacia las bajas frecuencias, producido durante la propagación de la señal por el medio. La antena puede no resolver los dos elementos por separado, de manera que se observan como un único reflector, con el tiempo mínimo de propagación situado en las trazas correspondientes al punto central entre los dos elementos. Utilizando las zonas de Fresnel se estima la mínima separación horizontal entre los dos elementos para que puedan ser identificados por separado.
7. La longitud de la anomalía de máxima amplitud obtenida en el caso de dos barras inmersas en el medio y próximas entre sí, corresponde a la distancia de separación entre estos dos objetos.
8. Para una separación entre los dos elementos de pequeño tamaño igual al diámetro de la huella de la antena, los registros producidos presentan tres eventos con un tiempo mínimo de propagación, de manera que el registro parece haberse generado a partir de tres

elementos reflectores. Dada esta geometría, las hipérbolas que se originan forman parte de una misma anomalía y no quedan registradas como eventos separados. En general, se observa que la anomalía central (correspondiente a la posición central entre elementos) presenta la máxima amplitud.

9. Cuando los dos elementos de pequeño tamaño están situados justo tras un cambio de medio, es decir, justo por debajo de un reflector importante, se producen interferencias entre las señales reflejadas, de manera que, para determinadas distancias, los mínimos de amplitud se sitúan en las zonas del registro que se corresponden con la posición real de los objetos reflectores. Es posible encontrar, por lo tanto, que los mínimos de tiempo de un registro hiperbólico pueden corresponderse tanto con máximos como con mínimos de amplitud, estando los segundos (tiempos y amplitudes mínimos) relacionados con los objetos y los primeros (tiempos mínimos y amplitudes máximas) con las zonas situadas entre dichos objetos. Esto puede llevar a una interpretación equívoca de los registros.
- El análisis del error sistemático que se produce por la aproximación de pequeñas pérdidas indica que el modelo resultante tiene menor error si la conductividad del medio es pequeña y la permitividad elevada. También se observa una dependencia importante de los errores sistemáticos, debidos a la aproximación de pequeñas pérdidas, con la frecuencia. Para frecuencias altas el error cometido es menor. Para frecuencias por debajo de los 10 MHz es conveniente considerar este error debido a su importancia. Para frecuencias de 100 MHz y superiores, si el medio sobre el que se trabaja tiene una conductividad inferior a los 10 mS/m y una permitividad relativa igual o superior a 5, la diferencia entre los dos modelos (el aproximado y el no aproximado) no es relevante.

En medios de alta velocidad hay que tener cuidado con las diferencias entre la permitividad estimada para el medio y su valor real, ya que se pueden producir errores relativos importantes tanto en la velocidad como en la profundidad.

## 18.4. Casos prácticos.

En este apartado se detallan las conclusiones de cada uno de los estudios de casos prácticos realizados. Además, en este trabajo, se propone un tipo de ficha para almacenar registros de interés junto con todos los datos que permitan identificar, trabajar, repetir o comparar el radargrama obtenido tanto en estos casos aplicados como en ensayos de laboratorio. Se trata de una forma de almacenar registros que permite disponer y utilizar la información de forma sencilla y rápida.

### Análisis de actuaciones sobre monumentos históricos.

- El radar de subsuelo es una herramienta útil en este tipo de estudios. Permite alcanzar las profundidades y la resolución que se necesitan en estos casos.
  
- En el caso del teatro romano de Sagunto ha sido posible determinar que:
  1. En la *cavea* se ha detectado claramente el contacto entre la restauración de 1990-91 (losas y recredido) y los sillares romanos, así como el contacto entre restauraciones de diferentes periodos.
  2. La permitividad dieléctrica efectiva de la zona del recredido es menor que la que presentan otros materiales constructivos, debido a la menor compactación de los materiales en esta zona.
  3. En el análisis de los muros se ha observado que se pueden detectar los distintos periodos constructivos. Los cambios laterales se observan en las zonas en las que se han reconstruido los muros. Los cambios en profundidad aparecen cuando existen refuerzos en el interior de los muros o cuando se ha aumentado su espesor durante la última intervención. Se ha detectado también la presencia de elementos metálicos de refuerzo (barras) en el interior de los muros reconstruidos.

