



Universitat Politècnica de València

Departamento de Ingeniería Cartográfica, Geodesia y Fotogrametría

Tesis Doctoral

**Una nueva perspectiva del cartografiado del
subsuelo para Restauración y Conservación del
Patrimonio Histórico: Modelización y
Catalogación de Registros de Georradar en
Edificios Singulares Religiosos**

Autor:

Luis Blanch Puertes

Director:

Francisco García García

Valencia, enero 2016

*A mi padre, por haberme dado los fundamentos básicos
donde he construido mis conocimientos.
Soy lo que soy, gracias a él.*

*A mi madre, por haberme dedicado todo el tiempo necesario.
Soy lo que soy, gracias a ella.*

*A mi mujer y a mis dos hijas, por todo el amor que me dan.
Con ellas comparto el presente y pensando en ellas construyo el futuro.*

*A todos mis compañeros y amigos, que me han ofrecido siempre su ayuda y
especialmente su tiempo.*

RESUMEN

Los recursos que destinan las administraciones públicas al patrimonio cultural y su conservación son importantes, aunque fluctuantes y cada vez existe más conciencia de que es un motor de crecimiento económico en un país. España es uno de los tres países europeos que cuenta con mayor riqueza patrimonial.

El patrimonio cultural religioso posee un significativo y elevado valor histórico, estético y sentimental. Este ámbito del patrimonio cultural requiere de actuaciones de protección, conservación y puesta en valor. Sin embargo, la mayoría de intervenciones en este campo (estudios previos, proyectos de conservación, etc.) no abordan el estudio del subsuelo del edificio de forma sistemática.

Este trabajo de investigación surge con la intención de poner en valor el patrimonio cultural religioso y conseguir la integración del análisis del subsuelo en los estudios y proyectos de restauración. Por otro lado, pretende mostrar a los Ingenieros en Geomática y Topografía un camino de integración y así afianzarse dentro de las profesiones que tienen como objeto de trabajo el patrimonio cultural.

Se ha estudiado aplicaciones a casos reales en edificios religiosos de la Comunidad Valenciana que han permitido interpretar y definir las anomalías existentes en el subsuelo de estas construcciones y sistematizar el cartografiado y la interpretación de los resultados mediante la modelización de las anomalías de acuerdo con una codificación de señales. Para ello, se ha empleado el georradar como técnica de prospección geofísica eficiente para obtener con éxito la cartografía del subsuelo y diagnosticar las anomalías existentes en el espacio enterrado de edificios singulares religiosos.

Los resultados obtenidos se sintetizan en fichas técnicas que presentan las claves referentes a la anomalía detectada, lugar y herramienta empleada. Estas fichas de catalogación serán de gran

utilidad en el estudio de casos similares, especialmente para técnicos no especialistas en el ámbito de la Geomática.

La propuesta expuesta en el presente trabajo de investigación potencia el valor arquitectónico histórico–religioso a través de la faceta investigadora por medio del cartografiado del subsuelo, su interpretación y su divulgación. Asimismo, constituye una forma de preservación del legado histórico del subsuelo.

RESUM

Els recursos que destinen les administracions públiques al patrimoni cultural i la seua conservació són importants, encara que fluctuants i cada vegada existeix més consciència que és un motor de creixement econòmic en un país. Espanya és un dels tres països europeus que compta amb major riquesa patrimonial.

El patrimoni cultural religiós posseeix un significatiu i elevat valor històric, estètic i sentimental. Aquest àmbit del patrimoni cultural requereix d'actuacions de protecció, conservació i posada en valor. No obstant això, la majoria d'intervencions en aquest camp (estudis previs, projectes de conservació, etc.) no aborden l'estudi del subsòl de l'edifici de forma sistemàtica.

Aquest treball de recerca sorgeix amb la intenció de posar en valor el patrimoni cultural religiós i aconseguir la integració de l'anàlisi del subsòl en els estudis i projectes de restauració. D'altra banda, pretén mostrar als Enginyers en Geomàtica i Topografia un camí d'integració i així afermar-se dins de les professions que tenen com a objecte de treball el patrimoni cultural.

S'ha estudiat aplicacions a casos reals en edificis religiosos de la Comunitat Valenciana que han permès interpretar i definir les anomalies existents en el subsòl d'aquestes construccions i sistematitzar el cartografiat i la interpretació dels resultats mitjançant la modelització de les anomalies d'acord amb una codificació de senyals. Per a açò, s'ha emprat el geo-radar com a tècnica de prospecció geo-física eficient per a obtenir amb èxit la cartografia del subsòl i diagnosticar les anomalies existents en l'espai enterrat d'edificis singulars religiosos.

Els resultats obtinguts se sintetitzen en fitxes tècniques que presenten les claus referents a l'anomalia detectada, lloc i eina emprada. Aquestes fitxes de catalogació seran de gran utilitat en l'estudi de casos similars, especialment per a tècnics no especialistes en l'àmbit de la Geomàtica.

La proposta exposada en el present treball de recerca potencia el valor arquitectònic històric–religiós a través de la faceta investigadora per mitjà del cartografiat del subsòl, la seua interpretació i la seua divulgació. Així mateix, constitueix una forma de preservació del llegat històric del subsòl.

ABSTRACT

The resources that public administrations allocate to cultural heritage and its conservation are important but fluctuating. People are increasingly becoming aware that cultural heritage is a driver of economic growth in a country. Spain is one of the three main European countries that has greater cultural heritage.

The religious cultural heritage has a significant and elevated historical, aesthetic and sentimental value. This field of the cultural heritage requires actions for the protection, conservation and enhancement of the cultural resources. However, the majority of projects in this area (preliminary studies, conservation projects, etc.) do not tackle the study of the building basement in a systematic way.

The aims of this study are to value the religious cultural heritage and to integrate the analysis of the building basement into the restoration projects. This research also intends to show an integration path for Geomatics and Topography Engineers in the list of professions related to cultural heritage.

This study presents real-case applications in religious buildings of the Valencian Autonomous Region. These applications allowed us to interpret anomalies of the building basements and to systematize the cartography and the interpretation of the results by means of the modelling of the anomalies following a signal coding. For this purpose, Ground Penetrating Radar (GPR) has been used as an efficient geophysical technique that enabled us to successfully obtain the cartography and to detect the existing anomalies of the religious building basements.

The results are summarized in technical specification sheets that compile references to the anomaly detected, place and tool employed. These cataloguing analytical cards will be very useful in the study of similar cases, especially for technicians who are no specialists in Geomatics.

This research proposal promotes the historical and religious architectural value through investigation by means of the cartography, interpretation and disclosure of religious building basement information. Likewise, it constitutes a way of preserving the historical legacy of religious building basements.

ÍNDICE GENERAL

Resumen	V
Resum	VII
Abstract	IX
Índice de figuras	XV
1 Introducción	1
1.1. Breve historia del georradar	6
1.2. Justificación del estudio	12
1.2.1. Antecedentes	12
1.2.2. Importancia económica del patrimonio cultural	24
1.2.3. Importancia de la investigación en la restauración y conservación del patrimonio	29
1.2.4. Plan Nacional de Abadías, Monasterios y Conventos	31
1.2.5. Conservación preventiva	33
1.2.6. Historic Building Information Modelling (HBIM)	35
2 Objetivos	41
2.1. Objetivos	43
2.2. Plan de la memoria	45
3 Estado del arte	47
3.1. Técnicas no destructivas aplicadas al cartografiado del patrimonio cultural	48
3.2. Estado del arte en el patrimonio cultural	49
4 Teoría de la prospección con radar del subsuelo	57
4.1. Introducción	57
4.2. Principios teóricos: propagación de ondas electromagnéticas	59
4.2.1. Parámetros electromagnéticos de un medio	61
4.2.2. Parámetros efectivos	66
4.2.3. Velocidad de propagación de una onda electromagnética	66
4.2.4. Longitud de onda en un medio material (diferente del vacío)	69
4.2.5. Coeficientes complejos de reflexión, refracción y transmisión	70
4.2.6. Atenuación	73
4.2.7. Profundidad de penetración	74
4.3. Instrumentación de georradar	75

4.3.1.	Unidad central y accesorios _____	75
4.3.2.	Antenas _____	77
5	Aplicación del georradar: estudio del subsuelo en el patrimonio religioso _____	81
5.1.	Iglesia de nuestra señora del don de alfafar _____	86
5.1.1.	Descripción del edificio _____	86
5.1.2.	Geología _____	87
5.1.3.	Materiales y metodología _____	87
5.1.4.	Resultados _____	89
5.1.5.	Modelización de los resultados en 2d _____	91
5.1.6.	Modelización de los resultados en 3d _____	93
5.2.	Iglesia de nuestra señora de la asunción de ares del maestre _____	95
5.2.1.	Descripción del edificio _____	95
5.2.2.	Geología _____	96
5.2.3.	Materiales y metodología _____	96
5.2.4.	Resultados _____	98
5.2.5.	Modelización de los resultados en 2d _____	102
5.2.6.	Modelización de los resultados en 3d _____	104
5.3.	Iglesia de san miguel arcángel de jalance _____	108
5.3.1.	Descripción del edificio _____	108
5.3.2.	Geología _____	109
5.3.3.	Materiales y metodología _____	109
5.3.4.	Resultados _____	110
5.3.5.	Modelización de los resultados en 2d _____	113
5.3.6.	Modelización de los resultados en 3d _____	115
5.4.	Iglesia de san pedro de paterna _____	117
5.4.1.	Descripción del edificio _____	117
5.4.2.	Geología _____	118
5.4.3.	Materiales y metodología _____	118
5.4.4.	Resultados _____	120
5.4.5.	Modelización de los resultados en 2d _____	122
5.4.6.	Modelización de los resultados en 3d _____	125
5.5.	Iglesia de nuestra señora del socorro de peñíscola _____	128
5.5.1.	Descripción del edificio _____	128
5.5.2.	Geología _____	129
5.5.3.	Materiales y metodología _____	129
5.5.4.	Resultados _____	130
5.5.5.	Modelización de los resultados en 2d _____	133
5.5.6.	Modelización de los resultados en 3d _____	136

5.6.	Iglesia de santiago apóstol de la pobla de vallbona _____	138
5.6.1.	Descripción del edificio _____	138
5.6.2.	Geología _____	139
5.6.3.	Materiales y metodología _____	139
5.6.4.	Resultados _____	140
5.6.5.	Modelización de los resultados en 2d _____	144
5.6.6.	Modelización de los resultados en 3d _____	146
5.7.	Iglesia del sagrado corazón de jesús de valencia _____	148
5.7.1.	Descripción del edificio _____	148
5.7.2.	Geología _____	149
5.7.3.	Materiales y metodología _____	149
5.7.4.	Resultados _____	150
5.7.5.	Modelización de los resultados en 2d _____	154
5.7.6.	Modelización de los resultados en 3d _____	156
5.8.	Iglesia de san juan del hospital de valencia _____	160
5.8.1.	Descripción del edificio _____	160
5.8.2.	Geología _____	161
5.8.3.	Materiales y metodología _____	161
5.8.4.	Resultados _____	163
5.8.5.	Modelización de los resultados en 2d _____	164
5.8.6.	Modelización de los resultados en 3d _____	165
5.9.	Cripta del monasterio de san miguel de los reyes de valencia _____	168
5.9.1.	Descripción del edificio _____	168
5.9.2.	Geología _____	169
5.9.3.	Materiales y metodología _____	169
5.9.4.	Resultados _____	171
5.9.5.	Modelización de los resultados en 2d _____	174
5.9.6.	Modelización de los resultados en 3d _____	176
5.10.	Iglesia arciprestal de santiago de villena _____	179
5.10.1.	Descripción del edificio _____	179
5.10.2.	Geología _____	180
5.10.3.	Materiales y metodología _____	180
5.10.4.	Resultados _____	181
5.10.5.	Modelización de los resultados en 2d _____	184
5.10.6.	Modelización de resultados en 3d _____	186
6	Catalogación de las estructuras mediante gpr: cartografiado del subsuelo _____	189
6.1.	Catalogación de niveles culturales/ geológicos en el subsuelo de edificios históricos religiosos _____	193
6.2.	Catalogación de estructuras subterráneas en el subsuelo de edificios históricos religiosos _____	194

6.2.1.	Pavimentos _____	194
6.2.2.	Criptas _____	195
6.2.3.	Estructuras abovedadas _____	196
6.2.4.	Tumbas _____	197
6.2.5.	Estructuras lineales: restos murarios _____	198
6.2.6.	Cimentaciones _____	199
6.2.7.	Instalaciones _____	200
6.2.8.	Otras estructuras _____	201
6.3.	Catalogación de lesiones en el subsuelo de edificios históricos religiosos _____	203
6.3.1.	Humedades _____	203
6.3.2.	Zonas anómalas _____	204
7	Conclusiones _____	209
7.1.	Discusión _____	210
7.2.	Conclusiones _____	212
7.3.	Futuras líneas de investigación _____	215
8	Bibliografía _____	219

ÍNDICE DE FIGURAS

Gráfico 1.1. Proporción de participación en proyectos de patrimonio cultural sobre el total de proyectos de la UE(Fuente: Plan Nacional de Investigación en Patrimonio).	16
Gráfico 1.2. Proporción de coordinación en proyectos de patrimonio cultural sobre el total de proyectos de la UE (Fuente: Plan Nacional de Investigación en Patrimonio).	16
Gráfico 1.3. Proporción de participación por país, en proyectos de patrimonio cultural sobre el total de proyectos. (Fuente: Plan Nacional de Investigación en Patrimonio).	17
Gráfico 1.4. Proporción de coordinación en proyectos de patrimonio cultural sobre el total de proyectos por país (Fuente: Plan Nacional de Investigación en Patrimonio).	17
Gráfico 1.5. Proporción de coordinación de proyectos respecto al total europeo en algunos temas estratégicos para España. (Fuente: Plan Nacional de Investigación en Patrimonio).	18
Gráfico 1.6. Inversiones en patrimonio cultural por parte de las Administraciones Públicas (Fuente: Estadística de Financiación y Gasto Público en Cultura. Ejercicio 2012).	20
Gráfico 1.7. Distribución porcentual del gasto por Comunidades Autónomas en 2012 (Fuente: Datos del MECD).	20
Gráfico 1.8. Gasto liquidado en cultura por la Administración General del Estado y por la Administración Autonómica (en millones de euros). (Fuente: Datos del MECD).	21
Gráfico 1.9. Gasto liquidado en cultura por la Administración Local (en millones de euros). (Fuente: Datos del MECD).	22
Gráfico 1.10. Número de intervenciones en inmuebles históricos en la provincia de Valencia, en el periodo comprendido entre el año 2000 y el año 2014. (Fuente: Diputación de Valencia).	23

Gráfico 1.11. Distribución porcentual de bienes inmuebles por Comunidades Autónomas en 2013 (Fuente: Datos del MECD).	23
Gráfico 1.12. Empleo medio anual cultural (en miles). (Fuente: Instituto Nacional de Estadística. Encuesta de población activa).	27
Gráfico 1.13. Distribución porcentual de empresas culturales por Comunidades Autónomas: Año 2013. (Fuente: Anuario de Estadísticas Culturales 2014).	29
Figura 5.1. Localización de las iglesias objeto de estudio.	82
Figura 5.2. Equipo de georradar empleado en este estudio para la prospección del subsuelo de las iglesias: (1) Unidad central SIR-3000, (2) Antena de 400 MHz, (3) Antena de 100 MHz.	84
Figura 5.3. Imágenes de la Iglesia de Nuestra Señora del Don de Alfajar: a- Fachada de la iglesia, b- Altar mayor, c- Nave central.	86
Figura 5.4. a- Equipo de georradar utilizado en este estudio: (1) antena 400 MHz de frecuencia central y (2) unidad central sistema SIR-3000; b- Observación durante la toma del perfil P7, en el altar mayor; c- Distribución de los perfiles tomados con la antena de 400 MHz sobre el plano de planta de la iglesia.	88
Figura 5.5. Radargramas de los perfiles P1 (a), P6 (b) y P10 (c) tomados en la nave central de la iglesia con la antena de 400 MHz.	89
Figura 5.6. a- Interpretación del perfil P1. b- Modelización de los estratos (pavimento, relleno, terreno natural) y estructuras detectadas (estructura lineal y cripta) en el perfil P1.	91
Figura 5.7. a- Interpretación del perfil P6. b- Modelización de los estratos (pavimento, relleno, terreno natural) y estructuras halladas (estructuras lineales y cripta) en el perfil P6.	92
Figura 5.8. a- Interpretación del perfil P10. b- Modelización de los estratos (pavimento, nivel antrópico, terreno natural con inclinación natural del terreno) y estructuras identificadas (tumba y cripta) en el perfil P10.	92

Figura 5.9. a- Modelo tridimensional de los datos de georradar obtenidos en la Iglesia de Nuestra Señora del Don de Alfafar, donde se observa la cota más superficial del subsuelo. b- Modelo tridimensional de los datos de georradar de la iglesia objeto de estudio, donde se muestra una sección horizontal del subsuelo a mayor profundidad. c- Localización en planta de las estructuras detectadas a partir del análisis del modelo 3D de georradar. _____ 93

Figura 5.10. Modelización tridimensional de las estructuras subterráneas identificadas en el subsuelo de la Iglesia de Nuestra Señora del Don, en Alfafar. _____ 94

Figura 5.11. Plano contrapicado del subsuelo de la iglesia donde se muestran la modelización de las estructuras detectadas en la prospección geofísica y la profundidad a la que se encuentran las mismas. _____ 94

Figura 5.12. Imágenes de la Iglesia de Nuestra Señora de la Asunción de Ares del Maestre: a- Fachada de la iglesia, b- Nave central, c- Altar mayor. _____ 95

Figura 5.13. a- Unidad central del equipo georradar utilizado en este estudio; b- Toma de datos con antena de 200 MHz; c- Planta de la iglesia con la distribución de los perfiles tomados con el georradar. _____ 97

Figura 5.14. Radargrama del perfil P3 tomado en una de las naves laterales de la iglesia donde se identifican claramente los cinco niveles detectados en el subsuelo del templo. _____ 99

Figura 5.15. Radargramas de los perfiles P1 (a), P8 (b) y P15 (c) tomados en las naves de la iglesia con la antena de 400 MHz. _____ 101

Figura 5.16. a- Interpretación del perfil P1. b- Modelización de los niveles (pavimento, relleno, terreno natural1, terreno natural 2, terreno natural 3, capa freática) y estructuras identificadas (tumba y contacto geológico inclinado) en el perfil P1. _____ 102

Figura 5.17. a- Interpretación del perfil P8. b- Modelización de los niveles (pavimento, relleno, terreno natural1, terreno natural 2, terreno natural 3, capa freática), estructuras identificadas (estructura lineal y contacto geológico inclinado) y patología (vacío, zona removida) en el perfil P8. _____ 103

Figura 5.18. a- Interpretación del perfil P15. b- Modelización de los niveles (pavimento, relleno, terreno natural1, terreno natural 2, terreno natural 3, capa freática) y estructuras identificadas (cripta y contacto geológico inclinado) en el perfil P15. _____	104
Figura 5.19. Localización en planta de las estructuras detectadas a partir del análisis de los radargramas obtenidos mediante georradar. _____	105
Figura 5.20. Modelización tridimensional de las estructuras subterráneas identificadas en el subsuelo de la Iglesia de Nuestra Señora de la Asunción de Ares del Maestre. _____	106
Figura 5.21. Plano contrapicado del subsuelo de la iglesia donde se muestran la modelización del pavimento y de las estructuras detectadas mediante la prospección con georradar y la profundidad a la que se localizan las mismas. ____	106
Figura 5.22. Modelización de los niveles culturales y estratos geológicos localizados en el subsuelo de la Iglesia de Nuestra Señora de la Asunción de Ares del Maestre. _____	107
Figura 5.23. a- y b- Imágenes exteriores de la Iglesia de San Miguel Arcángel de Jalance, c- Altar mayor. _____	108
Figura 5.24. Esquema de situación de los perfiles registrados con georradar en el interior y en el exterior de la iglesia. _____	109
Figura 5.25. Radargrama del perfil P5 (antena de 400 MHz), donde se distingue un nivel de humedad destacable en el subsuelo, a partir de los 1,30 m. de profundidad. _____	111
Figura 5.26. Radargrama del perfil P4 (antena de 100 MHz), donde se observa los tres niveles de humedades destacables en el subsuelo. _____	112
Figura 5.27. Radargrama del perfil P8 (antena de 100 MHz), en el que se identifica un nivel de humedad destacable en el subsuelo a partir de los 7,50 m. de profundidad y una estructura enterrada en los últimos metros del perfil. ____	112
Figura 5.28. a- Interpretación del perfil P4. b- Modelización de los niveles (pavimento, relleno, terreno natural1) y patología detectada (tres niveles de humedades) en el perfil P4. _____	113

Figura 5.29. a- Interpretación del perfil P8. b- Modelización de los niveles (pavimento, relleno, terreno natural) y patología detectada (tres niveles de humedades y una zona removida) en el perfil P8. _____	114
Figura 5.30. Localización en planta de las estructuras detectadas a partir del análisis de los radargramas obtenidos mediante georradar. _____	115
Figura 5.31. Modelización tridimensional de las estructuras subterráneas identificadas en el subsuelo de la Iglesia de Jalance (zona removida e instalación de calefacción). _____	116
Figura 5.32. Modelización de los niveles culturales, estratos geológicos y humedades localizados en el subsuelo de la Iglesia de San Miguel Arcángel de Jalance. _____	116
Figura 5.33. Imágenes de la Iglesia de San Pedro de Paterna: a- Nave central, b- Fachada principal, c- Altar de la capilla lateral. _____	117
Figura 5.34. a- Unidad Central SIR-3000 de GSSI, b- Antena de 400 MHz, c- Distribución en planta de los perfiles tomados con la técnica del georradar en el interior de la iglesia. _____	119
Figura 5.35. Radargrama del perfil P1 tomado con una antena de 400 MHz en el eje central de la nave principal de la iglesia. En el perfil se distingue los tres niveles del subsuelo, además de un contacto inclinado y las estructuras subterráneas (estructuras lineales y otras estructuras de grandes dimensiones). ____	120
Figura 5.36. Radargramas de los perfiles P5 (a) y P12 (b) tomados con la antena de 400 MHz transversalmente sobre las estructuras A y B, en la nave central de la iglesia. _____	121
Figura 5.37. Radargramas de los perfiles P2 (a) y P3 (b) tomados con la antena de 400 MHz longitudinalmente sobre las naves laterales de la iglesia. ____	122
Figura 5.38. a- Interpretación del perfil P1. b- Modelización de los niveles (pavimento, terreno natural: estratos 1, 2 y 3, contacto inclinado) y estructuras subterráneas (dos estructuras lineales y otras dos estructuras) en el perfil P1. _____	123

Figura 5.39. a- Interpretación del perfil P3. b- Modelización de los niveles (pavimento, terreno natural: estratos 1 y 2) y estructuras lineales en el perfil P3. _____	124
Figura 5.40. Ilustración del horno árabe “El dau”, extraída de la siguiente página web: “Antropología cultural de nuestro entorno” [http://mayores.uji.es/blogs/antropologia/?p=1904]. _____	124
Figura 5.41. a- Interpretación del perfil P12. b- Modelización de los niveles (pavimento, terreno natural: estratos 1 y 2) y la estructura B en el perfil P12. _____	125
Figura 5.42. Localización en planta de las estructuras detectadas tras el estudio de los perfiles de georradar. _____	126
Figura 5.43. Modelización tridimensional de las estructuras identificadas en el subsuelo de la Iglesia de Paterna. _____	127
Figura 5.44. Plano contrapicado del subsuelo de la Iglesia de San Pedro de Paterna, ilustrando la modelización de las estructuras del subsuelo y la profundidad a la que se localizan las mismas. _____	127
Figura 5.45. Imágenes de la Iglesia de Nuestra Señora del Socorro de Peñíscola: a- Fachada principal, b- Altar mayor, c- Capilla de la Comunión. _____	128
Figura 5.46. Esquema de distribución de los perfiles tomados en el interior de la iglesia. _____	130
Figura 5.47. Radargrama del perfil P2 tomado con una antena de 400 MHz. En el perfil se distingue dos de las estructuras abovedadas existentes en las proximidades del Altar mayor. _____	131
Figura 5.48. Radargrama del perfil P5, donde se identifica las estructuras abovedadas B y D ubicadas bajo la sacristía de la iglesia y en una capilla lateral, respectivamente. _____	131
Figura 5.49. Radargrama del perfil P7, donde se observa la estructura abovedada conocida bajo el altar mayor y su acceso. _____	132
Figura 5.50. Radargrama del perfil P9. En el perfil se observa la estructura del <i>bufador</i> en la nave principal de la iglesia y la Estructura abovedada E a los pies del Altar mayor. _____	132

Figura 5.51. a- Interpretación del perfil P9. b- Modelización de los niveles y estructuras en el perfil P9. _____	134
Figura 5.52. a- Interpretación del perfil P2. b- Modelización de los niveles y estructuras en el perfil P2. _____	134
Figura 5.53. a- Interpretación del perfil P5. b- Modelización de los niveles y estructuras abovedadas en el perfil P5. _____	135
Figura 5.54. a- Interpretación del perfil P7. b- Modelización de los niveles y estructura abovedada en el perfil P7. _____	135
Figura 5.55. Localización en planta de las estructuras detectadas a partir de la prospección con georradar y el análisis bidimensional de los radargramas obtenidos. _____	136
Figura 5.56. Modelización tridimensional de las estructuras detectadas en el subsuelo de la Iglesia de Nuestra Señora del Socorro de Peñíscola. _____	137
Figura 5.57. Plano contrapicado del subsuelo de la iglesia donde se muestran la modelización del pavimento y de las estructuras identificadas. _____	137
Figura 5.58. Imágenes de la Iglesia de Santiago Apóstol de la Pobl de Vallbona: a- Fachada principal, b- Campanario, c- Fachada posterior. _____	138
Figura 5.59. Ubicación de los perfiles de georradar en la zona estudiada: nave central, crucero, capillas laterales y atrio de la Iglesia de Santiago Apóstol de la Pobl de Vallbona. _____	140
Figura 5.60. Radargrama del perfil P1 en la nave central de la iglesia donde se observa los cinco niveles en el subsuelo registrados en este estudio. _____	141
Figura 5.61. Radargrama del perfil P5 donde se distingue la evidencia de una antigua cripta que está colmatada y en su parte superior está sellada mediante una losa de hormigón con mallazo. _____	142
Figura 5.62. Radargrama del perfil P17 en el atrio de la iglesia donde se observa la presencia de humedades en el subsuelo. _____	143
Figura 5.63. Radargrama P3 en el atrio de la iglesia donde se observa la presencia de dos anomalías singulares en el subsuelo. _____	144

Figura 5.64. a- Interpretación del perfil P5. b- Modelización de niveles y cripta en el perfil P5. _____	145
Figura 5.65. a- Interpretación del perfil P17. b- Modelización de los niveles y las áreas de humedad detectadas en el perfil P17. _____	145
Figura 5.66. Localización en planta de la cripta y las zonas de humedades, a partir del análisis de los radargramas obtenidos mediante georradar. _____	146
Figura 5.67. Modelización tridimensional de la estructura subterránea identificada (cripta) y localización de las humedades presentes en el subsuelo de la iglesia. _____	147
Figura 5.68. Modelización de los niveles culturales y estratos geológicos detectados en el subsuelo de la Iglesia de Santiago Apóstol de la Pobra de Vallbona. _____	147
Figura 5.69. Imágenes de la Iglesia del Sagrado Corazón de Jesús: a- Perspectiva aérea del exterior de la iglesia, b- Interior de la iglesia con el Altar mayor al fondo, c- Fachada principal. _____	148
Figura 5.70. Ubicación de los perfiles de georradar en la zona estudiada: nave central, naves laterales y crucero de la Iglesia del Sagrado Corazón de Jesús de Valencia. _____	150
Figura 5.71. Radargrama del perfil P1, obtenido en la nave central de la iglesia. Se observa: una estructura en un talud a los pies de la iglesia, una tumba, una cripta ya documentada en el Altar mayor, así como el nivel cultural que alcanza los 2 m. de profundidad. _____	151
Figura 5.72. Radargrama del perfil P29, tomado en una de las naves laterales de la iglesia. En el perfil se observa: una zona anómala y una tumba inédita. _____	153
Figura 5.73. Radargramas correspondiente a los perfiles 49 (a) y 50 (b), realizados para el estudio de la cimentación en muros y pilares, respectivamente. En ambos perfiles se distinguen las zapatas que conforman la cimentación en esta área del edificio. _____	153
Figura 5.74. Radargrama del perfil P8, realizado en el ala derecha de la nave del crucero de la iglesia, donde se distingue una cripta abovedada inédita. _____	154

Figura 5.75. a- Interpretación del perfil P1. b- Modelización de los niveles, los contactos geológicos y las estructuras subterráneas detectadas en el perfil P1. _____	154
Figura 5.76. a- Interpretación del perfil P8. b- Modelización de los niveles y la cripta detectada en el perfil P8. _____	155
Figura 5.77. a- Interpretación del perfil P29. b- Modelización de los niveles, estructuras y anomalías detectadas en el perfil P29. _____	155
Figura 5.78. Interpretación de los perfiles P49 (a) y P50 (b). Modelización de los niveles y las cimentaciones detectadas en los perfiles P49 (c) y P50 (d). _____	156
Figura 5.79. Situación en planta de las estructuras enterradas en el subsuelo de la Iglesia del Sagrado Corazón de Jesús resultantes de la interpretación de los datos 3D obtenidos por georradar. _____	157
Figura 5.80. a- Modelo 3D del subsuelo de la nave principal de la iglesia. b- Modelo 3D del subsuelo del ala derecha de la nave del crucero de la iglesia. c- Modelo 3D del subsuelo del ala izquierda de la nave del crucero de la iglesia. _____	158
Figura 5.81. Modelización tridimensional del subsuelo de la Iglesia del Sagrado Corazón de Jesús, donde se observa las estructuras y patología detectadas, así como el talud existente bajo el acceso a la iglesia. _____	159
Figura 5.82. Imágenes de la Iglesia de San Juan del Hospital: a- Patio norte de acceso, b- Portada de acceso a la iglesia, c- Interior de la iglesia (nave principal). _____	160
Figura 5.83. Ubicación de los perfiles de georradar en la zona estudiada: nave central de la Iglesia de San Juan del Hospital de Valencia. _____	162
Figura 5.84. Radargrama del perfil P12, que atraviesa longitudinalmente la iglesia por el eje central de la misma. _____	164
Figura 5.85. a- Interpretación del perfil P12. b- Modelización de los niveles y las estructuras subterráneas detectadas en el perfil P12. _____	165
Figura 5.86. a- Modelo 3D del subsuelo de la nave principal de la iglesia. b- Modelo 3D del subsuelo del Altar mayor de la iglesia. _____	166

Figura 5.87. Situación en planta de las estructuras enterradas en el subsuelo de la Iglesia de San Juan del Hospital resultantes de la interpretación de los datos 2D y 3D obtenidos por georradar: a- Estructuras existentes en el nivel cultural cristiano (0 - 2 m.), b- Estructuras del nivel cultural romano (a partir de 5m. de profundidad).	166
Figura 5.88. Modelización tridimensional del subsuelo de la Iglesia de San Juan del Hospital, donde se observa las estructuras detectadas en el subsuelo de la iglesia.	167
Figura 5.89. Plano contrapicado de la modelización tridimensional del subsuelo de la Iglesia de San Juan del Hospital, donde se observa las estructuras y niveles culturales identificados a distintas profundidades.	167
Figura 5.90. Imágenes del Monasterio de San Miguel de los Reyes: a- Conjunto monumental del Monasterio, b- Altar mayor de la Cripta, c- Fachada principal de la Iglesia del Monasterio.	168
Figura 5.91. a- Ubicación de los perfiles de georradar en el subsuelo de la Cripta del Monasterio de San Miguel de los Reyes, b- Localización de los perfiles sobre el Mausoleo de la reina Germana de Foix, en el interior de la Cripta.	170
Figura 5.92. Radargrama del perfil D1 tomado en la solera de la cripta, donde se observa la existencia de una zona de posibles enterramientos en el subsuelo (Tumbas A, B, C y D).	171
Figura 5.93. Radargrama del perfil RG4, perteneciente al Mausoleo de la Reina Germana de Foix, donde se observa la existencia de una zona anómala: vacío u oquedad.	172
Figura 5.94. Radargrama del perfil DC4, perteneciente al Mausoleo del Duque de Calabria, donde se distingue una zona anómala: vacío u oquedad.	173
Figura 5.95. Radargrama del perfil A1 realizado en la parte superior del altar de la cripta, donde se identifica la presencia de una zona destinada a un relicario o a una urna.	173

Figura 5.96. a- Interpretación del perfil D1. b- Modelización de los niveles (pavimento, relleno 1, relleno 2 y terreno natural) y estructuras detectadas (Tumbas A, B, C y D) en el perfil D1. _____	174
Figura 5.97. a- Interpretación del perfil RG4. b- Modelización de la anomalía detectada (vacío) en el perfil RG4. _____	175
Figura 5.98. a- Interpretación del perfil A1. b- Modelización de la estructura detectada (relicario) en el perfil A1. _____	176
Figura 5.99. a- Modelo tridimensional de los datos de georradar obtenidos en el subsuelo de la Cripta del Monasterio de San Miguel de los Reyes, donde se distingue los niveles del subsuelo y la reflexión de los enterramientos en el subsuelo. b- Modelo tridimensional filtrado, donde se muestra de forma aislada las tumbas detectadas en el subsuelo. _____	177
Figura 5.100. Modelización tridimensional de las tumbas detectadas en el subsuelo de la Cripta del Monasterio de San Miguel de los Reyes. _____	178
Figura 5.101. Plano contrapicado de la modelización tridimensional del subsuelo de la Cripta del Monasterio de San Miguel de los Reyes, donde se observa las tumbas detectadas. _____	178
Figura 5.102. Imágenes de la Iglesia Arciprestal de Santiago de Villena: a- Fachada principal, b- Interior de la iglesia. _____	179
Figura 5.103. Ubicación de los perfiles de georradar en la zona estudiada de la Iglesia Arciprestal de Santiago de Villena. _____	181
Figura 5.104. Fragmento del radargrama del perfil P1, tomado en la nave principal de la iglesia, donde se distingue los tres niveles que componen el subsuelo y las humedades. _____	182
Figura 5.105. Fragmento del radargrama del perfil P95, perteneciente al área del Altar mayor. _____	183
Figura 5.106. Fragmento del radargrama del perfil P3, tomado en la nave principal de la iglesia, próximo a una de las naves laterales. _____	183

Figura 5.107. Fragmento del radargrama del perfil P10, realizado sobre una de las naves laterales de la iglesia. En el radargrama se observa la patología de humedades presente en el subsuelo de la iglesia. _____	184
Figura 5.108. a- Interpretación del perfil P1. b- Modelización de niveles y patología en el perfil P1. _____	184
Figura 5.109. a- Interpretación del perfil P3. b- Modelización de los niveles y las estructuras detectadas (zona removida y estructuras lineales) en el perfil P3. _____	185
Figura 5.110. a- Interpretación del perfil P95. b- Modelización de los niveles y las estructuras detectadas (criptas) bajo el Altar mayor en el perfil P95. _____	186
Figura 5.111. Secciones horizontales del subsuelo a partir del modelo 3D de georradar a distintas profundidades: 0,50 m. (a), 3,50 m. (b), 5,50 m. (c), 7,50 m. (d). En la figura se observa la localización y extensión de la patología de humedades en el subsuelo de la nave principal de la iglesia. _____	187
Figura 5.112. Situación en planta de las estructuras enterradas en el subsuelo de la Iglesia Arciprestal de Santiago de Villena resultante de la interpretación de los datos 3D. _____	187
Figura 5.113. Modelización tridimensional de la patología y estructuras detectadas en el subsuelo de la Iglesia Arciprestal de Santiago de Villena. _____	188
Figura 5.114. Plano contrapicado de la modelización tridimensional del subsuelo de la Iglesia Arciprestal de Santiago de Villena, donde se observa las estructuras identificadas en el subsuelo, así como los niveles en los cuales se identifica la patología de humedades. _____	188
Figura 6.1. Ejemplo de ficha de catalogación de niveles culturales/geológicos en el subsuelo de edificios históricos religiosos. _____	193
Figura 6.2. Ejemplo de ficha de catalogación de pavimentos en el subsuelo de edificios históricos religiosos. _____	194
Figura 6.3. Ejemplo de ficha de catalogación de criptas en el subsuelo de edificios históricos religiosos. _____	195

Figura 6.4. Ejemplo de ficha de catalogación de estructuras abovedadas en el subsuelo de edificios históricos religiosos. _____	196
Figura 6.5. Ejemplo de ficha de catalogación de tumbas en el subsuelo de edificios históricos religiosos. _____	197
Figura 6.6. Ejemplo de ficha de catalogación de estructuras lineales (restos murarios) en el subsuelo de edificios históricos religiosos. _____	198
Figura 6.7. Ejemplo de ficha de catalogación de cimentaciones en el subsuelo de edificios históricos religiosos. _____	199
Figura 6.8. Ejemplo de ficha de catalogación de instalaciones en el subsuelo de edificios históricos religiosos. _____	200
Figura 6.9. Ejemplo de ficha de catalogación de otras estructuras (Gradas del Circo Romano) en el subsuelo de edificios históricos religiosos. _____	201
Figura 6.10. Ejemplo de ficha de catalogación de otras estructuras (Hornos árabes) en el subsuelo de edificios históricos religiosos. _____	202
Figura 6.11. Ejemplo de ficha de catalogación de otras estructuras (<i>bufador</i>) en el subsuelo de edificios históricos religiosos. _____	202
Figura 6.12. Ejemplo de ficha de catalogación de lesiones, humedades en este caso, en el subsuelo de edificios históricos religiosos. _____	203
Figura 6.13. Ejemplo de ficha de catalogación de zonas removidas, un tipo de lesión en la categoría de zonas anómalas, en el subsuelo de edificios históricos religiosos. _____	204
Figura 6.14. Ejemplo de ficha de catalogación de vacíos, un tipo de lesión en la categoría de zonas anómalas, en el subsuelo de edificios históricos religiosos. _____	205
Figura 6.15. Ficha (tipo A) de catalogación de elementos del subsuelo para futuras intervenciones de restauración de edificios históricos de carácter religioso: Datos generales. _____	207

Figura 6.16. Ficha (tipo B) de catalogación de niveles, estructuras y lesiones del subsuelo para futuras intervenciones de restauración de edificios históricos de carácter religioso: Detalles. _____ 208

1 INTRODUCCIÓN

Las técnicas geofísicas se han empleado históricamente para la investigación de las geoesferas o estructuras internas de la Tierra, donde las profundidades y dimensiones superan la resolución vertical de dichos métodos. No obstante, en el caso de estudios de zonas superficiales del subsuelo o de estructuras de reducidas dimensiones relacionadas con la actividad antrópica, se requiere una mayor resolución vertical de los métodos de prospección geofísica. En estas situaciones, la heterogeneidad y los fenómenos de atenuación de dichos medios dificultan los estudios, especialmente en los primeros metros. El georradar es un método no destructivo, que se emplea con éxito para realizar estudios de alta resolución.

El georradar es un método de prospección geofísica basado en el principio de emisión y reflexión de ondas electromagnéticas de alta frecuencia que se propagan en un medio a una determinada velocidad. Dicha velocidad depende, fundamentalmente, de las características del medio: la conductividad eléctrica, la constante dieléctrica y la

permeabilidad magnética. La fundamentación teórica del georradar es la misma que la empleada en la detección de aviones. Los registros obtenidos con esta técnica son similares a aquéllos adquiridos en estudios de sismica de reflexión; sin embargo, en el caso del radar del subsuelo, se emplea un ancho de banda más amplio, las antenas emisora y receptora se dirigen hacia el medio a explorar y la emisión de pulsos se puede efectuar de forma rápida. La similitud con la sismica de reflexión va más allá de la adquisición de datos. Varios procesos de filtrado empleados en georradar están basados en otros propios del ámbito de la sismica de reflexión, como la ganancia o la migración (Annan, 2002). El georradar funciona con un amplio registro de frecuencias (desde 10 Hz hasta 8 GHz). 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 (Conyers y Goodman, 1997; Bristow y Jol, 2003).

El equipo de georradar se compone de un sistema de control (computadora) conectado a unas antenas –emisora y receptora- que se desplazan sobre la superficie del medio a analizar. El trabajo de campo con georradar es sencillo y los datos se obtienen muy rápidamente. Las prospecciones mediante dicha técnica se llevan a cabo desplazando las antenas del georradar manualmente o en vehículos. La posición de cada señal puede ser indicada mediante el empleo de un odómetro o por impulsos emitidos manualmente (Conyers y Goodman, 1997). En las mediciones con georradar, la antena emisora genera una onda electromagnética con una determinada frecuencia. Dicha onda se propaga por el medio y al alcanzar un objeto o área con propiedades eléctricas diferentes a las circundantes, esto es, cuando se producen discontinuidades, parte de la energía electromagnética se refleja y es recibida por la antena receptora –registrándose para su posterior procesado e interpretación- y el resto de la energía continúa propagándose.

Durante los últimos treinta años, el georradar se ha empleado en investigaciones superficiales de alta resolución del subsuelo u otros medios en diferentes campos de estudio. Esta técnica consiste en obtener secciones verticales casi continuas (denominadas registros radar o radargramas) del medio, que presentan gran similitud con las secciones sísmicas, cuando se trata de GPR (Ground Penetrating Radar); y registros de eco-profundidades y amplitudes de onda en puntos determinados, si se trata de radio eco-sondeos RES (Radio Echo-Sounding). Asimismo, la variante GPIR (Ground Penetrating Imaging Radar) permite obtener una elevada densidad de datos, de manera que se pueden generar imágenes tridimensionales del medio analizado.

A pesar de que el georradar obtiene registros puntuales (trazas), los radargramas podrían considerarse como registros continuos. Dichos radargramas proporcionan información diversa, pero fundamentalmente se analiza el tiempo de llegada. El estudio del medio analizado para determinar la situación horizontal y la profundidad a la que se localizan las discontinuidades en el mismo, se basa en determinar las velocidades de propagación y los tiempos de propagación registrados. No obstante, la profundidad máxima alcanzada durante el estudio con georradar, depende de las condiciones del medio, así como del equipo empleado. En los casos presentados en este trabajo de investigación, no se superan los 10 m. de profundidad, pues se trata, en todos los casos, de estudios superficiales del medio.

El creciente número de aplicaciones del georradar en diferentes ámbitos se debe a una serie de circunstancias que permiten emplear el georradar en estudios superficiales altamente resolutivos. Así pues, el georradar se ha aplicado 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, en la detección de armaduras en muros de hormigón, en la localización o cartografiado de tuberías, en 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,...).

La sencilla y rápida adquisición de datos en campo, la alta resolución y el carácter no destructivo propios del georradar, lo convierten en una técnica útil y eficaz 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.

Este trabajo de investigación muestra la aplicación de las prospecciones geofísicas con georradar en el ámbito del patrimonio histórico-artístico, a través del estudio de casos prácticos en edificios históricos de carácter religioso localizados en áreas urbanas. Los estudios por georradar en construcciones religiosas, se pueden dividir en dos vertientes. Por una parte, se orientan al análisis de elementos constructivos. Esta vertiente consiste en el estudio de muros, columnas, pilares, suelos, techos, forjados, bóvedas, cúpulas o cubiertas para detectar y localizar la presencia de algún tipo de lesión o patología (humedad, falta de adherencia entre materiales, fisuras, grietas, etc.) o bien para diferenciar distintas fases constructivas. La alta precisión y resolución requeridas en estas investigaciones obliga a emplear antenas de alta frecuencia (Pérez et al., 1996). En esta línea, el empleo del georradar puede ser útil para la realización de controles de calidad de las intervenciones de restauración que se hayan llevado a cabo en este tipo de edificaciones (Pérez, 2001).

Por otro lado, se puede aplicar para el análisis del subsuelo, como por ejemplo para la búsqueda de niveles culturales o elementos enterrados debajo de edificios históricos religiosos. La detección y localización de restos arquitectónicos o estratos culturales subyacentes a un edificio religioso puede ser de suma importancia para analizar las lesiones presentes en el mismo, causadas por problemas de asentamiento diferencial. En este caso, es muy probable que aparezcan fisuras en muros, bóvedas, cúpulas y techos, pudiendo afectar a la conservación de frescos y elementos ornamentales (Ramírez-Blanco et al., 2008). El empleo del georradar en estos casos de aplicación arqueológica permite comprobar, también, las zonas en las que existe mayor concentración de anomalías, así como confirmar la presencia de elementos subterráneos sin realizar actuaciones invasivas. Un estudio habitual de esta vertiente consiste en confirmar la información de documentos históricos que tratan sobre la localización de antiguas criptas, tumbas y osarios (Pérez-Gracia et al., 1996; Pérez-Gracia et al., 2000, García et al., 2007).

Los edificios religiosos suelen estar afectados por problemas de humedad. Dicha humedad puede tener como origen causas naturales (agua de lluvia o humedad ambiente, o bien humedad del subsuelo) o causas artificiales (fugas de agua, construcciones posteriores que ayuden a la acumulación de agua, etc.). En el caso de problemas de humedad en el subsuelo de edificios religiosos, éstos pueden afectar a otros elementos constructivos del edificio. El georradar puede ofrecer información acerca de la extensión de la zona dañada y, en determinadas ocasiones, puede facilitar las causas de la lesión (García et al., 2004).

En esta memoria, se incluye una recopilación y clasificación de señales obtenidas con georradar que permite acceder fácilmente a la información y a la interpretación de los registros obtenidos mediante esta técnica en la aplicación de los casos prácticos especificados. La presente tesis proporciona una metodología para la detección y localización de elementos del subsuelo propios del patrimonio histórico y religioso, que manifiestan la heterogeneidad presente en la geología

más superficial de las zonas urbanas. La clasificación y modelización de las estructuras del subsuelo permite definir pautas para la interpretación de los datos geofísicos, así como para la intervención arquitectónica –de conservación y restauración- en edificios patrimoniales.

1.1. BREVE HISTORIA DEL GEORRADAR

Los primeros estudios empleando ondas electromagnéticas fueron llevados a cabo entre 1910 y 1911 en los campos de la geología y la minería en Alemania, por Levi y Leimbach (Kozlovsky et al., 1989; Finkelshtein et al., 1986). Durante el pasado siglo, la ciencia de las ondas de radio se ha desarrollado especialmente para las telecomunicaciones; mientras que los primeros equipos de registro de datos con ondas electromagnéticas fueron realizados en Alemania, hacia 1920. Las primeras investigaciones con ondas electromagnéticas realizadas en la antigua Unión Soviética datan de 1923 - 1928, bajo la dirección de Petrovsky –perteneciente al Instituto de Geofísica Aplicada de Moscú-, quien realizó una serie de experimentos de penetración de ondas de radio en zonas de sal, con el fin de determinar las áreas de sombra correspondientes a conductividades altas y bajas (Yakubovsky, 1973).

Durante la Segunda Guerra Mundial, el Reino Unido realizó operaciones de reconocimiento general para servicios militares con la intención de emitir y recibir ondas en largas distancias (Brown, 1999; Morris, 1962). En estas primeras aplicaciones, las frecuencias aplicadas eran bajas –considerando las frecuencias medias empleadas actualmente- y el medio de propagación era el aire; sin embargo, más tarde, la necesidad de explorar y visualizar el subsuelo derivó en la emisión de ondas electromagnéticas a través de la superficie de la Tierra.

A principios de la década de los cincuenta, Wait llevó a cabo destacadas investigaciones en el ámbito de los métodos

electromagnéticos y, a nivel teórico, argumentó diferentes casos de propagación de ondas electromagnéticas en medios estratificados (Wait, 1951, 1952, 1953, 1957, 1958, 1959, 1960 y 1962). Paralelamente, a mediados de los años cincuenta, Tarjov (1965) junto con sus colaboradores elaboraron un método fundado en la dependencia entre la intensidad del campo electromagnético y la estructura geológica de un área específica. Sobre el tema de propagación de ondas en medios estratificados, cabe citar como monografía fundamental la de Brejovsky (1973). En esta misma década, se empezaron a desarrollar las primeras imágenes relacionadas con la detección del nivel freático, empleando la superposición de la onda propagada por el aire con las ondas reflejadas por el nivel freático (Said, 1956).

Algunos de los primeros informes sobre la representación del subsuelo se desarrollaron en Groenlandia (Waite y Schmidt, 1961), donde un avión fue empleado para inspeccionar niveles geológicos y se llevaron a cabo trabajos de representación sobre la capa de hielo. Tres años más tarde, el radar se aplicó en investigaciones de glaciología en el medio polar (Walford, 1964).

Continuando con la transmisión por aire y hielo, ya en la década de los setenta, las aplicaciones del radar se multiplicaron. Los depósitos de sal y las minas de carbón fueron objeto de estudio, puesto que los materiales presentes en estas localizaciones crearon un visible contraste con el medio circundante, de acuerdo con la respuesta dada por las ondas electromagnéticas (Holser et al., 1972; Cook, 1973).

A partir de los años cincuenta, se inició la introducción de los métodos previamente descritos en el ámbito de la Ingeniería con fines de producción o investigación, principalmente geológica y minera. Esta dilación tuvo como causa las dificultades técnicas y la necesidad de solucionar cuestiones referentes a compatibilidad electromagnética. Asimismo, en el caso de la Ingeniería, los medios de propagación que habitualmente se analizan presentan unas características de atenuación elevadas. Por esta razón, las escalas de ondas en decímetros o centímetros resultaban inapropiadas y parecía necesario aplicar una

escala de metros y decámetros, hecho que habría desmejorado notablemente la resolución vertical. Por tanto, se requería emplear impulsos de un periodo o mono-impulsos, es decir, radio-impulsos que incluyesen únicamente unos cuantos periodos o, incluso, uno pero de oscilaciones de alta frecuencia.

La forma de obtener este tipo de impulsos de forma efectiva en estudios de Glaciología fue expuesta en 1960 por Cook, quien propuso generarlos mediante una antena emisora en banda ancha por caída de potencial. Cabe señalar los trabajos realizados por Cherniak (1964), durante la década de los sesenta, sobre perfiles de geo-radar mediante el método de sintonización de antena.

Así, se favoreció el diseño de georradars de impulsos, pudiéndose considerar el georradar como un método similar al de prospección sísmica de reflexión, pero teniendo presente la dependencia existente entre la propagación de las ondas electromagnéticas y los factores y propiedades eléctricas del medio en el que se transmitan (Brekovskikh, 1960; Szareniec, 1979 y 1976; Lee et al., 1987; Ursin, 1983; Zhadanov, 1988; Fisher et al., 1992).

Durante las décadas de los sesenta y setenta, se enfocaron gran cantidad de esfuerzos en la mejora del equipo de emisión y recepción, pero principalmente en la mejora de la calidad de las imágenes, modificando la emisión, transmisión, directividad de la antena y la ganancia de transmisión. Los georradars de impulsos de corta duración –Ground Penetrating Radar (GPR) de acuerdo con la terminología anglosajona-, se empezaron a comercializar a principios de los años setenta, ofreciendo en un principio bandas de frecuencias superiores a 15 MHz. Dada la creciente importancia del georradar, la compañía *Geophysical Survey Systems* fue fundada por dos ingenieros en 1970.

En la década de los ochenta, otras compañías se adentraron en la creación y desarrollo de radares, consolidando el *pulseEKKO*. Paralelamente, el *Swedish Geological Survey* mejoró la metodología de adquisición de datos, creando el georradar de perforación para analizar

la evacuación de residuos nucleares (Olsson et al., 1987). La mayoría de los georradars fabricados y utilizados en los años ochenta emitían impulsos electromagnéticos de corta duración (de 1 ns a 10 ns) al subsuelo en el rango de frecuencias muy altas VHF hasta ultra-altas UHF (entre 35 MHz y 1 GHz), consiguiéndose mejores resoluciones y registros prácticamente continuos del medio (Ulriksen, 1982). En esa misma década, el radar ya se había empleado como herramienta de prospección de carreteras (Ulriksen, 1982) y túneles en servicios militares (Owen, 1981).

Todo ello ha dado lugar a que las aplicaciones del georradar se vayan extendiendo paulatinamente hacia nuevos campos, cuyos objetivos más relevantes son: la localización de objetos, formaciones o substratos, tanto en el subsuelo, como en elementos constructivos; la determinación de sus coordenadas, geometría y parámetros de movimiento; así como, la obtención de información sobre su estructura, estado interno, propiedades físicas y patología.

En las últimas décadas, el método de propagación de ondas de radio se ha asentado en el campo de la prospección geofísica electromagnética de frecuencias altas como una nueva línea de investigación en Ingeniería y Glaciología. Este método de prospección se caracteriza por su alta capacidad de resolución vertical (Davis y Annan, 1989), convirtiéndose en una técnica muy útil para estudios sobre las capas más superficiales del subsuelo y de determinados medios, como pueden ser elementos de construcción. El empleo del georradar resulta más efectivo en medios conformados por capas homogéneas, puesto que presentan una atenuación baja de las ondas y sus espesores superan la resolución vertical. Claros ejemplos son los casquetes glaciares de la Antártida y Groenlandia.

La aplicación del georradar en ingeniería civil se inició a principios de la década de los ochenta; de ahí que, en 1986, se celebrase el primer congreso internacional específicamente sobre aplicaciones de georradar en Estados Unidos. Desde entonces, las aplicaciones del georradar se han extendido más allá de los temas geológicos y mineros, abarcando

otros ámbitos como por ejemplo Ingeniería Civil, Geotecnia, Ingeniería Aplicada al Medio Ambiente y Arqueología, e incluso en otras áreas como una técnica de investigación policial en crímenes (Davenport et al., 1988).

El mayor desarrollo de la investigación y la industria del georradar tuvo lugar a partir de 1990. En estas fechas, se profundizó el desarrollo del método de georradar, especialmente en sistemas digitales de registro, diseño de antenas de frecuencias de GHz y tratamiento de señales, con el fin de elaborar representaciones tridimensionales. Esta variante se denomina *Ground Penetrating Imaging Radar* (GPIR) (van Deen y de Feitjer, 1992; Warhus et al., 1993; Johansson y Mast, 1994).

Desde entonces, numerosas aplicaciones se han desarrollado, por ejemplo, en el ámbito de la ingeniería civil. Los primeros trabajos de adquisición de datos múltiples empezaron con Fisher et al. (1992); mientras que las simulaciones numéricas en dos dimensiones fueron iniciadas por Zeng et al. (1995). Goodman (1994) incluyó la arqueología como un campo de investigación más donde emplear el radar, y dos años más tarde, Redman et al. (1996) lo aplicaron a estudios medioambientales. La modelización con el método de las diferencias finitas de elementos tridimensionales fue diseñada a partir de los ordenadores ideados por Bergmann et al. (1998) y Lampe y Holliger (2000).

En la última década, desde el año 2000 al 2010, las aplicaciones del georradar han aumentado considerablemente, así como la calidad de los equipos y el software empleado para el procesado de datos.

Las primeras publicaciones referentes a aplicaciones de georradar en Ingeniería, fundamentalmente geológica y minera, aparecen a partir de principios de la década de los setenta (Anann y Davis, 1976; Balanis et al., 1976; Bogorodsky y Trepov, 1979; Cook, 1974, 1975; Dolphin et al., 1974; Emslie y Lagace, 1976; Finkelshtein et al., 1974, 1979; Glushnev et al., 1976; Jones, 1987; Lytle et al., 1976; Unterberger, 1974, 1978). En España, las primeras publicaciones sobre el georradar datan de principios de los años noventa, tanto en ámbito nacional

(Lorenzo et al., 1991; Canas et al., 1996a, 1996b, 1996d; García et al., 1996a, 1996b) como internacional (Casas et al., 1992; Lorenzo et al., 1991; Canas et al., 1996c). Lorenzo (1994) elaboró la primera tesis doctoral en España, exclusivamente a partir de investigaciones mediante georradar relacionadas con cuestiones geotécnicas y arqueológicas. Esta tesis se convertiría en punto de referencia para investigaciones posteriores realizadas en nuestro país.

El desarrollo del georradar y sus nuevas aplicaciones y tendencias han sido descritas y resumidas por diversos autores. En 1996, Daniels (1996) publicó uno de los primeros libros sobre georradar, enfocado a la investigación criminal y la teledetección, así como a detecciones en arqueología, ingeniería y minas terrestres. El libro proporciona información para iniciarse en el manejo del georradar en términos de usuario básico. Conyers (1997) aclara conceptos relacionados con la teoría física sobre la propagación de ondas, la frecuencia central en función de la resolución, definiendo los modos de adquisición de datos: compensación y punto medio comunes e incluyendo el concepto de muestreo como uno de los numerosos temas tratados en el libro. La interpretación con diagramas y casos de estudio relacionados con la arqueología constituye una gran introducción para científicos no relacionados con la Física. Conyers ha elaborado nuevos libros y revistas en base al citado libro publicado en 1997 (Conyers, 2004, 2012). En 2002, Annan (2002) llevó a cabo una evaluación describiendo la evolución del georradar desde sus orígenes hasta el año 2000. Esta revisión conecta la evolución del georradar con la mejora de los equipos, dada la necesidad de explorar diferentes campos de estudio debido a las diversas aplicaciones de esta técnica. El libro publicado en 2008 sobre teoría del georradar y sus aplicaciones (Jol, 2008), se centró en la teoría de las antenas y la propagación de onda, incluyendo aplicaciones como el estudio de casos, artículos, libros o revistas llevados a cabo por distintos autores. Dicha recopilación permitió conocer el estado del arte en 2009, así como las limitaciones y las ventajas de este método. El compendio expone también métodos comparativos para complementar la interpretación de los radargramas.

La revisión más reciente sobre temas relacionados con georradar fue publicado en Roma en 2013 (Cost action TU1208, 2013).

Los congresos o reuniones internacionales específicamente sobre georradar –independientes de otros métodos electromagnéticos- han adquirido la suficiente entidad y valía en los últimos años, pudiendo ser consideradas como sesiones propias gracias al gran volumen de aportaciones y comunicaciones presentadas. Cabe destacar las convenciones celebradas por la *European Geophysical Society* (EGS) o la *European Geosciences Union* (EGU). Existe, incluso, un congreso dedicado exclusivamente al georradar, denominado *International Conference on Ground Penetrating Radar* (GPR).

1.2. JUSTIFICACIÓN DEL ESTUDIO

1.2.1. Antecedentes

El patrimonio cultural es reconocido en la Unión Europea (UE) como parte fundamental de sus políticas. El artículo 167.2 del *Tratado de Funcionamiento* de la UE, establece que la UE favorecerá la cooperación entre estados miembros y completará la acción de éstos en conservación y protección del patrimonio cultural de importancia europea. Las primeras medidas tomadas por la UE sobre materia de protección del patrimonio arquitectónico y cultural de Europa datan del año 1974. Es entonces cuando la UE asume el papel de salvaguarda del patrimonio cultural.

Pronto se reconoció la importancia del patrimonio cultural europeo como factor clave para el desarrollo de Europa y se puso de manifiesto las implicaciones directas en temas medioambientales, sociales y económicos. El patrimonio europeo es uno de los más ricos y variados del mundo, pero se halla expuesto a amenazas por el propio uso, disfrute y explotación, así como por los cambios climáticos. Es por este motivo, por el que se reconoce el papel importante de la investigación y el conocimiento para la puesta en valor y salvaguarda de dicho patrimonio.

La UE ha financiado varios proyectos de investigación en conservación del patrimonio cultural en los distintos Programas Marco (*Framework Programme*):

- FP1-FP4 (1984-87). Se enfocó hacia el efecto del medio ambiente en patrimonio inmueble y posteriormente hacia el mueble, aunque en menor medida. Se favorecía la coordinación y colaboración entre grupos de distintos países. Se implicaron varias instituciones y empresas.
- FP5 (1999-2002). Supuso el punto álgido en la financiación europea. Se reconoció de manera explícita el patrimonio cultural y se le relacionó directamente con el desarrollo urbano, la construcción y la sostenibilidad de la gestión de las ciudades. Se dedicaron 40 millones de euros y se financiaron 29 proyectos de investigación. Las temáticas principales iban dirigidas hacia la evaluación del daño del patrimonio cultural, el desarrollo de estrategias innovadoras de conservación y la mejor integración del patrimonio en el entorno urbano. Hay que sumar 10 millones de euros en proyectos de cooperación internacional, fundamentalmente con países del Mediterráneo.
- FP6 (2002-2006). En este periodo, la financiación decreció a tan solo 10 millones de euros. Sin embargo, las propuestas no fallaron, asignándose un proyecto por cada nueve propuestas presentadas. Los proyectos estuvieron relacionados con el impacto del cambio climático y la contaminación ambiental sobre el patrimonio cultural. También hubo proyectos de cooperación internacional con países del Mediterráneo.
- FP7 (2007-2013). Uno de los proyectos más significativos desarrollados es el *NET-HERITAGE*, que consiste en formar una red europea sobre el programa de investigación aplicada a la protección del patrimonio cultural tangible. Es una asociación de ministerios,

organismos de financiación y autoridades de 14 países europeos, para superar las barreras de intercambio de información sobre la actividad de investigación de la UE aplicado a la protección del patrimonio cultural. Se pretendía que este proyecto tuviese impacto significativo en las políticas científicas. Se invirtió cerca de 100 millones de euros.

- FP8 (2014-2020), *Horizon 2020 and Cultural Heritage*. El programa contempla desde la conservación y digitalización hasta la infraestructura, investigación y capacidades. En definitiva, abarca desde la generación del conocimiento hasta su implementación en el mercado. Este programa pretende impulsar la investigación básica reforzando la excelencia científica, la innovación y la competitividad para ofrecer importantes oportunidades de negocio y mejorar la vida de los ciudadanos. El objetivo preliminar que tiene España en materia de Ciencia Excelente es reforzar y ampliar la excelencia de la base científica de la UE, consolidar el Espacio Europeo de Investigación y conseguir un sistema de investigación e innovación más competitivo a escala mundial. Plantea la necesidad de involucrar, con mayor intensidad, a las iniciativas privadas en la explotación del patrimonio cultural, de modo que pueda optimizar su uso dentro de sus propios modelos de negocio. Asimismo, pretende reforzar el papel del patrimonio como parte del capital socio-económico, cultural y natural de Europa, que contribuirá al crecimiento, la creación de empleo y el refuerzo de la cohesión y la participación. Sería interesante establecer una comparativa entre la participación española en los proyectos de investigación sobre patrimonio cultural y su conservación desarrollados en la UE, y la de otros países europeos. Asimismo, se podría estudiar la

participación y coordinación de proyectos de patrimonio por parte de España. Cabe resaltar que los países más significativos por su I+D europeo son: Alemania, Francia y Reino Unido. Sin embargo, los países con más importancia social y económica del patrimonio cultural, en el ámbito europeo, son: Italia, Grecia y España.

De acuerdo con el Plan Nacional de Investigación en Patrimonio, se ha obtenido una serie de datos que aparecen representados en los siguientes gráficos. Analizando la proporción de participación (Gráfico 1.1) y coordinación (Gráfico 1.2) en proyectos de patrimonio cultural y en proyectos de conservación del patrimonio cultural, sobre el total de proyectos de la UE, se observa:

En el caso de Italia, en el que el patrimonio cultural tiene una gran importancia, ésta participa en un 27% del total de proyectos de la UE, de los cuales sólo coordina un 10%. Sin embargo, cuando se trata de proyectos relacionados con el patrimonio, el porcentaje alcanza un 48% en participación y un 18% en coordinación. En los casos de proyectos relacionados con la conservación del patrimonio, el porcentaje también aumenta hasta un 50% en participación y un 25% en coordinación.

En el caso de España, ésta participa en un 21% del total de proyectos de la UE, de los cuales sólo coordina un 6%. En proyectos relacionados con el patrimonio y su conservación, participa en un 28% y 29%, y coordina un 5% y un 6%, respectivamente. No obstante, en este punto se produce una paralización, alcanzando niveles similares a los de Grecia. Cabe señalar que países como Reino Unido o Alemania, con un patrimonio cultural notablemente inferior al de España, participan y coordinan un mayor número de proyectos que España.

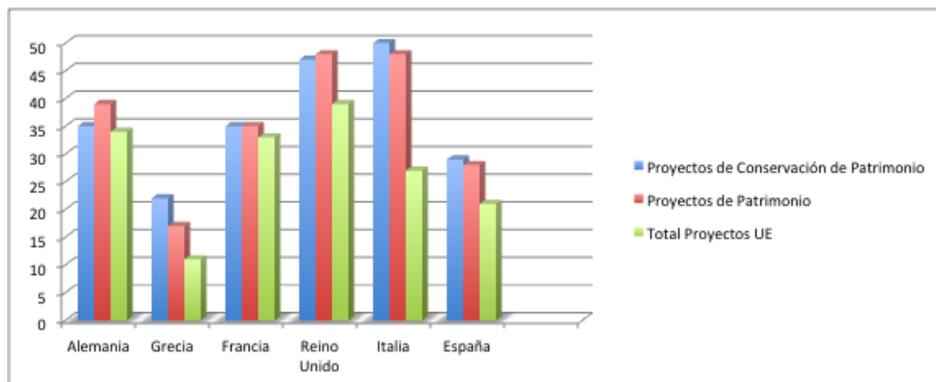


Gráfico 1.1. Proporción de participación en proyectos de patrimonio cultural sobre el total de proyectos de la UE (Fuente: Plan Nacional de Investigación en Patrimonio).

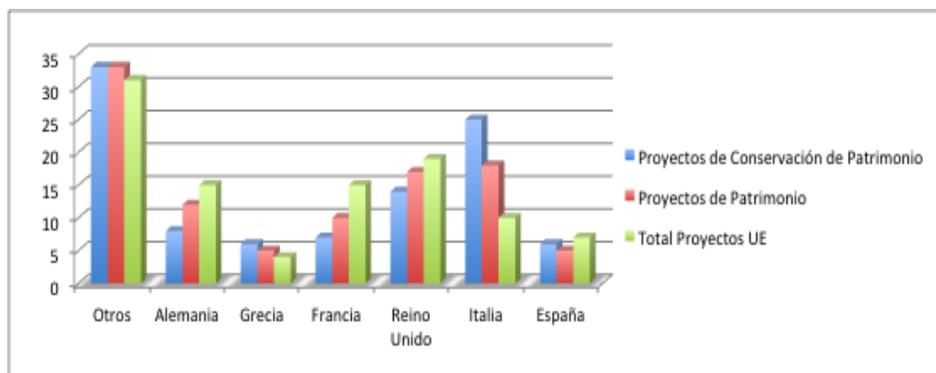


Gráfico 1.2. Proporción de coordinación en proyectos de patrimonio cultural sobre el total de proyectos de la UE (Fuente: Plan Nacional de Investigación en Patrimonio).

Analizando el porcentaje de proyectos de patrimonio cultural y su conservación, dentro del total de proyectos en los que participa (Gráfico 1.3) y coordina (Gráfico 1.4) cada país, se observa:

En el ámbito de la participación, España está por delante de países con un patrimonio cultural menos significativo (Reino Unido, Alemania y Francia) pero por detrás de Grecia y, sobre todo, de Italia. En cuanto a la coordinación, España está situada por debajo de Grecia y está, incluso, en niveles inferiores que la media de la UE.

Existen diferencias importantes entre la coordinación de un proyecto y la simple participación. Por un lado, el coordinador es el agente que suele llevarse el mayor montante económico, lo que supone un retorno económico mayor que el que conlleva una simple participación en un proyecto de dichas características. Y por otro, es un claro indicador del liderazgo científico-técnico en un determinado campo de investigación.

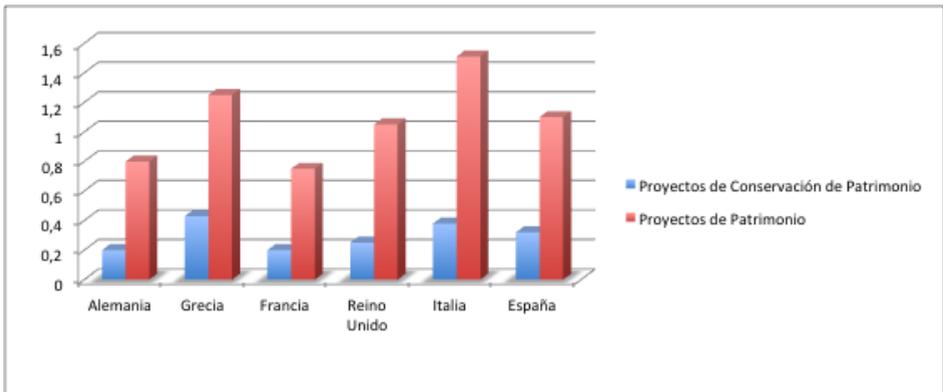


Gráfico 1.3. Proporción de participación por país, en proyectos de patrimonio cultural sobre el total de proyectos. (Fuente: Plan Nacional de Investigación en Patrimonio).

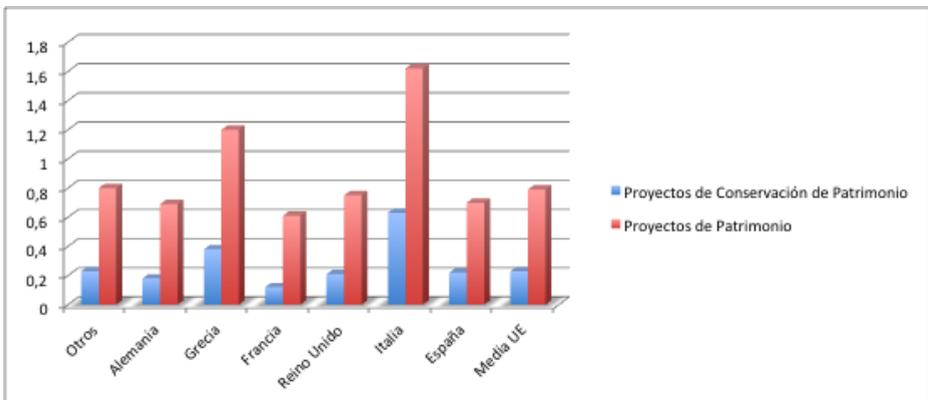


Gráfico 1.4. Proporción de coordinación en proyectos de patrimonio cultural sobre el total de proyectos por país (Fuente: Plan Nacional de Investigación en Patrimonio).

En el caso de España, el porcentaje de coordinación es menor que otros países (excepto Grecia e Italia) en el total de proyectos, incluso por debajo de la media europea, cuando lo propio sería que presentase un mayor liderazgo, imitando a Italia, por el elevado porcentaje de patrimonio cultural presente en el país. Dicho aspecto puede tener su origen en problemas intrínsecos existentes en el sistema de I+D+i Español en su conjunto.

Como se ha indicado previamente, los porcentajes de coordinación de España en proyectos de patrimonio cultural y su conservación se sitúan por debajo de la media de la UE. Sin embargo, si se analiza otros temas estratégicos como el turismo y la energía solar (Gráfico 1.5), se observa cómo, especialmente en el ámbito de la energía solar, la coordinación española es sobresaliente sobre la media de la UE. Estos datos estadísticos hacen surgir cuestiones en referencia a esa gran diferencia observada en los distintos temas estratégicos, sobre todo considerando que el patrimonio cultural y su conservación constituyen uno de los principales recursos de España.

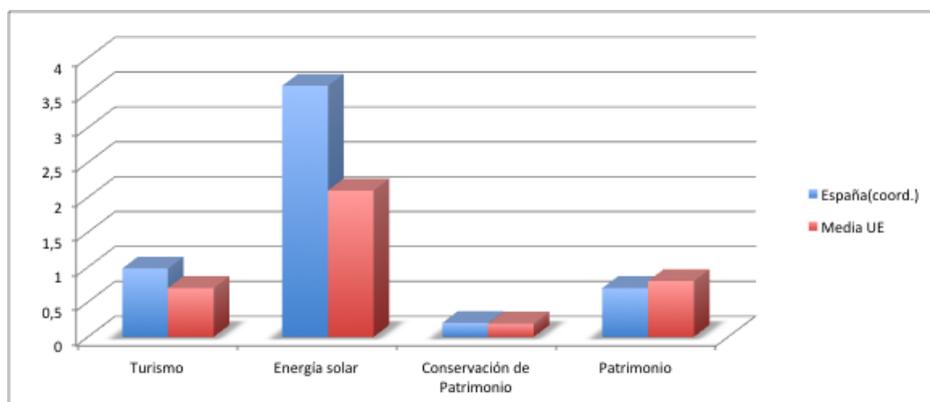


Gráfico 1.5. Proporción de coordinación de proyectos respecto al total europeo en algunos temas estratégicos para España. (Fuente: Plan Nacional de Investigación en Patrimonio).

España, junto con Italia y Grecia, es uno de los países que cuenta con una mayor riqueza patrimonial, pero a su vez, se caracteriza por una escasa capacidad de generación de recursos.

Las administraciones contemplan como proyectos sostenibles todo aquello relacionado con la conservación del patrimonio. No obstante, no se le tiene la consideración que requiere, a pesar de que constituye una forma de garantizar el acceso público y el conocimiento a los bienes culturales y, además, es un medio de impacto para el fortalecimiento de la economía del país.

El patrimonio cultural español es fuente de crecimiento económico, creación de riqueza y empleo, además de servir de estímulo para el turismo. Los estudios realizados sobre patrimonio y economía, son determinantes para conceder al patrimonio cultural la importancia en cuanto a motor de desarrollo en la sociedad, puesto que conllevan un elevado porcentaje de retorno de la inversión y beneficios para la economía local.

La estadística del año 2014 que publica el Ministerio de Educación, Cultura y Deporte (MECD), pone de manifiesto la importancia del sector cultural como motor de otros sectores de gran relevancia, como es el sector turístico. El 12,3% del total de viajes realizados en 2013 por ocio, recreo o vacaciones de los residentes en España fueron iniciados principalmente por motivos culturales. A estos 9,9 millones de viajes han de añadirse 7,4 millones de viajes realizados por turistas internacionales a España por motivos culturales. De ello se concluye que el 14% de los viajes realizados en España por ocio, recreo o vacaciones son por motivos culturales.

Siguiendo con esta edición del anuario, los resultados del ejercicio 2012 de la Estadística de Financiación y Gasto Público en Cultura (Gráfico 1.6) se repartió de la siguiente manera:

- Administración General del Estado: 772,4 mills. de euros.
- Administración Autonómica: 1.273,8 millones de euros.
- Administración Local: 2.725,9 millones de euros.

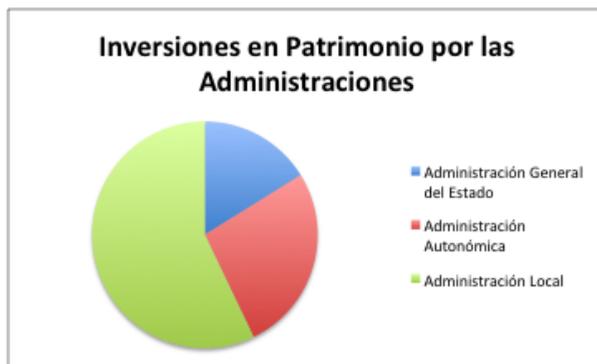


Gráfico 1.6. Inversiones en patrimonio cultural por parte de las Administraciones Públicas (Fuente: Estadística de Financiación y Gasto Público en Cultura. Ejercicio 2012).

Sin embargo, estas cifras supusieron un descenso interanual cifrado en el 19,3%, 14,1% y 19,8% respectivamente.

A continuación se representa (Gráfico 1.7) la distribución porcentual de inversión en patrimonio cultural por las diferentes Comunidades Autónomas. La mayor inversión se realiza en Andalucía, seguida de Cataluña. La Comunidad Valenciana se sitúa en un discreto quinto lugar.

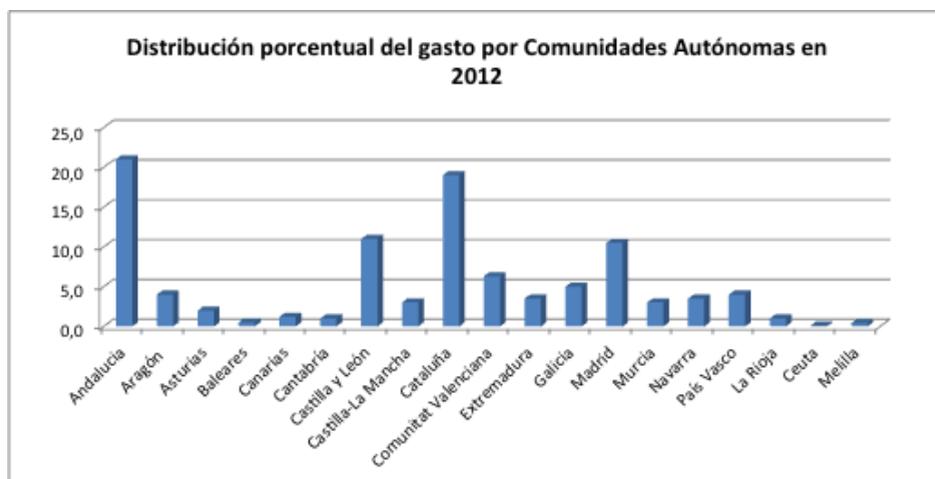


Gráfico 1.7. Distribución porcentual del gasto por Comunidades Autónomas en 2012 (Fuente: Datos del MECD).

La inversión de la Administración General del Estado en patrimonio cultural, en el transcurso de los años, ha mantenido unos niveles de inversión parecidos, aunque inferiores en comparación con las Administraciones Autonómicas. Las Administraciones Autonómicas fueron aumentando las inversiones hasta el 2008, para luego descender en el año 2012 a niveles parecidos al 2003. A continuación vemos el gráfico comparativo (Gráfico 1.8)

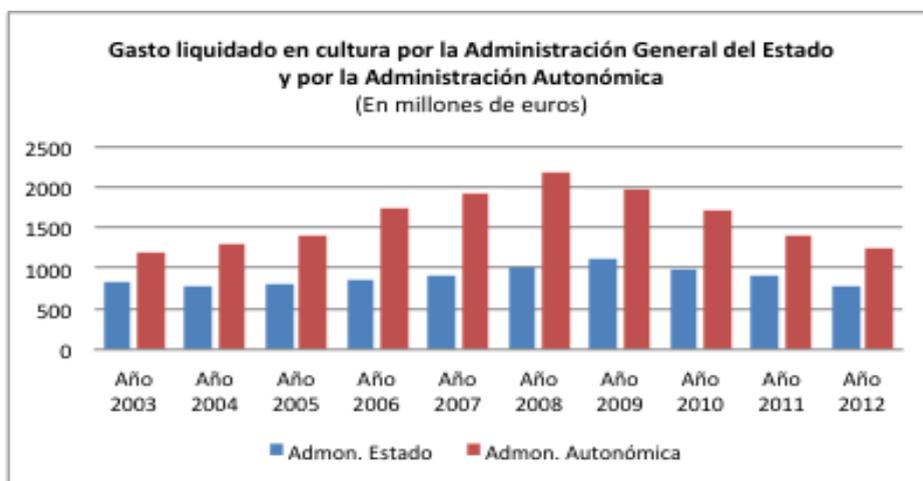


Gráfico 1.8. Gasto liquidado en cultura por la Administración General del Estado y por la Administración Autónoma (en millones de euros). (Fuente: Datos del MECD).

En este mismo ejercicio de 2012, el gasto liquidado en cultura, con destino al Patrimonio Histórico y Artístico, por las Administraciones Locales, fue de 2726 millones de euros. En el transcurso de los años, también se ha mantenido constante e incluso ascendió en el periodo del año 2007 al 2010 (Gráfico 1.9), para situarse en el 2012 a niveles del 2003.



Gráfico 1.9. Gasto liquidado en cultura por la Administración Local (en millones de euros). (Fuente: Datos del MECD).

La mayor inversión cultural en el territorio la realiza las administraciones locales (entendidas por Diputaciones y Ayuntamientos), por ser las más cercanas al ciudadano y las que se encuentran con una mayor posibilidad de contacto con el territorio.

La Diputación Provincial de Valencia ha venido coordinando y participando en la conservación de varios inmuebles históricos, ubicados en diversos municipios de la provincia de Valencia (Gráfico 1.10). Realiza inversiones entre 3 y 4 millones de euros anuales en las tres líneas de acción que impulsa cada ejercicio: ayudas económicas para la restauración del patrimonio mueble, bienes inmuebles y para inmuebles destinados a actividades musicales. Mantiene una línea constante de inversión desde hace quince años. Hay un número significativo de edificios singulares religiosos, principalmente iglesias.

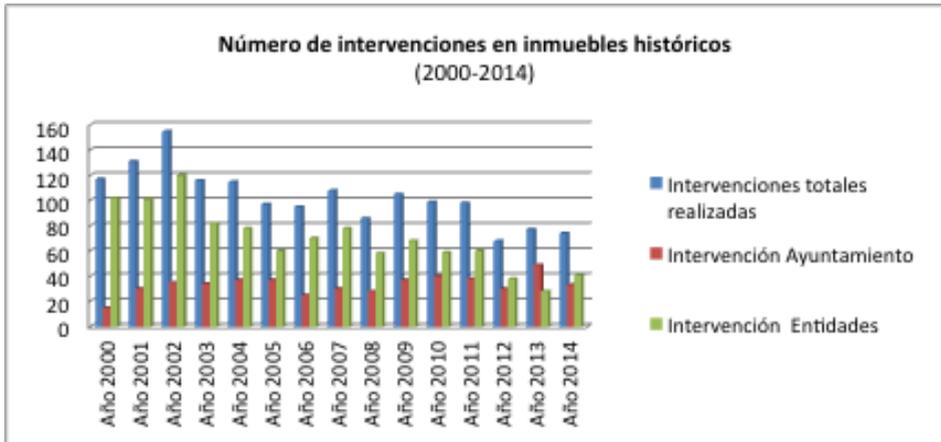


Gráfico 1.10. Número de intervenciones en inmuebles históricos en la provincia de Valencia, en el periodo comprendido entre el año 2000 y el año 2014. (Fuente: Diputación de Valencia).

Los bienes inmuebles españoles clasificados como Bienes de Interés Cultural (BIC) en el año 2013 alcanzan la cifra de 16.795. En el siguiente gráfico (Gráfico 1.11), observamos que las Islas Baleares es la Comunidad Autónoma que posee el mayor número de inmuebles (3052) y la Comunidad Valenciana (1208) estaría en quinto lugar.

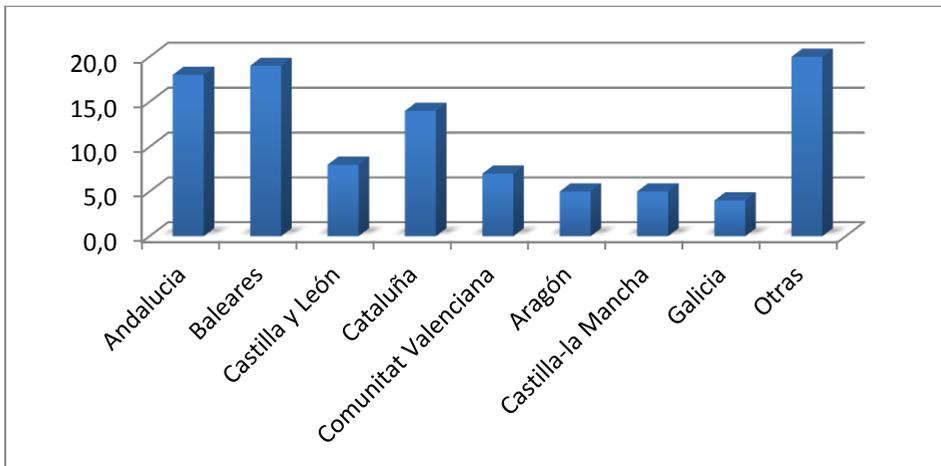


Gráfico 1.11. Distribución porcentual de bienes inmuebles por Comunidades Autónomas en 2013 (Fuente: Datos del MECD).

Según la plataforma EVoCH (*Economic Value of Cultural Heritage*) –que es un grupo de trabajo y ámbito de colaboración permanente en Europa en torno al valor económico del patrimonio cultural y de las actividades para su conocimiento, conservación, difusión y gestión-, cada euro invertido en patrimonio cultural genera diez euros de beneficio económico. (Datos AEERPA: *Association Européenne des Entreprises de Restauration du Patrimoine Architectural*).

La conservación y la restauración conllevan otras mejoras no contempladas, como son: la fabricación de productos, equipamientos, materiales, y otras relacionadas con la investigación, formación y divulgación. Hasta la fecha, todos estos aspectos no han sido incluidos en los estudios realizados sobre el impacto económico del patrimonio.

1.2.2. Importancia económica del patrimonio cultural

Como ya se ha indicado anteriormente, el patrimonio cultural constituye una fuente de riqueza y creación de empleo para varios sectores. Asimismo, genera multitud de actividades relacionadas con la protección, conservación, restauración y difusión del patrimonio, entre otras.

Según datos del Ministerio de Educación, Cultura y Deporte (MECD), la iniciativa del programa de “Visitas guiadas a bienes culturales en proceso de restauración”, puesto en marcha a través del Instituto de Patrimonio Cultural de España (IPCE) entre julio y octubre del 2014, ha incrementado la afluencia en un 21,92% respecto al mismo periodo del año anterior.

El impacto económico es de difícil evaluación. No obstante, existen numerosos estudios y análisis coste/beneficio en el ámbito del patrimonio cultural. Incluso pueden hallarse diferentes métodos de valoración contingente, los cuales consisten en asignar un valor al

patrimonio por parte de ciudadanos y turistas; en definitiva, la disposición a pagar por visitar el patrimonio.

Dada la condición de bien público, no renovable y de valor intangible, resulta difícil calcular el valor del bien cultural a precio de mercado. Tal vez, el mayor activo es el que concede a la ciudad que lo posee, otorgándole el nombre de ciudad o capital cultural. A partir de ahí, ésta se convierte en centro de atención turística.

La fuente de ingresos tiene diversas procedencias, pudiéndose resumir y clasificar las principales aportaciones por: mecenazgo, particulares de ciudadanos y de la propiedad del bien cultural con fines para restauración.

Algunos estudios económicos se centran en determinar, cuánto están dispuestos a pagar los ciudadanos o visitantes por el patrimonio cultural. Esto se convierte en parte de la puesta en valor de un bien cultural; otro baremo podría ser el hecho de disfrutar de la sensibilidad que aporta el bien en sí mismo.

La denominada “rentabilidad social del patrimonio cultural” está directamente relacionada con la aportación institucional, ya que ésta consta de unas acciones que están encaminadas a una recuperación y promoción del patrimonio histórico y a la repercusión directa sobre el turismo. Se hace necesario, por consiguiente, cuantificar e identificar tanto los beneficios como los costes del proyecto y ejecución de la obra de conservación. Sin embargo, no es tarea fácil tasar un bien del patrimonio cultural cuando no existe un precio de mercado, por lo que se requiere conocer cuál podría ser el aprovechamiento o destino del mismo. No obstante, los costes de la intervención resultan más fáciles de determinar, pues son los representados por la obra de restauración, los equipamientos y el coste de personal y mantenimiento; son cuantificables.

El retorno de la inversión realizada, tras un análisis coste/beneficio, crea una determinada incertidumbre, puesto que requiere la consideración de un parámetro adicional: la sensibilidad aportada. El Anuario de Estadísticas Culturales (AEC), cuya publicación es

elaborada por el MECD con periodicidad anual, proporciona una selección de resultados estadísticos para conocer la repercusión que genera la cultura en España como valor social, fuente generadora de riqueza y desarrollo económico. Sus datos, están basados principalmente en indicadores estadísticos incluidos en el Plan Estadístico Nacional.

Los principales resultados que ofrece el AEC 2014, basado en datos del año anterior, son:

a) Empleo cultural

Los resultados que se muestra en el Gráfico 1.12 proceden de una explotación específica de los ficheros de la Encuesta de Población Activa, elaborada por el MECD, en la que se han considerado las personas ocupadas que desarrollan su actividad económica en el ámbito cultural. Se trata del empleo que se desarrolla en empresas dedicadas a actividades culturales, tales como: bibliotecas, museos, televisión y radio, edición y las actividades artísticas y espectáculos, entre otras. También se contempla el empleo en ocupaciones con una dimensión cultural, tales como: escritores, bibliotecarios, artistas, etc.

En el Gráfico 1.12, se observa que la evolución del empleo medio anual cultural desde el año 2000 fue ascendente hasta el 2008, año en el que comenzó a descender, hasta alcanzar el 2012. En el año 2013 ha experimentado un ligero repunte, llegando casi a las 500.000 personas.

Tradicionalmente, las disciplinas universitarias relacionadas con el patrimonio cultural han sido: Bellas Artes, Historia del Arte, Arqueología, Arquitectura, Turismo, Biblioteconomía y Documentación y otras afines.

Para definir las profesiones vinculadas al patrimonio cultural, se ha elaborado una selección basada en los criterios que se muestra a continuación.

- Profesiones de origen institucional, es decir, aquéllas que pertenecen a las instituciones del patrimonio cultural:
 - Archivero/a

- Bibliotecario/a
- Conservador/a de museos
- Documentalista

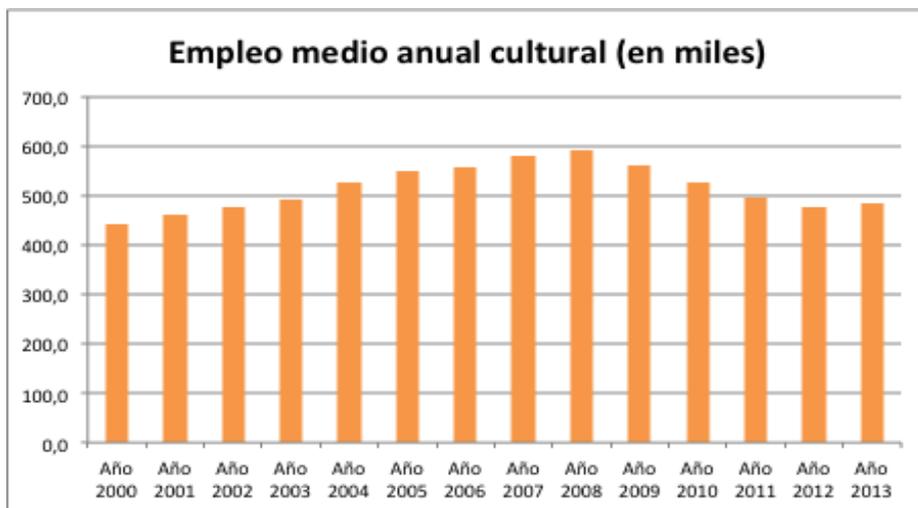


Gráfico 1.12. Empleo medio anual cultural (en miles). (Fuente: Instituto Nacional de Estadística. Encuesta de población activa).