4. En la zona de la *orchestra* existe una anomalía justo bajo las gradas denominadas *senatoriales* o *prima sedes* que se puede asociar con la existencia de una tercera grada (existen dos en la actualidad) bajo los materiales de relleno. También se detecta la roca caliza del sustrato por debajo de los materiales de relleno de este sector.
  5. En el escenario (*proscenium*), se han detectado las viguetas metálicas que soportan la estructura de madera. También se ha observado la existencia de los materiales de relleno por debajo de la tarima y, bajo éstos, la presencia de una serie de anomalías que parecen corresponderse con restos de los muros que habrían formado parte del antiguo edificio escénico romano.
- En el caso de los puentes sobre el río Turia se concluye que:
    1. El radar detecta anomalías ocasionadas por el contraste entre estratos de distintos materiales, siempre y cuando estos contrastes sean superficiales, nunca por debajo de los 50 ns de tiempo doble de propagación. La alta atenuación por absorción que se produce en este medio no permite registrar eventos a tiempos superiores a los mencionados.
    2. La presencia de un nivel freático muy superficial, observado en los sondeos mecánicos efectuados en las proximidades de los puentes, genera una reflexión dentro de una capa de los mismos materiales, únicamente diferenciados por su contenido en agua. Calculando las velocidades de propagación de cada una de las zonas (la saturada por debajo del nivel freático y la no saturada por encima) se observa que son mayores en la zona no saturada, tal como era de esperar. La diferencia entre los dos valores calculados es importante, ya que pasa de  $v=11.3$  cm/ns ( $\epsilon_r=7$ ) a  $v=6.9$  cm/ns ( $\epsilon_r=19$ ) respectivamente. Las velocidades se han podido obtener gracias a la información acerca de la estratigrafía de la zona que proporcionan los sondeos.
    3. Las zonas anómalas de mayor interés se localizan cerca de los pilares de los puentes. Estas zonas anómalas se asocian con las zapatas, que no

deben quedar afectadas por las obras del colector. La situación exacta de las zapatas es difícil de establecer debido al poco contraste de las propiedades electromagnéticas de los medios involucrados.

### **Estudio de lesiones en edificios de interés histórico-artístico.**

- El radar de subsuelo se presenta como una herramienta útil para localizar y dimensionar zonas dañadas por humedad. La fuerte dependencia de la velocidad con la saturación permite identificar los cambios de esta última, tanto laterales como en profundidad:
  1. Los cambios laterales se identifican a partir de las variaciones laterales de la velocidad de propagación. A partir de estas variaciones y de la porosidad del muro se puede estimar la saturación de cada zona analizada.
  2. Los cambios de la saturación en profundidad se identifican por las fuertes reflexiones que se producen en los contrastes de velocidades.
- Para la identificación y el diagnóstico de lesiones mecánicas (grietas, fisuras y oquedades) el radar de subsuelo es una herramienta útil siempre que las dimensiones de los daños sean suficientemente grandes para que se puedan resolver con este sistema. La detección de microfisuras y el estudio fino de fisuras requiere otros métodos de estudio, más adecuados a las dimensiones del problema.
- En el estudio de la iglesia de San Jorge se ha concluido que:
  1. La zona con mayor problema de humedad es la del muro Este de la iglesia. En esta zona los registros contienen anomalías que indican la existencia de cambios en el contenido de agua del medio. Los registros obtenidos en esta zona permiten delimitar el problema y dimensionar los daños.

2. Calculando las permitividades relativas en las zonas dañadas y sanas (de 6 y 9.5, respectivamente) se ha estimado el posible incremento de la saturación en el muro, en función de la porosidad.
  3. El análisis del subsuelo ha permitido localizar una anomalía próxima al muro Este que parece corresponderse con un antiguo canal, cegado en la actualidad, y que puede ser una de las causas de humedad de este sector de la iglesia.
  4. El estudio con georradar de los muros de la torre de la iglesia, dañados con grietas y despegues de materiales de recubrimiento, ha permitido delimitar las zonas con mayores lesiones, en las que se observan múltiples anomalías, de pequeño tamaño e irregulares. En las zonas dañadas por grietas la velocidad es mayor que en las zonas sanas. A pesar de todo, los cambios de velocidad no son significativos y resultan mucho menos importantes que los observados en los estudios de humedad.
- En el estudio de la catedral de Valencia, se ha concluido que:
    1. Los radargramas obtenidos en zonas afectadas de humedad muestran diferencias en los tiempos dobles de propagación de las reflexiones al compararlos con los obtenidos en zonas sanas. La velocidad promedio de propagación es mayor en zonas sanas.
    2. Se han estimado estas velocidades para las zonas sanas y dañadas.