- Profesiones que han surgido para adaptarse a la demanda del mercado y que tienen como objeto de trabajo el patrimonio cultural:
 - Anticuario/a
 - Comisario/a de exposiciones
 - Educador/a en patrimonio cultural
 - Intérprete del patrimonio cultural
 - Gestor/a del patrimonio cultural
 - Técnico/a en exposiciones
 - Conservador/a de patrimonio
 - Profesiones que tienen una trayectoria académica
 - Antropólogo/a
 - Arqueólogo/a
 - Arquitecto/a patrimonialista
 - Restaurador/a en bienes culturales

Al margen de estos criterios existen una serie de disciplinas que, debido a la demanda del mercado o a la evolución del propio concepto del patrimonio y de sus herramientas, han pasado a tener una clara inmersión en el mercado de trabajo del patrimonio cultural. Como ejemplo cabría citar la Geografía y la Arquitectura, que aplican sus conocimientos y técnicas al patrimonio cultural, a la docencia, investigación, etc.

Algunas Escuelas y Facultades incorporan en sus planes de estudios asignaturas e incluso líneas curriculares dedicadas a la formación en materia de Patrimonio Histórico o Cultural. Aportan una formación complementaria mediante cursos de especialización en patrimonio cultural, a través de másteres y otros estudios de postgrado y doctorado. No obstante, una vez adquirida la titulación específica, dichos profesionales deben actualizar continuamente sus conocimientos según los cambios de normativas y reglamentaciones y adaptándose a la rápida evolución tecnológica.

b) Empresas culturales

En el año 2013, el número total de empresas destinadas a la actividad cultural ascendió a 108.556 empresas. Repartidas en el sector de industrias culturales y servicios estaban 82.833 y en las actividades del comercio y alquiler 25.723. En la Comunitat Valenciana estaban ubicadas 10.171.

En lo referente a la ubicación de estas empresas por Comunidades Autónomas (Gráfico 1.13), se observa que, las Comunidades de Madrid, Cataluña y Andalucía, acaparan más de la mitad. La siguiente Comunidad en importancia es la Valenciana.



Gráfico 1.13. Distribución porcentual de empresas culturales por Comunidades Autónomas: Año 2013. (Fuente: Anuario de Estadísticas Culturales 2014).

1.2.3. Importancia de la investigación en la restauración y conservación del patrimonio

El patrimonio cultural es de naturaleza compleja y variada. Por su propio carácter histórico está sometido al natural envejecimiento; pero además, está influenciado por otros factores como el cambio climático y las acciones antrópicas en forma de contaminación, por citar un ejemplo. Todos estos factores dan pie a la investigación de los elementos que componen el patrimonio cultural, con el fin de conseguir un conocimiento más exhaustivo del mismo y poder así llevar a cabo una mejor intervención de conservación.

La investigación en conservación del patrimonio cultural en Europa siempre ha estado incluida en los diferentes programas de

investigación de la UE; en cambio, la financiación ha sido variable. Hoy en día, gracias a la puesta en marcha de diversos proyectos y teniendo presente un horizonte comprendido entre los 10 y los 20 años, se puede considerar que el patrimonio cultural constituye uno de los temas clave para el desarrollo y la investigación en Europa.

Como se ha analizado anteriormente, la participación española en materia de investigación en patrimonio cultural en el ámbito europeo está situada por debajo de la que debería corresponderle como país de gran riqueza en patrimonio. El elevado valor patrimonial que posee el país, con efecto socio-económico importante y con gran capacidad de gestión del I+D+i parecen ser aspectos insuficientes para conseguir una mayor participación española en la investigación del patrimonio en el ámbito europeo.

Con respecto al ámbito nacional, cabe destacar que no todas las Comunidades Autónomas ofrecen el mismo soporte en materia de investigación orientada a la conservación del patrimonio cultural. No obstante, la mayoría de las comunidades incluyen la conservación del patrimonio cultural como parte de los planes de investigación autonómicos. En la Comunidad Valenciana en particular, existe desde 2005 el Instituto Valenciano para la Conservación y Restauración (IVC+R), con avanzadas instalaciones y un equipo multidisciplinar, cuyo fin es estudiar e investigar los aspectos históricos y técnicos de los proyectos relacionados con el patrimonio cultural valenciano, así como de la salvaguarda del mismo. Además, dicho instituto proporciona ayudas y subvenciones para la conservación del patrimonio a diferentes entidades.

La contemplación de la investigación en las intervenciones sobre el patrimonio cultural, supondría una mejora de la metodología y de las actividades; en definitiva, una mejora de las buenas prácticas. Asimismo, cabe resaltar que, para alcanzar estos objetivos, se dispone de nuevas tecnologías e instrumentación aplicados al patrimonio, así como de plataformas de comunicación que permiten la divulgación del conocimiento con el fin de alcanzar la correspondiente repercusión

social y económica. De acuerdo con los distintos Planes Nacionales, la investigación en conservación del patrimonio cultural ha sufrido diversos altibajos a lo largo de los años. Sin embargo, hoy en día se puede afirmar que, a pesar de la crisis económica, la tendencia es al alza.

1.2.4. Plan Nacional de Abadías, Monasterios y Conventos

Los Planes Nacionales constituyen una herramienta de gestión del patrimonio para definir una sistemática de actuación y proyectar las intervenciones, con el objetivo de coordinar la actuación de diversos organismos de la Administración sobre los bienes culturales. El fundamento legal procede de la Ley 16/1985 de Patrimonio Histórico Español, una vez fueron transferidas las competencias sobre Patrimonio a las Comunidades Autónomas.

El primer Plan Nacional fue el Plan Nacional de Catedrales, aprobado en 1990. A continuación le sucedieron los de Patrimonio Industrial, Arquitectura Defensiva, Paisaje Cultural y, finalmente, el Plan Nacional de Abadías, Monasterios y Conventos en la primera década del siglo XXI.

El Plan Nacional de Abadías, Monasterios y Conventos se creó por diversos motivos. En primer lugar, la situación por la que el patrimonio religioso sufre un proceso de abandono y cierre. La falta de vocaciones y la elevada edad de las religiosas/os hacen que este conjunto arquitectónico patrimonial sea más vulnerable a la desaparición. Además, los procesos de aculturación, como consecuencia de la entrada de religiosos/as procedentes de otras culturas que introducen nuevos valores y usos, hacen que este patrimonio pierda su significancia.

Este plan desarrollaba varios aspectos, entre los que cabe señalar los de índole jurídica, los valores patrimoniales, la metodología de actuaciones y los usos compatibles. Asimismo, dada la intervención y participación pública en estos elementos patrimoniales, se estableció la necesidad de compensar la inversión económica con hacer visitables los

conjuntos donde se hubiera intervenido con fondos públicos, siempre y cuando no se alterase la vida monacal y se velara por la conservación de los bienes.

Los objetivos iniciales en los que se basaba del Plan Nacional de Abadías, Monasterios y Conventos fueron:

- Abordar el problema del rápido deterioro y la alta vulnerabilidad de este amplio Patrimonio.
- Profundizar en la apertura a la sociedad de este Patrimonio y buscar usos compatibles o alternativos que permitan su sostenibilidad para evitar el cierre y abandono.
- Potenciar la investigación mediante el diseño de un Plan Director y de Documentación que no sólo se centre en aspectos arquitectónicos e históricos sino también en la recogida de información del Patrimonio inmaterial (actividades desarrolladas en el convento por la comunidad religiosa) y etnográfico.

Este acuerdo de colaboración entre el Ministerio de Cultura y la Conferencia Episcopal fue firmado el 25 de marzo de 2004. Sin embargo, su puesta en práctica y financiación nunca se llevaron a efecto, a pesar de que en diversas ocasiones se ha puesto de manifiesto la importancia de los aspectos esenciales de este Plan Nacional y de abordar la necesidad de un tratamiento singular del Patrimonio intangible.

Este Plan Nacional hacía hincapié en definir un método de trabajo basado en el mejor conocimiento del bien desde una visión interdisciplinar, procurando para ello la aplicación de todos los medios disponibles de la ciencia y de la técnica. Resaltaba la importancia de que, antes de cualquier intervención se debería procurar un conjunto de estudios previos interdisciplinares con la finalidad de adquirir el mayor conocimiento.

También hacía mención especial a la conservación preventiva, acometiendo en una primera fase de identificación y evaluación de riesgos, a partir de la cual se diseñan estrategias de prevención y se

establecía prioridades de actuación. El propósito era obtener un diagnóstico.

Se establece, por tanto, una relación directa del Patrimonio con el Turismo Cultural, que es un generador de recursos económicos que ayudan a la conservación del bien cultural, así como integrador de una oferta compleja y diversificada de rutas y redes culturales de cada región. Las intervenciones con proyección de futuro y de acuerdo con criterios de sostenibilidad y las aportaciones presupuestarias, tanto privadas como públicas estableciendo un equilibrio, marcan los criterios de cofinanciación y corresponsabilidad y coparticipación de los agentes implicados.

1.2.5. Conservación preventiva

La actuación en materia de conservación se mueve entre dos ciencias: la humana y la experimental; la primera, por su naturaleza histórica y cultural y la segunda, por ser física y química. En ocasiones, las intervenciones de conservación son de difícil explicación debido a esta doble componente y, en consecuencia, algunos proyectos de restauración no resultan lo suficientemente fructíferos debido a su complejidad científica, no siempre comprendida en el campo de las Humanidades.

Un aspecto a tener presente ante cualquier actuación de conservación es que este tipo de intervenciones no son reversibles. Se desarrollan gran cantidad de planes directores y actuaciones de conservación, pero a pesar de ello, estas intervenciones siempre supondrán un riesgo para la preservación y salvaguarda del patrimonio cultural. Sin embargo, un equipo técnico multidisciplinar, capaz de diagnosticar en base a los estudios previos realizados, permitiría concretar las necesidades de intervención.

Es por ello, que resulta imprescindible definir los estudios previos que son necesarios disponer, previo a cualquier actuación relacionada con la conservación del patrimonio. La evaluación en su conjunto

ayudará a garantizar la calidad requerida, tanto en los pequeños detalles como en los elementos y aspectos generales y, así, evitar daños en lo material que causen pérdidas irreparables del patrimonio.

La conservación preventiva constituye todo un método de trabajo sistemático para identificar, evaluar, analizar y controlar los riesgos de deterioro que permitirán preparar y coordinar las posteriores actuaciones sobre el patrimonio. Cabe hacer hincapié en lo establecido en el Plan Nacional de Conservación Preventiva, según el cual, el patrimonio cultural es un bien material y, por tanto irrecuperable una vez se ha intervenido sobre él. Así pues, una desafortunada intervención podría incluso suponer la pérdida del bien en cuestión.

Previamente al emprendimiento de cualquier actuación sobre el patrimonio, es necesario considerar y valorar las posibles repercusiones sobre el elemento que se va a actuar, así como analizar la posible influencia y afección sobre otros. Por tanto, este tipo de intervenciones debe implicar una planificación previa de dicha conservación preventiva, que además sea aplicable al conjunto de bienes.

La conservación preventiva contempla numerosos aspectos, todos ellos redactados y especificados en el Plan Nacional de Conservación Preventiva. Sin embargo, cabe destacar algunos de ellos que resultan especialmente indicados para la justificación del presente estudio, a saber:

- “daños o pérdidas relacionados con la negligencia en los procedimientos de seguimiento y control”,
- “daños físicos causados por la manipulación o disposición inadecuadas o por la presión sobre el uso de los mismos”.

Toda intervención sobre el patrimonio implica un cierto grado de complejidad. Por tanto, los daños causados como consecuencia de una inadecuada planificación de las tareas o por un exceso de presión que supere la resistencia de un área determinada, favorece el incremento del riesgo de deterioro o pérdida de la totalidad o parte del bien patrimonial.

A partir de éste y otros aspectos nace el concepto de protección activa. Este concepto se basa en la capacidad de identificar y analizar los riesgos de una intervención sobre el patrimonio, con el propósito de definir unos métodos y técnicas de conservación enfocados a la coordinación de las actuaciones y la optimización de los recursos.

La conservación preventiva se concibe como un instrumento de gestión con enfoque interdisciplinar. Cualquier comisión de gestión del patrimonio cultural necesita abordar estudios, trabajos y documentos para fijar criterios y metodología de trabajo.

El estudio preventivo resulta todavía más complejo cuando se trata de edificios históricos en uso: lugares de culto, edificios declarados BIC, etc. Por ello, requiere de un mayor seguimiento y control, con la definición de protocolos de mantenimiento programado de inmuebles que implique a todos los intervinientes en el proceso de conservación.

La inversión del Ministerio de Educación, Cultura y Deporte, junto con las Comunidades Autónomas, Administraciones Locales, Fundaciones, Asociaciones y la Iglesia Católica para el periodo 2011-2015, ronda los siete millones de euros.

1.2.6. Historic Building Information Modelling (HBIM)

Los estudios previos realizados y su calidad, están directamente relacionados con el éxito de las actuaciones de conservación y restauración arquitectónicas. Para llegar a obtener una propuesta de actuación adecuada, antes es necesario disponer de una información completa y precisa del Bien cultural y así poder realizar un diagnóstico certero.

Tradicionalmente, los edificios históricos han sido documentados empleando sistemas de medición manual y fotogrametría. Más recientemente, se ha comenzado a aplicar la tecnología digital, que ha permitido automatizar el proceso de la toma de datos y el procesado de la información. Estas tecnologías están basadas en la aplicación del

láser escáner y el modelado mediante fotografía digital; pero además, cabe destacar la aparición de nuevas técnicas como el modelado 3D para la representación digital del patrimonio histórico.

La documentación digitalizada forma parte de los estudios previos necesarios para intervenir en el patrimonio histórico y potenciar su puesta en valor y su conservación.

La utilización de modelos infográficos en 3D capaces de facilitar la visualización y en definitiva, la interpretación de las representaciones arquitectónicas, se está utilizando desde hace más de dos décadas, pero hoy en día, la información constructiva requiere de nuevas herramientas capaces de integrar: la visualización, la información, el diseño y la gestión de las construcciones arquitectónicas. En este sentido, el BIM (*Building Information Modelling*) ha surgido como un modelo de datos visual, una innovación reciente que combina e impulsa el potencial de estos avances tecnológicos en la edificación.

El propio Parlamento Europeo aprueba la Directiva 2014/24/UE que hace referencia a la Contratación Pública. Esta Directiva fue creada con el fin de recomendar e impulsar la tecnología BIM en proyectos y contratos de obra pública. Estamos ante una recomendación no una exigencia explícita, al parecer limitada hasta que se definan los formatos de intercambio que faciliten la comunicación y se creen aplicaciones abiertas. En base a esta Directiva, podemos afirmar que la UE encuentra en la tecnología BIM el medio más adecuado para evaluar las ofertas, como paso previo a la contratación de obras y el mantenimiento de las mismas.

Existen países europeos como, Dinamarca, Finlandia, Noruega y Reino Unido, en los cuales ya está implantada y por lo tanto es exigida su utilización. Francia y Alemania se encuentran en proceso de adopción y se espera su implantación a partir del 2018. En España, el Ministerio de Fomento ha constituido una Comisión para la implantación de la tecnología BIM. Dicha Comisión, creada recientemente, en julio de 2015, entre sus objetivos tiene: fomentar el uso de BIM, informar a las Administraciones Públicas de las ventajas

que supone su utilización por la reducción de costes, establecer un calendario de implantación, homogeneizar su uso, realizar la transición del soporte físico al digital, fomentar la aplicación basada en estándares abiertos y realizar el mapa académico de formación de esta metodología en España. Esta Comisión ha aprobado un calendario en el que define el uso obligatorio de BIM en licitaciones públicas de edificación para el 17 de diciembre de 2018 y para licitaciones públicas de infraestructuras para el 26 de julio de 2019.

Cabe puntualizar que las directivas europeas son leyes de trascripción y para su incorporación en el ordenamiento jurídico de cada país miembro, es más importante tener presente su finalidad que el articulado que cada país desarrolle.

Al margen de la Directiva Europea, se observa que diversas empresas del sector de la construcción ya han implantado en su sistema productivo la tecnología BIM con el fin de mejorar su productividad y competitividad.

La tecnología BIM es integradora, capaz de soportar información gráfica y alfanumérica a la vez y de varias procedencias. Por ejemplo, el interior de un edificio se puede visualizar en 3D, contemplando las diferentes estancias y sus dimensiones, la iluminación, las redes ocultas (electricidad, agua potable, etc.) y, al mismo tiempo, solicitar información alfanumérica diversa (diámetros, material, coste por unidad, constructora, año de ejecución, etc.).

Si se traslada este concepto al patrimonio cultural, donde se precisa integrar información multidisciplinar y que sea interpretable por diversos técnicos –como serían ingenieros, arquitectos, arqueólogos, historiadores, restauradores, entre otros-, recibe la denominación de HBIM (Historic Building Information Modeling). El HBIM proporciona una herramienta eficaz para la gestión integral del edificio, que contempla las singularidades del edificio y facilita un análisis evaluado por los agentes que van a intervenir en el proceso de restauración.

El HBIM es un novedoso prototipo de biblioteca digital de objetos paramétricos, basado en información arquitectónica histórica y en un sistema de cartografía digital. Habitualmente, los objetos paramétricos se levantan gráficamente mediante el empleo de láser escáner, el cual permite representar la geometría y la materialidad del edificio. Los elementos arquitectónicos son descritos utilizando un Lenguaje Geométrico Descriptivo (*Geometric Descriptive Language – GDL*). Nuevas alternativas surgen en torno al uso de una base de datos de edificios históricos a través de la cual configurar el modelo de la construcción histórica objeto de estudio.

Emplear tecnología BIM de última generación significa combinar modelos 3D con información asociada, interactuar con el modelo y con la información, generar consultas, búsquedas, modificaciones y, también, compartir y divulgar la información allí contenida.

El empleo de documentación arquitectónica para la creación de modelos se ha convertido en parte fundamental del planteamiento actual del diseño arquitectónico. Emplear información histórica para recrear el pasado o para restaurar o conservar objetos o edificios históricos, se ha convertido en una práctica común en el ámbito de la restauración y constituye una amplia área de investigación (ICOMOS, 1964).

El HBIM perfecciona y desarrolla la información para construir objetos paramétricos a partir de patrones de detalles arquitectónicos. Asimismo, genera documentación de conservación además de modelos de representación del patrimonio. Cabe señalar también, que el uso del Lenguaje Geométrico Descriptivo plantea la oportunidad de ampliar el marco de diseño paramétrico para los modelos de arquitectura histórica. El HBIM ha sido objeto de diversos estudios y trabajos de investigación relacionados con la arquitectura histórica (De Roo et al., 2013; Dore y Murphy, 2012; Dore y Murphy, 2015; Mphil, 2012; Murphy et al., 2013; Oreni et al., 2013; Quattrini et al., 2015; Volk et al., 2014), pero siempre analizando y documentando la construcción en

superficie. Hasta la fecha, no se ha tenido en cuenta investigaciones sobre el cartografiado del subsuelo para ser incorporadas en un HBIM.

La tecnología avanza continuamente y con las nuevas instrumentaciones, técnicas y metodologías se está consiguiendo mucha información que precisa ser documentada y analizada. Al tratarse de información perteneciente a diversas disciplinas, se hace necesaria la interacción de más disciplinas. Este hecho conlleva un diseño de consulta de la información que sea integrador en sus bases de datos y, a su vez, que ofrezca una visión lo más realista posible cuando se trata de elementos que están ocultos, como es el caso del subsuelo de los edificios históricos.

2 OBJETIVOS

La relevancia del patrimonio cultural es independiente de los objetos o bienes en sí; ésta está en función de los valores que la sociedad le atribuye en cada momento histórico, estableciendo así qué bienes son de interés para su preservación. En el siglo XX, se incorpora el valor cultural al patrimonio, como un concepto añadido al carácter monumental y artístico. Es a partir de la Primera y Segunda Guerra Mundial cuando se incrementa el interés por la salvaguarda de las manifestaciones culturales.

Dicha inquietud de la sociedad moderna se refleja en diferentes cartas y documentos internacionales, como la Carta de Atenas (1931), la Convención de la Haya (1954), la Comisión Franceschini (años 60) y la Carta de Venecia (1964), por medio de los cuales se incorpora al concepto de patrimonio las entidades que son consideradas testimonio de las culturas de un pueblo, incluido el patrimonio natural en el que dichas culturas se han desarrollado. Esta idea se representa en la

Convención sobre la protección del patrimonio mundial, cultural y natural de 1972, la cual considera al patrimonio cultural integrado por:

- monumentos: obras arquitectónicas, de escultura o de pintura monumentales, elementos o estructuras de carácter arqueológico, inscripciones, cavernas y grupos de elementos, que tengan un valor universal excepcional desde el punto de vista de la historia, del arte o de la ciencia.
- conjuntos: grupos de construcciones, aisladas o reunidas, cuya arquitectura, unidad e integración en el paisaje les dé un valor universal excepcional desde el punto de vista de la historia, del arte o de la ciencia.
- lugares: obras del hombre u obras conjuntas del hombre y la naturaleza así como las zonas, incluidos los lugares arqueológicos que tengan un valor universal excepcional desde el punto de vista histórico, estético, etnológico o antropológico.

El georradar se presenta como una técnica no destructiva que, por medio de ondas electromagnéticas, determina superficies reflectoras en el interior de los medios. Se trata de una herramienta muy útil para obtener información de elementos ocultos o enterrados, especialmente en el ámbito del patrimonio cultural, donde la preservación del bien cultural es un requisito importante. Su aplicación para el cartografiado del subsuelo presenta multitud de ventajas para la salvaguarda y puesta en valor del patrimonio.

En este capítulo, se presenta los objetivos establecidos para abordar la presente tesis doctoral en el ámbito del patrimonio cultural enfocado al estudio del subsuelo de edificios singulares religiosos.

2.1. OBJETIVOS

Para el desarrollo de esta memoria, se presenta una serie de trabajos como aplicaciones reales al estudio del subsuelo del patrimonio arquitectónico religioso. La realización de los trabajos de campo para la toma de datos y la posterior interpretación de los registros implicaron una revisión de los objetivos planteados con el fin de adaptar los resultados a un público multidisciplinar. En este sentido, además de la aplicación a casos reales, se incluía el planteamiento de problemas habituales observados en las aplicaciones reales, una revisión de los tratamientos de señales y la realización de modelizaciones en 2D y 3D que permitieran interpretar los registros observados en el subsuelo de los edificios analizados.

El trabajo de investigación se completa con una propuesta de fichas para crear una base de datos que contenga los registros y la información relevante sobre los mismos, presentada de forma sintética. Dichas fichas constituirán una base de datos como fuente de consulta rápida, donde poder encontrar registros tipo propios del subsuelo de los edificios singulares religiosos en la Comunidad Valenciana. Esto permitirá comparar radargramas de campo con los almacenados en las fichas, disponiendo de este modo de una fuente de información que ayude en la interpretación de casos similares, especialmente por parte de técnicos relacionados con el ámbito de la restauración, pero no directamente formados en la disciplina de la Geomática.

Los objetivos concretos de la presente tesis doctoral son:

1. Argumentar la viabilidad del estudio y cartografiado del subsuelo de edificios patrimoniales como medio para la documentación, preservación y puesta en valor del patrimonio enterrado.
2. Justificar la necesidad de incluir las disciplinas de Geomática y Topografía como parte integrante de los estudios y proyectos de restauración y conservación del patrimonio cultural.

3. Detectar e identificar las estructuras subterráneas, niveles geológicos y culturales, y lesiones presentes en el subsuelo de los edificios religiosos analizados en la Comunidad Valenciana.
4. Sistematizar el análisis y la interpretación de los resultados mediante la modelización de las anomalías de acuerdo con una codificación de señales establecida en el presente trabajo de investigación.
5. Realizar una base de datos sobre los niveles, estructuras y lesiones propias de los edificios singulares religiosos de la Comunidad Valenciana mediante la elaboración de una propuesta de fichas catálogo. Se pretende con ello iniciar una base de datos de radargramas de interés con los que poder trabajar para mejorar la comprensión de los fenómenos que se registran.
6. Proponer un modelo de fichas para catalogar los registros, en las que se incluya toda la información que puede precisarse para desarrollar proyectos de conservación y restauración aplicados al patrimonio cultural.

Enumerando brevemente los casos reales analizados se pueden mencionar diez estudios en iglesias de la Comunidad Valenciana: Iglesia de Nuestra Señora del Don (Alfajar); Iglesia de Nuestra Señora de la Asunción (Ares del Maestre); Iglesia de San Miguel Arcángel (Jalance); Iglesia de San Pedro (Paterna); Iglesia de Nuestra Señora del Socorro (Peñíscola); Iglesia de Santiago Apóstol (Pobla de Vallbona); Iglesia del Sagrado Corazón de Jesús (Valencia); Iglesia de San Juan del Hospital (Valencia), Cripta del Monasterio de San Miguel de los Reyes (Valencia), Iglesia Arciprestal de Santiago (Villena).

2.2. PLAN DE LA MEMORIA

Las fases seguidas para la consecución de los objetivos expuestos quedan reflejadas en la organización de esta memoria, dividida en siete capítulos.

En el primer capítulo, “Estado del arte”, se realiza una breve introducción a la historia del georradar, aplicado a estudios del patrimonio cultural, y se comenta el estado actual y la evolución de esta técnica de prospección geofísica y su aplicabilidad durante los últimos años.

En el segundo capítulo, “Introducción”, se presenta el tema objeto de estudio y se justifica la investigación en el ámbito del patrimonio cultural. Asimismo, se argumenta la necesidad de investigar y documentar el subsuelo del patrimonio construido, tomando como ejemplo los edificios singulares religiosos.

En el presente capítulo, se recoge los objetivos propuestos con la intención de proveer al lector sobre el contenido desarrollado en esta memoria.

En el cuarto capítulo, denominado “Teoría de la prospección con radar del subsuelo”, se tratan los fundamentos teóricos en los que se basan los fenómenos de propagación y reflexión de ondas electromagnéticas en medios absorbentes y estratificados, que son característicos en los estudios que se realizan en el ámbito del patrimonio cultural. Con esta finalidad, se describe las características electromagnéticas complejas de los materiales, su dependencia de factores físicos, químicos y geológicos, las ecuaciones y relaciones principales, y el proceso de reflexión de las ondas electromagnéticas en medios absorbentes y estratificados. Asimismo, se expone la ecuación de radar y se describen los equipos de georradar empleados en los trabajos con los que se ha obtenido los datos de campo, haciendo unas breves referencias a sus componentes y características.

El quinto capítulo, “Aplicación del georradar: Estudio del subsuelo en el patrimonio religioso”, se expone los estudios por georradar en

diferentes casos de edificios singulares religiosos de la Comunidad Valenciana: detección de niveles, estructuras y lesiones a través de radargramas; interpretación de los datos obtenidos; modelización en 2D de los niveles, estructuras y lesiones del subsuelo; y modelización y representación en 3D de los elementos detectados en el subsuelo de los edificios estudiados. En este capítulo se describe la metodología empleada en cada caso para la adquisición de datos, su tratamiento y los resultados obtenidos.

En el sexto capítulo, “Catalogación de las estructuras mediante GPR: cartografiado del subsuelo”, se muestra un inventario a través de fichas-catálogo que recopilan documentación gráfica (radargramas y modelizaciones) de los elementos del subsuelo analizados, así como información sobre los aspectos técnicos relativos a la toma de datos. Asimismo, se propone unas fichas tipo para la catalogación de niveles, estructuras y lesiones en futuras obras de conservación y restauración de edificios singulares religiosos.

En el capítulo séptimo, “Conclusiones”, se resumen las aportaciones de esta técnica aplicada al estudio del subsuelo de edificios singulares religiosos, y se formulan recomendaciones y líneas de futuras investigaciones en esta área.

3 ESTADO DEL ARTE

En este capítulo, se presenta la historia del georradar aplicada al tema tratado en este estudio, así como las líneas de trabajo más relevantes consideradas en la actualidad. El objetivo de este apartado es mostrar un esbozo de la historia con el fin de contextualizar los trabajos y establecer una conexión entre el desarrollo de estos temas y el interés para su estudio y sus aplicaciones.

En primer lugar, se ha de tener presente que el método de prospección es relativamente reciente, puesto que los primeros ensayos están datados a principios del siglo XX. No obstante, fue hacia las décadas de los 60 y 70 cuando se empezó a desarrollar como un método práctico y, desde entonces, los ensayos y aplicaciones en distintos campos han crecido rápidamente. Este método se inició con los estudios aplicados a la geología y la glaciología; más tarde, se introdujo en la ingeniería civil para, posteriormente, incluirse en el ámbito de la arqueología y el patrimonio histórico-artístico.

3.1. TÉCNICAS NO DESTRUCTIVAS APLICADAS AL CARTOGRAFIADO DEL PATRIMONIO CULTURAL

La documentación del subsuelo del patrimonio cultural habitualmente requiere una intervención multidisciplinar. Este tipo de actuaciones suele incluir una revisión documental, además del empleo de diversas técnicas, normalmente técnicas no destructivas, con el fin de preservar la integridad de las estructuras históricas.

Las técnicas geofísicas son ampliamente empleadas para llevar a cabo prospecciones no invasivas. Proporcionan soluciones efectivas de tipo no destructivo y, por tanto, ofrecen información relevante para la organización de excavaciones arqueológicas y estudios preliminares en obras de restauración.

Los métodos geofísicos más utilizados para el cartografiado del suelo son: (a) los métodos de resistividad eléctrica y electromagnética (entre los que se incluye el georradar), (b) los métodos sísmicos y (c) los métodos gravimétricos (Butler, 2008). A pesar de que todas estas técnicas pueden ser altamente eficaces para la detección de anomalías en el subsuelo, el modo más efectivo de optimizar la localización de cavidades subterráneas consiste en la combinación de métodos complementarios.

El uso combinado de técnicas no destructivas se ha aplicado para cartografiar anomalías subterráneas (Costanzo et al., 2014; Fiedler et al., 2009; Forte y Pipan, 2008; Leucci y De Giorgi, 2005; Moropoulou et al., 2005), así como para corroborar información histórica de archivo (Barilaro et al., 2007; Sutton and Conyers, 2013), entre otras opciones.

La microgravimetría es una de las técnicas más acertadas para la detección y delineación de cavidades subterráneas superficiales (Butler, 1984; Rodríguez-Abad et al., 2007; Yule et al., 1998). Sin embargo, la toma de datos y el análisis de los resultados conlleva un mayor tiempo en su proceso. Otros métodos, como los relacionados con la resistividad eléctrica (Martínez-Moreno et al., 2015) y los métodos magnéticos pueden ofrecer excelentes resultados (Becker y Fassbinder,

2001; von der Osten-Woldenburg et al., 2002), pero proporcionan una menor información, debido a su resolución en las imágenes tridimensionales del subsuelo que se obtienen.

Los métodos sísmicos también han sido utilizados para localizar, por ejemplo, cámaras funerarias (Louis, 2001; Polymenakos et al., 2004; Tsokas et al., 1995). No obstante, estas técnicas presentan algunas limitaciones en los sectores periféricos, donde la cobertura angular limitada deriva en resultados pobres.

El georradar se presenta como una herramienta no destructiva, de gran aplicabilidad para el cartografiado del suelo. Permite centrar el estudio en el subsuelo a la vez que asegura que la zona de análisis se analice en su totalidad. Se trata de un método muy eficiente para este propósito debido a su alta resolución, que permite obtener representaciones tridimensionales, debido también a la rápida toma de datos y a su idoneidad para detectar y delinear anomalías subterráneas. Por esta razón, esta técnica ha sido ampliamente utilizada en el ámbito del patrimonio cultural, para la restauración de edificios (García et al., 2007; Ranalli et al., 2004) y para investigaciones arqueológicas (Piro et al., 2011; Conyers y Connell, 2007), como se verá en el siguiente apartado del presente capítulo.

3.2. ESTADO DEL ARTE EN EL PATRIMONIO CULTURAL

El patrimonio cultural engloba tanto edificación, como escultura, pintura o cualquier tipo de arte de considerada relevancia y vinculado con el pasado histórico. Así pues, dentro del ámbito del patrimonio cultural se puede incluir desde la arqueología hasta corrientes artísticas relativamente más recientes como el Renacimiento o el Modernismo. La aplicación del georradar en arqueología y estudios de patrimonio está cada vez más extendida. Durante la década de los ochenta, se produjo un considerable aumento del empleo del georradar en yacimientos arqueológicos. Desde entonces, las aplicaciones en este ámbito se han sucedido de forma significativa, siendo cada vez más

variadas. Dado que se trata de una técnica no destructiva, que presenta un fácil manejo en campo y que permite delimitar zonas anómalas y acotar el área a investigar en profundidad, las tareas a realizar con posterioridad son mucho más efectivas.

La metodología científica basada la cuantificación a través de la Física, Química e Ingeniería para el estudio de la arqueología se denomina arqueometría. El georradar es una herramienta que contribuye al estudio de esta rama de la ciencia y permite detectar anomalías y elaborar representaciones tridimensionales de una manera relativamente rápida (Conyers, 1997). Asimismo, la importancia histórica de determinados estudios y análisis señala la necesidad de emplear el georradar como una técnica no destructiva, ya que la destrucción provocada por el uso de métodos invasivos es totalmente irreversible. La aplicación del georradar en el ámbito del patrimonio se remonta a la década de los 70, siendo ésta relativamente reciente si se compara con las aplicaciones en los servicios militares y la geología. Las primeras publicaciones en este ámbito fueron los trabajos de Bevan y Kenyon (1975), Bevan (1977) y Dolphin et al. (1978). En estas primeras aplicaciones, el georradar se utilizó para detectar muros enterrados empleando reflexiones. En todos estos casos preliminares, los estudios se realizaron en terrenos básicamente secos, de manera que se alcanzaron resultados óptimos, dada la facilidad de penetración de las ondas de radar.

La necesidad de proyectar las anomalías en los ejes cartesianos, así como el hecho de poder analizar su continuidad y oscilación de la amplitud, dieron lugar a un nuevo desarrollo del georradar aplicado a la arqueometría. De esta manera, la interpolación entre perfiles se empleó para reconstruir la forma de los objetos. Asimismo, este hecho contribuyó notablemente a la interpretación de las posibles características del suelo, convirtiéndose en imágenes comprensibles para arqueólogos y especialistas de arte. Los cortes de profundidades, así como los cortes en las direcciones X e Y, fueron desarrollados definitivamente por Nishimura y Kamei (1990), tras un versión preliminar elaborada por Geophysical Survey Systems en 1986. Con

ello, no sólo se consiguió la visualización en tres dimensiones (3D), sino que la incoherencia lateral en términos de energía y desorden permitió crear filtros para aumentar la relación señal ruido (*SNR*, *signal-to-noise ratio*).

Entre 1980y 1990, diversas aplicaciones se llevaron a cabo (Jol y Bristow, 2003). Cabe resaltar los estudios realizados en Red Bay (península del Labrador, Canadá) en la década de los ochenta. Durante estos análisis, se determinó la localización de tumbas, muros y otros elementos enterrados pertenecientes a residencias de un poblado del siglo XVI (Vaughan, 1986). Posteriormente a las prospecciones geofísicas, se llevaron a cabo excavaciones arqueológicas, a través de las cuales se identificaron los elementos del subsuelo que habían generado las anomalías en los radargramas. De esta manera, se pudo establecer que elementos ubicados en el interior de tumbas –como huesos o piezas metálicas- no diferían lo suficiente con la señal del medio analizado como para aparecer representados en los registros del georradar. No obstante, la presencia de tumbas o criptas sí que se distinguía claramente como zonas anómalas en los registros. Éste es uno de los primeros estudios geofísicos empleando el georradar en yacimientos arqueológicos que, además, aporta unos análisis comparativos entre los resultados geofísicos y los propios obtenidos a partir de las excavaciones arqueológicas. Otra aportación interesante en este campo que servirá como referencia en estudios posteriores, es la realizada en Japón a mediados de los ochenta por Imai et al. (1987). Sus trabajos estaban basados en la detección y localización de antiguas viviendas en terrenos volcánicos, pero además pretendían determinar los estratos culturales, esto es, las capas del subsuelo pertenecientes a una época o cultura determinadas.

El objetivo principal de muchas prospecciones con georradar ha sido y es detectar áreas anómalas con el fin de localizar el área de trabajo en posteriores excavaciones arqueológicas (Basile et al., 2000; Bonomo et al., 2010; Conyers, 1998; Butler et al., 1994; Goodman, 1996; Ivashov et al., 1998; Mellet, 1992; Orlando, 2007; Sternberg y McGill,1995; Tohge et al., 1998). A veces, lo que se pretende es

corroborar la existencia de elementos documentados históricamente mediante el empleo de un método no invasivo (Conyers, 1996; Kong et al., 1992; Lorenzo, 1994; Lorenzo et al., 1998; Pérez Gracia et al., 1997(a); Pérez Gracia et al., 1997(b); Pérez Gracia et al., 1998; Pérez Gracia et al., 2000) e incluso detectar la presencia de estructuras no documentadas o las fases constructivas que componen un edificio histórico (Bini et al., 2010). Otra aplicación del georradar en el campo del patrimonio es aquella relacionada con la localización de zonas anómalas causadas por humedad en elementos arquitectónicos o suelos (Maierhofer et al., 1998; Pérez Gracia et al., 1997(b); Pérez Gracia et al., 1998(a), 1998(b); Pérez Gracia et al., 2000) o, en su defecto, zonas anómalas cuyo origen está en la existencia de grietas y fisuras (Liu et al., 1998; Papaioannou et al., 1996; Pérez Gracia et al., 1997).

Dada la creciente importancia y difusión del empleo del georradar en el campo de la arqueología, un nuevo libro fue editado por Renfrew y Bahn (2000), donde se describían las teorías y los estudios prácticos sobre la arqueología. Un estudio completo sobre la aplicación del georradar al patrimonio con experimentos de laboratorio y aplicaciones en varias evaluaciones de elementos patrimoniales han puesto de manifiesto la capacidad del georradar para detectar estructuras o elementos enterrados y para estudiar el estado de conservación en términos de espesor, fisuras y contenido de humedad de pavimentos y muros (Pérez Gracia, 2001). El georradar también se ha utilizado para examinar las estructuras y la velocidad de propagación en mamposterías, como en el caso del Castillo Malpaga (Binda et al., 1998). Las obras de reconstrucción llevadas a cabo en un teatro romano también han sido objetivo de estudio con la técnica del georradar. Diferentes elementos constructivos del monumento fueron evaluados con antenas de frecuencia media y alta para comprobar el estado de los restos históricos y el alcance de la nueva intervención realizada (Pérez Gracia et al., 2008). El georradar se ha empleado asimismo para estudiar la estructura interna y la velocidad de propagación en columnas y muros de edificios de más reciente construcción (González-Drigo et al., 2008). La técnica del georradar se ha empleado asimismo

para realizar representaciones tridimensionales del subsuelo (Goodman et al., 1996; Grasmueck et al., 2004; Leckebusch, 2003; Malagodi et al., 1996; Nuzzo et al., 2002). Además, en los últimos años, se ha empezado a utilizar sistemas radar multicanal en el ámbito de la arqueología, lo que permite mejorar notablemente la calidad de las representaciones tridimensionales en términos de resolución y tiempo de adquisición de datos (Novo et al., 2013). Todos estos ejemplos ponen de relieve que los datos obtenidos con georradar proporcionan información muy útil e interesante para el ámbito arquitectónico y arqueológico.

En determinados casos, se combina más de un método de prospección geofísica para analizar el medio. Así, se puede obtener un modelo resultante del empleo conjunto de los métodos –es decir, estos se complementan-, o bien, se pueden utilizar para confirmar o contrastar los resultados obtenidos (Bauman et al., 1994; Campana et al., 2009; Imai et al., 1987; Pérez Gracia et al., 2011). El georradar está considerado como una herramienta extraordinaria para la representación del subsuelo; sin embargo, presenta algunos inconvenientes como la velocidad estimada de propagación y las grandes pérdidas en conductividad o suelos estratificados. Además, se caracteriza por una escasa profundidad de penetración y la imposibilidad de penetrar estructuras metálicas (Jol, 2003). Las técnicas más relevantes empleadas en arqueología analizan oscilaciones en los campos eléctricos, magnéticos, gravimétricos y mecánicos que se corresponden, principalmente, con la tomografía de resistividad eléctrica, gravimetría y ensayos sísmicos. Otros métodos como la termografía o la fotogrametría aérea pueden ser combinados con la técnica del georradar (Balaras and Argiriou, 2002; Chávez et al., 2005; Imposa, 2010; Hildebrand et al., 2002; Solla et al., 2012). Los estudios integrados proporcionan información muy útil para completar la descripción de las estructuras y el subsuelo, permitiendo determinar las causas que generan los daños o deterioros en las estructuras o construcciones superficiales.

El análisis del subsuelo y diversos elementos constructivos se ha aplicado también para el estudio de edificios singulares religiosos. Los estudios del subsuelo de iglesias o edificios religiosos mediante georradar se han realizado, especialmente, para conocer la estratigrafía del subsuelo, detectar y localizar anomalías históricas o elementos enterrados, así como para complementar investigaciones arqueológicas y determinar los estratos culturales existentes bajo dichas construcciones (Cataldo et al., 2012; Gustafsson and Alkarp, 2007; Leckebusch, 2000; Leucci, 2002; Pérez et al., 2000). Cabe destacar el análisis realizado en un monasterio del siglo XVI, empleando antenas de 400 MHz, 900 MHz y 1,5 GHz. Como resultado de estos trabajos se obtuvo una representación tridimensional de las criptas (García et al., 2007). Barone et al. (2007) emplearon la técnica del georradar para investigar las técnicas constructivas existentes en una iglesia de Sicilia. Una aplicación similar es la descrita por Ranalli et al. (2004), donde se determina el espesor de los muros y el tipo de cimentación en una basílica de 1287, con el fin de realizar trabajos de restauración. En la misma línea, Udphuay et al. (2010) llevó a cabo una investigación sobre las cimentaciones de una antigua iglesia románica del siglo XII, bajo una abadía gótica perteneciente al siglo XIII. Asimismo, el georradar ha sido aplicado para el estudio y la restauración de un rosetón en la catedral de Troia, en Italia (Masini et al., 2007) y para el análisis del subsuelo en una iglesia de Valencia con el fin de determinar la causa de los daños estructurales localizados en dicha construcción (Ramírez et al., 2008).

La integración de diferentes técnicas se ha empleado también para el estudio de construcciones históricas religiosas; tal es el caso del estudio llevado a cabo en la cripta de la Catedral de Otranto (Cataldo et al., 2005), o en las iglesias de Sicilia (Barilaro et al., 2006) y Gerona (Dabas et al., 2000) La determinación de problemas de deterioro y el grafiado de mapas de humedad relativa en estructuras arquitectónicas es posible gracias a la combinación de mediciones térmicas con el georradar, localizando los resultados con SIG (Sistema de Información Geográfica). Técnicas no destructivas como la microgravimetría y el

georradar se han empleado para la detección de criptas (Pašteka et al., 2007; Rodríguez et al., 2007) y elementos de cimentación (Ebrahimzadeh, 2004; García et al., 2007; Ramírez, 2001). La tomografía de resistencia eléctrica también se ha empleado conjuntamente con el georradar en yacimientos arqueológicos, como en Lecce (Italia), para la detección de una tumba y sus respectivos muros (Leucci, 2006).

Las técnicas no destructivas aplicadas al patrimonio resultan esenciales para la representación y el conocimiento de las propiedades de los materiales. Este tipo de métodos pretenden evitar las intervenciones invasivas y, a su vez, proporcionar la información suficiente a arquitectos e ingenieros civiles para el diseño de las soluciones constructivas en obras de restauración.

4 TEORÍA DE LA PROSPECCIÓN CON RADAR DEL SUBSUELO

4.1. INTRODUCCIÓN

La prospección con georradar consiste en la emisión y recepción de ondas electromagnéticas. En este capítulo, se presentan los fundamentos teóricos en los que se basan los fenómenos de propagación y reflexión de ondas electromagnéticas en medios absorbentes y estratificados, los cuales son propios de estudios realizados en el ámbito de Ingeniería Civil y Patrimonio Histórico-Artístico.

Esta fundamentación teórica se toma como referencia para estimar las posibilidades de éxito de las aplicaciones de la técnica de georradar. A lo largo de este capítulo se desarrollan tres apartados: el primero, hace referencia a los parámetros electromagnéticos de los medios y la propagación de las ondas electromagnéticas. El segundo, expone los fenómenos asociados a la propagación de las ondas electromagnéticas

en un medio, que son: difracción, dispersión y atenuación de la onda electromagnética. Por último, en el tercer apartado, se presenta los elementos que componen los equipos de radar y su funcionamiento, así como las características de emisión de un radar y los métodos de trabajos que se emplean habitualmente.

La técnica de prospección con georradar se fundamenta en la emisión y detección de ondas electromagnéticas que se propagan por un medio heterogéneo. La capacidad de penetración de dicha técnica está en función de las propiedades electromagnéticas del medio y de la frecuencia de emisión al mismo. Al incidir al energía en el medio y detectar las irregularidades presentes en él, da lugar a fenómenos de reflexión, refracción y difracción. Estas irregularidades presentes en el medio material están asociadas a cambios en las propiedades electromagnéticas del material. Tanto los parámetros que definen dichas propiedades, como las características de la onda emitida, establecerán la propagación de la energía por el medio material.

En este sentido, las señales obtenidas también pueden verse afectadas por las variaciones de las características del medio. Así, la composición, distribución y relación volumétrica de los elementos del medio influyen en las señales obtenidas; así como la interacción de las fases, el rango de frecuencias utilizadas para la emisión de ondas electromagnéticas y las condiciones térmicas y de presión. Por tanto, el fin último de esta técnica de prospección es la detección y determinación de estructuras superficiales y elementos u objetos enterrados.

Este método se asemeja a la sísmica de reflexión de pequeño ángulo. Además, los fenómenos vinculados con la propagación de la energía son esencialmente los mismos; siendo las diferencias más destacadas el rango de frecuencia de las ondas empleadas (siendo mayores en el caso del georradar) y la naturaleza de la emisión. Así pues, mientras que en la prospección sísmica la propagación de las ondas está en función de las propiedades mecánicas del medio, en el caso del georradar son las propiedades electromagnéticas del medio las

que determinan la propagación de la energía: la permitividad dieléctrica, la conductividad y la permeabilidad magnética. Asimismo, el procesamiento de datos también es similar al aplicado en la sismica de reflexión.

4.2. PRINCIPIOS TEÓRICOS: Propagación de Ondas Electromagnéticas

Este método de prospección se fundamenta en la teoría de campos electromagnéticos. Las ecuaciones de esta teoría fueron enunciadas por Maxwell en 1867, poniendo en relación los campos eléctrico y magnético con sus fuentes. Las ecuaciones de continuidad, que permiten concretar el comportamiento de dichos campos donde se producen distribuciones superficiales de carga –esto es, donde hay discontinuidades en el medio-, complementan las propias enunciadas por Maxwell.

Las ecuaciones relativas al campo magnético y eléctrico se expresan como sigue (Lorrain y Corson, 1972; Carcione, 1996):

$$\begin{aligned}\nabla \vec{D} &= \rho_f \\ \nabla \vec{B} &= 0 \\ \nabla \times \vec{E} &= -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} + \vec{M} \\ \nabla \times \vec{H} &= -\frac{\partial \vec{D}}{\partial t} + \vec{J}\end{aligned}, \tag{4.1}$$

donde \vec{D} es el vector de desplazamiento eléctrico (en Coulombios/m²), ρ_f es la densidad de carga libre (Coulombios/m³), \vec{B} es la inducción magnética (en Webers/m²), \vec{E} es el la intensidad del campo eléctrico (en voltios/metro), \vec{M} es la imanación (en Amperios/metro), \vec{H} es la intensidad del campo magnético (en Amperios/metro), y \vec{J} (Amperios/m²) es la densidad de corriente debida al movimiento de cargas en la materia, que engloba la densidad de corriente de cargas

libres y la propia de polarización, así como aquella equivalente en materia imanada.

Por otro lado, la intensidad de los campos eléctrico y magnético se vincula, respectivamente, con el desplazamiento eléctrico y la inducción magnética a través de las ecuaciones constitutivas. En el caso de medios homogéneos e isótropos, dichas ecuaciones se expresan de forma sencilla, estableciendo la relación entre las mencionadas magnitudes mediante la permitividad dieléctrica, la conductividad y la permeabilidad magnética.

$$\begin{aligned}\vec{D} &= \varepsilon \vec{E} \\ \vec{H} &= \frac{\vec{B}}{\mu} \\ \vec{J} &= \sigma \vec{E}\end{aligned}\tag{4.2}$$

Por regla general, se analizarán medios anisótropos; por lo que la relación entre las citadas magnitudes se formula por medio de los tensores de la permitividad, permeabilidad y conductividad (Carcione, 1996):

$$\begin{aligned}\vec{D} &= \tilde{\varepsilon}^* \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \\ \vec{B} &= \tilde{\mu} \vec{H} \\ \vec{J} &= \tilde{\sigma}^* \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} + \vec{J}_m\end{aligned},\tag{4.3}$$

donde \vec{J}_m es la densidad de corriente consecuencia de la polarización y la magnetización del material producida por la aplicación de los campos eléctrico y magnético, y $\tilde{\varepsilon}$, $\tilde{\mu}$ y $\tilde{\sigma}$ se corresponden con tres tensores diagonales de dimensión 3x3.

A partir de las ecuaciones de Maxwell junto con la ecuación de ondas es posible establecer, dependiendo de las propiedades del medio de propagación, las relaciones de la propagación de ondas

electromagnéticas. Así, se podrá determinar la velocidad de propagación de la onda electromagnética, así como la atenuación de la energía durante la propagación en el medio y la longitud de onda en el medio natural.

4.2.1. Parámetros Electromagnéticos de un Medio

Tres parámetros definen las propiedades electromagnéticas de un material dado, a saber: la conductividad, la permitividad dieléctrica (también denominada, constante dieléctrica) y la permeabilidad magnética.

4.2.1.1. Conductividad

La conductividad de un medio (σ) mide cuál es la respuesta de las cargas libres del medio cuando éste está afectado por la presencia de un campo eléctrico externo. Existe una relación de proporcionalidad entre la densidad volúmica de corriente generada por la corriente de las cargas libres y el campo libre externo. Así, la conductividad mide la capacidad de un medio (o un material) para conducir corriente eléctrica.

De acuerdo con la Ley de Ohm:

$$\vec{J}_f = \sigma \vec{E}, \quad (4.4)$$

donde \vec{J}_f es la densidad volúmica de corriente debido a las cargas libres, σ es la conductividad del material (Siemens/metro) y \vec{E} es el campo eléctrico externo aplicado. Por regla general, la conductividad eléctrica se muestra como un valor complejo:

$$\sigma = \sigma' - i\sigma'' \quad (4.5)$$

donde σ' constituye la parte real de la conductividad compleja, y establece la amplitud de la corriente en fase con la intensidad del campo eléctrico externo, y σ'' constituye la parte imaginaria de la conductividad compleja, que determina la amplitud de la corriente

desfasada respecto al campo eléctrico externo y tiene en cuenta la demora en la respuesta de conducción que experimenta el material por la afección de un campo eléctrico que varía con el tiempo (Sutinen, 1992).

De acuerdo con el Sistema Internacional, la conductividad se expresa mediante las siguientes unidades de medida: Mohs/metro, o su equivalente en Siemens/metro. Cabe destacar que la conductividad de un medio es la inversa de su resistividad, la cual se mide en Ohmios·metro (Ωm).

Habitualmente, se puede diferenciar tres tipos de materiales según su conductividad: materiales conductores, materiales semiconductores y materiales aislantes. Los materiales conductores son aquéllos cuya conductividades superior a 10^5 S/m. Por otro lado, los materiales aislantes presentan una conductividad inferior a 10^{-8} S/m; mientras que los materiales semiconductores son aquéllos que poseen una conductividad comprendida entre los dos valores previamente citados.

En muchos casos, la cantidad de agua presente en los poros del material y la composición química de ésta son determinantes a la hora de establecer la conductividad del medio, por encima de los granos minerales que lo conforman.

La mayoría de los materiales que componen los subsuelos objeto de estudio poseen conductividad electrolítica. Esto se debe a que, a excepción de las arcillas y la presencia de minerales metálicos, la mayoría de los materiales presentes en las áreas de prospección suelen ser considerados como aislantes. Por tanto, en este tipo de medios la conductividad es consecuencia directa de la presencia de fluidos en fisuras y poros; de manera que, cuanto mayor sea la cantidad de agua presente en el medio, la porosidad del medio y la proporción de iones disueltos será mayor y, en consecuencia, su conductividad incrementará.

Normalmente, la conductividad varía notablemente; no obstante, dicha modificación no depende únicamente de las variaciones que experimentan los materiales en el medio, sino que puede cambiar dentro de una misma formación. En el caso de materiales porosos, la conductividad puede verse altamente afectada en función de la naturaleza de los iones disueltos en el fluido, del contenido de agua, de la proporción de poros y su conectividad, etc.

4.2.1.2. Permitividad Dieléctrica

La permitividad dieléctrica absoluta (ϵ) es una constante que relaciona proporcionalmente el vector desplazamiento \vec{D} y el campo externo:

$$\vec{D} = \epsilon \vec{E} \quad (4.6)$$

La permitividad dieléctrica absoluta es el resultado del producto entre la permitividad dieléctrica del vacío ($\epsilon_0=8,854 \times 10^{-12}$ Faradios/metro) y la permitividad relativa del material –siendo ésta última una constante adimensional–.

$$\epsilon = \epsilon_0 \epsilon_r \quad (4.7)$$

La permitividad dieléctrica relativa mide la capacidad de polarización de un material cuando un campo eléctrico está presente. Dicha constante suministra la respuesta estática de un material en presencia de un campo eléctrico. El valor de la constante dieléctrica para el vacío es 1.

La relación de proporcionalidad (adimensional) entre la polarización del material y el campo eléctrico externo viene determinada por la constante de susceptibilidad (χ):

$$\vec{D} = \vec{P} + \epsilon_0 \vec{E} = \chi \epsilon_0 \vec{E} + \epsilon_0 \vec{E} = (1 + \chi) \epsilon_0 \vec{E} = \epsilon_r \epsilon_0 \vec{E} \quad (4.8)$$

La permitividad dieléctrica relativa es una constante compleja (Marshall et al., 1982; Turner y Siggins, 1994) que se obtiene a partir

de dos componentes, una real y una imaginaria. La parte real genera una corriente desfasada con respecto al campo eléctrico aplicado, mientras que la parte imaginaria produce una corriente en desfase con respecto al citado campo. La constante dieléctrica relativa se expresa de la siguiente manera:

$$\varepsilon = \varepsilon' - i\varepsilon'' \quad (4.9)$$

donde ε' es la componente real –denominada también permitividad real- y ε'' es la componente imaginaria.

Existe una interrelación entre la permitividad dieléctrica relativa y la conductividad. La componente real de la permitividad dieléctrica y la respectiva imaginaria de la conductividad provocan una corriente que cambia en fase con el campo eléctrico externo que les afecta. Por otro lado, la componente imaginaria de la constante dieléctrica y la respectiva real de la conductividad producen una corriente desfasada con el campo eléctrico externo.

La permitividad dieléctrica varía en función de la frecuencia. En la mayoría de materiales de subsuelo para el caso de frecuencias altas (10 MHz – 1000 MHz), los desplazamientos (o fenómenos de polarización) predominan sobre la conductividad. Es por ello que normalmente los suelos se definan por el valor de la constante dieléctrica. Por el contrario, cuando se emplean frecuencias más bajas, la conductividad estática predomina sobre la polarización. Ambas componentes –tanto la real como la imaginaria- de la permitividad dieléctrica varían en función de la frecuencia. Dicha dependencia queda definida por diversos mecanismos (Robert, 1996), entre los que cabe destacar los modelos de Debye y de Cole y Cole (1941) –denominado también como modelo Maxwell-Wagner.

4.2.1.3. Permeabilidad Magnética

La permeabilidad magnética (μ) pone en relación la inducción magnética \vec{B} y la intensidad del campo magnético \vec{H} . La unidad de

medida de este parámetro es Henri/metro y se puede expresar como el producto entre la permeabilidad magnética del vacío ($\mu_0=4\pi \times 10^{-7}$ H/m) y la permeabilidad relativa del material (μ_r). Dicha permeabilidad relativa del material depende de la susceptibilidad magnética del material (χ_m) –que constituye la constante de proporcionalidad entre la intensidad de un campo magnético externo y la imanación de un material, \vec{M} -.

$$\vec{B} = \mu_0 \mu_r \vec{H} = \mu_0 (1 + \chi_m) \vec{H} = \mu \vec{H} \quad (4.10)$$

$$\vec{M} = \chi_m \vec{H} \quad (4.11)$$

La permeabilidad magnética relativa se puede expresar de forma compleja:

$$\mu_r = \mu' - i\mu'' = 1 + \chi_m \quad (4.12)$$

A la componente real de la permeabilidad magnética relativa se le denomina permeabilidad magnética elástica, que determina la energía magnética que se acumula en el material. Por otro lado, la componente imaginaria –también llamada permeabilidad magnética viscosa- define la cuantía de las pérdidas magnéticas derivadas de las corrientes turbillonarias, histéresis, viscosidad magnética del material, entre otros.

La mayoría de materiales presentes en medios donde se lleven a cabo prospecciones con georradar (a excepción de aquéllos que posean materiales ferromagnéticos) presentan un valor de permeabilidad magnética próximo a 1 y es independiente de la frecuencia del campo magnético aplicado.

La relación existente entre los parámetros de permeabilidad magnética en el vacío y permitividad dieléctrica en el vacío se define por medio de la velocidad de propagación de una onda electromagnética (en m/s):

$$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} = 2.998 \times 10^8 \quad (4.13)$$

4.2.2. Parámetros Efectivos

Los campos observados se determinan a partir de una serie de parámetros efectivos. Dichos parámetros se definen como permitividad dieléctrica efectiva real ε'_e y conductividad eléctrica efectiva real σ'_e (Ulriksen, 1982; Turner y Siggins, 1994; Carcione, 1996):

$$\varepsilon'_e = \varepsilon' - \frac{\sigma''}{\omega} \quad (4.14)$$

$$\sigma'_e = \sigma' + \omega\varepsilon'' \quad (4.15)$$

Así pues, la permitividad dieléctrica compleja efectiva $\hat{\varepsilon}_e$ se puede expresar del siguiente modo (Carcione, 1996):

$$\hat{\varepsilon}_e = \varepsilon'_e - j \frac{\sigma'_e}{\omega} \quad (4.16)$$

Estos parámetros efectivos, junto con la atenuación de la energía durante la propagación de la onda, son los empleados para calcular y definir la propagación de las ondas electromagnéticas a través del medio. Dichos parámetros se pueden determinar experimentalmente en laboratorio.

En los siguientes capítulos, siempre que se haga referencia a la permitividad dieléctrica y a la conductividad –salvo que se especifique lo contrario- se hablará de la permitividad dieléctrica efectiva y de la conductividad efectiva –en concreto, de su componente real, pues es ésta la que se puede medir en laboratorio-. Asimismo, se hará alusión a la permitividad dieléctrica relativa efectiva (ε_r) denominándola permitividad dieléctrica relativa.

4.2.3. Velocidad de Propagación de una Onda Electromagnética

Los parámetros que determinan la propagación de ondas electromagnéticas en un medio se pueden hallar tomando como base las

ecuaciones enunciadas por Maxwell en 1867. Si se supone una variación del campo armónica respecto al tiempo, dependiente de $e^{i\omega t}$ y se considera una onda plana que se propaga en una dirección \vec{r} , resulta la siguiente expresión:

$$\begin{aligned}\vec{E}(\vec{r}, t) &= \vec{E}_0 e^{(i\omega t - \gamma \vec{r})} \\ \vec{H}(\vec{r}, t) &= \vec{H}_0 e^{(i\omega t - \gamma \vec{r})}\end{aligned}\tag{4.17}$$

La constante de propagación –o número de onda complejo- (γ) depende de los parámetros electromagnéticos de cada medio (Stewart et al., 1994; García, 1997):

$$\gamma = i\omega\sqrt{\epsilon_0\epsilon_r\mu_0\mu_r} = i\frac{\omega}{c}\sqrt{\epsilon_r\mu_r} = i\frac{2\pi}{\lambda_0}\sqrt{\epsilon_r\mu_r}\tag{4.18}$$

siendo ϵ_0 la constante dieléctrica del vacío, ϵ_r la constante dieléctrica relativa del medio, μ_0 la permeabilidad magnética del vacío, μ_r la permeabilidad magnética del medio, c la velocidad de una onda electromagnética en el vacío (constante), y λ_0 es la longitud de la onda electromagnética en el vacío.

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

$$\gamma = \alpha + i\beta\tag{4.19}$$

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

$$\begin{aligned}\alpha &= \frac{\omega}{c} \operatorname{Im} \sqrt{\epsilon_r \epsilon_0 \mu_r \mu_0} \\ \beta &= \frac{\omega}{c} \operatorname{Re} \sqrt{\epsilon_r \epsilon_0 \mu_r \mu_0}\end{aligned}\tag{4.20}$$

4.2.3.1. Velocidad de propagación de una onda electromagnética en un medio material

A partir del parámetro β se puede determinar la velocidad de la onda en el medio material donde ésta se propaga, mediante la siguiente ecuación:

$$\beta = \frac{\omega}{v} \quad (4.21)$$

siendo v la velocidad de fase de la onda electromagnética. Así, la velocidad de propagación de la onda se puede expresar del siguiente modo:

$$v = \frac{\omega}{\beta} = \frac{\omega}{\frac{\omega}{c} \operatorname{Re} \sqrt{\epsilon_r \mu_r}} \cong \frac{1}{\sqrt{\frac{\mu \epsilon}{2} \left(\sqrt{1 + \left(\frac{\sigma}{\omega \epsilon} \right)^2} + 1 \right)}} \quad (4.22)$$

Lo más frecuente en las prospecciones con georradar es hallar medios no magnéticos. En estos casos, la expresión anterior se simplifica notablemente, puesto que $\mu_r=1$. Por tanto, la ecuación que se podría aplicar en la mayoría de estudios con georradar sería la siguiente:

$$v = \frac{c}{\operatorname{Re} \sqrt{\epsilon_r}} \quad (4.23)$$

Esta expresión varía para materiales diferentes, en función de la velocidad de propagación (v) y de la constante de propagación (γ) (Marshall et al., 1982).

En los medios dieléctricos o poco conductores, el parámetro relativo a la conductividad es reducido. Se ha de considerar, además, que el rango de frecuencias más habitual al trabajar con georradar oscila entre los 10 MHz y los 1000 MHz. Por tanto, en estas situaciones, la ecuación (4.23) se puede simplificar:

$$v = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \epsilon_r \mu_0}} = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad (4.24)$$

Las medidas tomadas con georradar proporcionan un parámetro denominado constante dieléctrica efectiva del material (ϵ_r), el cual consiste en un promediado de las partes reales de las diferentes permitividades dieléctricas de una capa.

La velocidad de propagación de la onda varía frente a la constante dieléctrica (en línea continua) (Reynolds, 1997). El aire presenta el valor más elevado de velocidad de onda, mientras que el valor más bajo de este parámetro está asociado al agua. Los valores de velocidad de propagación de la onda electromagnética para los materiales del subsuelo están comprendidos entre los valores citados anteriormente.

4.2.4. Longitud de onda en un medio material (diferente del vacío)

La longitud de onda en un medio varía en función de la velocidad de fase y de la frecuencia de onda emitida, y además depende, de forma indirecta, de la constante dieléctrica efectiva del medio. En la siguiente ecuación aparecen parámetros relacionados con la propagación en el vacío y, por tanto, la longitud de onda en un medio material se puede relacionar con la longitud de onda en el vacío (λ_0):

$$\lambda_m = \frac{2\pi}{\beta} = \frac{2\pi}{\omega} v = \frac{2\pi}{\omega} \frac{c}{\text{Re} \sqrt{\epsilon_r \mu_r}} = \frac{\lambda_0}{\text{Re} \sqrt{\epsilon_r \mu_r}} \quad (4.25)$$

Como se había indicado previamente, en medios no magnéticos el valor de μ_r es 1 y, por tanto, la expresión se puede simplificar del siguiente modo:

$$\lambda_m = \frac{\lambda}{\text{Re} \sqrt{\epsilon_r}} \quad (4.26)$$

El parámetro de la longitud de onda define la resolución vertical del georradar y, por consiguiente, está en función de la frecuencia de emisión de la antena empleada en la prospección y de la constante dieléctrica efectiva del medio.

4.2.5. Coeficientes complejos de reflexión, refracción y transmisión

4.2.5.1. Reflexión y refracción

La reflexión y refracción de la energía electromagnética se produce cuando ésta alcanza discontinuidades en los parámetros electromagnéticos del medio por el que se propaga. Si la interface es plana, el ángulo de reflexión es igual al ángulo de incidencia; del mismo modo que la frecuencia de la onda incidente coincide con la propia de las ondas reflejadas y refractadas.

La relación entre los ángulos de incidencia, reflexión y refracción con la velocidad de propagación de las ondas propia de los medios de propagación que están en contacto se establece mediante la Ley de Snell.

La diferencia que existe entre los parámetros electromagnéticos de los materiales que conforman el medio de propagación define el porcentaje de energía que se refleja. Dicho porcentaje determina los coeficientes de transmisión y de reflexión.

El cociente entre el campo eléctrico y el campo magnético es lo que se denomina impedancia de un campo electromagnético. Se pueden definir dos tipos de impedancia: una para el campo electromagnético incidente, η_1 (que coincide con la impedancia del campo magnético reflejado); y otra para el campo electromagnético refractado (transmitido), η_2 .

$$\eta_1 = \left\{ \frac{\vec{E}_i}{\vec{H}_i} = \sqrt{\frac{\mu_0 \mu_r}{\epsilon_0 \epsilon_r}} \right\} = \left\{ \frac{\vec{E}_r}{\vec{H}_r} = \sqrt{\frac{\mu_0 \mu_r}{\epsilon_0 \epsilon_r}} \right\} \quad (4.27)$$

$$\eta_2 = \left\{ \frac{\vec{E}_t}{\vec{H}_t} = \sqrt{\frac{\mu_0 \mu_{r2}}{\epsilon_0 \epsilon_{r2}}} \right\} \quad (4.28)$$

Los coeficientes de transmisión y de reflexión de Fresnel se pueden obtener tomando como referencia las expresiones que definen las impedancias de los campos electromagnéticos incidente, reflejado y refractado.

$$R_{1 \rightarrow 2} = \frac{\vec{E}_r}{\vec{E}_i} = \frac{\eta_2 \cos(at) - \eta_1 \cos(ai)}{\eta_1 \cos(ai) + \eta_2 \cos(at)} \quad (4.29)$$

$$T_{1 \rightarrow 2} = \frac{\vec{E}_t}{\vec{E}_i} = \frac{2\eta_2 \cos(at)}{\eta_1 \cos(ai) + \eta_2 \cos(at)}$$

Siendo $T_{1 \rightarrow 2}$ el coeficiente de Fresnel de refracción entre los medios superior (1) e inferior (2), $R_{1 \rightarrow 2}$ el coeficiente de Fresnel de reflexión en el contacto entre los dos medios, \vec{E}_i el campo incidente, \vec{E}_r el campo reflejado y \vec{E}_t el campo refractado o transmitido, ai el ángulo de incidencia de la onda sobre la superficie plana y at el ángulo de refracción.

Dichas expresiones pueden simplificarse para el caso del georradar, ya que en las situaciones en que la superficie reflectora sea plana se considera incidencia normal, al ser considerados como de cero grados los ángulos de incidencia y reflexión. Por tanto, para estos casos, los coeficientes de reflexión y transmisión están únicamente en función de las impedancias. Otra consideración a tener en cuenta es el medio de propagación, que normalmente suele ser no magnético para mayoría de los materiales donde se aplica el georradar. Por tanto:

$$R = \frac{\eta_1 - \eta_2}{\eta_1 + \eta_2} = \frac{\sqrt{\epsilon_{r1}} - \sqrt{\epsilon_{r2}}}{\sqrt{\epsilon_{r1}} + \sqrt{\epsilon_{r2}}} \quad (4.30)$$

$$T = \frac{2\eta_2}{\eta_1 + \eta_2} = \frac{2\sqrt{\epsilon_{r2}}}{\sqrt{\epsilon_{r1}} + \sqrt{\epsilon_{r2}}}$$

La suma de los coeficientes de reflexión y refracción es la unidad.

Se puede deducir que cuanto mayor sea la diferencia entre los parámetros electromagnéticos de los medios, mayor será el coeficiente de reflexión, es decir, que a mayor contraste entre los dos medio en contacto, mayor porcentaje de la energía incidente será reflejada en la discontinuidad, y por lo tanto, existirá un menor porcentaje de energía transmitida al medio inferior.

Valores de R elevados implican en un estudio con georradar, por una parte, la posibilidad de observar en los registros con más facilidad la onda reflejada, mientras que por otro lado la penetración del método disminuye y las reflexiones producidas en contrastes posteriores son de menor amplitud, ya que el porcentaje de energía refractada es menor, lo que contribuye a que la amplitud de la onda en posteriores reflexiones sea menor.

Cuando el cociente se realiza con amplitudes en lugar de con energía se obtienen las siguientes expresiones para el coeficiente de reflexión en amplitud, que se suele representar como r y para el coeficiente de transmisión en amplitud, normalmente representado como t :

$$r = \frac{A_r}{A_i} \tag{4.31}$$
$$t = \frac{A_t}{A_i}$$

Donde A_i es la amplitud de la onda incidente en la discontinuidad, A_r la amplitud de la onda reflejada y A_t la amplitud de la onda refractada o transmitida.

Los coeficientes de reflexión y transmisión están relacionados entre sí de la siguiente manera (Lorenzo, 1996):

$$R = r^2 \tag{4.32}$$
$$T = t^2$$

4.2.5.2. 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:

$$R_{1-2} = \frac{\sqrt{\hat{\epsilon}_2} - \sqrt{\hat{\epsilon}_1}}{\sqrt{\hat{\epsilon}_1} + \sqrt{\hat{\epsilon}_2}} \quad (4.33)$$

$$T_{1-2} = \frac{2\sqrt{\hat{\epsilon}_1}}{\sqrt{\hat{\epsilon}_1} + \sqrt{\hat{\epsilon}_2}} \quad (4.34)$$

4.2.6. Atenuación

La atenuación de la energía de una onda electromagnética depende de las características del medio por el que se propaga. Este aspecto se ha analizado en diversas ocasiones de forma teórica (Zonghou y Tripp, 1997; Carcione, 1996; Turner y Siggins, 1994) y mediante simulaciones (Xu y McMechan, 1997; Carcione, 1996; Casper y Kung, 1996).

El factor de atenuación (α), cuyas unidades de medida son Np/m, determina el porcentaje de disminución de la amplitud de la onda al incrementar la distancia respecto del punto donde se ha emitido (Cai y McMechan, 1995; García, 1997):

$$\alpha = \frac{\omega}{c} \text{Im} \sqrt{\epsilon_r \mu_r} \quad (4.35)$$

El valor de la atenuación está en función de la componente imaginaria de la permitividad dieléctrica relativa y de la permeabilidad magnética relativa del medio.

El grado de atenuación de una onda electromagnética queda definido como el cociente entre las amplitudes de las variaciones de la

onda entre dos puntos separados una distancia r . Dicha relación se expresa del siguiente modo:

$$\frac{\vec{E}_0}{\vec{E}(\vec{r})} = e^{\alpha \vec{r}} \quad (4.36)$$

El grado de atenuación se puede medir en nepers si se consideran logaritmos neperianos en la expresión anterior:

$$L = \ln\left(\frac{\vec{E}_0}{\vec{E}(\vec{r})}\right) = \alpha \vec{r} \quad (4.37)$$

donde la atenuación específica está constituida por el grado de atenuación de una onda por unidad de longitud:

$$\Gamma = \frac{1}{\vec{r}} L = 8.686\alpha = \frac{54.6}{\lambda} \text{Im} \sqrt{\epsilon_r \mu_r} \quad (4.38)$$

A partir de este parámetro, se puede calcular el grado de decaimiento de la amplitud de una onda mientras ésta se propaga por el medio analizado.

4.2.7. 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):

$$d = \frac{1}{\alpha} \quad (4.39)$$

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.

4.3. INSTRUMENTACIÓN DE GEORRADAR

El georradar tiene un funcionamiento similar a cualquier otro sistema de radar. Se compone de unas antenas emisora y receptora (monoestáticas o biestáticas de diversas frecuencias) y una unidad central que se encarga del control de la radiación y del almacenamiento de registros.

4.3.1. Unidad Central y Accesorios

4.3.1.1. Unidad central

En un equipo de georradar, el componente encargado de coordinar y controlar las antenas, los demás elementos y accesorios y de la señal emitida es la unidad central –también denominada unidad de control-. Dicha unidad central también coordina el tratamiento y almacenamiento de la señal recibida mediante algún tipo de soporte, que puede ser magnético, fotográfico o en papel. Este componente de control lleva incorporado un programa informático a través del cual se lleva a cabo el procesado básico de la señal. Además, en determinadas ocasiones puede incorporar diversas utilidades que permiten intervenir 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.

La visualización de la señal adquirida en campo es posible gracias a la conexión de la unidad central a un monitor. 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. Para visualizar el registro de datos se puede 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). Cuando se trabaja con radares sencillos, la señal registrada sólo se puede visualizar, esto es, no se puede aplicar ningún tipo de tratamiento para optimizar la calidad de la imagen. En general, la unidad central de georradar se puede definir como la unidad de control de los pulsos, de cálculo y de almacenamiento de datos, por lo que en algunos equipos dicha unidad puede tratarse simplemente de un ordenador personal donde se ha instalado el programa adecuado para el control de las antenas y el procesado de señales.

La unidad de control se une a las antenas mediante un cableado que puede ser bien metálico o bien óptico. La fuente de alimentación asociada a la unidad central es de corriente continua (habitualmente, una batería seca de 12 V).

4.3.1.2. Accesorios

El equipo básico de georradar se puede implementar con accesorios diversos, que pueden ser desde un odómetro para obtener distancias con precisión hasta una impresora para tener en campo un registro en papel de las señales detectadas.

Los accesorios empleados para complementar el equipo básico de georradar se pueden clasificar del siguiente modo:

Accesorios para visualización:

- impresoras,
- pantallas,
- software o programas informáticos,

- unidades para el registro de datos en soporte magnético u óptico.

Accesorios para almacenamiento de registros incluye el material informático para la visualización de registros gráficos y traspaso de datos a otros soportes. Se emplean habitualmente tras la toma y adquisición de datos:

- impresoras, plotters, escáneres, ordenadores personales, programas informáticos, etc.

Accesorios para situación de perfiles:

- odómetros,
- marcadores,
- equipos fotográficos,
- material topográfico para el posicionamiento de perfiles: fitas, banderolas, taquímetros, cintas métricas, etc.
- material topográfico para posicionamiento por satélite, sistema GPS,

Accesorios para transporte de equipo y manejo de antenas:

- vehículos,
- pequeño carro o plataforma con ruedas,
- mochilas.
- grúas para acceso a zonas elevadas,
- cuerdas, poleas,
- andamios, etc.

4.3.2. Antenas

Un componente fundamental de los equipos básicos de georradar son las antenas. Las antenas se emplean para dos funciones básicas en la prospección con georradar. Por un lado, emiten la energía que se les suministra mediante pulsos electromagnéticos con la direccionalidad y las características óptimas para la aplicación asignada. Al emplear antenas para prospección de medios lo más adecuado es que la energía

emitida tenga una única dirección. Así, al tener mayor densidad de energía focalizada el medio estudiado, será más fácil detectar los objetos situados a mayor profundidad, pues se eliminará gran parte del ruido provocado por reflexiones de objetos ubicados en los alrededores. Por otro lado, las antenas recogen la energía reflejada por las discontinuidades electromagnéticas del medio, al volver hacia la superficie donde se localiza la antena receptora.

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

$$\lambda = \frac{v}{f} \tag{4.40}$$

donde v es la velocidad de propagación de la onda electromagnética en el medio, λ es la longitud de la onda en dicho medio y f es la frecuencia del pulso emitido.

Las antenas que se utilizan en prospección quedan definidas por la frecuencia del pulso de emisión, puesto que la longitud de onda de la energía radiada depende de las características del medio de propagación. De esta manera, una antena puede quedar determinada exclusivamente por la frecuencia central a la que emite la energía y por el ancho de banda de frecuencias en las que emite (Lorenzo, 1994).

Las antenas de georradar suelen consistir en espiras de media onda que funcionan como dipolos. La frecuencia central de la emisión está determinada por la longitud de estas espiras, puesto que la onda emitida en el vacío presenta una longitud doble a la de la espira.

Uno de los parámetros más relevantes de las antenas de georradar es la frecuencia central. Ésta depende del dipolo de la antena y establece el alcance de penetración de la señal de emisión en el medio (rango) y la resolución del registro.

Cada tipo de aplicación o problema requiere un determinado tipo de antena cuyas características sean adecuadas al mismo. El georradar utiliza frecuencias comprendidas entre las microondas y las ondas de radio. Habitualmente, se emplean bandas de frecuencia situadas entre 3 GHz y 10 MHz. Por tanto, se trabaja con bandas de microondas y radiofrecuencias (entre las bandas de HF y UHF). Las antenas de bajas frecuencias alcanzan mayor profundidad de penetración, puesto que poseen una longitud de onda mayor que aquéllas de altas frecuencias y, por consiguiente, la resolución obtenida es menor.

Para estudios de georradar se realiza otra diferenciación entre antenas, atendiendo a si se trata de una única antena o de dos. Se distingue entre antenas monoestáticas (son a la vez emisoras y receptoras de la energía.) y biestáticas (se componen de dos módulos separados).

5 APLICACIÓN DEL GEORRADAR: ESTUDIO DEL SUBSUELO EN EL PATRIMONIO RELIGIOSO

El patrimonio cultural habitualmente se asocia con edificios o conjuntos monumentales que destacan por su singularidad y valor arquitectónico. No obstante, el patrimonio arquitectónico religioso, es decir, las iglesias de pueblos o barrios, poseen un significativo y elevado valor patrimonial, y en muchos casos sentimental, independientemente de su singularidad arquitectónica o constructiva. Este tipo de edificios han acogido y acogen un sinnúmero de vivencias religiosas, familiares y sociales de nuestro entorno. Es por ello que constituyen nuestro patrimonio más cercano y merecen especial atención para su estudio, puesta en valor y salvaguarda.

En este capítulo, se presenta la aplicación del georradar en el ámbito del patrimonio arquitectónico religioso. De esta manera, se muestra el alcance y las posibilidades de la mencionada técnica del georradar, que se caracteriza por ser la de mayor resolución dentro de

los métodos geofísicos no invasivos. Diversas iglesias de la Comunidad Valenciana se toman como caso de estudio para el desarrollo de dicho análisis. Las iglesias objeto de estudio son (Figura 5.1):

1. Iglesia de Nuestra Señora del Don de Alfafar.
2. Iglesia de Nuestra Señora de la Asunción de Ares del Maestre.
3. Iglesia de San Miguel Arcángel de Jalance.
4. Iglesia de San Pedro de Paterna.
5. Iglesia de Nuestra Señora del Socorro de Peñíscola.
6. Iglesia de Santiago Apóstol de la Pobl de Vallbona.
7. Iglesia del Sagrado Corazón de Jesús de Valencia.
8. Iglesia de San Juan del Hospital de Valencia.
9. Cripta del Monasterio de San Miguel de los Reyes de Valencia.
10. Iglesia Arciprestal de Santiago de Villena.



Figura 5.1. Localización de las iglesias objeto de estudio.

Los principales objetivos del presente estudio de diferentes ejemplos del patrimonio arquitectónico religioso de la Comunidad Valenciana son:

- Detectar y analizar las estructuras subterráneas, estratos culturales y/o lesiones presentes en el subsuelo de los edificios de carácter religioso analizados.
- Interpretar y definir las anomalías existentes en subsuelo de las construcciones religiosas.
- Sistematizar el análisis y la interpretación de los resultados mediante la modelización de las anomalías de acuerdo con una codificación de señales establecida en el presente trabajo de investigación.

Con el fin de lograr estos objetivos, cada una de las iglesias se estudia de forma individualizada. La metodología de estudio empleada consiste en realizar un estudio del subsuelo de la iglesia con un equipo de georradar SIR-3000 y unas antenas de frecuencia central de 100 MHz, 200 MHz y 400 MHz (Figura 5.2). El procesado de datos se ha realizado con el programa informático RADAN. Principalmente, se han tomado datos del subsuelo en las zonas del altar mayor y la nave central, aunque dependiendo del caso se ha incluido también otras áreas de la iglesia o del exterior de la misma.

Para ello, el estudio se ha llevado a cabo mediante la realización de perfiles transversales y longitudinales, creando una malla que ha permitido obtener modelos tridimensionales de los datos del georradar. En general, se ha alcanzado una profundidad máxima de penetración en el subsuelo de unos 2,5 – 3 m. con el empleo de la antena de 400 MHz, unos 5 - 6 m. al aplicar la antena de 200 MHz y unos 8 – 10 m. utilizando la antena de 100 MHz.

En cada caso, la información y resultados obtenidos se presenta siguiendo los apartados que se enumeran a continuación:

- 1) Descripción del edificio.
- 2) Geología.
- 3) Materiales y metodología.

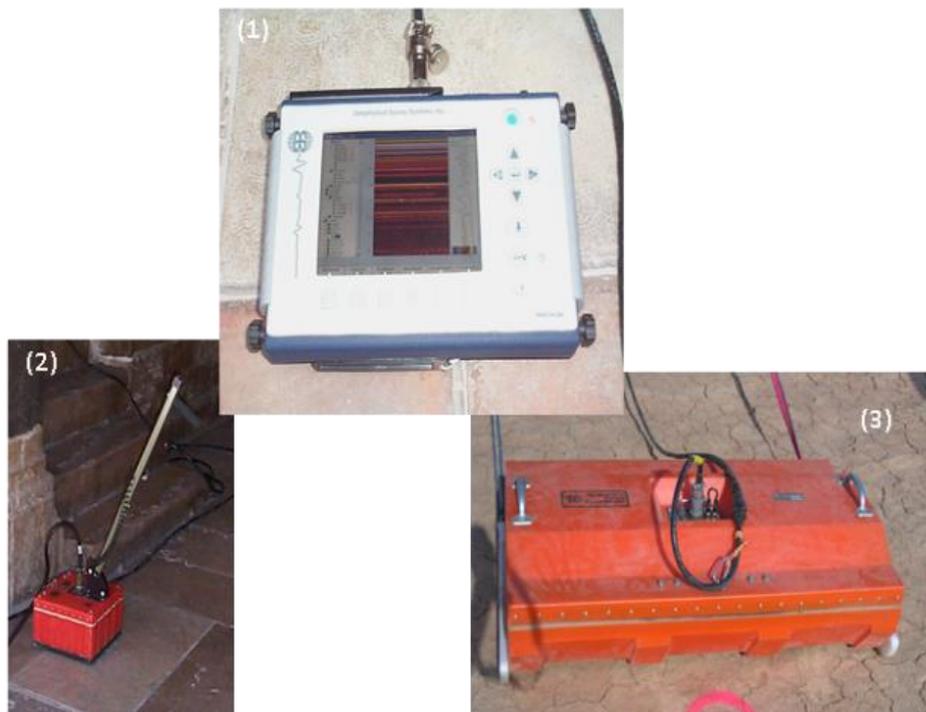


Figura 5.2. Equipo de georradar empleado en este estudio para la prospección del subsuelo de las iglesias: (1) Unidad central SIR-3000, (2) Antena de 400 MHz, (3) Antena de 100 MHz.

- 4) Resultados del estudio de georradar.
- 5) Modelización de los resultados en 2D.
- 6) Modelización de los resultados en 3D.

Los resultados de la investigación se han obtenido mediante la interpretación de las imágenes (radargramas y modelos tridimensionales) que se derivan del estudio con la técnica del georradar. En el presente apartado no se incidirá en el procesado y filtrado de datos con las ecuaciones descritas en el capítulo anterior, sino que se expondrá la interpretación de los resultados de georradar adaptada para técnicos especialistas de la construcción y el patrimonio arquitectónico, con el fin de mostrar la potencialidad presente y futura en este ámbito.

Los enterramientos humanos han sido una práctica muy extendida a lo largo de la historia. Pueden encontrarse en diferentes medios y condiciones: cementerios tradicionales, fosas comunes, enterramientos prehistóricos y, también, en nichos, tumbas, criptas o sepulcros en el subsuelo de edificios religiosos como iglesias o ermitas.

La técnica del georradar permite detectar una amplia variedad de enterramientos. A pesar de que la toma de datos con georradar resulta relativamente sencilla, debido a que el suelo de las iglesias es plano y sin grandes obstáculos que dificulten el proceso, las reflexiones creadas por los diferentes tipos de enterramientos son numerosas. Asimismo, los resultados obtenidos con la técnica del georradar pueden ser difíciles de interpretar. En este sentido, tiene gran influencia el tipo de terreno sobre el que han sido creados estos sepulcros, puesto que generan diferentes respuestas frente a un mismo tipo de enterramiento.

Las anomalías o elementos subterráneos presentes en el subsuelo de los edificios religiosos analizados se clasifican como sigue:

1. Niveles culturales.
2. Niveles geológicos.
 - a. Contactos inclinados.
3. Nivel freático.
4. Estructuras subterráneas:
 - a. Pavimentos.
 - b. Criptas.
 - c. Estructuras abovedadas.
 - d. Tumbas.
 - e. Estructuras lineales: restos murarios.
 - f. Cimentaciones.
 - g. Instalaciones.
 - h. Otras.
5. Patología:
 - a. Humedades.
 - b. Zonas anómalas: zonas removidas, vacíos, anomalías singulares, etc.

5.1. IGLESIA DE NUESTRA SEÑORA DEL DON DE ALFAFAR

5.1.1. Descripción del edificio

El objeto de este estudio es localizar y georreferenciar cavidades subterráneas, mediante la técnica geofísica de georradar, así como detectar otras eventuales estructuras enterradas en la Iglesia de Nuestra Señora del Don, Alfafar (Valencia). La iglesia de Nuestra Señora del Don se localiza en el centro urbano del municipio de Alfafar, próximo a la ciudad de Valencia.

En 1238, muchas mezquitas fueron convertidas en parroquias cuando se instauró el Reino de Valencia, pudiéndose datar el origen de esta iglesia de Alfafar entre los siglos XIII y XIV. Este templo, de estilo gótico, fue construido con estructura de ladrillo, en contraposición a lo habitualmente establecido, es decir, piedras de sillería.

A finales del siglo XVII, la iglesia se desmoronó por causas desconocidas. La actual iglesia se levantó en el lugar del antiguo templo gótico en 1736, y tras 12 años de obras se inauguró en 1748. Esta nueva iglesia se levantó siguiendo el estilo barroco; presenta una planta de cruz latina y posee una nave central, dos claustros laterales, crucero y cúpula central. Tiene una superficie de 672 m², con una longitud de 34,14 m. y 19,68 m. de anchura.



Figura 5.3. Imágenes de la Iglesia de Nuestra Señora del Don de Alfafar: a- Fachada de la iglesia, b- Altar mayor, c- Nave central.

La iglesia fue restaurada en dos ocasiones, en 1918 y 1993. Debido a un incendio producido durante la Guerra Civil Española (1936-1939) gran parte del edificio fue destruido. La reconstrucción y conservación del templo se ha prolongado hasta la actualidad.

5.1.2. Geología

El término municipal de Alfajar pertenece al Sistema Ibérico, y en la zona Sur existen interferencias del Sistema Prebético. Sus características geológicas son bastante homogéneas, describiéndose su estructura como resultado del período Mioceno, durante el cual se produjo una depresión del terreno. Posteriormente se rellenó por un depósito cuaternario procedente de las aportaciones fluviales, dando lugar a una serie de lechos horizontales, tipo margas y arcillas intercaladas con gravas, arenas y cantos rodados (Mapa Geológico de España, MAGNA 50, hoja 722).

5.1.3. Materiales y metodología

La zona objeto de estudio comprendió el área de la nave central y la del altar mayor de la Iglesia de Nuestra Señora de Don. Las mediciones se efectuaron con un equipo de georradar SIR-3000 y una antena de frecuencia central de 400 MHz. El estudio se llevó a cabo mediante la realización de 9 perfiles transversales (P1-P9), 3 longitudinales (P10-P12) (Figura 5.4(c)). Los rangos de registro fueron de 40 ns y 60 ns, alcanzándose una profundidad máxima de penetración en el subsuelo de unos 2.5 m.