#### **Aplicaciones para apoyo en estudios arqueológicos.**

- Se ha observado que el radar de subsuelo es un método muy útil para localizar zonas de interés arqueológico. Permite delimitar los sectores del terreno de mayor interés en función del número de anomalías detectadas, de su intensidad y de su profundidad. Esto facilita los trabajos arqueológicos posteriores.

- Permite conocer la máxima profundidad de excavación ya que detecta los contactos entre los sedimentos y la roca base.
- Es un método que, por su carácter no destructivo, se puede utilizar en lugares que no han de quedar afectados por estos trabajos de análisis del subsuelo. Resulta útil, por lo tanto, para localizar y confirmar la existencia de elementos enterrados bajo edificaciones de interés histórico-artístico, de los que se tiene noticia documental.
- En los trabajos realizados en la catedral de Valencia, el georradar ha servido como apoyo a la investigación documental que se estaba realizando, permitiendo localizar y confirmar la existencia de elementos documentados en la cartografía antigua. Se han localizado los restos de un muro de importantes dimensiones, que se corresponde con la antigua fachada principal. Los restos de las edificaciones anexas, demolidas para la ampliación de la iglesia, se observan en los radargramas como anomalías de pequeño tamaño, superficiales. También se han localizado elementos de menor tamaño no documentados, como es el caso de sepulcros y pudrideros. Las criptas bajo el suelo de la catedral han generado reflexiones importantes.
- En la iglesia de San Jorge se han identificado dos sectores del subsuelo claramente diferenciados. En el primero, cercano a la fachada Norte y a la torre, se observa un elevado número de anomalías, localizadas a una profundidad máxima de dos metros, asociadas con los restos de una iglesia más antigua sobre la que se levanta el actual edificio. En el segundo sector los radargramas muestran un subsuelo homogéneo sin anomalías de interés excepto las asociadas con cambios estratigráficos de materiales.
- En el estudio del emplazamiento del antiguo castro romano se han podido delimitar las zonas de mayor interés, donde conviene realizar excavaciones arqueológicas. Se ha identificado también el contacto entre los sedimentos y la base rocosa y se ha localizado la situación del aljibe del patio de armas de la antigua fortaleza. Se ha observado que, en función de los materiales del subsuelo, las variaciones de la velocidad (calculadas a partir de eventos

hiperbólicos) son importantes y se pueden utilizar para definir los diferentes sectores.

- En el estudio del antiguo convento de las Monjas Comendadoras se han identificado, en el interior de la iglesia, dos anomalías paralelas que se corresponden con dos muros de una iglesia más antigua, posiblemente visigótica, de mayores dimensiones que la actual (con tres naves; la actual tiene una sola nave). Se han identificado diversas reflexiones superficiales, posiblemente producidas en enterramientos y sepulcros no documentados. En la zona del antiguo claustro se ha localizado el aljibe y se ha detectado una reflexión de importancia cercana a esta zona y a la misma profundidad que puede corresponderse con otro aljibe o bien con alguna construcción relacionada con el primero. Enfrente de la iglesia, en el camino que une este edificio con la villa, se han localizado dos anomalías de una anchura aproximada de 1.5 m y de gran longitud (se detectan en varios perfiles paralelos), posiblemente asociadas con antiguos túneles.

## **18.5. Futuras líneas de investigación.**

A partir de los resultados obtenidos es posible determinar algunas líneas por las que se puede continuar este trabajo. Se proponen las siguientes líneas de trabajo:

- Continuar los trabajos analizando el comportamiento de la permitividad efectiva en función de la porosidad y de la saturación del medio. Comparar los resultados con distintos medios, analizando su composición, para ir completando unas tablas que pueden ser de gran utilidad en trabajos de campo.
- Analizar con mayor detalle el comportamiento de las frecuencias, también dependiendo de las características del medio, para intentar encontrar un modelo que permita predecir el filtrado que se producirá y el espectro que se ha de obtener.

- Continuar con los ensayos para analizar la resolución horizontal. Completar el análisis de elementos de pequeño tamaño cercanos entre sí, con el estudio de otros medios y con un mayor número de casos, analizando situaciones con dos, tres, cuatro o más elementos inmersos en el medio. Se sugiere la utilización de objetos iguales de diferentes materiales y de barras con distintos diámetros, utilizando diferentes disposiciones de dichos objetos.
- Idear y analizar ensayos para estudiar los cambios de fase y la dependencia de estos con las características de los medios en contacto.
- Modelizar los distintos problemas analizados con programas informáticos, teniendo en cuenta los efectos estudiados.