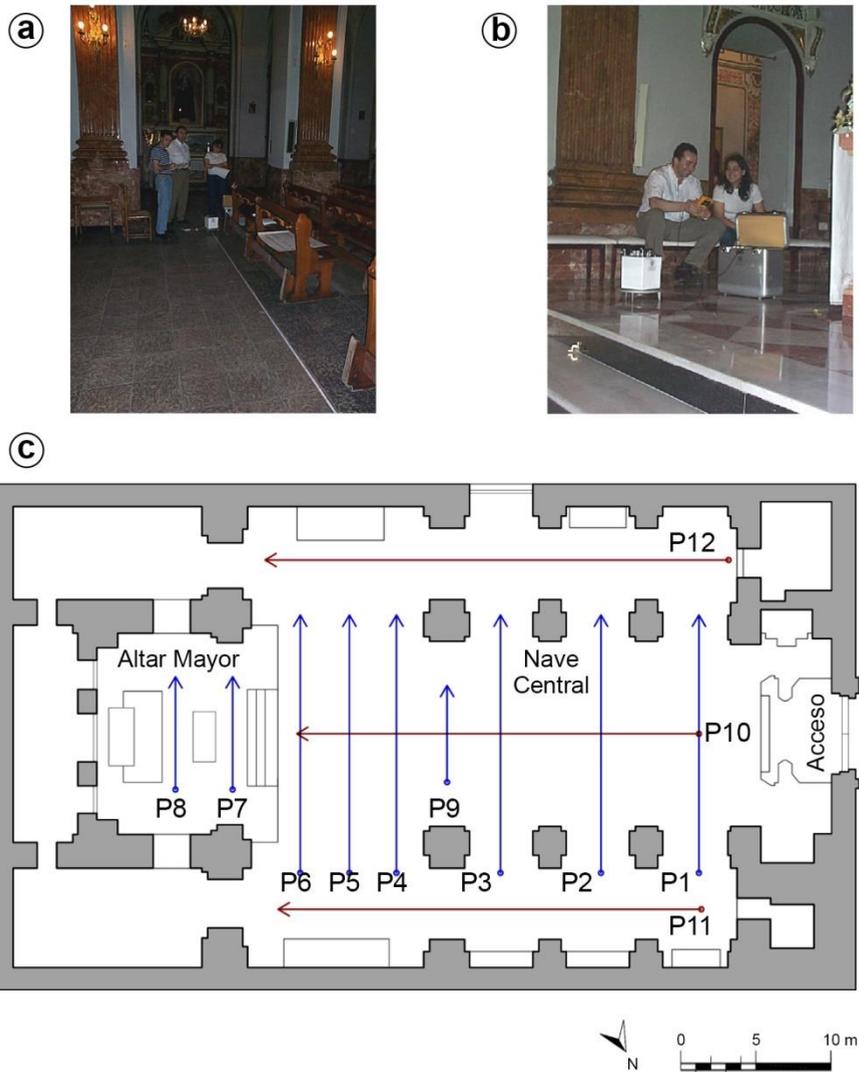


Figura 5.4. a- Equipo de georradar utilizado en este estudio: (1) antena 400 MHz de frecuencia central y (2) unidad central sistema SIR-3000; b- Observación durante la toma del perfil P7, en el altar mayor; c- Distribución de los perfiles tomados con la antena de 400 MHz sobre el plano de planta de la iglesia.

Se realizó una calibración *in situ* para determinar la constante dieléctrica (ϵ) del subsuelo para la determinación de profundidades, obteniéndose un valor $\epsilon = 10$. El procesado de los datos obtenidos mediante georradar se realizó mediante la aplicación de filtros: deconvolución y migración. Tras el procesado de los radargramas, se elaboró un modelo tridimensional (3D) del subsuelo en la nave central de la iglesia.

5.1.4. Resultados

Tras el análisis de los radargramas, se han detectado diferentes tipos de respuestas en el subsuelo de la iglesia. Cada una de dichas señales de respuesta se corresponde con un tipo diferente de estructura subterránea. Los resultados obtenidos en el área estudiada son los siguientes:

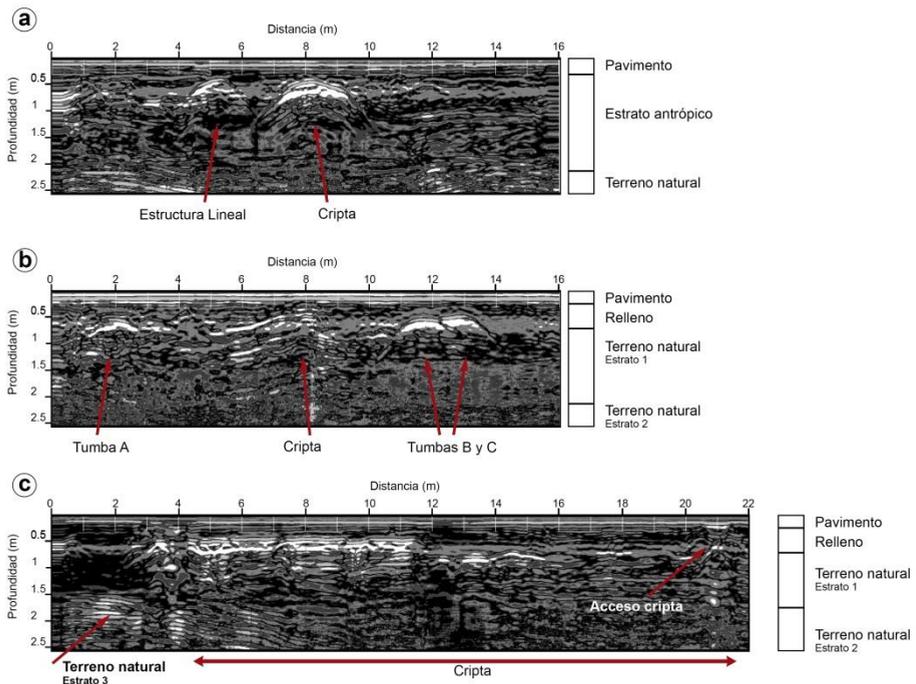


Figura 5.5. Radargramas de los perfiles P1 (a), P6 (b) y P10 (c) tomados en la nave central de la iglesia con la antena de 400 MHz.

1. *Niveles culturales y geológicos*

Dos niveles antrópicos en toda la superficie de la nave central hasta una profundidad de unos 0,70 m. aproximadamente. El primer nivel está conformado por el pavimento, de unos 0,30 m. de espesor; mientras que el segundo nivel está compuesto por una capa de relleno antrópico.

El terreno natural se distingue a partir de los 0,70 m. de profundidad. El primer estrato geológico se sitúa entre los 0,70 m. y los 2,00 m.; a partir de dicha última profundidad se aprecia un segundo estrato geológico.

2. *Cripta*

Un espacio abovedado, situado en el eje central de la iglesia, entre los metros 7,50 y 9,50 del perfil P1 (también en los P2, P3, P4, P5 y P6). Esta estructura abovedada se identifica desde el perfil P1 hasta el perfil P6; y su profundidad media de coronación es de 0,45 m. aproximadamente. No obstante, dicho espacio abovedado se encuentra parcialmente colmatado, y en mayor grado, entre los perfiles P3 y P6, esto es, entre los metros 12 y 20 del perfil P10.

3. *Tumba*

Una estructura enterrada de aproximadamente un metro de extensión, identificada entre los metros 20,50 y 21,50 del perfil P10, se localiza a una profundidad de unos 0,25 m.

4. *Estructuras lineales: restos de muros u otros elementos*

Una primera estructura lineal se identifica entre los metros 4,50 y 5,50 de los perfiles P1, P2, P3 y P4. La profundidad media a la que se detecta dicha estructura lineal es de 0,35 m. aproximadamente.

Una segunda estructura lineal detectada se sitúa entre los metros 1,60 y 2,50 en los perfiles P5 y P6. La presente

estructura lineal se reconoce a partir de unos 0,50 m. de profundidad.

Dos elementos localmente ubicados entre los metros 11,0 y 13,40 del perfil P6 (profundidades 0,50 m y 0,45 m).

5.1.5. Modelización de los resultados en 2D

En las siguientes figuras, se muestra la modelización bidimensional de las estructuras subterráneas detectadas en los radargramas más representativos de la Iglesia de Nuestra Señora del Don de Alfajar. Dicha modelización se ha llevado a cabo a partir de la interpretación de los radargramas, estableciendo los niveles culturales y estratos geológicos, así como asociando cada una de las estructuras subterráneas con una geometría característica. Los niveles, el espacio abovedado y la estructura lineal identificados en el perfil P1 se han modelizado como sigue:

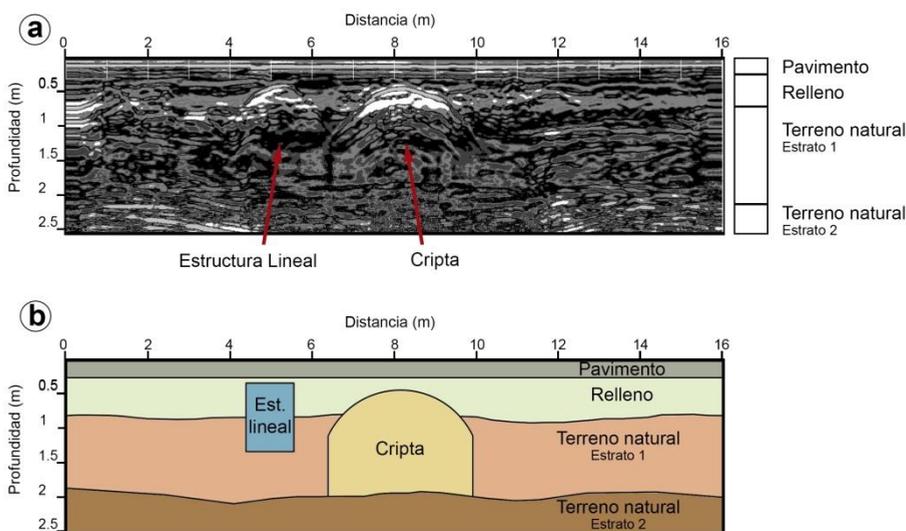


Figura 5.6. a- Interpretación del perfil P1. b- Modelización de los estratos (pavimento, relleno, terreno natural) y estructuras detectadas (estructura lineal y cripta) en el perfil P1.

Las anomalías detectadas en el perfil P6 se modelizan del siguiente modo:

5. Aplicación del georradar: Estudio del subsuelo en el patrimonio religioso

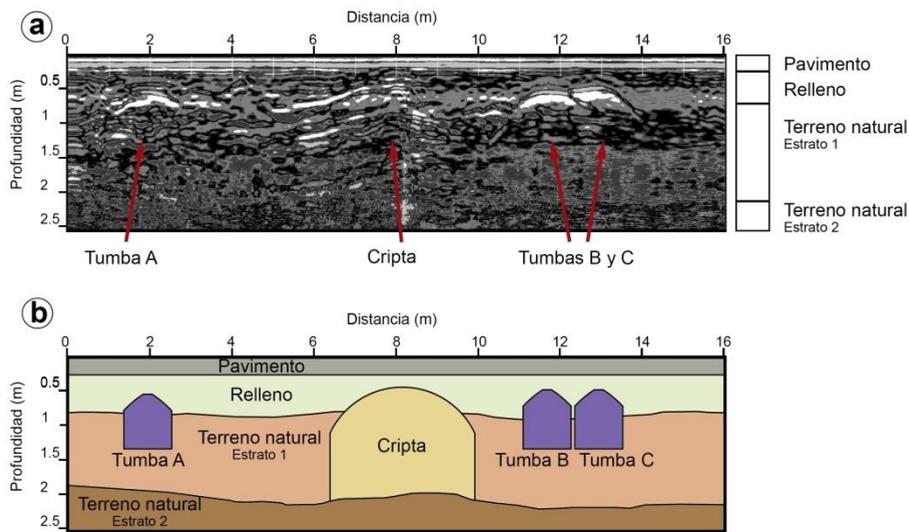


Figura 5.7. a- Interpretación del perfil P6. b- Modelización de los estratos (pavimento, relleno, terreno natural) y estructuras halladas (estructuras lineales y cripta) en el perfil P6.

En el caso del perfil P10, la cripta o espacio abovedado aparece seccionado longitudinalmente. Se distingue una nueva estructura subterránea, una tumba o sepulcro, ubicada en el mismo nivel antrópico que la cripta. En el terreno natural, se observa una inclinación que podría estar asociada a la presencia de diferentes estratos geológicos.

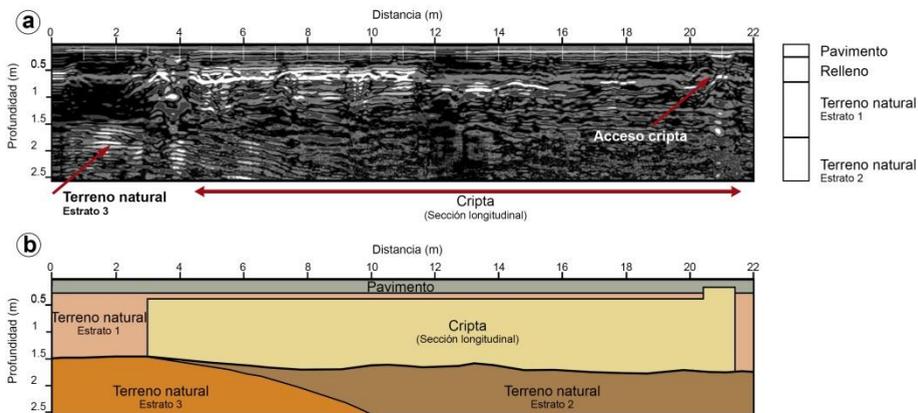


Figura 5.8. a- Interpretación del perfil P10. b- Modelización de los estratos (pavimento, nivel antrópico, terreno natural con inclinación natural del terreno) y estructuras identificadas (tumba y cripta) en el perfil P10.

5.1.6. Modelización de los resultados en 3D

La modelización tridimensional de los datos obtenidos con el georradar se presenta como una herramienta visual que facilita la comprensión de los resultados. Su aplicación permite corroborar las profundidades y dimensiones superficiales definidas a partir de los radargramas.

Asimismo, el análisis tridimensional de los datos de georradar ha permitido, en este caso concreto, delimitar la ubicación exacta de las diferentes estructuras halladas. Del mismo modo, se ha determinado la extensión en superficie de la cripta y los diferentes elementos lineales detectados para su cartografiado en planta, ya que el análisis de los datos en 2D resultaba restrictivo en este aspecto.

A continuación, se presenta la modelización tridimensional y la localización de los elementos subterráneos identificados en la Iglesia de Nuestra Señora del Don de Alfajar.

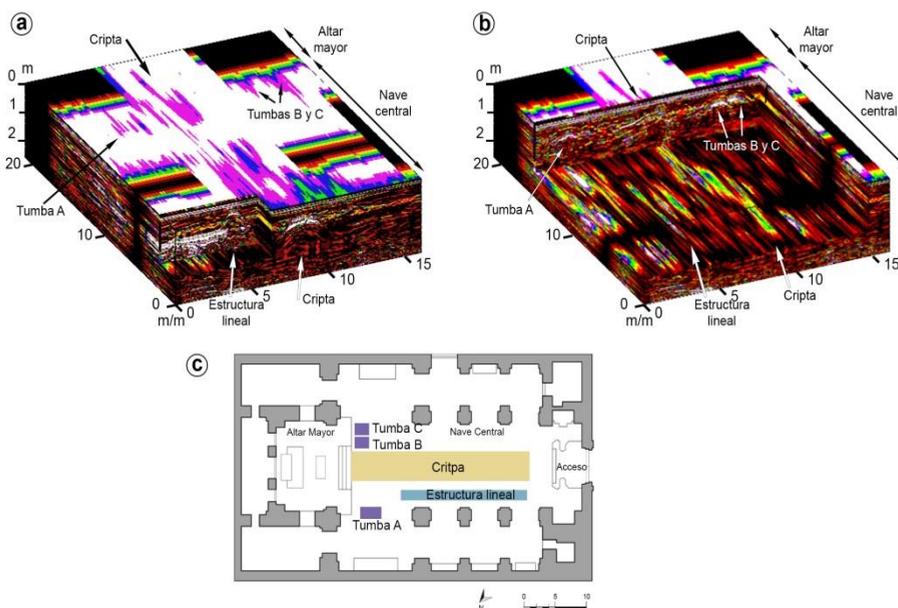


Figura 5.9. a- Modelo tridimensional de los datos de georradar obtenidos en la Iglesia de Nuestra Señora del Don de Alfajar, donde se observa la cota más superficial del subsuelo. b- Modelo tridimensional de los datos de georradar de la iglesia objeto de estudio, donde se muestra una sección horizontal del subsuelo a mayor profundidad. c- Localización en planta de las estructuras detectadas a partir del análisis del modelo 3D de georradar.

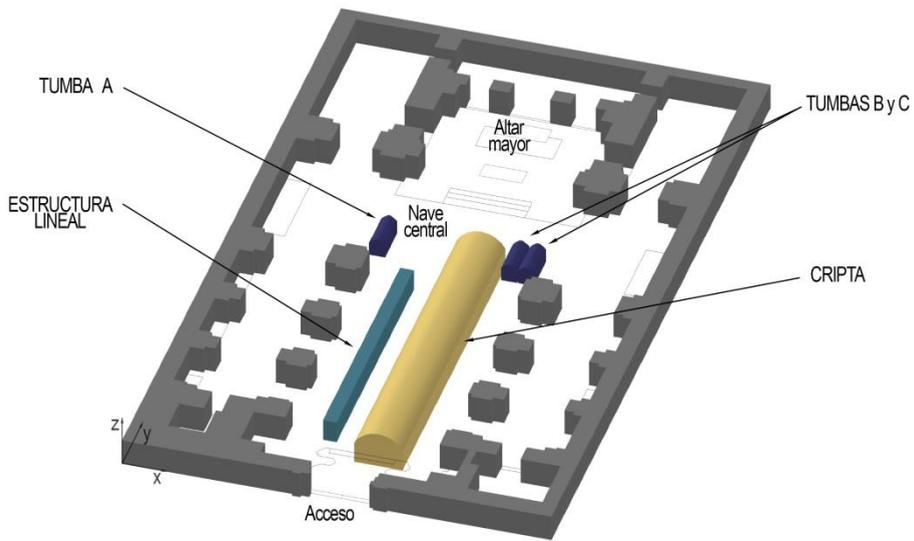


Figura 5.10. Modelización tridimensional de las estructuras subterráneas identificadas en el subsuelo de la Iglesia de Nuestra Señora del Don, en Alfafar.

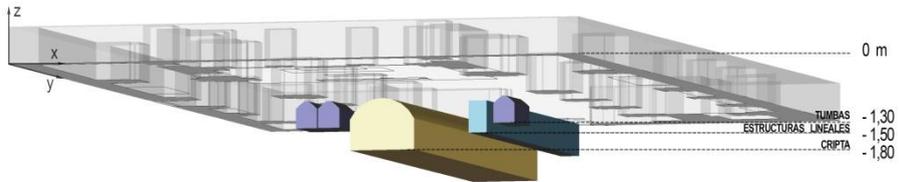


Figura 5.11. Plano contrapicado del subsuelo de la iglesia donde se muestran la modelización de las estructuras detectadas en la prospección geofísica y la profundidad a la que se encuentran las mismas.

5.2. IGLESIA DE NUESTRA SEÑORA DE LA ASUNCIÓN DE ARES DEL MAESTRE

5.2.1. Descripción del edificio

La finalidad de este estudio es analizar el subsuelo en el cual está ubicada la Iglesia de Nuestra Señora de la Asunción de Ares del Maestre. Debido a las particularidades de la ubicación de dicha iglesia objeto de estudio, se plantearon los siguientes objetivos:

- Estudiar la distribución de las capas del subsuelo y la localización del nivel freático.
- Detectar y localizar eventuales estructuras enterradas.

La Iglesia está situada en el centro histórico del pueblo Ares del Maestre (Castellón), en el lado sur de la población junto a los restos del Castillo, enclavado el Maestrazgo.

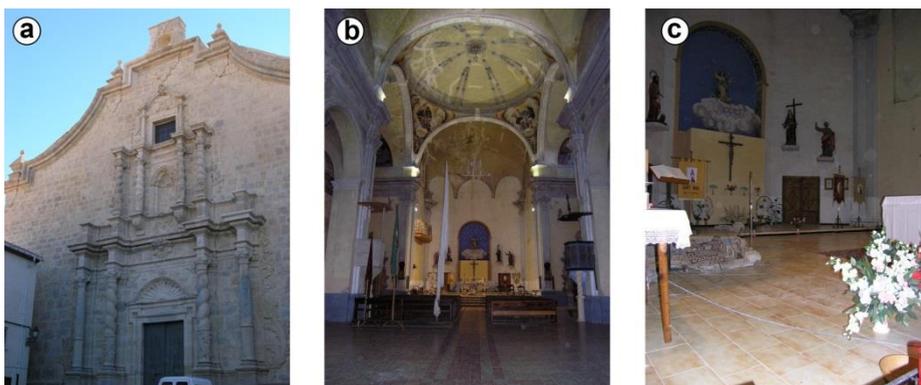


Figura 5.12. Imágenes de la Iglesia de Nuestra Señora de la Asunción de Ares del Maestre: a- Fachada de la iglesia, b- Nave central, c- Altar mayor.

La iglesia actual se construyó sobre los restos de la antigua iglesia románico-gótica data del siglo XV, que sufrió quema y destrucción por las tropas de Felipe V durante la Guerra de Sucesión Española en 1707.

La Iglesia actual de Ares es del siglo XVIII; fue construida entre los años 1717 y 1739, siguiendo el estilo barroco. Ésta se sitúa junto al

campanario, del siglo XIII, el cual sí sobrevivió a la destrucción y quema del templo antiguo. Las dos estructuras dan lugar un singular conjunto arquitectónico, ya que es de los pocos ejemplos en los que la iglesia presenta mayor altura que la torre del campanario.

5.2.2. Geología

La estructura geológica del término de Ares del Maestre se describe como resultado del período Cretácico Inferior. Este enclave se caracteriza geológicamente por la presencia de margas y calizas (Mapa Geológico de España, MAGNA 50, hoja 570).

5.2.3. Materiales y metodología

En este estudio geofísico se ha utilizado un equipo de georradar GSSI modelo SIR-3000. Tras un ensayo in situ se optó por la utilización de una antena de frecuencia central 200 MHz.

Las zonas estudiadas fueron la nave central, naves laterales, capilla de la comunión y altar mayor. Teniendo en cuenta las peculiaridades de ubicación de las mismas, y en consonancia con el objetivo propuesto en este estudio, se proyectaron 19 perfiles de georradar, tanto longitudinales como transversales al eje de la Iglesia. Esto ha permitido investigar con detalle desde 0 hasta unos 5 m de profundidad.

Los datos obtenidos (radargramas) en el área estudiada se han procesado con el programa RADAN. Durante el procesado de los radargramas se han determinado las constantes dieléctricas del subsuelo. Asimismo se han aplicado diversos filtros, deconvolución, y en algunos casos la transformada de Hilbert.

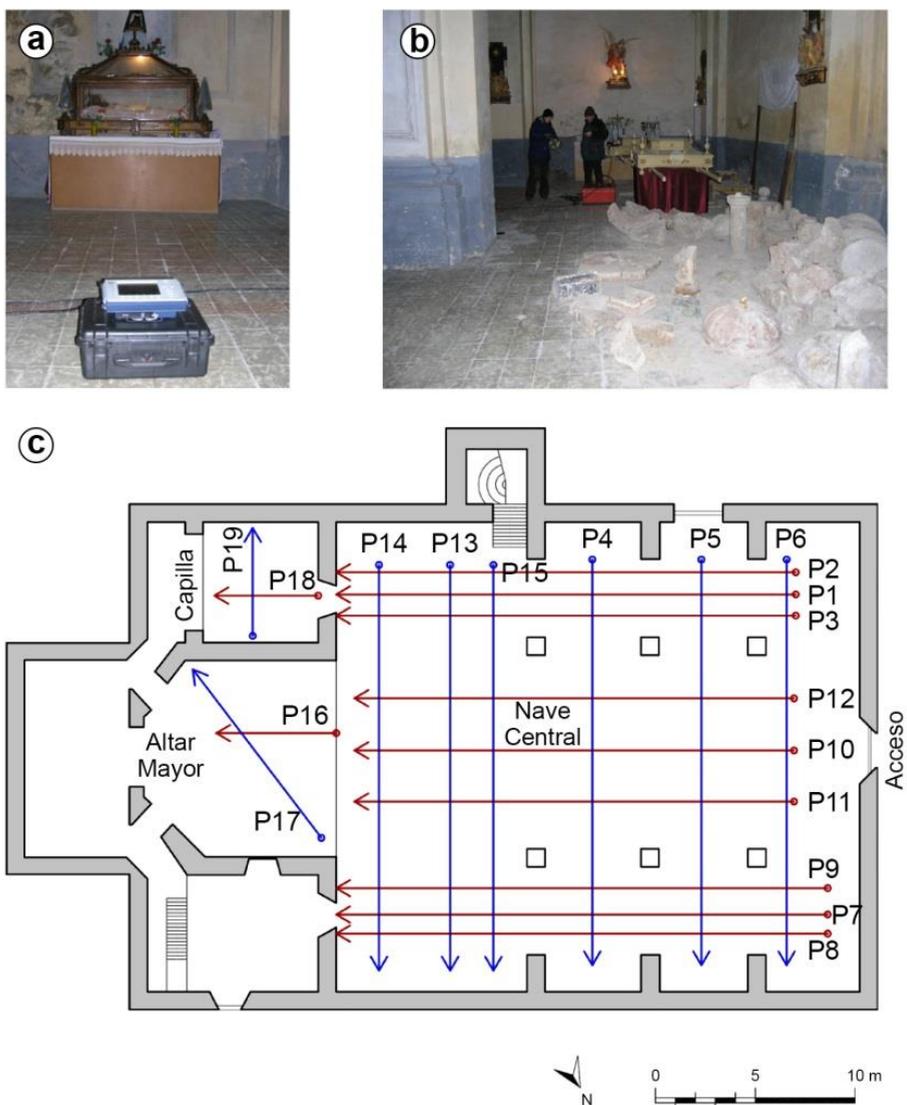


Figura 5.13. a- Unidad central del equipo georradar utilizado en este estudio; b- Toma de datos con antena de 200 MHz; c- Planta de la iglesia con la distribución de los perfiles tomados con el georradar.

5.2.4. Resultados

Los resultados y conclusiones de este estudio se basan necesaria y exclusivamente en los 19 perfiles de georradar realizados, ajustándose en todo momento a los condicionantes de la ubicación de la Iglesia en los que está enmarcada esta investigación geofísica.

La interpretación de los radargramas en la iglesia de Ares del Maestre ha permitido obtener los resultados que se presentan a continuación. Tanto en los perfiles del Altar mayor como en los propios de la Capilla de la Comunión, se observan similares niveles culturales y geológicos a los descritos para los perfiles de las naves de la iglesia. No obstante, los radargramas del altar y la capilla se caracterizan por la ausencia de anomalías significativas, a excepción del significativo grado de humedad presente en el subsuelo de la capilla, a partir de los 3,40 m. de profundidad.

1. *Niveles culturales y geológicos*

A lo largo de los todos perfiles estudiados se diferencian siete niveles:

- El primero corresponde a un nivel de pavimento hasta los 0,25-0,30 m. de profundidad.
- El segundo nivel se trata de un horizonte antrópico, de relleno, cuya profundidad está comprendida entre los 0,25-0,30 m. hasta los 0,90 m.
- El tercero y cuarto horizontes se identifican a partir de los 0,60 m. hasta los 1,95 m. de profundidad, que en algunas zonas de la iglesia se presenta con una inclinación determinada, mientras que en otras se mantiene horizontal.

Contacto inclinado

En la mayor parte de los perfiles se observa un reflector inclinado descendente desde el acceso de la iglesia hacia el Altar mayor. Se corresponde con un contacto geológico entre los estratos primero y segundo del terreno.

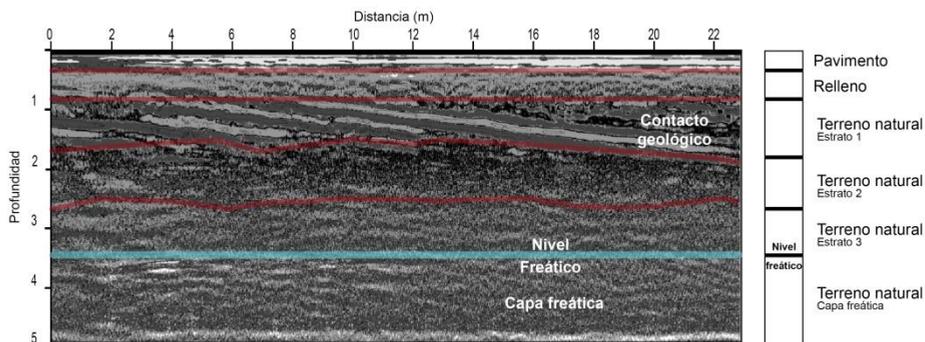


Figura 5.14. Radargrama del perfil P3 tomado en una de las naves laterales de la iglesia donde se identifican claramente los cinco niveles detectados en el subsuelo del templo.

- El quinto, subyacente al anterior, hasta los 2,60 m. de profundidad.
- El sexto, el último registrado, está comprendido entre los 2,60 m. y los 3,40 m. Éste corresponde a un horizonte cuya característica principal es la presencia de un elevado grado de humedad.
- A partir de los 3,40 m. de profundidad se detecta la existencia del nivel freático.

2. Cripta

En los perfiles P12 y P10, entre los metros 16 y 19, se ha detectado un espacio abovedado que tiene correspondencia con la cripta existente en esta zona de la iglesia. Esta misma estructura se detecta también en los perfiles P13 y P15, entre los metros 6 y 9.

3. Tumba

Una anomalía singular en los perfiles P1 y P2 entre los metros 10 y 11 de los perfiles y en el perfil P4 desde el primer metro

hasta los 2,50 m., que podría asociarse a un enterramiento superficial próximo al altar situado en esa nave lateral.

4. Estructuras lineales

En los perfiles P7, P8 y P9, tomados sobre una de las naves laterales, se observa una estructura vertical que puede corresponder a los restos de un muro, entre los metros 2 y 2,4.

5. Patología

- Humedades

A la vista de la configuración de los diferentes niveles detectados el edificio se encuentra ubicado sobre una eventual vertiente de aguas en el subsuelo. Un mayor grado de humedad se detecta en el subsuelo de la Capilla de la Comunión respecto a otras zonas estudiadas de la iglesia.

- Zonas anómalas:

a. Zonas removidas

Entre los metros 6 y 10 de los perfiles P7, P8 y P9, se aprecia una zona removida, en la nave lateral. Esta zona se observa netamente diferenciada en el perfil P5 a partir del metro 17 hasta el final.

b. Vacíos

Un espacio vacío con forma tubular se distingue en los perfiles P7, P8 y P9, desde el inicio de los mismos hasta el metro 2. Asimismo, en los últimos tres metros del perfil P6, aparece nuevamente dicha anomalía, que se corresponde con el existente recinto vacío, presente hasta unos 3,30 m de profundidad.

5. Aplicación del georradar: Estudio del subsuelo en el patrimonio religioso

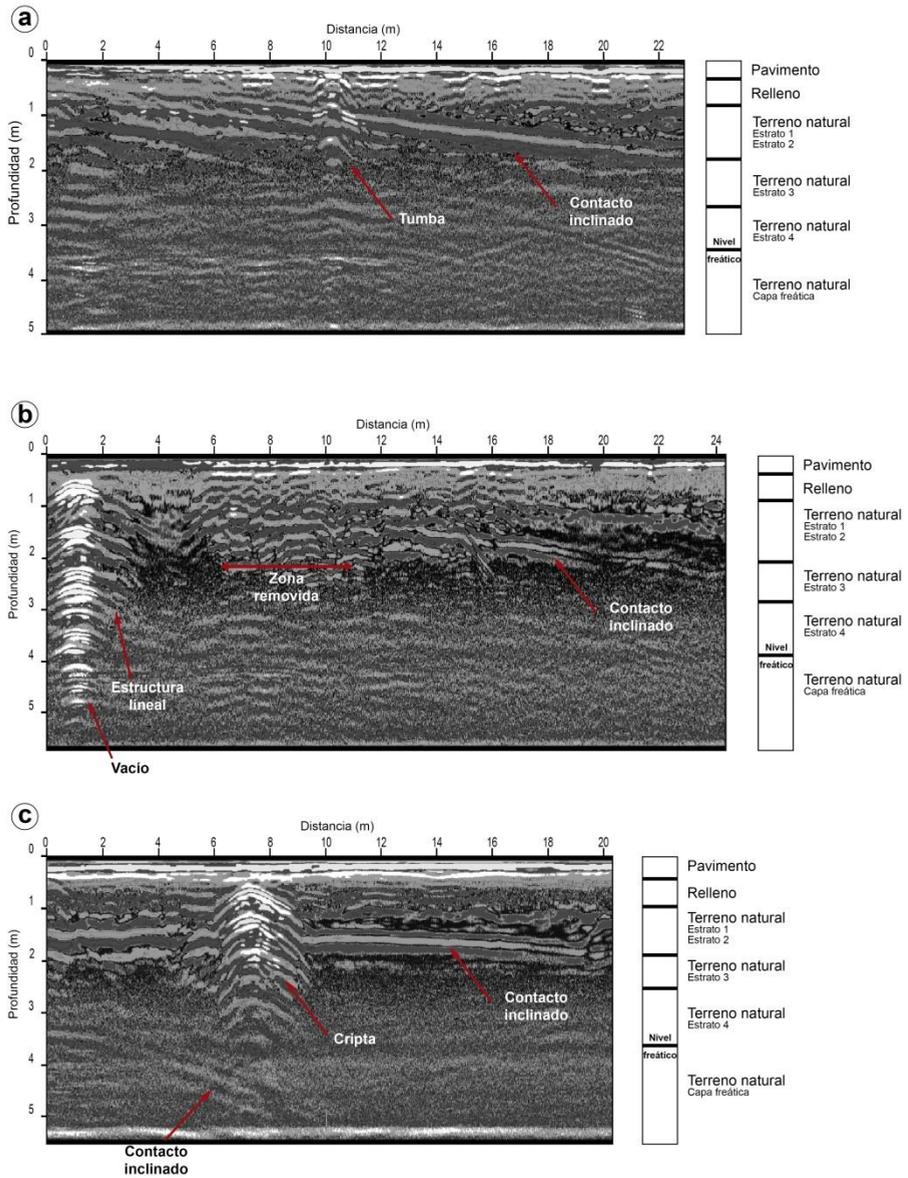


Figura 5.15. Radargramas de los perfiles P1 (a), P8 (b) y P15 (c) tomados en las naves de la iglesia con la antena de 400 MHz.

5.2.5. Modelización de los resultados en 2D

La modelización bidimensional del subsuelo de la Iglesia de Nuestra Señora de la Asunción de Ares del Maestro se basa en la interpretación de los radargramas más representativos del templo, abarcando la nave central y las laterales. A partir de dicha interpretación, se ha establecido la representación gráfica de la modelización bidimensional de los niveles culturales y estratos geológicos, así como de las estructuras subterráneas identificadas y la patología presente en dicho edificio religioso.

La modelización para los niveles y las estructuras detectados en el perfil P1 se muestran en la figura siguiente:

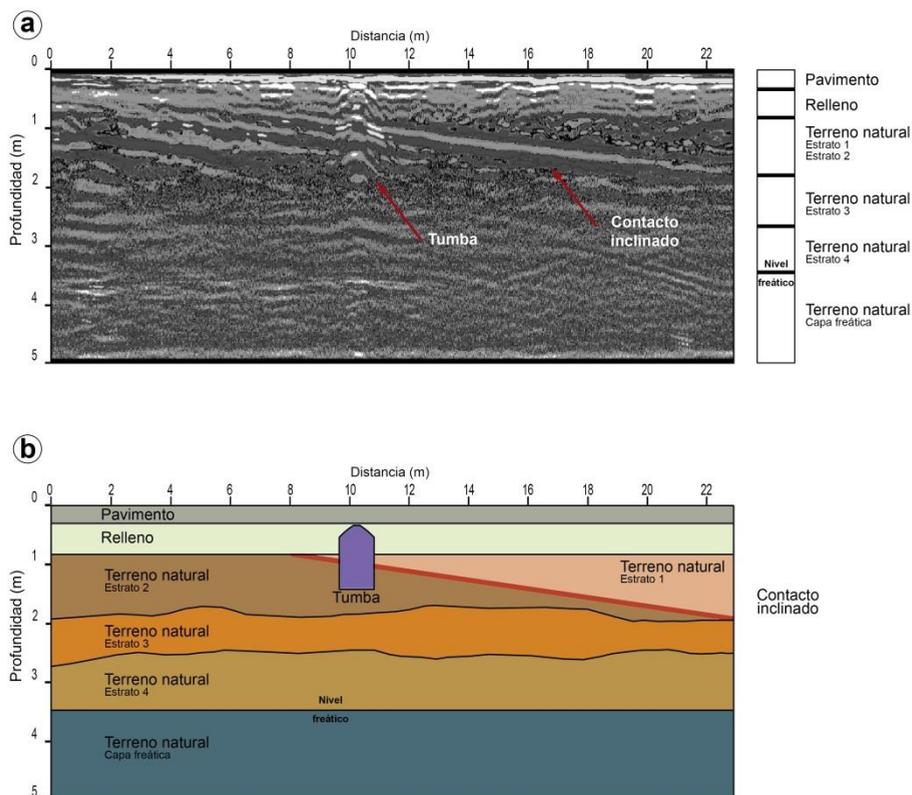


Figura 5.16. a- Interpretación del perfil P1. b- Modelización de los niveles (pavimento, relleno, terreno natural1, terreno natural 2, terreno natural 3, capa freática) y estructuras identificadas (tumba y contacto geológico inclinado) en el perfil P1.

A continuación se muestra la interpretación y modelización de una de las naves laterales. Dicha interpretación incluye la patología presente en la iglesia (vacíos, zonas removidas), además de una estructura lineal junto al espacio vacío y el contacto inclinado identificado en el resto de perfiles de la iglesia.

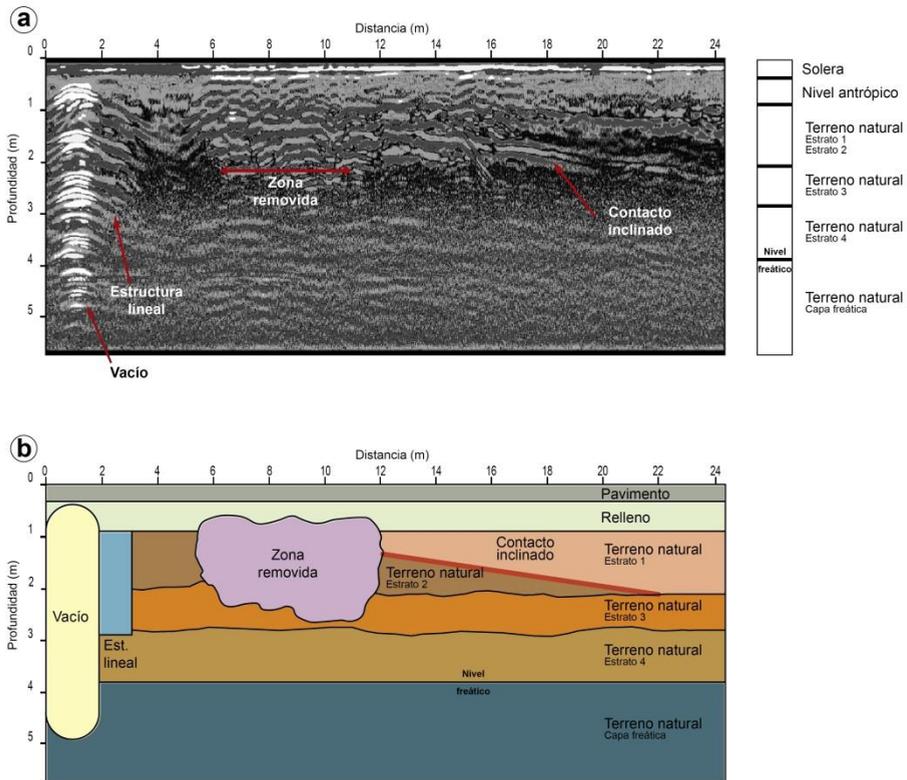


Figura 5.17. a- Interpretación del perfil P8. b- Modelización de los niveles (pavimento, relleno, terreno natural1, terreno natural 2, terreno natural 3, capa freática), estructuras identificadas (estructura lineal y contacto geológico inclinado) y patología (vacío, zona removida) en el perfil P8.

Por último, se muestra un perfil representativo de la nave central, en el que aparece, de nuevo, el contacto geológico inclinado que atraviesa toda la iglesia y la cripta que se ubica a los pies del Altar mayor:

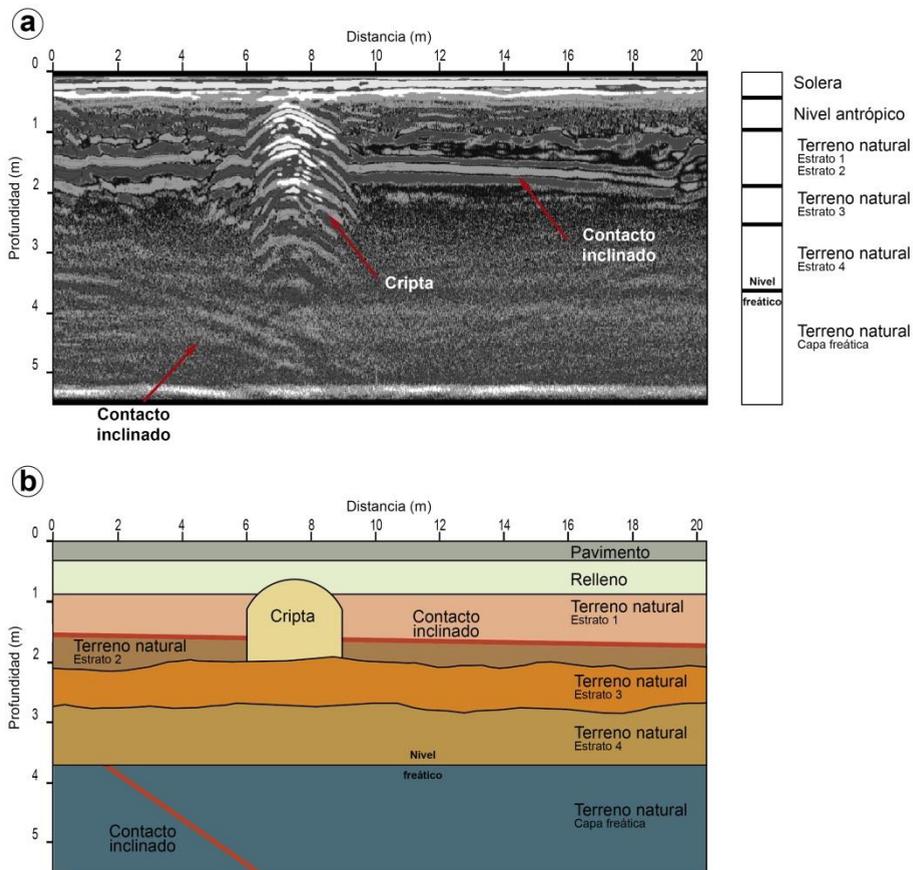


Figura 5.18. a- Interpretación del perfil P15. b- Modelización de los niveles (pavimento, relleno, terreno natural1, terreno natural 2, terreno natural 3, capa freática) y estructuras identificadas (cripta y contacto geológico inclinado) en el perfil P15.

5.2.6. Modelización de los resultados en 3D

Para el caso de la Iglesia de Nuestra Señora de la Asunción de Ares del Maestre, la delimitación exacta de las diferentes estructuras halladas y niveles del subsuelo detectados se ha establecido a partir del análisis bidimensional de los radargramas de georradar.

La extensión en superficie de los elementos enterrados se ha cartografiado en planta tomando como base los datos en 2D, correlacionando los resultados de los perfiles longitudinales y transversales.

La modelización tridimensional en este caso de estudio se presenta en diferentes imágenes. En primer lugar, se presenta la localización de las distintas estructuras en planta; en segundo lugar, la modelización tridimensional de la distribución espacial de las mismas; y, por último, se muestra una modelización de los distintos niveles culturales y estratos geológicos (incluyendo el contacto geológico inclinado) identificados en el subsuelo del templo de Ares del Maestre.

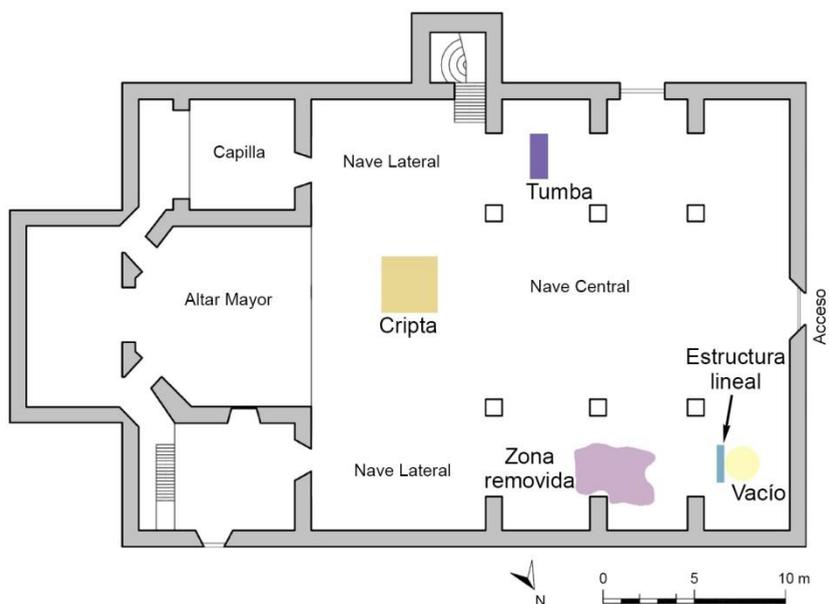


Figura 5.19. Localización en planta de las estructuras detectadas a partir del análisis de los radargramas obtenidos mediante georradar.

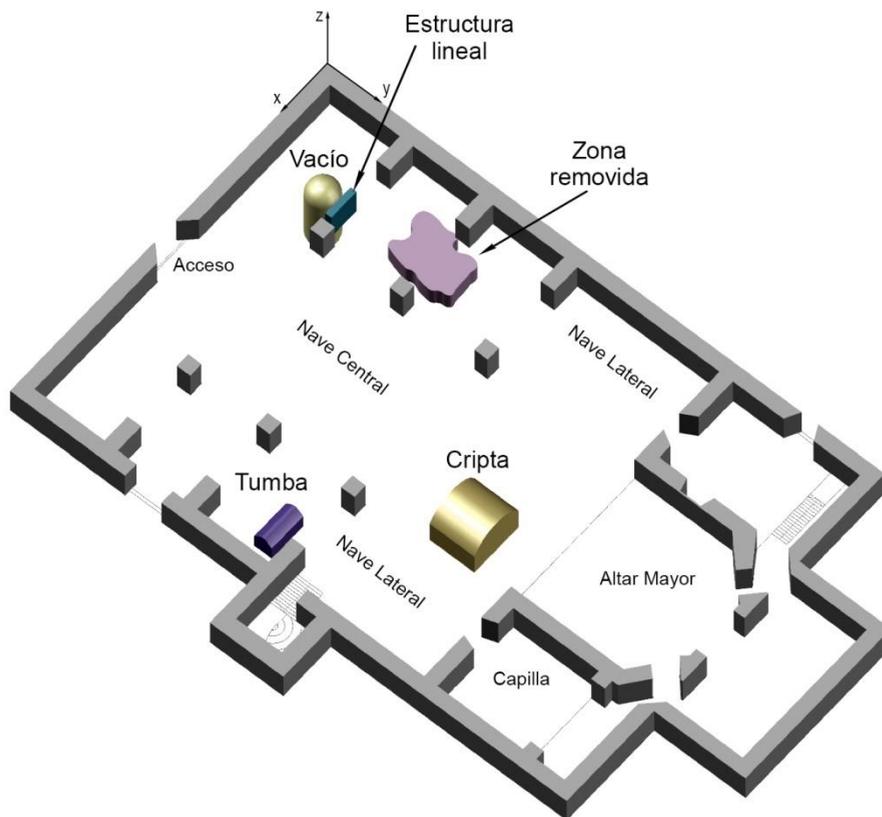


Figura 5.20. Modelización tridimensional de las estructuras subterráneas identificadas en el subsuelo de la Iglesia de Nuestra Señora de la Asunción de Ares del Maestre.

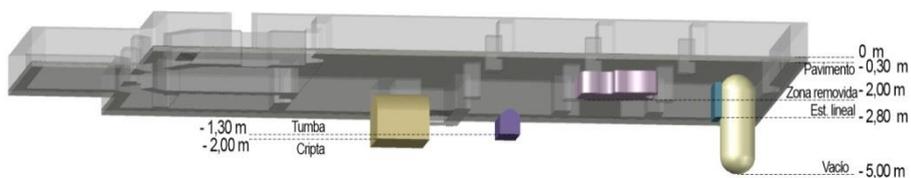


Figura 5.21. Plano contrapicado del subsuelo de la iglesia donde se muestran la modelización del pavimento y de las estructuras detectadas mediante la prospección con georradar y la profundidad a la que se localizan las mismas.

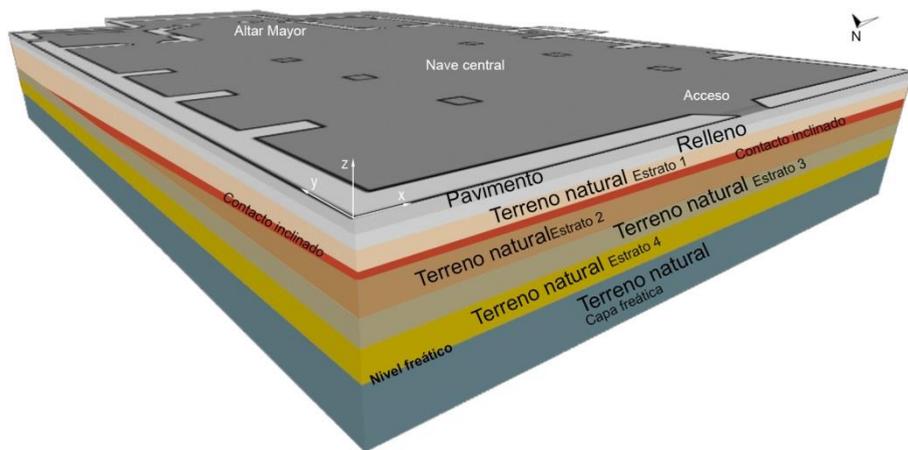


Figura 5.22. Modelización de los niveles culturales y estratos geológicos localizados en el subsuelo de la Iglesia de Nuestra Señora de la Asunción de Ares del Maestre.

5.3. IGLESIA DE SAN MIGUEL ARCÁNGEL DE JALANCE

5.3.1. Descripción del edificio

El objeto del estudio geofísico en la Iglesia de San Miguel Arcángel de Jalance es estudiar el subsuelo en el cual está ubicada la iglesia. Dadas las características del enclave en el cual está localizada dicha iglesia, el estudio se centró en los siguientes objetivos:

- Estudio de la distribución de las capas del subsuelo.
- Localización del nivel freático.
- Detección y localización de eventuales estructuras enterradas.

La Iglesia, de estilo barroco, está situada dentro del casco histórico, en la parte alta del municipio de Jalance (Valencia), el cual está enclavado en la comarca del Valle de Ayora.

La Iglesia Parroquial de San Miguel Arcángel está construida sobre los restos de una antigua mezquita musulmana. Su construcción se inició en el año 1623, concluyéndose más de un siglo después, en 1736.



Figura 5.23. a- y b- Imágenes exteriores de la Iglesia de San Miguel Arcángel de Jalance, c- Altar mayor.

Un estudio previo de este edificio se recoge en el artículo publicado por Alonso Durá *et al.* (2011).

5.3.2. Geología

La Iglesia de San Miguel de Jalance está ubicada sobre formación de yesos triásicos del Keuper característicos en esta zona de la Comunidad Valenciana, donde se intercalan con arcillas rojas y arcillas yesíferas con aragonitos y cuarzos idiomorfos (Mapa Geológico de España, MAGNA 50, hoja 745).

5.3.3. Materiales y metodología

En este estudio geofísico se ha utilizado un equipo de georradar GSSI modelo SIR-3000. Tras un ensayo in situ se optó por la utilización de dos antenas de frecuencias centrales: antena de 100 MHz para estudio de horizontes a mayor profundidad y antena de 400 MHz para estudio con mayor resolución de los primeros metros desde la superficie.

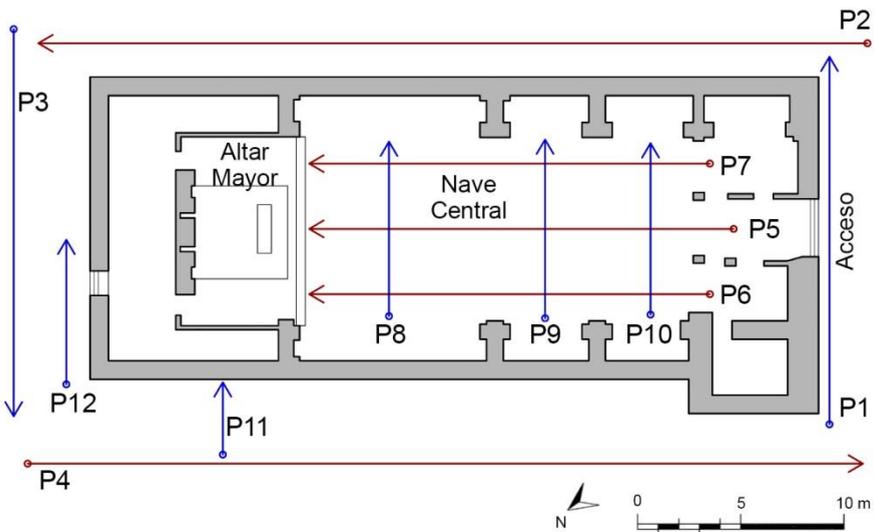


Figura 5.24. Esquema de situación de los perfiles registrados con georradar en el interior y en el exterior de la iglesia.

El empleo de estas antenas ha permitido estudiar con detalle hasta unos 10 m. de profundidad tanto en la nave central y capillas de la iglesia, como en el exterior periférico de la misma. Las longitudes de cada uno de los perfiles se han registrado con un odómetro conectado a la unidad de georradar.

Los radargramas obtenidos en el área estudiada se han procesado con el programa RADAN. Durante el procesado de los radargramas se han determinado las constantes dieléctricas del subsuelo. Asimismo se han aplicado diversos filtros, entre los que destacan el de deconvolución y, en algunos casos, la transformada de Hilbert.

5.3.4. Resultados

Tras el análisis de los radargramas obtenidos en los espacios interiores y exteriores de la Iglesia de San Miguel Arcángel de Jalance, los resultados más relevantes son los siguientes:

1. Niveles culturales y geológicos

A lo largo de los todos perfiles estudiados se diferencian tres niveles:

- El primero corresponde a un nivel de pavimento hasta los 0,30 m. de profundidad aproximadamente.
- El segundo nivel se trata de un horizonte antrópico, de relleno, cuya profundidad está comprendida entre los 0,30 m. y los 0,90 m.
- El tercero es un horizonte, a partir de los 0,60 m. de profundidad, que representa el terreno natural sobre el que se asienta el edificio.

2. Instalaciones

Sistema de calefacción detectado entre los metros 4 y 5,5 del perfil P9, entre los metros 3,5 y 5 del perfil P10, y entre los metros 3 y 4,5 del perfil P8.

3. Patología

- Humedades

A lo largo la mayoría de los perfiles estudiados (tanto los internos como externos de la iglesia) se diferencian tres zonas de humedades en el subsuelo:

- Zona de humedades desde la superficie hasta una profundidad de 1,5 – 2,5 m, metros en todo el perfil.
- Zona de humedades a partir de los 7,5 m.
- Un mayor grado de humedad en el subsuelo en los perfiles P4, P5 y P6, respecto a los demás perfiles, principalmente el perfil P4, entre los 4 y 6 m. de profundidad.

- Estructuras lineales

Una eventual estructura enterrada a partir del metro 7 hasta el final del perfil P8 que abarca la totalidad de la profundidad en el radargrama tomado con la antena de 100 MHz.

Estas zonas de humedades detectadas se han de tener en cuenta a la hora de estudiar posibles movimientos del edificio dado que éste se encuentra ubicado sobre una formación yesífera del Keuper.

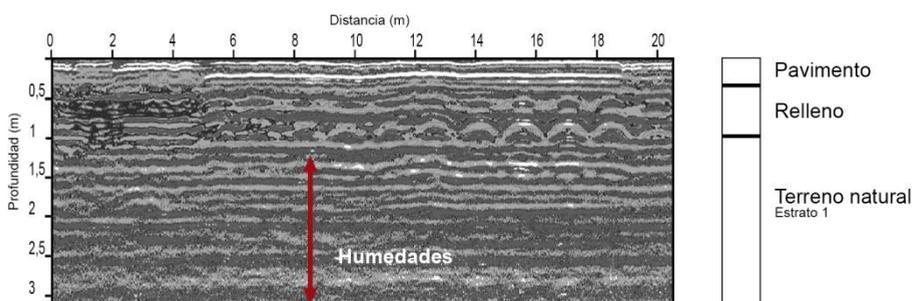


Figura 5.25. Radargrama del perfil P5 (antena de 400 MHz), donde se distingue un nivel de humedad destacable en el subsuelo, a partir de los 1,30 m. de profundidad.

5. Aplicación del georradar: Estudio del subsuelo en el patrimonio religioso

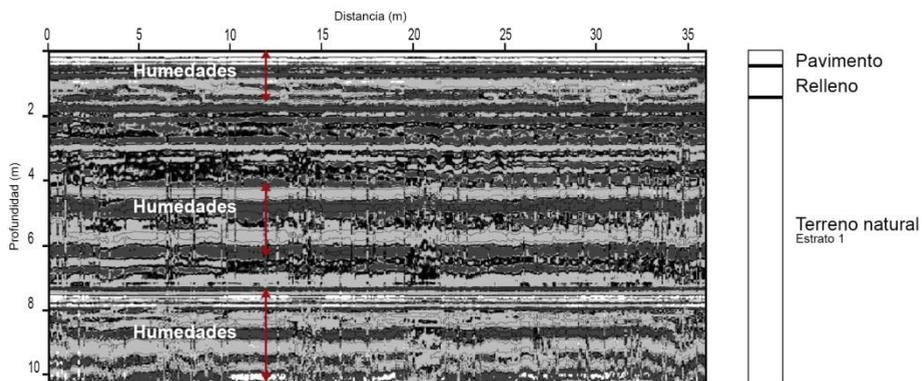


Figura 5.26. Radargrama del perfil P4 (antena de 100 MHz), donde se observa los tres niveles de humedades destacables en el subsuelo.

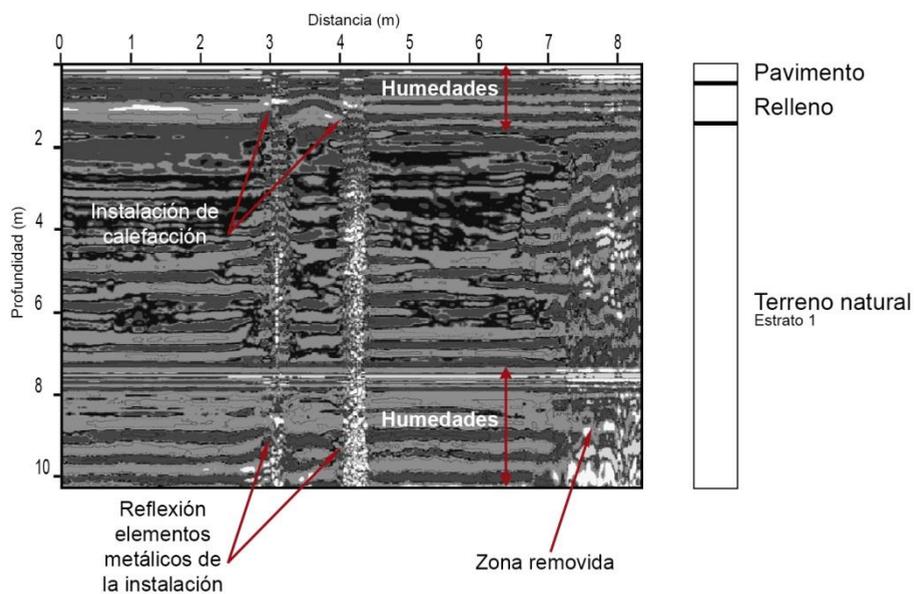


Figura 5.27. Radargrama del perfil P8 (antena de 100 MHz), en el que se identifica un nivel de humedad destacable en el subsuelo a partir de los 7,50 m. de profundidad y una estructura enterrada en los últimos metros del perfil.

5.3.5. Modelización de los resultados en 2D

En el caso de la Iglesia de San Miguel Arcángel de Jalance, para la modelización bidimensional del subsuelo se tomaron dos radargramas como ejemplo representativo de los datos hallados tanto en el espacio interior como en las inmediaciones exteriores de la iglesia. Tomando como base dicha interpretación, se ha establecido la representación gráfica de la modelización bidimensional de las estructuras, los niveles y la patología de humedad existente en el presente edificio.

La modelización del perfil P4 perteneciente al espacio exterior de la iglesia, se muestran en la figura siguiente:

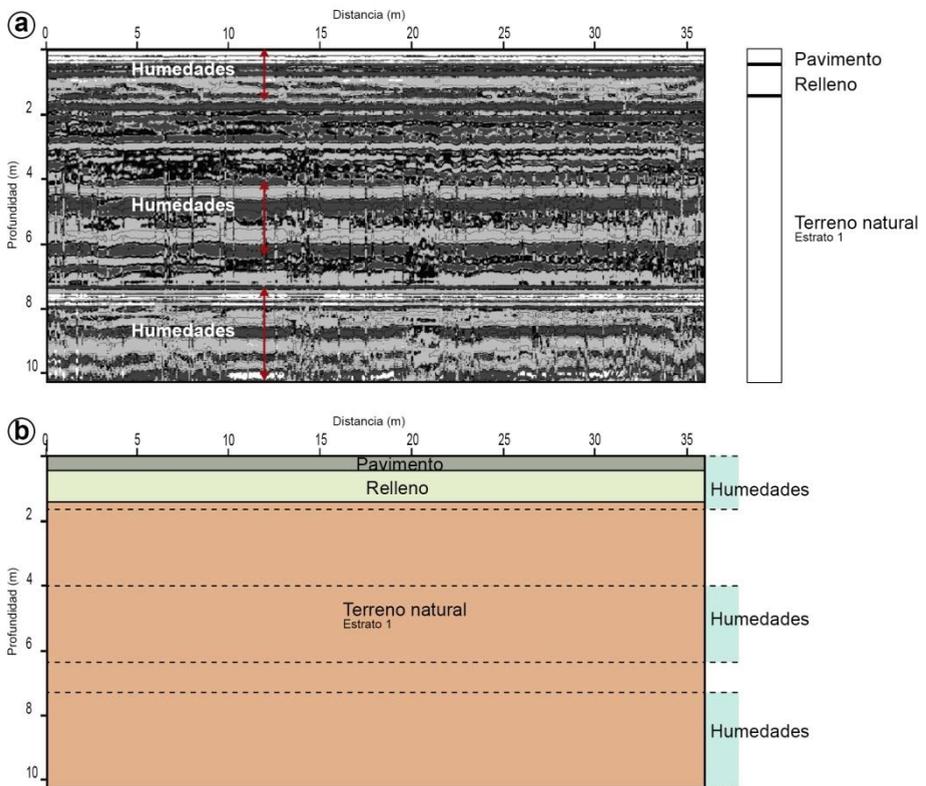


Figura 5.28. a- Interpretación del perfil P4. b- Modelización de los niveles (pavimento, relleno, terreno natural1) y patología detectada (tres niveles de humedades) en el perfil P4.

En la siguiente figura aparece ilustrada la interpretación y modelización de un perfil perteneciente al espacio interior de la iglesia. En el radargrama se observa la patología presente en la iglesia (humedad), además de una instalación que atraviesa longitudinalmente la nave central.

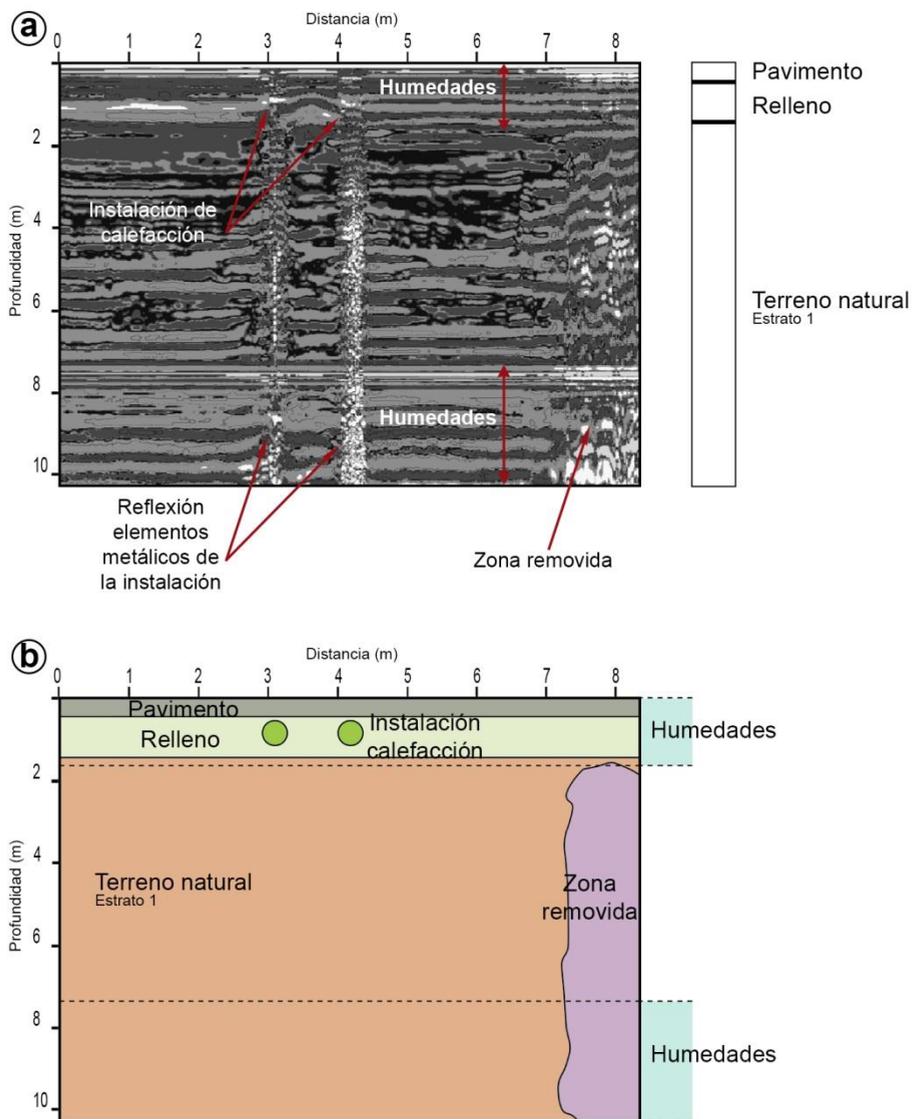


Figura 5.29. a- Interpretación del perfil P8. b- Modelización de los niveles (pavimento, relleno, terreno natural1) y patología detectada (tres niveles de humedades y una zona removida) en el perfil P8.

5.3.6. Modelización de los resultados en 3D

El estudio de los radargramas obtenidos en la nave central de la iglesia objeto de estudio ha permitido detectar dos estructuras subterráneas principales. Por un lado, se localiza una zona removida a los pies del Altar mayor y también se identifica el recorrido de la instalación de calefacción, la cual atraviesa longitudinalmente la nave principal de la iglesia.

De igual manera que en el caso anterior, la definición de la patología, estructuras y niveles del subsuelo detectados se ha determinado tomando como referencia el análisis bidimensional de los perfiles de georradar.

La modelización tridimensional se representa mediante una ilustración de la iglesia en planta; la distribución espacial de las estructuras en una perspectiva cenital; y, además, se muestra la modelización de los distintos niveles culturales y estratos geológicos, así como las profundidades a las que fueron halladas las humedades en el subsuelo del templo de Jalance.



Figura 5.30. Localización en planta de las estructuras detectadas a partir del análisis de los radargramas obtenidos mediante georradar.

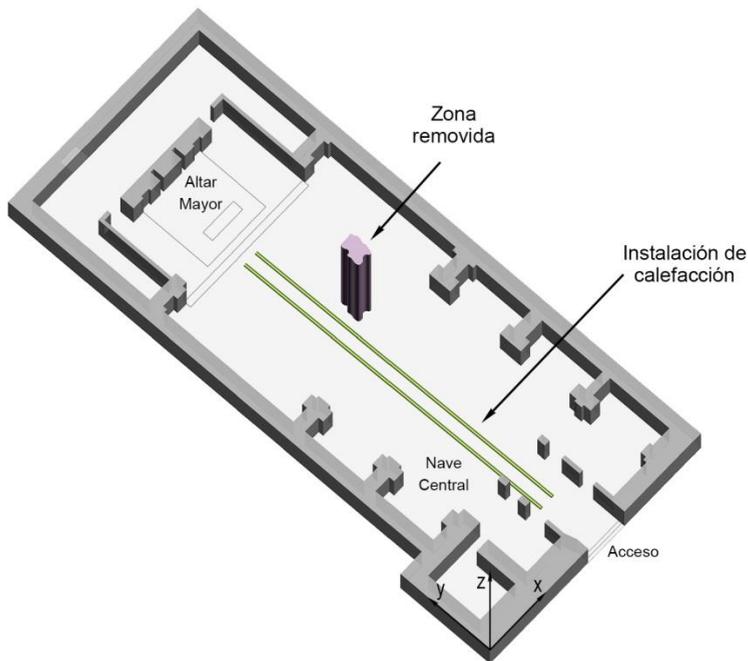


Figura 5.31. Modelización tridimensional de las estructuras subterráneas identificadas en el subsuelo de la Iglesia de Jalance (zona removida e instalación de calefacción).

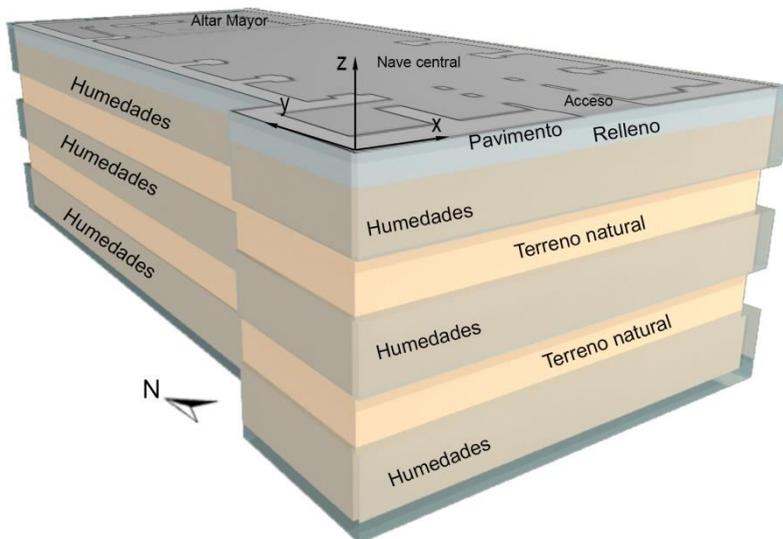


Figura 5.32. Modelización de los niveles culturales, estratos geológicos y humedades localizados en el subsuelo de la Iglesia de San Miguel Arcángel de Jalance.

5.4. IGLESIA DE SAN PEDRO DE PATERNA

5.4.1. Descripción del edificio

El caso práctico de estudio en la Iglesia de San Pedro en Paterna (Valencia) tiene como principal objetivo la aplicación de la técnica geofísica del georradar para la detección de restos arqueológicos. Dada la ubicación de la iglesia dentro del casco histórico del municipio, a través de dicho análisis geofísico, se pretende averiguar si la actual Iglesia de San Pedro está construida sobre una antigua mezquita musulmana. Asimismo, se pretende llevar a cabo un cartografiado del subsuelo con el fin de detectar la causa de las humedades que habían provocado el hundimiento de una porción del pavimento junto a una de las columnas interiores del templo.

Este edificio se sitúa en la plaza del Pueblo, localizada en el núcleo histórico de Paterna. Concretamente, la zona de estudio se encuentra muy próxima a los límites del barrio de las Ollerías Menores, barrio medieval destinado a la producción de cerámica.



Figura 5.33. Imágenes de la Iglesia de San Pedro de Paterna: a- Nave central, b- Fachada principal, c- Altar de la capilla lateral.

El edificio actual data de finales del siglo XVIII y es una ampliación de una edificación anterior realizada por parte de Antonio Gilabert y Lorenzo Martínez. Basándose en el Arreglo Parroquial de

1574, el arzobispo Ribera ordenó el derribo y la construcción de un nuevo templo. Más tarde, hacia 1782, el Comú de la Vila de Paterna encargó a Antonio Gilabert la confección de unos planos para la ampliación de la iglesia. Después de 15 años de litigios se llegó a un acuerdo entre las partes, para lo que se recurrió a los planos de Gilabert, aunque prescindiendo de toda su grandiosidad y modificando la estructura de las naves.

Se trata de un templo formado por una nave única con crucero no emergente y capillas laterales. Su alzado interior se articula sobre la base de la sintaxis clásica de pilastras que enmarcan los arcos que dan paso a las capillas laterales entre contrafuertes.

5.4.2. Geología

El municipio de Paterna se encuentra sobre un afloramiento de materiales terciarios. El Terciario de esta zona se apoya sobre materiales mesozoicos y, en general, está cubierto discordantemente por una potente secuencia de sedimentos cuaternarios.

El tramo inferior del Terciario es predominantemente arenarcilloso con algunos bancos calizos de poco espesor. Por encima del tramo anterior se sitúa un tramo calcáreo sobre el que se asienta la población de Paterna. Se trata de micritas frecuentemente recristalizadas y localmente dolomitizadas, en las que se llega a perder totalmente la textura original. Se suelen presentar con aspecto masivo, con abundantes lentejones margo-arcillosos, de color blanco. Son muy cristalinas y oquerosas, apareciendo frecuentemente carstificadas (Mapa Geológico de España, MAGNA 50, hoja 696).

5.4.3. Materiales y metodología

El estudio geofísico en la Iglesia de San Pedro de Paterna se ha llevado a cabo con el empleo de un equipo de georradar GSSI modelo

SIR3000, con la utilización de una antena de frecuencia central 400 MHz.

Dicho estudio se centra en la nave principal de la iglesia de San Pedro, para lo cual se han trazado 17 perfiles: 3 longitudinales (P1, P2 y P3) y 14 transversales. Se trazaron 12 perfiles transversales (P4-P15) para delimitar la extensión de estructuras en la nave central; mientras que los otros 2 perfiles transversales restantes (P16 y P17) fueron tomados al principio y final del perfil P1 para descartar la existencia de otras estructuras en el subsuelo de la iglesia.

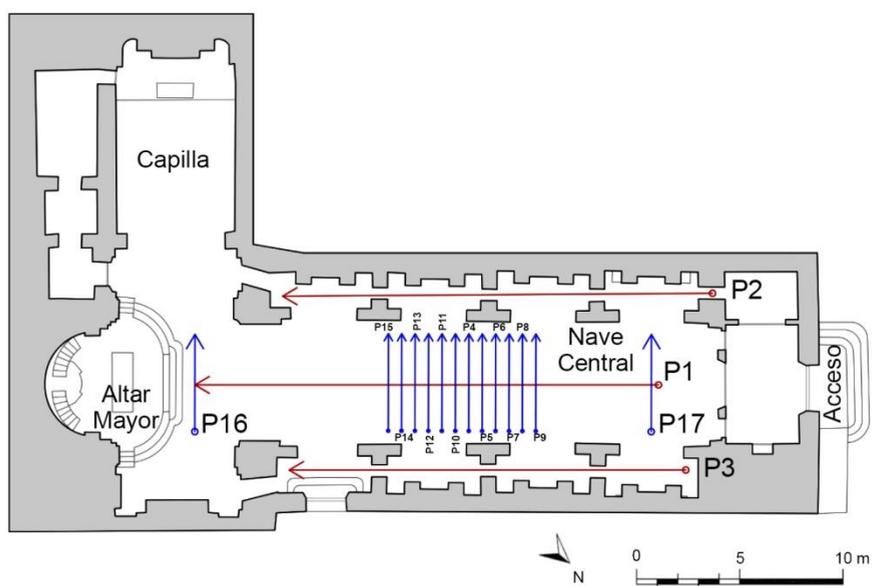


Figura 5.34. a- Unidad Central SIR-3000 de GSSI, b- Antena de 400 MHz, c- Distribución en planta de los perfiles tomados con la técnica del georradar en el interior de la iglesia.

Para el procesado de datos de los radargramas obtenidos en el área de estudio, se ha utilizado el programa RADAN. En este proceso, se ha calculado la constante dieléctrica del subsuelo. Asimismo, se han aplicado varios filtros (como deconvolución o transformada de Hilbert) para un análisis más exhaustivo de los datos.

5.4.4. Resultados

Como resultado del análisis de los radargramas obtenidos en el interior de la Iglesia de San Pedro de Paterna, se han obtenido los siguientes datos:

1. Niveles culturales y geológicos

A lo largo de los todos perfiles analizados se distinguen tres niveles:

- Un primer nivel correspondiente al pavimento. Se identifica hasta una profundidad de 0,25 m.
- Un segundo nivel que está conformado por un horizonte geológico, cuya profundidad está comprendida entre los 0,25 m. y los 1,20 m.
- El tercer nivel está formado por otro horizonte geológico de terreno natural sobre el que se asienta el edificio. Dicho horizonte se localiza a partir de los 1,20 m. de profundidad y presenta una naturaleza distinta al nivel inmediatamente superior.

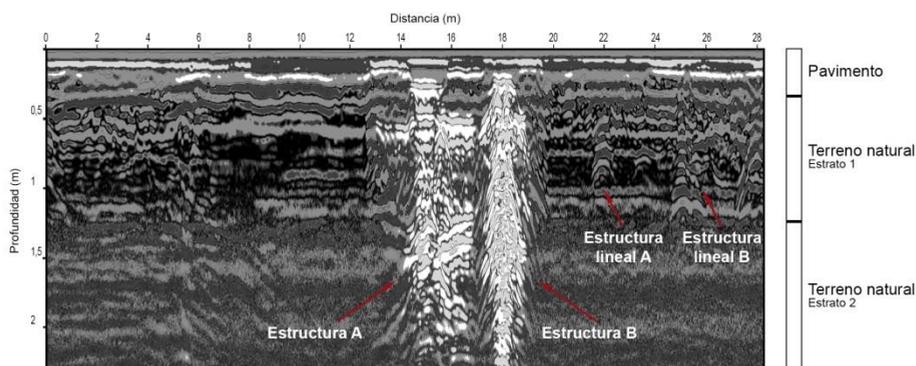


Figura 5.35. Radargrama del perfil P1 tomado con una antena de 400 MHz en el eje central de la nave principal de la iglesia. En el perfil se distingue los tres niveles del subsuelo, además de un contacto inclinado y las estructuras subterráneas (estructuras lineales y otras estructuras de grandes dimensiones).

2. Estructuras

Se distinguen dos estructuras en el eje principal de la nave central. La primera de ellas se registra desde los 13 m. hasta los

17 m. del perfil P1, desde 0,25 m. bajo el suelo de la iglesia extendiéndose hasta una profundidad de 1,75 m. Dicha estructura también se detecta en los perfiles P4, P5, P6, P7, P8 y P10, desde el metro 1,10 hasta el metro 3,50.

La segunda estructura se sitúa entre los 17,20 m. y los 19 m.; aparece también a los 0,25 m. bajo el suelo, pero ésta se extiende hasta una profundidad mayor de 2 m. Asimismo, se observa la presencia esta segunda estructura en los perfiles transversales P11, P12 y P13, desde el metro 1,10 hasta el metro 3.

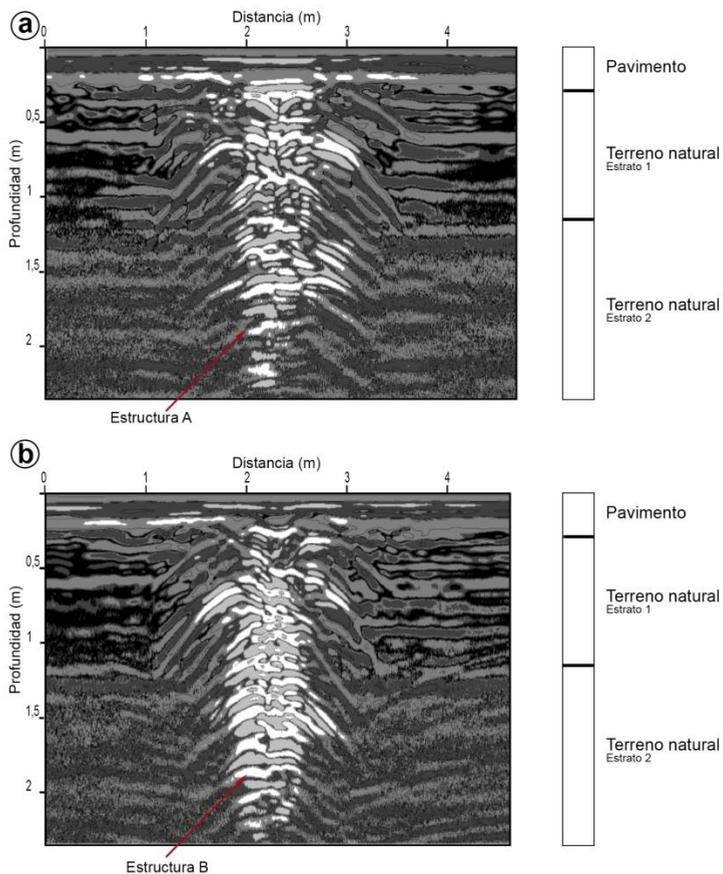


Figura 5.36. Radargramas de los perfiles P5 (a) y P12 (b) tomados con la antena de 400 MHz transversalmente sobre las estructuras A y B, en la nave central de la iglesia.

3. Estructuras lineales

Una serie de estructuras lineales enterradas que se identifican indistintamente en las naves laterales y en la nave central.

En la nave principal se observan dos estructuras lineales, en los metros 22 y 25 del perfil P1.

También en las capillas laterales se perciben estructuras lineales. En el perfil P2, se diferencia una estructura de este tipo en los metros 5 y 6. En el perfil 3, se distinguen una serie de reflexiones a las distancias de 1 m., 5 m., 10 m. y 14 m. desde el inicio del perfil.

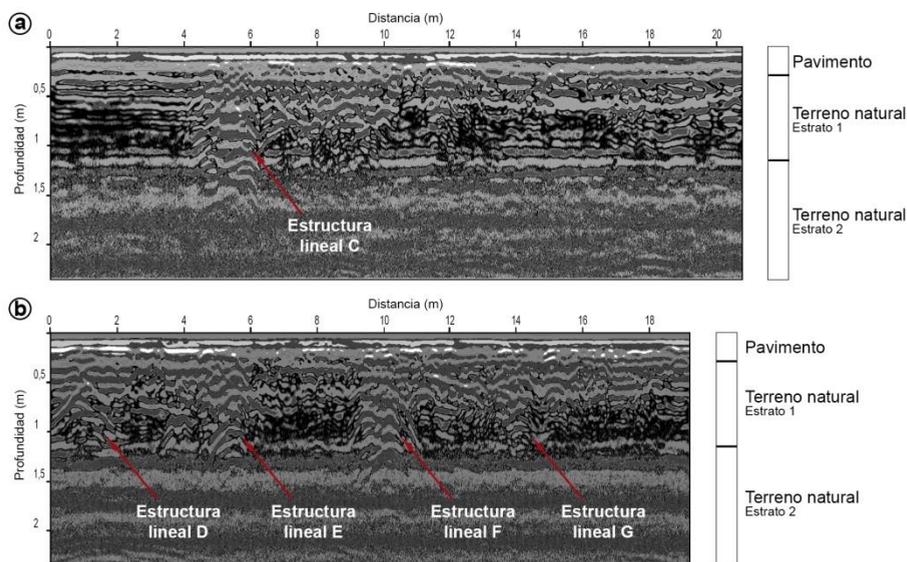


Figura 5.37. Radargramas de los perfiles P2 (a) y P3 (b) tomados con la antena de 400 MHz longitudinalmente sobre las naves laterales de la iglesia.

5.4.5. Modelización de los resultados en 2D

A continuación se muestra la interpretación y modelización bidimensional de una selección de radargramas representativos de la Iglesia de San Pedro de Paterna. La modelización se deriva de la interpretación de los perfiles de georradar. De esta manera, se han

determinado los niveles culturales y estratos geológicos, así como cada una de las estructuras subterráneas.

En el perfil P1, se han modelizado como sigue los niveles, las estructuras lineales y las otras dos estructuras ubicadas en el eje de la nave central de la iglesia:

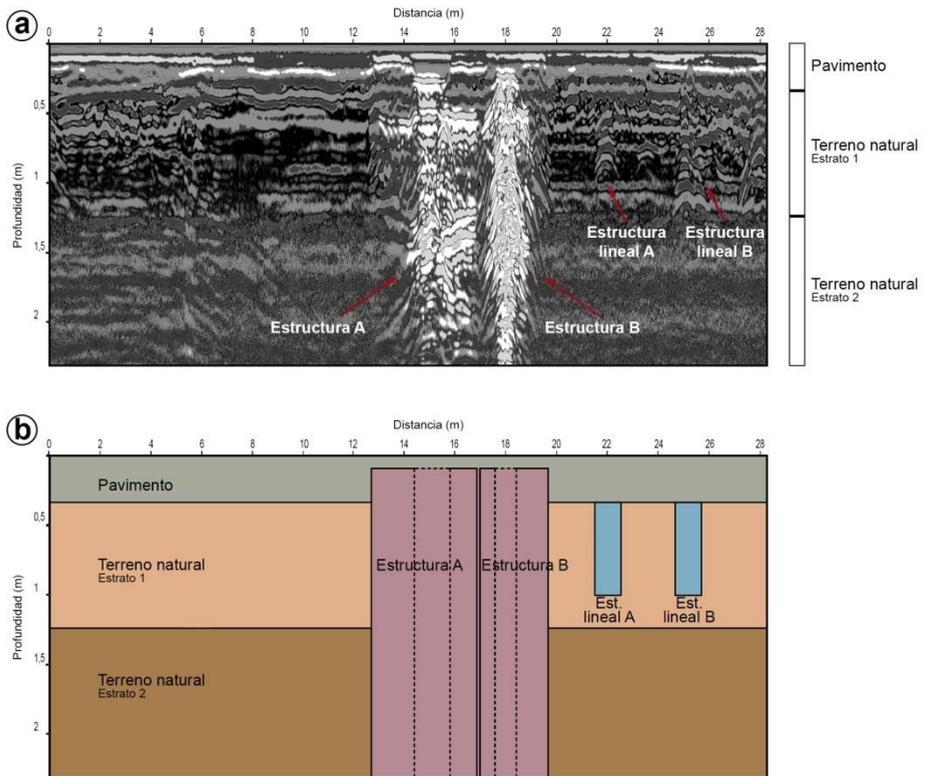


Figura 5.38. a- Interpretación del perfil P1. b- Modelización de los niveles (pavimento, terreno natural: estratos 1, 2 y 3, contacto inclinado) y estructuras subterráneas (dos estructuras lineales y otras dos estructuras) en el perfil P1.

En el perfil P3, se distingue una secuencia de estructuras lineales en el subsuelo de una de las naves laterales. Se trata de pequeñas reflexiones, presentes tanto en el perfil P3 como en el perfil P2, que podrían señalar la ubicación de las zapatas de las columnas que separan las distintas capillas.

5. Aplicación del georradar: Estudio del subsuelo en el patrimonio religioso

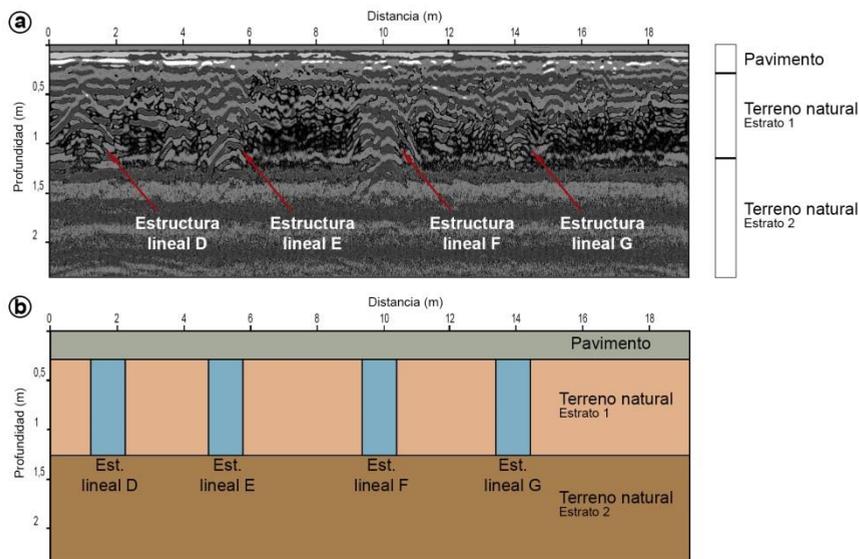


Figura 5.39. a- Interpretación del perfil P3. b- Modelización de los niveles (pavimento, terreno natural: estratos 1 y 2) y estructuras lineales en el perfil P3.

Una vez finalizado el análisis de los datos de georradar y su interpretación, se notificó a los arqueólogos municipales la existencia de las estructuras halladas en los perfiles P5 y P12 –entre otros-. Los arqueólogos apuntaron la posibilidad de que dichas estructuras puedan ser vestigios de antiguos hornos de cerámica que, por la forma que presentan, podrían poseer algún tipo de abertura a modo de pozo con un diámetro de unos 0,70 m. aproximadamente.

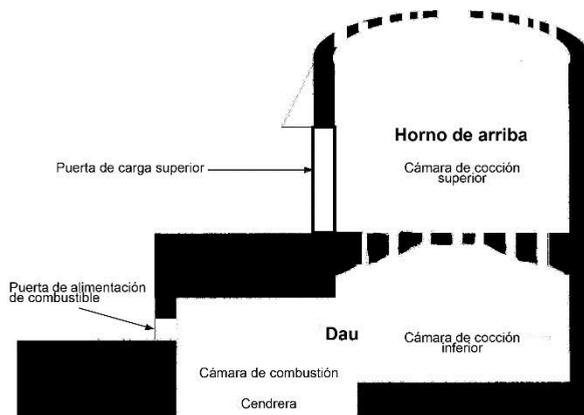


Figura 5.40. Ilustración del horno árabe "El dau", extraída de la siguiente página web: "Antropología cultural de nuestro entorno" [<http://mayores.uji.es/blogs/antropologia/?p=1904>].

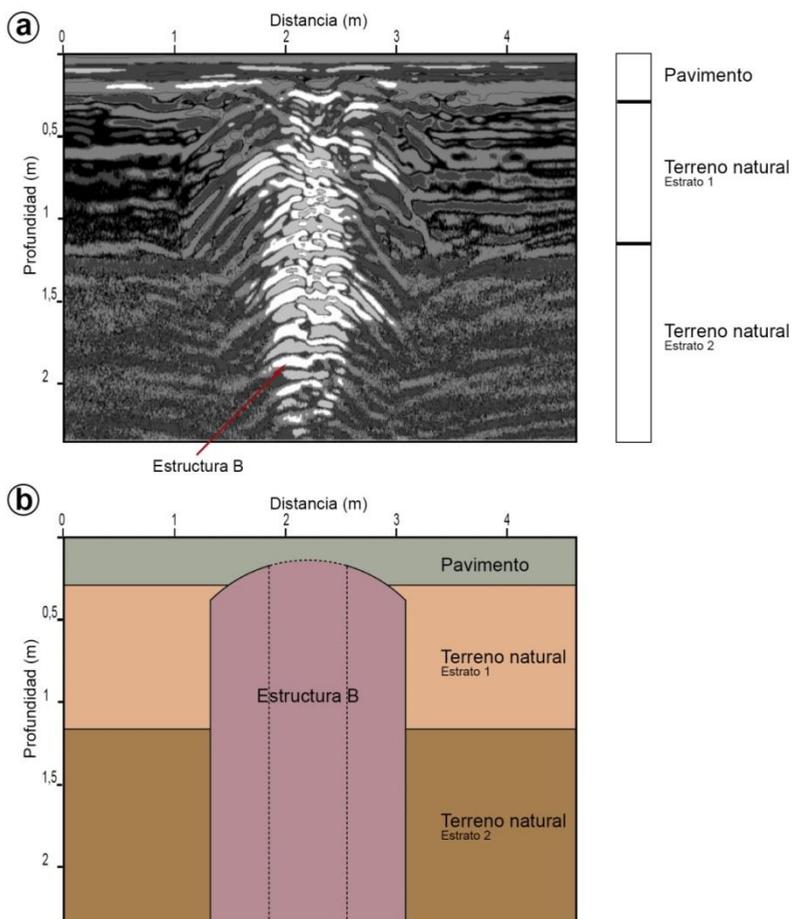


Figura 5.41. a- Interpretación del perfil P12. b- Modelización de los niveles (pavimento, terreno natural: estratos 1 y 2) y la estructura B en el perfil P12.

5.4.6. Modelización de los resultados en 3D

A pesar de la limitación para la toma de datos con georradar debido a la distribución del mobiliario en la nave principal de la Iglesia de San Pedro en Paterna, el análisis bidimensional de los perfiles de georradar ha permitido detectar las principales estructuras presentes en el subsuelo de la iglesia. En el centro de la nave central, se distinguen dos estructuras principales, como se ha indicado anteriormente, posiblemente asociadas a unos antiguos hornos árabes.

En las proximidades del Altar mayor se ha identificado un par de estructuras lineales. No obstante, dadas las limitaciones espaciales referidas anteriormente, no ha sido posible determinar la longitud total de las mismas.

Se ha hallado esta misma tipología de estructuras lineales subterráneas bajo las capillas laterales que vuelcan sobre la nave central. Se trata de estructuras bastante superficiales, localizadas en el primer estrato natural, que podrían asociarse, como se ha citado previamente, con las zapatas de las columnas entre capillas.

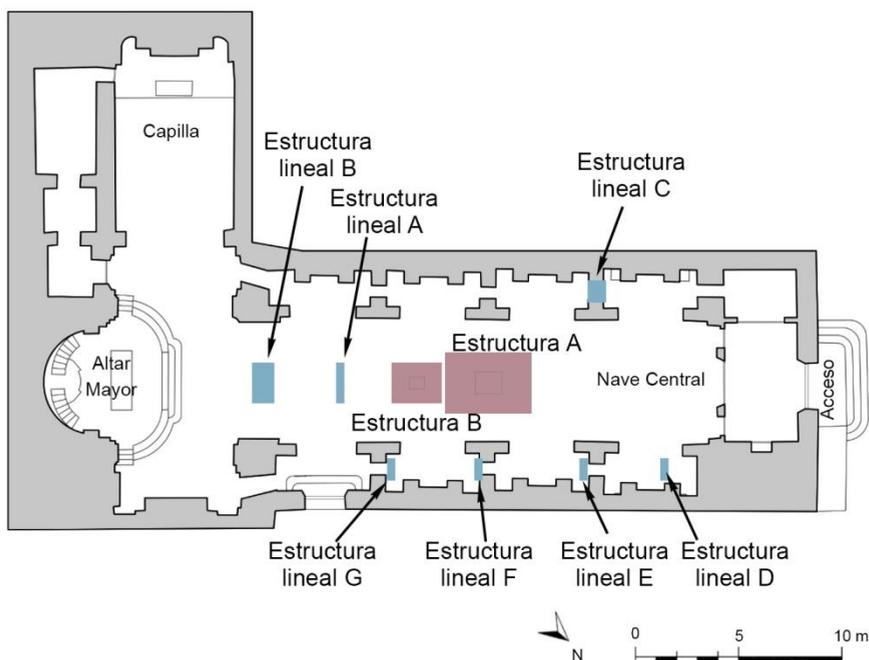


Figura 5.42. Localización en planta de las estructuras detectadas tras el estudio de los perfiles de georradar.

Los resultados de la modelización tridimensional se muestran mediante una representación en planta de la iglesia; una perspectiva tridimensional cenital; además de una vista en contrapicado para ilustrar la localización y profundidades de las diferentes estructuras halladas.

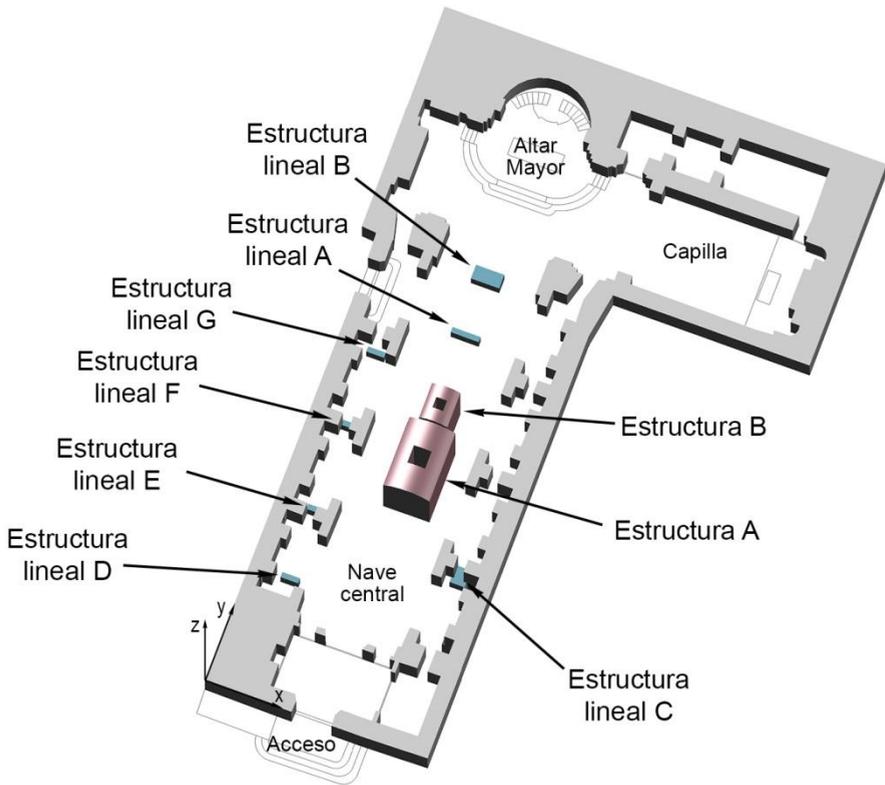


Figura 5.43. Modelización tridimensional de las estructuras identificadas en el subsuelo de la Iglesia de Paterna.

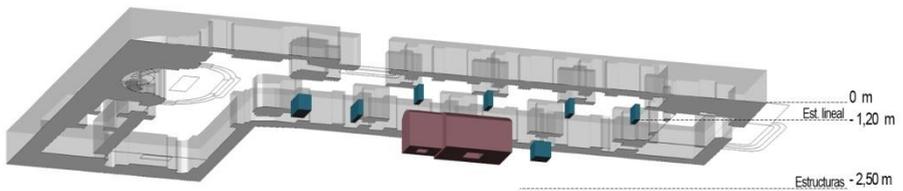


Figura 5.44. Plano contrapicado del subsuelo de la Iglesia de San Pedro de Paterna, ilustrando la modelización de las estructuras del subsuelo y la profundidad a la que se localizan las mismas.

5.5. IGLESIA DE NUESTRA SEÑORA DEL SOCORRO DE PEÑÍSCOLA

5.5.1. Descripción del edificio

A través de la prospección geofísica realizada en la Iglesia Parroquial de Nuestra Señora del Socorro de Peñíscola se pretende detectar y localizar posibles recintos en el subsuelo del edificio.

Dicha parroquia, de estilo gótico inicial y ampliación barroca, está situada dentro del recinto amurallado de la localidad de Peñíscola (Castellón), en su casco histórico.

La construcción de esta iglesia fue iniciada poco después de la Conquista en el siglo XIV. A mediados del siglo XV el templo fue destruido por un incendio y a finales del siglo XVII se cubrieron las capillas laterales. Entre 1725 y 1739 el templo se amplía y transforma, cambiando su orientación, y construyendo una nueva cabecera, con sacristía, y capilla de la Comunión. Por su parte, el campanario se construyó en 1862 siguiendo el diseño del arquitecto Vicente Martí.

En 1995, las fachadas fueron restauradas y durante el año 2004, con motivo de la exposición “Paisajes Sagrados”, la fundación *La Luz de las Imágenes* se efectuó una completa restauración del edificio.



Figura 5.45. Imágenes de la Iglesia de Nuestra Señora del Socorro de Peñíscola: a- Fachada principal, b- Altar mayor, c- Capilla de la Comunión.

5.5.2. Geología

El casco histórico de Peñíscola se sitúa sobre una península rocosa, -un tómbolo-. El término municipal se asienta sobre playas (arenas y gravas) del Cuaternario y, a su vez, incluye la Sierra de Irta, que acaba en el mar en una costa rocosa baja y en algunos puntos, de altos acantilados. La sierra ocupa las dos terceras partes meridionales del término. La parte septentrional es una pequeña llanura aluvial que comparte con Benicarló y que llega desde el mar hasta las cimas del Puig (Mapa Geológico de España, MAGNA 50, hoja 571).

5.5.3. Materiales y metodología

Un equipo de georradar GSSI modelo SIR-3000, con dos antenas de frecuencia central de 200 MHz y 400 MHz, se ha utilizado en el estudio geofísico de la Iglesia de Nuestra Señora del Socorro de Peñíscola. La prospección geofísica ha abarcado diversas áreas del templo: nave central, altar mayor, sacristía y capilla de la Comunión.

Teniendo en cuenta las peculiaridades la planta, y en consonancia con objetivos propuestos en este estudio, se proyectaron 8 perfiles de georradar en la zona que comprende el Altar mayor, la Sacristía y la Capilla de la Comunión. Asimismo, se realizaron siete perfiles de georradar en la nave principal.

Dependiendo de la profundidad a estudiar se emplearon las dos antenas anteriormente citadas con los diversos rangos de registro en los perfiles diseñados. Esto ha permitido investigar con detalle rangos de profundidades desde los 0 m. hasta los 10 m.

Así pues, en la adquisición de datos de georradar se obtuvieron en los perfiles un total de 28 radargramas (registros de georradar) en 15 perfiles para este estudio.

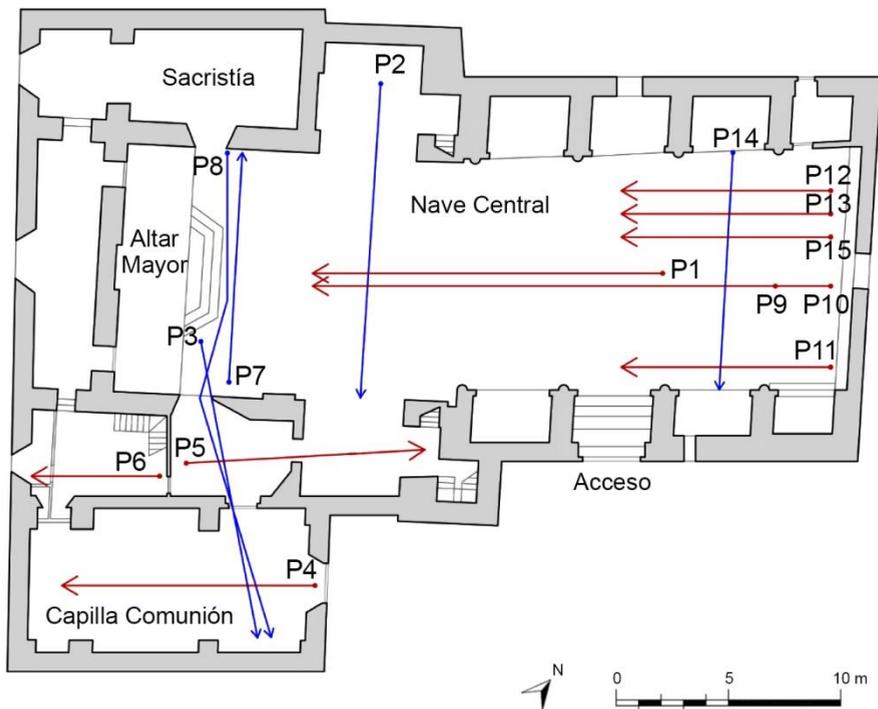


Figura 5.46. Esquema de distribución de los perfiles tomados en el interior de la iglesia.

Los datos obtenidos (radargramas) en el área estudiada se han procesado con el programa RADAN. Durante el procesamiento de los radargramas se han determinado las constantes dieléctricas del subsuelo. Asimismo se han aplicado diversos filtros, deconvolución, y en algunos casos la transformada de Hilbert.

5.5.4. Resultados

Tras el análisis de los radargramas, los resultados y conclusiones más relevantes son los siguientes:

1. Niveles culturales y geológicos

A lo largo de los todos perfiles analizados se distinguen cuatro niveles:

- Un primer nivel correspondiente al pavimento. Se identifica hasta una profundidad de 0,25 m.
- Un segundo nivel que está conformado por un horizonte antrópico, de relleno, cuya profundidad alcanza aproximadamente 0,60 m.
- El tercer nivel está formado por otro horizonte geológico de terreno natural. Dicho nivel se localiza entre los 0,60 y los 2,50 m. de profundidad.
- El cuarto y último nivel detectado con la prospección geológica se trata de un horizonte geológico y presenta una naturaleza distinta al nivel inmediatamente superior. Este horizonte se localiza a partir de los 2,50 m. de profundidad.

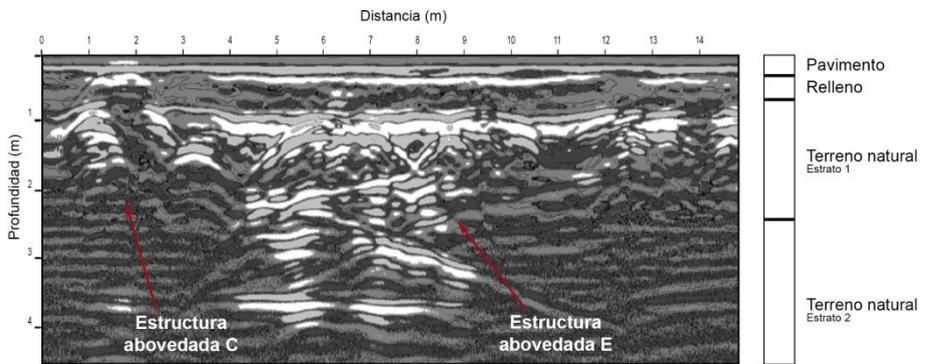


Figura 5.47. Radargrama del perfil P2 tomado con una antena de 400 MHz. En el perfil se distingue dos de las estructuras abovedadas existentes en las proximidades del Altar mayor.

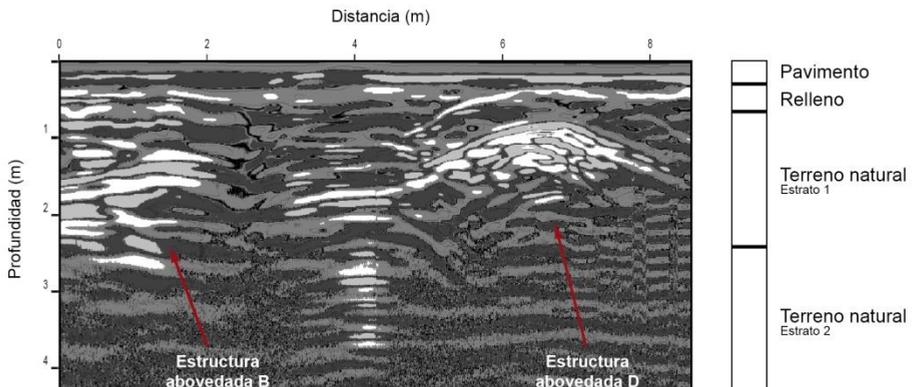


Figura 5.48. Radargrama del perfil P5, donde se identifica las estructuras abovedadas B y D ubicadas bajo la sacristía de la iglesia y en una capilla lateral, respectivamente.

2. Estructuras abovedadas

- Dos espacios abovedados huecos bajo la sacristía. Una primera (Estructura abovedada A) se localiza en el perfil P6, desde el metro 2,5 hasta el final del perfil. Una segunda (Estructura abovedada B) se detecta en el perfil P3 entre los metros 4 y 6,70, desde el inicio del perfil hasta el metro 2,40 del perfil P5 y en el perfil P8, desde el metro 11,70 hasta el metro 15.
- Se observa dos estructuras abovedadas en los perfiles tomados sobre las capillas laterales más próximas al Altar mayor. En la capilla norte, se distingue una estructura (Estructura abovedada C) desde los 0,50 m. hasta los 3 m. del perfil P2. En la capilla sur, la Estructura abovedada D se identifica entre los metros 4,50 y 8, del perfil P5.

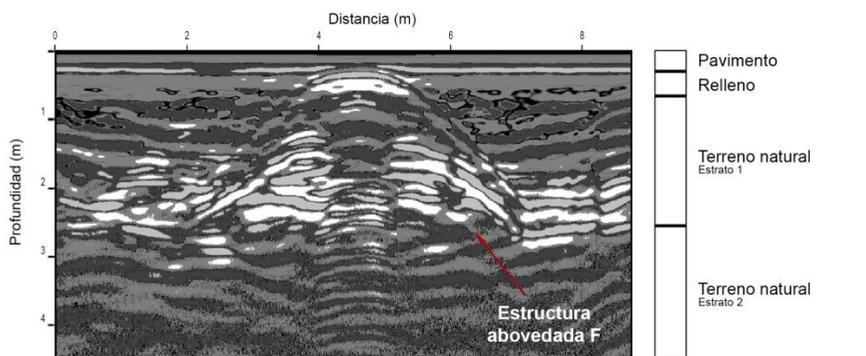


Figura 5.49. Radargrama del perfil P7, donde se observa la estructura abovedada conocida bajo el altar mayor y su acceso.

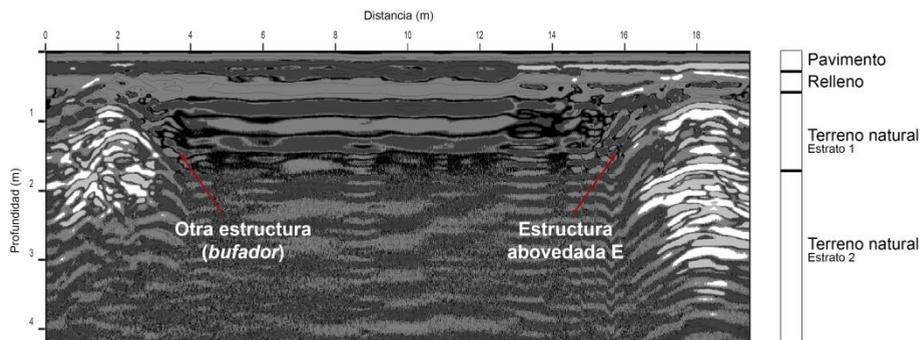


Figura 5.50. Radargrama del perfil P9. En el perfil se observa la estructura del *bufador* en la nave principal de la iglesia y la Estructura abovedada E a los pies del Altar mayor.

- Un espacio abovedado en la nave principal de la iglesia, a los pies del Altar mayor. Dicha Estructura abovedada E se distingue entre los metros 4 y 9 del perfil P2, en los últimos metros del perfil P9 y también al final del perfil P10.

3. Otras estructuras

- Una eventual estructura inédita en la nave principal: *bufador*. Un *bufador* es un agujero o túnel natural en la roca por el que sale y entra el agua del mar, lo que produce un sonido muy peculiar, provocando estruendosos bufidos y elevaciones violentas del agua del mar en días de temporal. Esta estructura es transversal al eje principal de la iglesia y se encuentra entre las dos penúltimas capillas laterales (desde el Altar mayor). Esta estructura presenta forma de bóveda y se encuentra entre unos 0,75 m y los 2,70 m de profundidad. Dicha estructura se identifica en los primeros 4 m. del perfil P9, entre los metros 2 y 6 del perfil P10, entre los 3 m. y los 7 m. del perfil P11 y en los últimos metros del perfil P14.

5.5.5. Modelización de los resultados en 2D

Las figuras que se muestran a continuación recogen la interpretación y modelización bidimensional de las estructuras detectadas en los perfiles tomados en la Iglesia de Peñíscola. A partir de la interpretación de los datos obtenidos con el georradar, se ha elaborado la modelización, determinando los niveles culturales y estratos geológicos, así como representando cada una de las estructuras con su geometría característica. Se ha tomado los radargramas más representativos que ayudan a ilustrar la complejidad espacial hallada en el subsuelo de la iglesia.

Cabe destacar que mediante este estudio se detectaron estructuras cuya existencia ya era conocida y, además, se identificó otras inéditas en la nave principal y en las capillas laterales; no obstante, para este caso de estudio se representarán todas de la misma manera.

5. Aplicación del georradar: Estudio del subsuelo en el patrimonio religioso

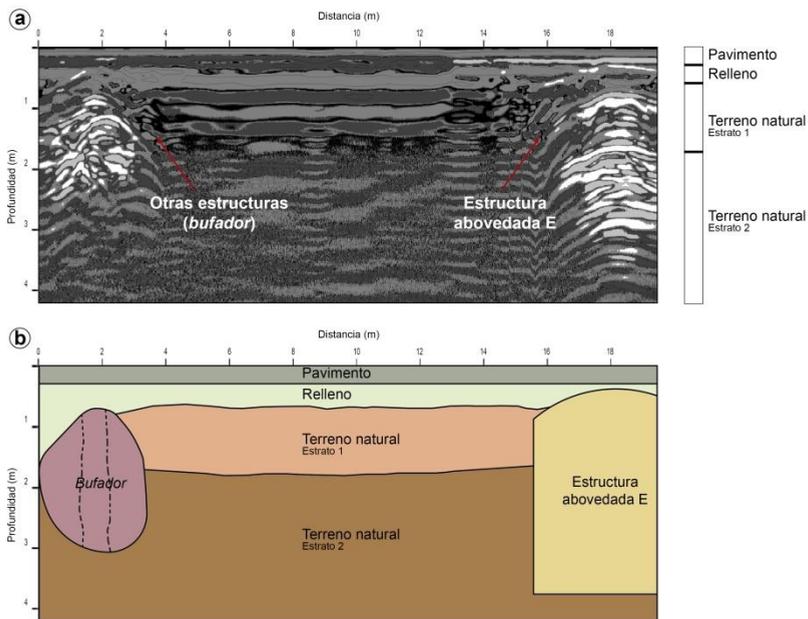


Figura 5.51. a- Interpretación del perfil P9. b- Modelización de los niveles y estructuras en el perfil P9.

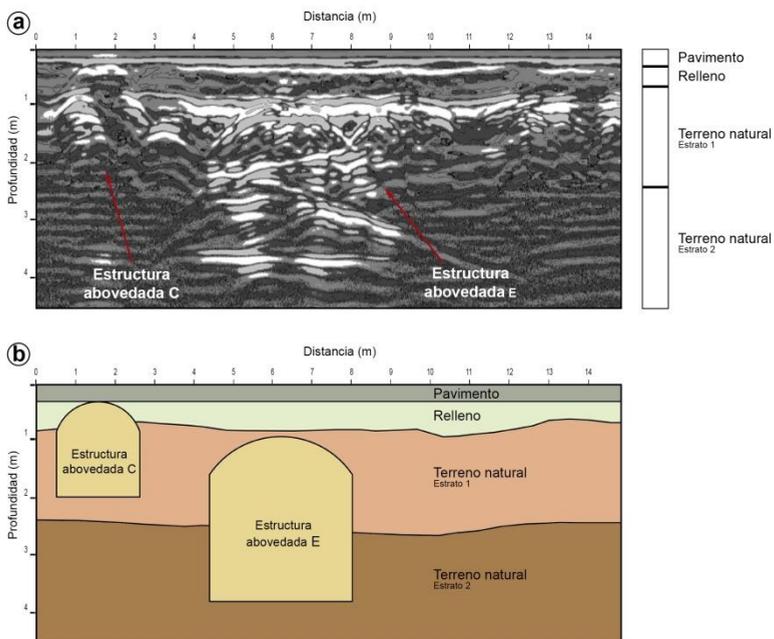


Figura 5.52. a- Interpretación del perfil P2. b- Modelización de los niveles y estructuras en el perfil P2.

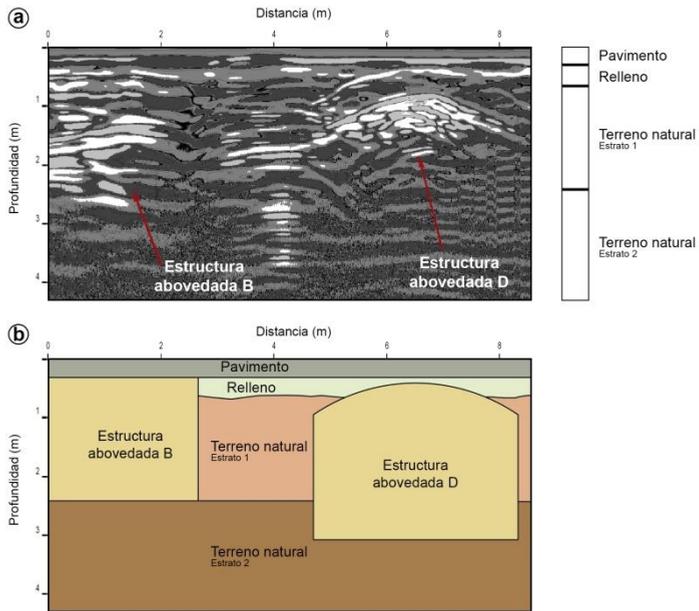


Figura 5.53. a- Interpretación del perfil P5. b- Modelización de los niveles y estructuras abovedadas en el perfil P5.

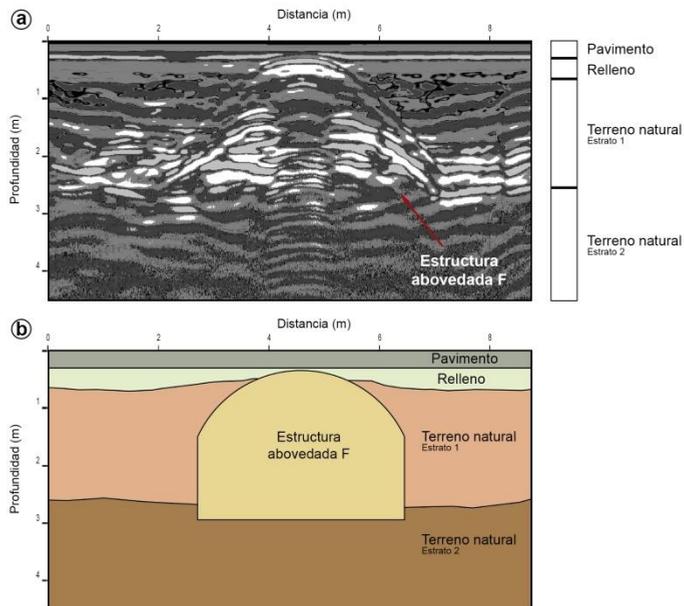


Figura 5.54. a- Interpretación del perfil P7. b- Modelización de los niveles y estructura abovedada en el perfil P7.

5.5.6. Modelización de los resultados en 3D

Dada la imposibilidad de elaborar un modelo tridimensional de los datos de georradar, el análisis bidimensional de los radargramas se ha convertido nuevamente en el medio imprescindible para localizar cada uno de los niveles del subsuelo detectados y cada una de las estructuras subterráneas halladas. Así pues, la ubicación y la extensión de cada una de las criptas se ha cartografiado en planta tomando como referencia los datos en 2D obtenidos con el georradar, estableciendo una correlación entre los perfiles longitudinales y los transversales.

La modelización tridimensional del subsuelo del templo de Peñíscola se presenta en las siguientes imágenes: localización de las criptas en planta y modelización tridimensional de la distribución espacial de las mismas.

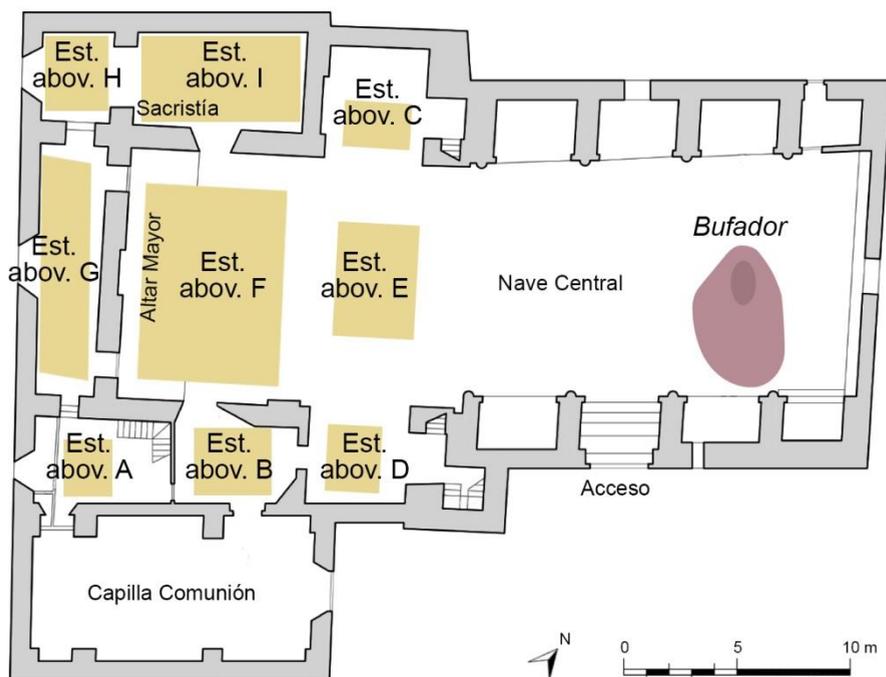


Figura 5.55. Localización en planta de las estructuras detectadas a partir de la prospección con georradar y el análisis bidimensional de los radargramas obtenidos.

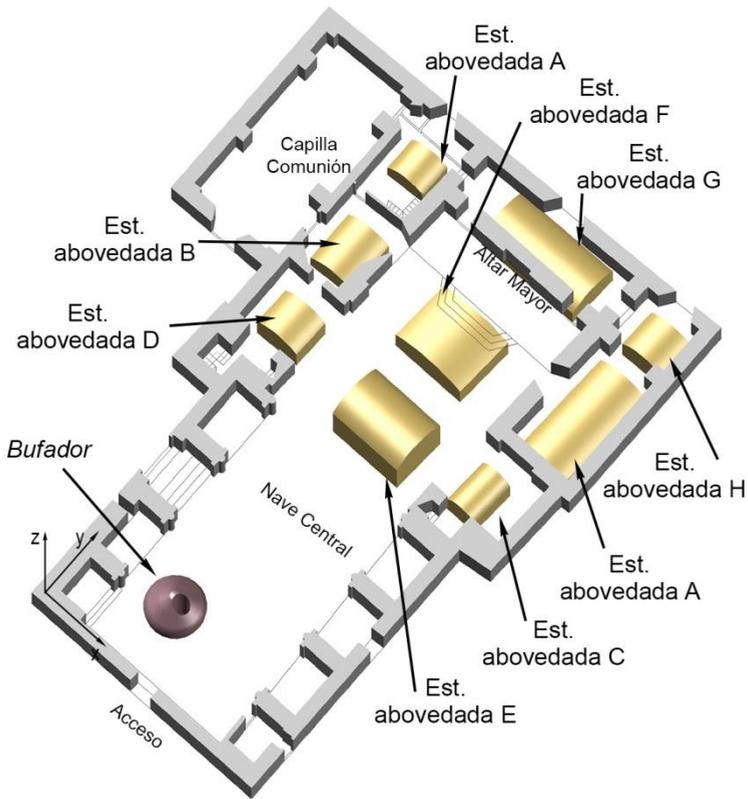


Figura 5.56. Modelización tridimensional de las estructuras detectadas en el subsuelo de la Iglesia de Nuestra Señora del Socorro de Peñíscola.

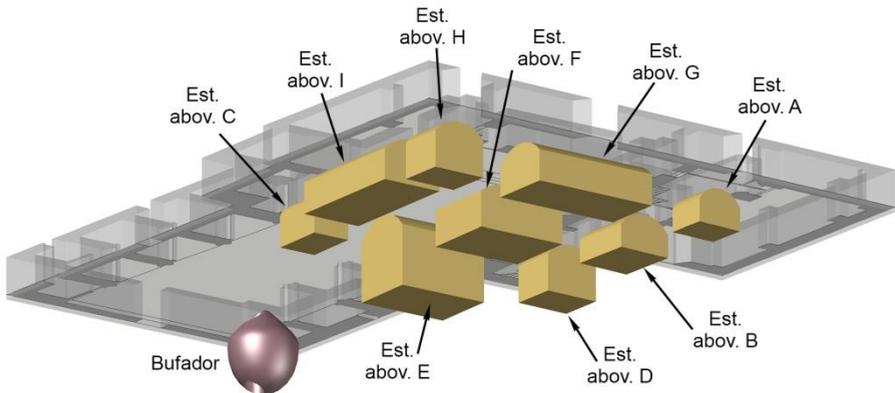


Figura 5.57. Plano contrapicado del subsuelo de la iglesia donde se muestran la modelización del pavimento y de las estructuras identificadas.

5.6. IGLESIA DE SANTIAGO APÓSTOL DE LA POBLA DE VALLBONA

5.6.1. Descripción del edificio

El estudio geofísico mediante la técnica no destructiva de georradar para el análisis del subsuelo de la Iglesia de Santiago Apóstol de La Pobra de Vallbona tiene como objetivos:

- Localizar eventuales estructuras enterradas.
- Detectar humedades en el subsuelo.

Esta iglesia está ubicada en el casco histórico de la Pobra de Vallbona (Valencia). Se trata de una construcción que ha sufrido diferentes transformaciones, adaptándose a los estilos arquitectónicos desde el gótico original hasta la constitución del presbiterio neoclásico.

El levantamiento de dicha iglesia se remonta al período de la Reconquista, en el siglo XIII. En origen, era una construcción sencilla, sin capillas laterales y con un altar al fondo. La nave central es de estilo gótico y presenta decoración de yesería. A finales del siglo XVIII, en época neoclásica, se edificó la nave lateral con sus correspondientes capillas. Asimismo, se adosó un crucero y una cúpula de estilo neoclásico.

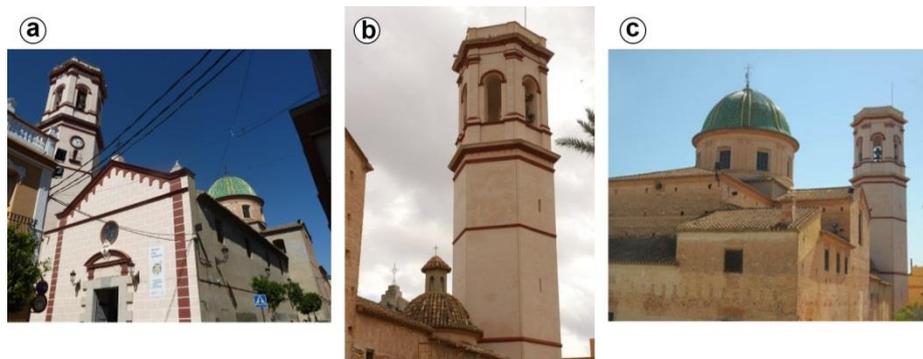


Figura 5.58. Imágenes de la Iglesia de Santiago Apóstol de la Pobra de Vallbona: a- Fachada principal, b- Campanario, c- Fachada posterior.

La torre campanario tiene una base hexagonal y alcanza una altura de 38 metros. La torre está compuesta por cuatro cuerpos, albergándose las campanas en el último de ellos. Tras los efectos ocasionados durante la guerra civil, entre 1940 y 1945, se pavimentó de nuevo la parroquia colocándose baldosas de colores blanco y negro.

5.6.2. Geología

Parte del municipio de la Población de Vallbona está sobre material terciario del Mioceno Superior, en este caso, conformado por un coluvión antiguo de arcillas rojas con cantos angulosos cementados. El resto del término municipal se asienta sobre material cuaternario, en su mayor parte, perteneciente al Pleistoceno Superior. El material de esta zona se corresponde con limos pardos fluviales (Mapa Geológico de España, MAGNA 50, hoja 695).

5.6.3. Materiales y metodología

El trabajo se desarrolla exclusivamente en la planta de la nave central, el crucero, las capillas laterales y el atrio de la iglesia. Para la realización de la prospección geofísica en dicho edificio, se ha empleado un equipo de georradar GSSI modelo SIR-3000, con la antena de frecuencia central de 400 MHz.

Teniendo en cuenta las peculiaridades de la zona de estudio (especialmente el mobiliario presente, pilares, etc.) y en consonancia con los objetivos propuestos en este estudio, se proyectaron perfiles que adecuaban al máximo espacio exento posible para el paso de la antena de 400 MHz. En concreto se realizaron 21 perfiles, con el objetivo de cubrir al máximo zona designada.

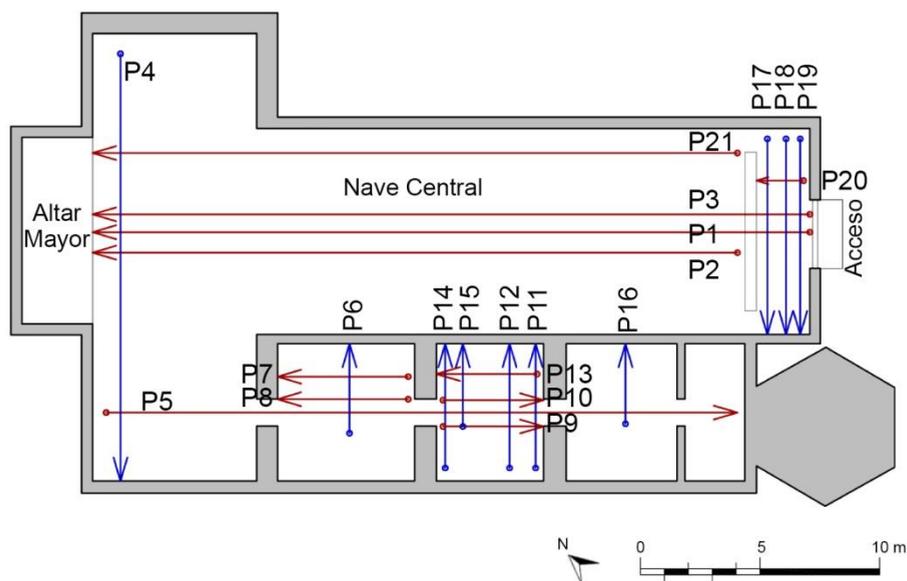


Figura 5.59. Ubicación de los perfiles de georradar en la zona estudiada: nave central, cruceo, capillas laterales y atrio de la Iglesia de Santiago Apóstol de la Pobla de Vallbona.

Los datos obtenidos (radargramas) en el área estudiada se han procesado con el programa RADAN de GSSI. Durante el procesado de los radargramas se han determinado las constantes dieléctricas del subsuelo. Asimismo se han aplicado diversos filtros y deconvolución, con el objetivo de identificar con mayor claridad aquellas anomalías encontradas.

5.6.4. Resultados

Los resultados más relevantes obtenidos de este estudio son los siguientes:

1. Niveles culturales y geológicos

Se diferencian 5 niveles en el subsuelo de la iglesia:

- El primer horizonte se corresponde con el nivel del pavimento y se localiza desde la superficie hasta unos 0,35 m. de profundidad.

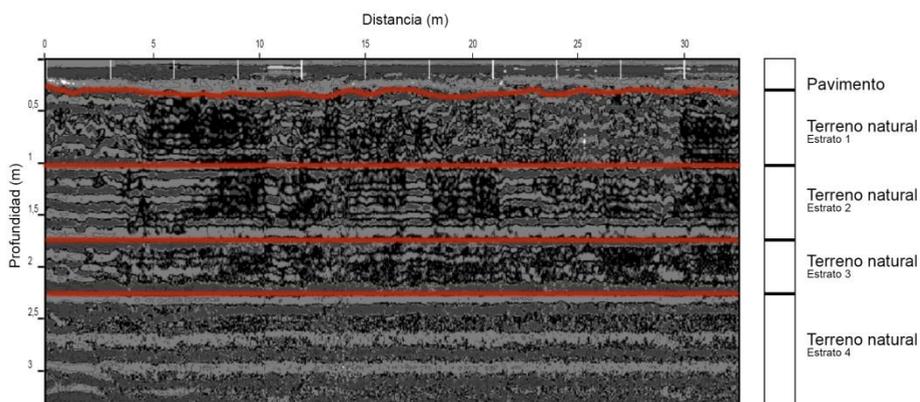


Figura 5.60. Radargrama del perfil P1 en la nave central de la iglesia donde se observa los cinco niveles en el subsuelo registrados en este estudio.

- El segundo nivel, estrato geológico, abarca desde los 0,35 m. hasta los 1,05 m. de profundidad.
- El tercer horizonte, también de naturaleza geológica, se identifica desde los 1,05 m. hasta los 1,75 m. de profundidad.
- El cuarto nivel se detecta entre los 1,75 m. y los 2,30 m. de profundidad.
- Y el quinto y último nivel está presente desde los 2,30 m. hasta la profundidad máxima alcanzada en este estudio.

2. Cripta

De acuerdo con la información que se tenía sobre la existencia de una cripta y de una posterior intervención en ella, en este estudio se ha determinado:

- o su ubicación en una capilla lateral
- o que ha sido colmatada y sellada en su parte superior con una losa de hormigón con mallazo,

tal y como se confirma en el perfil P5, entre los metros 15,5 y 20,7 y a lo largo de las longitudes de los perfiles P9, P10, P11, P12, P13, P14 y P15.

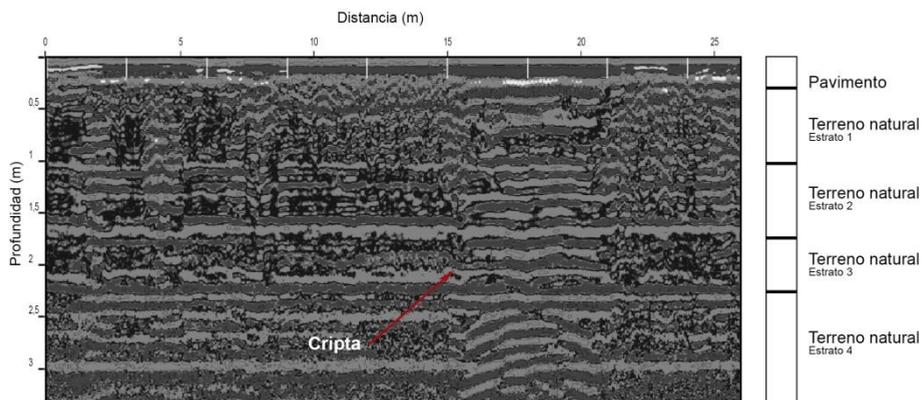


Figura 5.61. Radargrama del perfil P5 donde se distingue la evidencia de una antigua cripta que está colmatada y en su parte superior está sellada mediante una losa de hormigón con mallazo.

3. Patología

- Humedades

La presencia de zonas de humedades significativas en el subsuelo sobre todo en dos zonas de la iglesia: en el atrio y desde el eje de la nave central hacia las capillas laterales (flanco derecho de la iglesia).

Se ha detectado las siguientes zonas de humedades significativas en los perfiles:

- Perfiles P1 y P3: del inicio hasta los 3,4 m. y 12,5 m. de los perfiles P1 y P3 respectivamente, a partir de los 0,90 m. de profundidad.
- Perfil P2: del inicio hasta los 3,4 m. del perfil, a partir de los 2 m. de profundidad.
- Perfil P4: del inicio hasta los 2,4 m. del perfil, a partir de los 2,2 m. de profundidad.
- Perfil P5: del inicio hasta el metro 21 del perfil, a partir de los 2,2 m. de profundidad.
- Perfiles P6, P7, P8, P9, P10, P11, P12, P13, P14 y P15: a partir de los 2,2 m. de profundidad.
- Perfil 17, P18, P19 y P20: prácticamente en toda la longitud de los perfiles a partir de los 0,5 m. de profundidad.

- *Zonas anómalas: anomalías singulares*

La existencia de anomalías singulares en el crucero de la iglesia que apuntan a una posible alineación de las mismas.

- Perfiles P1 y P3: entre los metros 25 y 26,5, entre los 0,5 y 1,05 m. de profundidad; y entre los metros 28,75 y 29,5, a una profundidad entre los 0,6 y los 1,2 m.
- Perfil P2: entre los metros 21 y 22 (profundidad 0,35 – 1,05 m.) y entre los metros 25 y 25,85 (profundidad 0,6 – 1,2 m.).
- Perfil P5: entre los metros 1,4 y 2,4 (profundidad 0,5 – 1,2 m.) y entre los metros 3,6 y 4,7 (profundidad 0,6 – 1,4 m.).
- Perfiles P17, P18 y P19: en el metro 5,4; entre 0,6 m. y 3,1 m. de profundidad.
- Perfil P20: en el metro 2, entre 0,35 m. y 1 m. de profundidad.
- Perfil P21: entre los metros 14 y 15,35 (profundidad 0,35 – 0,9 m.) y entre los metros 17,3 y 18,2 (profundidad 0,4 – 0,95 m.).

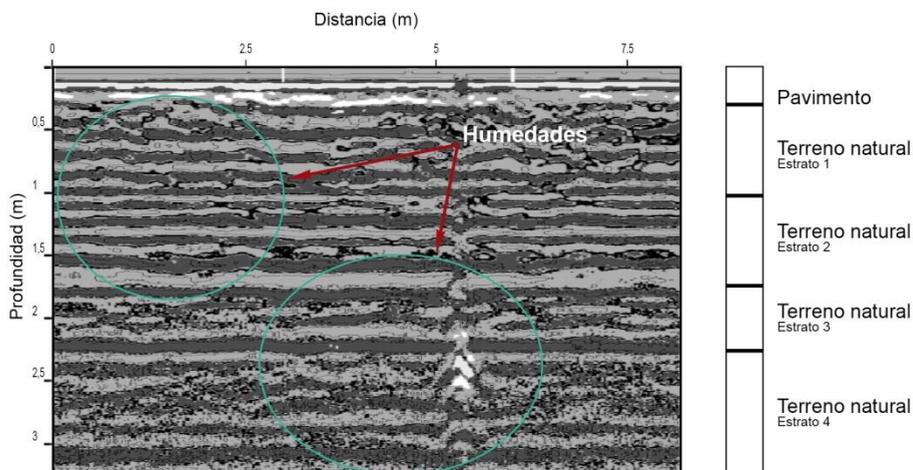


Figura 5.62. Radargrama del perfil P17 en el atrio de la iglesia donde se observa la presencia de humedades en el subsuelo.

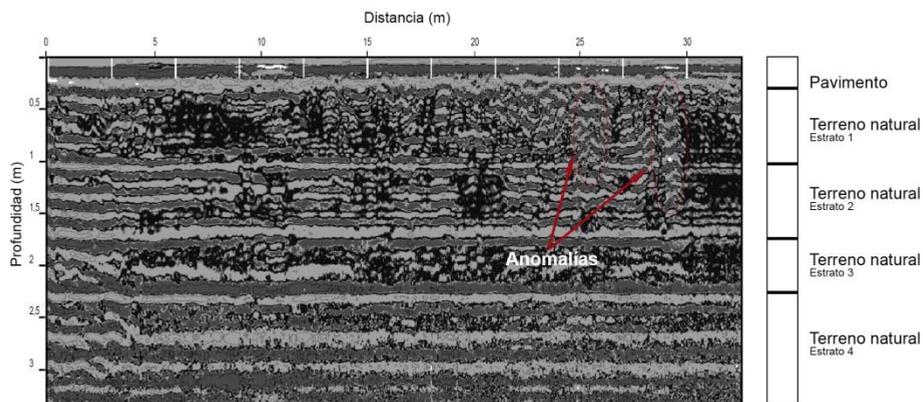


Figura 5.63. Radargrama P3 en el atrio de la iglesia donde se observa la presencia de dos anomalías singulares en el subsuelo.

5.6.5. Modelización de los resultados en 2D

La modelización se ha llevado a cabo tomando como base, nuevamente, la interpretación de los perfiles de georradar; se ha determinado los horizontes del subsuelo, se ha corroborado la preexistencia de una cripta y se ha hallado las zonas del subsuelo afectadas por las humedades.

Para la representación de la modelización bidimensional del subsuelo, se ha tomado una pequeña selección de radargramas que incluyen las estructuras, niveles y patología citados anteriormente.

Las anomalías diversas aparecen alineadas a los pies del Altar mayor, pero se desconoce su significado. La interpretación de este tipo de estructuras requiere de un estudio más exhaustivo, apoyándose por ejemplo, en el empleo de documentación histórica o en sondeos realizados en los alrededores de la iglesia. Es por ello que la modelización de este tipo de elementos subterráneos se ha omitido en este caso de estudio, a la espera de ahondar en el análisis de las mismas.

5. Aplicación del georradar: Estudio del subsuelo en el patrimonio religioso

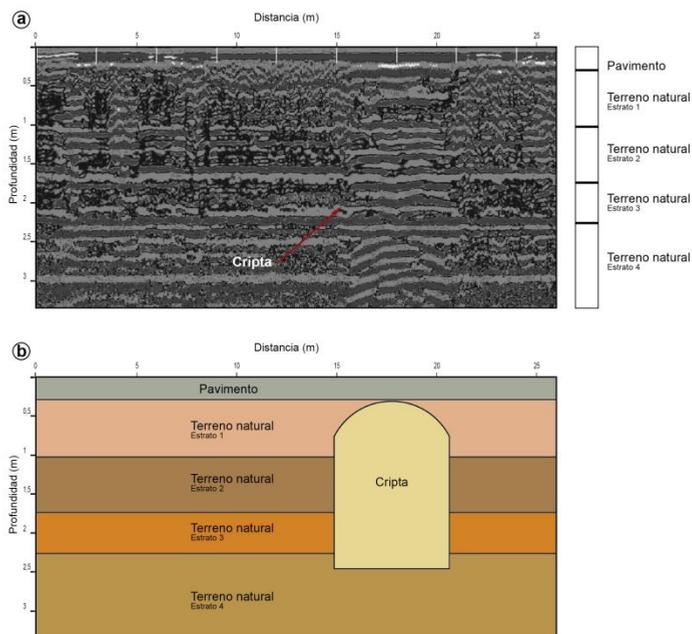


Figura 5.64. a- Interpretación del perfil P5. b- Modelización de niveles y cripta en el perfil P5.

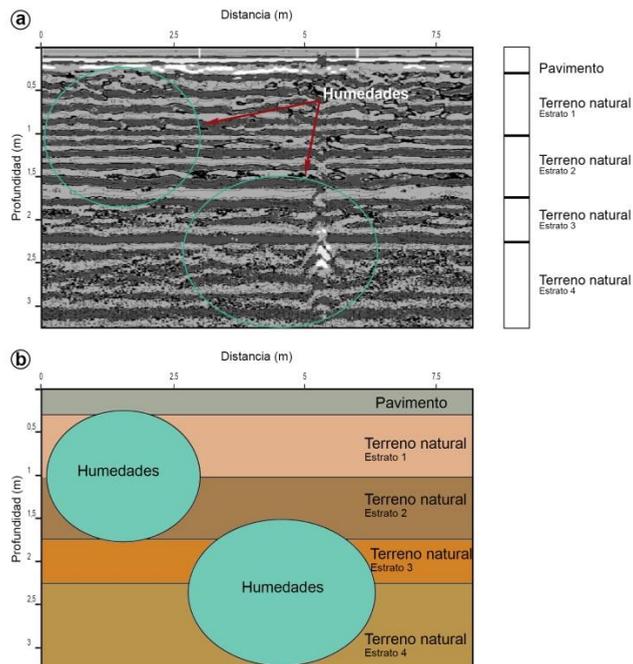


Figura 5.65. a- Interpretación del perfil P17. b- Modelización de los niveles y las áreas de humedad detectadas en el perfil P17.

5.6.6. Modelización de los resultados en 3D

Como resultado del análisis bidimensional de los perfiles de georradar (longitudinales y transversales), se ha corroborado la existencia de una cripta bajo una de las capillas laterales, contigua a la nave principal de la iglesia. Este estudio ha permitido conocer el estado en el que se encuentra dicha cripta, habiendo sido colmatada y sellada en su parte superior con una losa de hormigón con mallazo.

En el área suroeste de la Iglesia de Santiago Apóstol de la Pobl de Vallbona, se ha localizado una gran concentración de humedades, ubicadas a distintas profundidades. Cabe hacer mención, asimismo, a la presencia notoria de esta misma patología en el acceso del templo, así como en otros puntos aislados del subsuelo del edificio.

En las proximidades del Altar mayor se ha identificado un par de estructuras lineales. No obstante, dadas las limitaciones espaciales referidas anteriormente, no ha sido posible determinar la longitud total de las mismas.

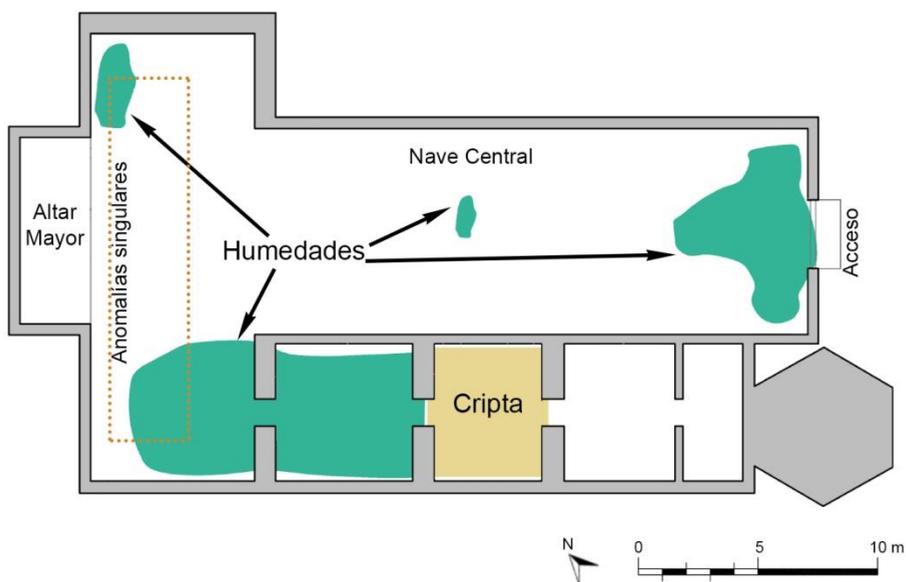


Figura 5.66. Localización en planta de la cripta y las zonas de humedades, a partir del análisis de los radargramas obtenidos mediante georradar.

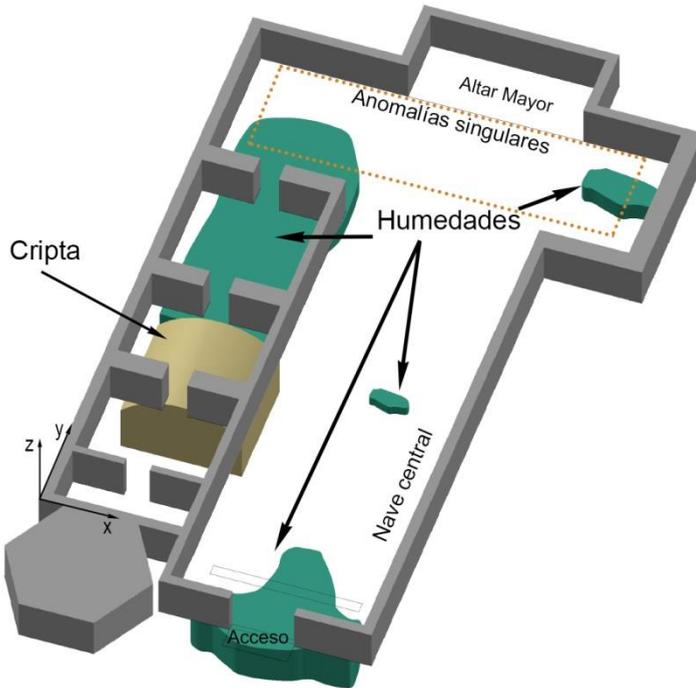


Figura 5.67. Modelización tridimensional de la estructura subterránea identificada (cripta) y localización de las humedades presentes en el subsuelo de la iglesia.

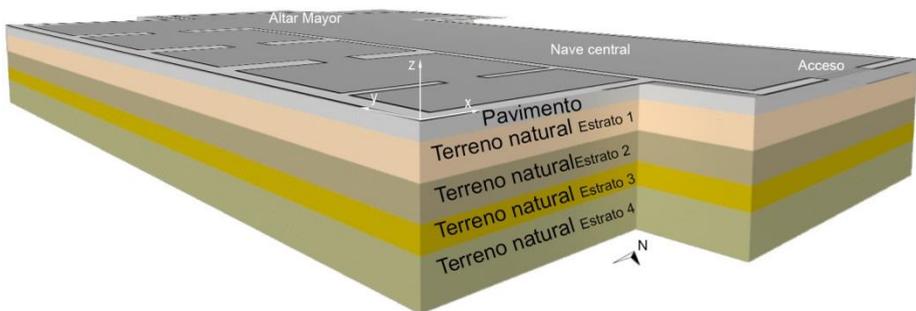


Figura 5.68. Modelización de los niveles culturales y estratos geológicos detectados en el subsuelo de la Iglesia de Santiago Apóstol de la Pobl de Vallbona.

5.7. IGLESIA DEL SAGRADO CORAZÓN DE JESÚS DE VALENCIA

5.7.1. Descripción del edificio

El objetivo principal de este estudio es la detección y cartografiado de elementos enterrados que pueden dar lugar a la patología que se manifiesta en el edificio y dimensionar una serie de estructuras del subsuelo conocidas, y al mismo tiempo detectar posibles estructuras no documentadas. La Iglesia del Sagrado Corazón de Jesús está ubicada en el centro histórico de la ciudad de Valencia, y adyacente al antiguo trazado de la antigua muralla árabe.

Las primeras referencias históricas sobre la Iglesia del Sagrado Corazón de Jesús datan de 1571. El edificio se construyó en diversas fases, componiéndose de la antigua capilla y Casa Profesa (1579), la posterior iglesia (1595) y la adición de un ábside y el transepto (1621). En 1868, tras la expulsión de los Jesuitas de Valencia, el templo fue demolido. Una vez la orden Jesuítica volvió a instaurarse en la ciudad de Valencia hacia 1886, la iglesia fue reconstruida sobre las ruinas de la anterior construcción, probablemente sobre el suelo de la antigua iglesia. Durante la Guerra Civil Española (1936-1939), la iglesia sufrió un devastador incendio y, por ello, se acometieron intensivas obras de reforma que finalizaron hacia 1957.

Parte del estudio del subsuelo de este edificio se recoge en el artículo de Ramírez-Blanco *et al.* (2008).



Figura 5.69. Imágenes de la Iglesia del Sagrado Corazón de Jesús: a- Perspectiva aérea del exterior de la iglesia, b- Interior de la iglesia con el Altar mayor al fondo, c- Fachada principal.

5.7.2. Geología

La ciudad de Valencia se asienta sobre terrenos cuaternarios del Pleistoceno Superior. El tipo de suelo sobre el que se sitúa la ciudad está conformado por limos arenosos de inundación, que se extienden a lo largo de todo el territorio que conforma la Huerta y el centro histórico de Valencia (Mapa Geológico de España, MAGNA 50, hoja 722).

5.7.3. Materiales y metodología

El equipo de georradar utilizado en este trabajo es un SIR-10H de GSSI, con dos antenas de 200 MHz y de 400 MHz. El procesado de datos se llevó a cabo con el programa RADAN.

Para la realización del modelo 3D del subsuelo, en la zona estudiada se ha planificado 3 mallas de perfiles (Figura 2).

- La primera en la nave principal de la iglesia, constituida por 5 perfiles longitudinales y 2 transversales.
- La segunda y la tercera mallas están situadas en las alas derecha e izquierda, respectivamente, de la nave crucero y son mucho más densas en cuanto al número de perfiles realizados:
 - o La segunda, situada en el ala derecha de la nave crucero, cuenta con 11 perfiles longitudinales y 12 transversales.
 - o En la tercera, situada en el ala izquierda de la nave crucero, se han realizado 10 perfiles longitudinales y 5 perfiles transversales.

Cada perfil se ha estudiado con antenas de 400 MHz (con rangos de registro de 60 ns y 80 ns) y de 200 MHz (con rangos de registro de 150 ns y 200 ns). El empleo de diferentes rangos de registros en cada antena ha permitido alcanzar las resoluciones y profundidades adecuadas para el estudio del subsuelo en el interior de la iglesia.

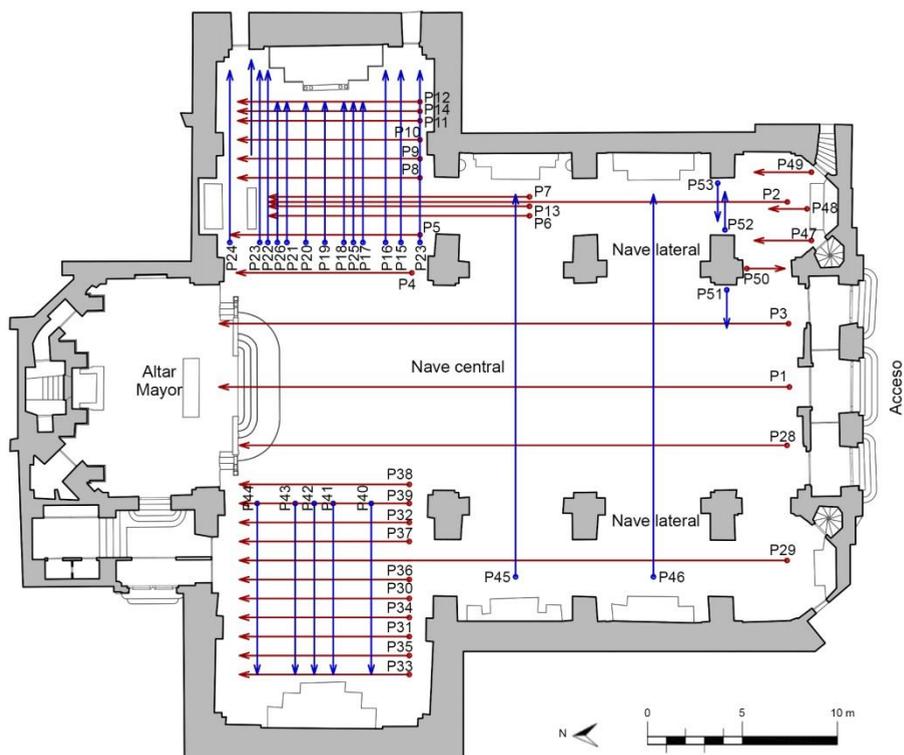


Figura 5.70. Ubicación de los perfiles de georradar en la zona estudiada: nave central, naves laterales y crucero de la Iglesia del Sagrado Corazón de Jesús de Valencia.

Asimismo, para el estudio de la cimentación de los muros y pilares se planificó 7 perfiles. En este caso, se utilizó la antena de 400 MHz con rangos de registro de 40 ns y 60 ns, alcanzando una profundidad de unos 2 m.

5.7.4. Resultados

A partir del análisis de los radargramas del subsuelo de la Iglesia del Sagrado Corazón de Jesús, se obtienen los siguientes resultados:

1. Niveles culturales y geológicos

Se diferencian 3 niveles en el subsuelo de la iglesia:

- El primer nivel se corresponde con el nivel del pavimento y alcanza desde la superficie hasta unos 0,25 m. de profundidad.

- El segundo horizonte es también un nivel antrópico, que se extiende desde los 0,25 m. de profundidad hasta los 2 m. aproximadamente.
- El tercer y último nivel detectado en el subsuelo se trata del terreno natural sobre el que se asienta la iglesia. Está presente a partir de aproximadamente los 2 m. de profundidad.

Contacto inclinado:

Una estructura que presenta un talud desde el inicio del perfil P1 (profundidad de 2,52 m.) hasta el metro 14,10 del mismo perfil (profundidad 5,15 m.). Esta misma estructura se observa también desde el inicio en los siguientes perfiles: perfil P2 (profundidad 2,1 m. hasta el metro 13,95 con una profundidad de 4,42 m.); perfil P3 (profundidad 2,50 m. hasta el metro 14,10 con una profundidad de 5,10 m.); y perfil P28 (profundidad 2,50 m. hasta el metro 14,15 con una profundidad de 4,85 m.). Esta estructura podría corresponder a un elemento constructivo de la antigua muralla árabe de la ciudad de Valencia, dado que la fachada principal de la iglesia, donde comienzan los perfiles, es adyacente al trazado de esta antigua muralla.

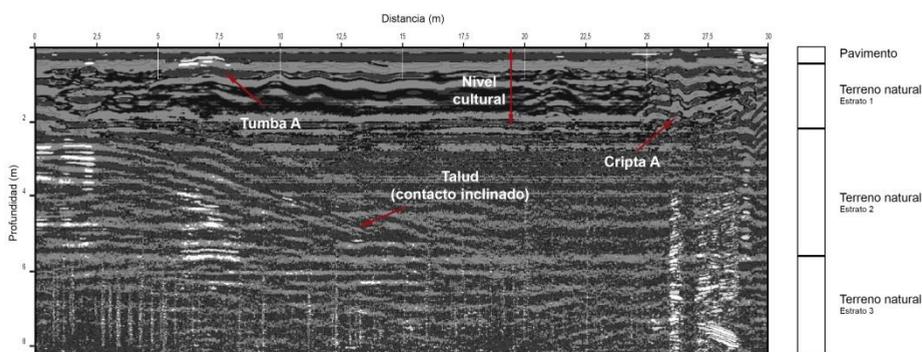


Figura 5.71. Radargrama del perfil P1, obtenido en la nave central de la iglesia. Se observa: una estructura en un talud a los pies de la iglesia, una tumba, una cripta ya documentada en el Altar mayor, así como el nivel cultural que alcanza los 2 m. de profundidad.

2. *Cripta*

- Una cripta ya documentada (Cripta A), y que es accesible, se localiza desde el metro 25,70 hasta el metro 29,60 del perfil P1, situada a 0,25 m. de profundidad. Esta cripta se observa también en los radargramas de los perfiles P3 y P28.
- Una cripta inédita (Cripta B) ubicada en el ala derecha de la nave del crucero, de la que además no existe documentación histórica. Esta cripta tiene su eje mayor entre los perfiles P6 y P14, con una longitud de 5,5 m. y un ancho de 3,50 m. (entre los metros 3,5 y 7,0 de los perfiles P8, P9, P10, P11 y P14; y entre los metros 8,5 y 12 de los perfiles P6, P7 y P13). La altura de esta cripta es de unos 2,5 m., a partir de los 0,30 m. de profundidad. El radargrama del perfil P8 muestra una sección transversal de la cripta con su bóveda.

3. *Tumba*

- Una tumba situada entre los metros 5,30 y 8,70 del perfil P1 (Tumba A). Dicha estructura se sitúa a una profundidad comprendida entre los 0,30 m. y 0,90 m.
- Una tumba (Tumba B) que tiene su eje mayor comprendido entre los perfiles P29 y P32, con una longitud de 2 m., y un ancho de 1,7 m. (entre los 4,30 m. y los 6,0 m. de los perfiles P32 y P37). La altura de esta tumba es de unos 1,3 m. a partir de los 0,40 m. de profundidad. El perfil P32 muestra una sección transversal de dicha tumba de la que no se tenía constancia y que se localiza en el ala izquierda de la nave del crucero.

4. *Cimentación*

- Zapatas de cimentación con una potencia de 1 m., situadas a una profundidad entre los 0,5 m. y 1,5 m. en los perfiles P49 y P50, entre otros.

5. Patología

- Zonas anómalas:

a. Zonas removidas

A partir del metro 13,30 hasta el metro 18,50 del perfil P29 se identifica una zona anómala, zona removida, en el subsuelo de la nave lateral izquierda, entre los 0,50 m. y los 1,30 m. de profundidad.

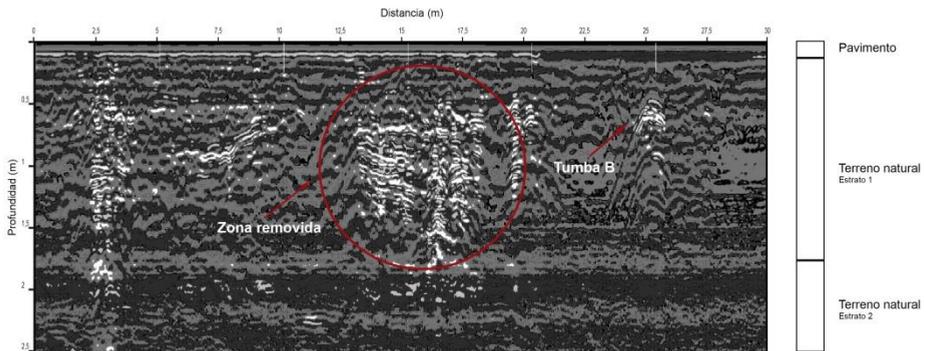


Figura 5.72. Radargrama del perfil P29, tomado en una de las naves laterales de la iglesia. En el perfil se observa: una zona anómala y una tumba inédita.

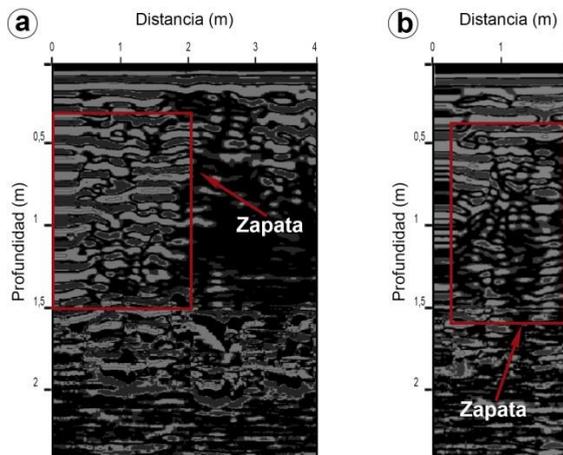


Figura 5.73. Radargramas correspondiente a los perfiles 49 (a) y 50 (b), realizados para el estudio de la cimentación en muros y pilares, respectivamente. En ambos perfiles se distinguen las zapatas que conforman la cimentación en esta área del edificio.

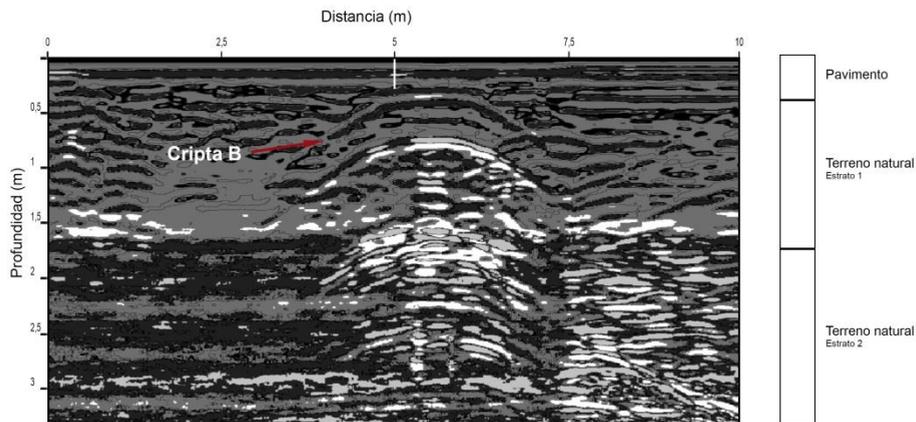


Figura 5.74. Radargrama del perfil P8, realizado en el ala derecha de la nave del crucero de la iglesia, donde se distingue una cripta abovedada inédita.

5.7.5. Modelización de los resultados en 2D

En las siguientes figuras se presenta la modelización bidimensional de una selección de radargramas representativos de la Iglesia del Sagrado Corazón de Jesús, derivada de la interpretación de los perfiles de georradar.

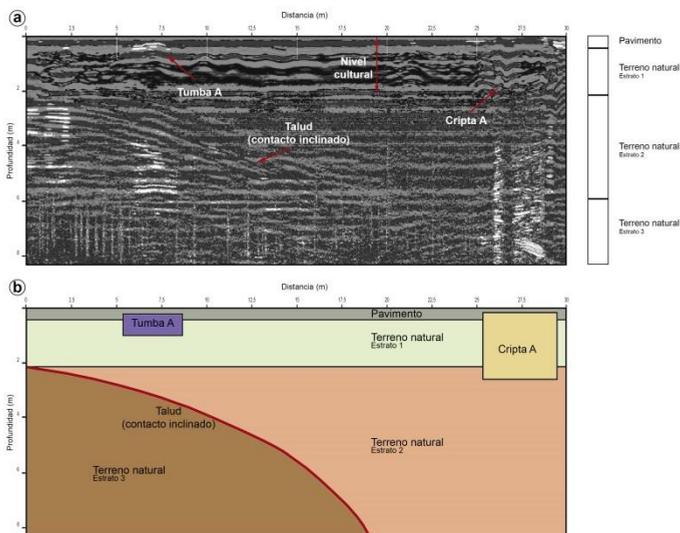


Figura 5.75. a- Interpretación del perfil P1. b- Modelización de los niveles, los contactos geológicos y las estructuras subterráneas detectadas en el perfil P1.

5. Aplicación del georradar: Estudio del subsuelo en el patrimonio religioso

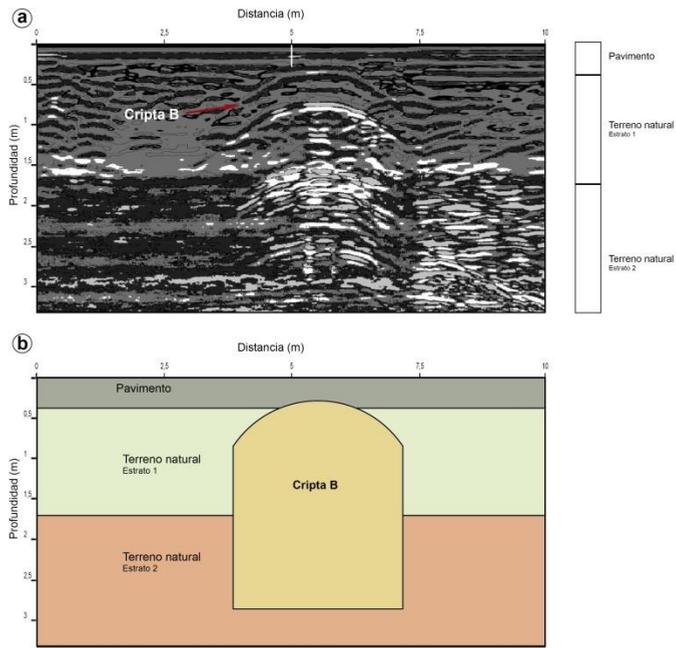


Figura 5.76. a- Interpretación del perfil P8. b- Modelización de los niveles y la cripta detectada en el perfil P8.

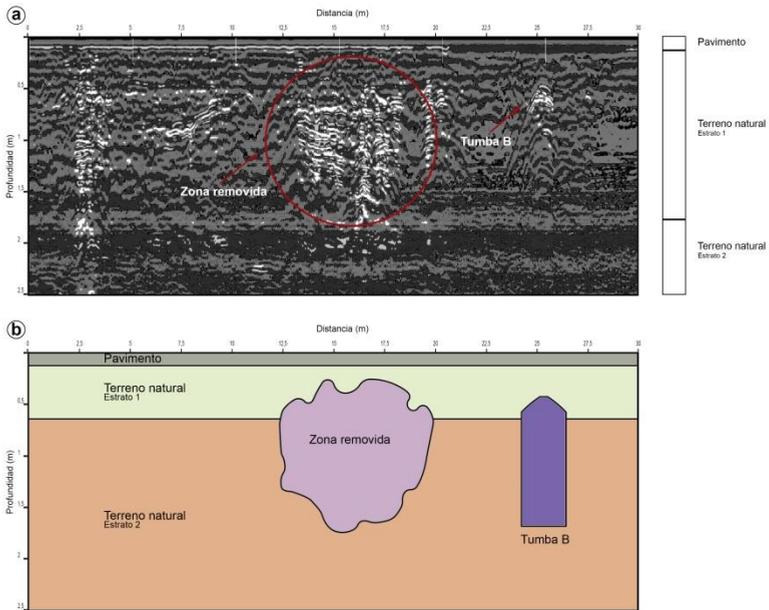


Figura 5.77. a- Interpretación del perfil P29. b- Modelización de los niveles, estructuras y anomalías detectadas en el perfil P29.

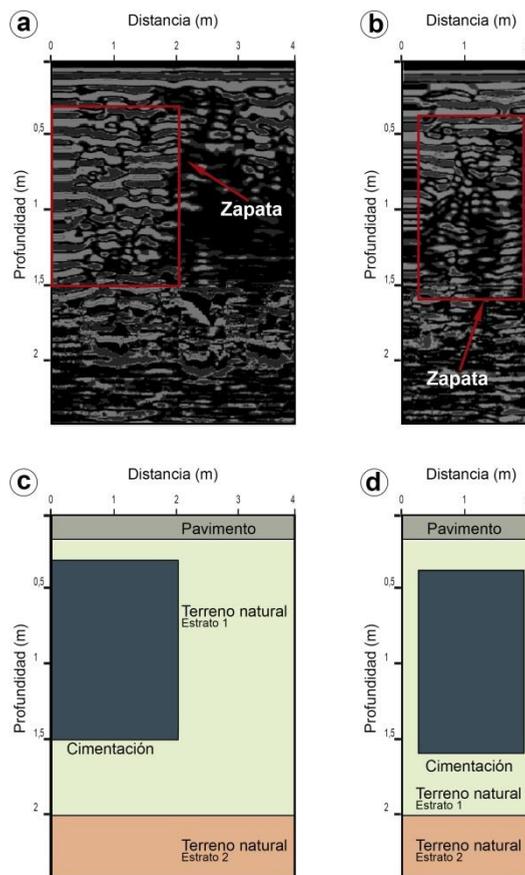


Figura 5.78. Interpretación de los perfiles P49 (a) y P50 (b). Modelización de los niveles y las cimentaciones detectadas en los perfiles P49 (c) y P50 (d).

5.7.6. Modelización de los resultados en 3D

La generación de tres modelos 3D de los datos de georradar del subsuelo en el interior de la Iglesia del Sagrado Corazón de Jesús, correspondientes a la nave principal y a las alas derecha e izquierda de la nave del crucero, ha mejorado notablemente el análisis de los radargramas en 2D. De esta manera, se ha incrementado la calidad de los resultados correspondientes a la detección y cartografiado de estructuras enterradas, obteniendo las dimensiones más precisas tanto en planta como en profundidad.

En la interpretación de los resultados 3D obtenidos en el estudio cabe destacar la detección de los siguientes elementos: un talud en el subsuelo situado en la fachada principal, que podría corresponder a una estructura constructiva de la antigua muralla árabe; una cripta en el ala derecha de la nave crucero de dimensiones 5,5 m. de longitud, 3,50 m. de ancho y 2,5 m. de altura; una tumba en el ala izquierda de la nave crucero; un enterramiento en la nave principal; la disposición de los niveles culturales en el subsuelo y las dimensiones de las cimentaciones de muros y pilares.

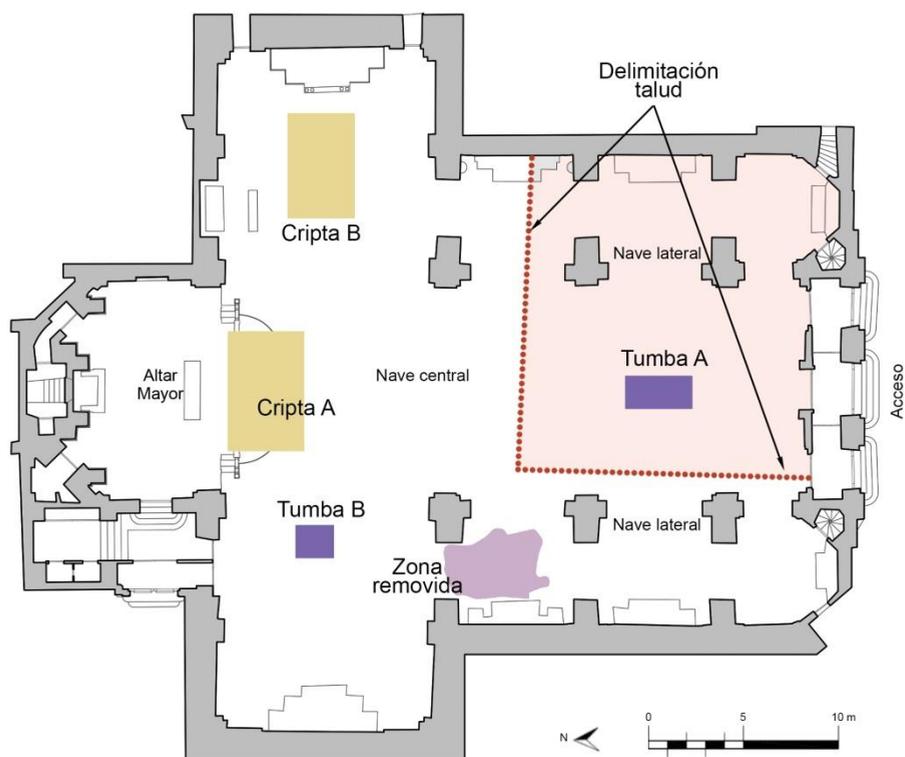


Figura 5.79. Situación en planta de las estructuras enterradas en el subsuelo de la Iglesia del Sagrado Corazón de Jesús resultantes de la interpretación de los datos 3D obtenidos por georradar.

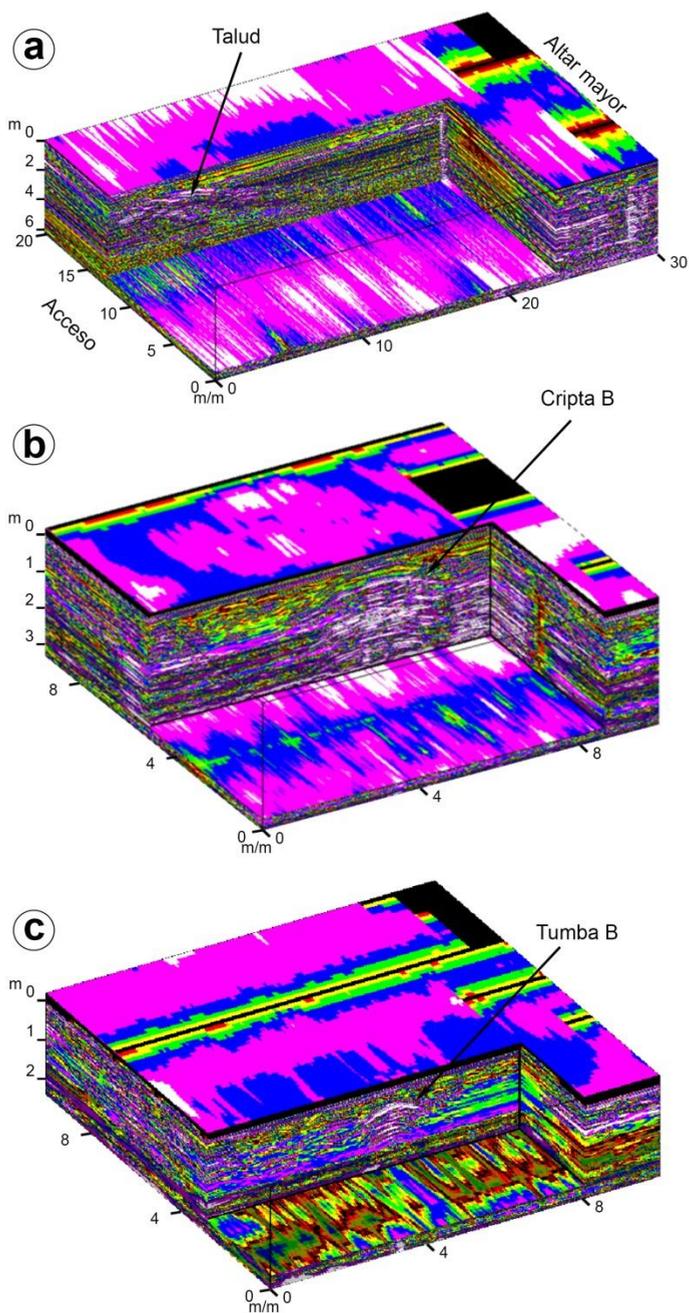


Figura 5.80. a- Modelo 3D del subsuelo de la nave principal de la iglesia. b- Modelo 3D del subsuelo del ala derecha de la nave del crucero de la iglesia. c- Modelo 3D del subsuelo del ala izquierda de la nave del crucero de la iglesia.

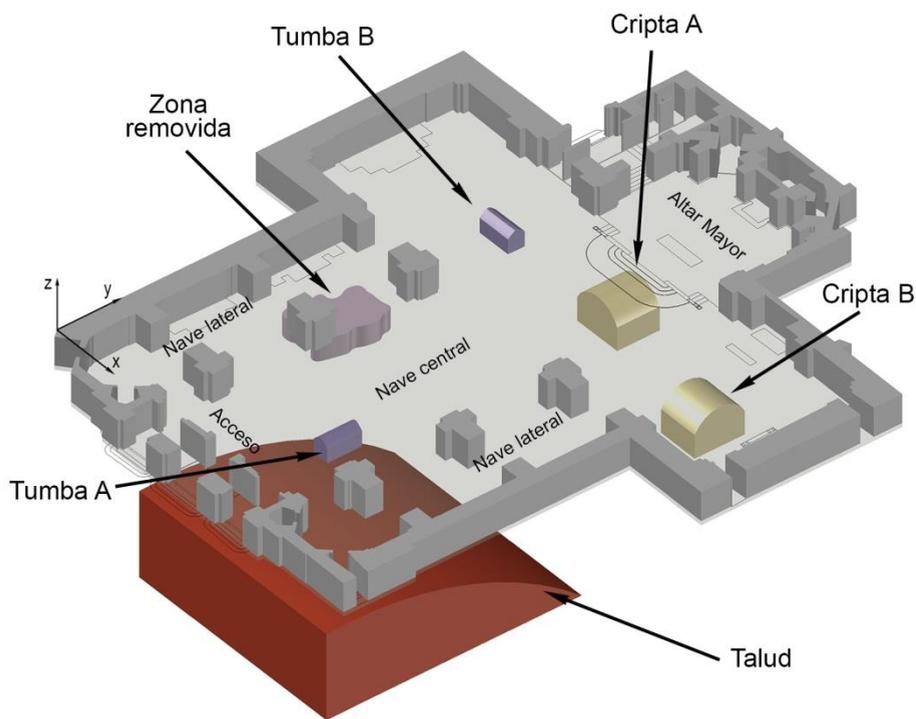


Figura 5.81. Modelización tridimensional del subsuelo de la Iglesia del Sagrado Corazón de Jesús, donde se observa las estructuras y patología detectadas, así como el talud existente bajo el acceso a la iglesia.

5.8. IGLESIA DE SAN JUAN DEL HOSPITAL DE VALENCIA

5.8.1. Descripción del edificio

El objetivo de este estudio es confirmar la presencia de vestigios de las gradas del Circo Romano en el subsuelo de la Iglesia de San Juan del Hospital, tomando como referencia excavaciones arqueológicas llevadas a cabo en los alrededores del edificio. Asimismo, se pretende detectar y cartografiar cualquier estructura subterránea existente en el subsuelo del edificio.

El conjunto de San Juan del Hospital, del siglo XIII, está ubicado en el centro histórico de la ciudad de Valencia.

Dicho conjunto monumental fue sede durante 600 años de la primera Orden religioso-militar de caballeros cruzados, la de San Juan del Hospital de Jerusalén, actualmente Orden de Malta. Primer hospital de la ciudad reconquistada por Jaime I en 1238. Albergue de peregrinos hacia lugares tradicionales, como Santiago de Compostela. Cementerio hasta el s. XVIII. La preocupación de la Orden de Malta por la conservación del complejo dio como resultado la Declaración del Conjunto como Monumento Histórico Artístico de carácter Nacional en 1943.



Figura 5.82. Imágenes de la Iglesia de San Juan del Hospital: a- Patio norte de acceso, b- Portada de acceso a la iglesia, c- Interior de la iglesia (nave principal).

El conjunto de San Juan del Hospital está compuesto por la iglesia de una única nave con capillas laterales y dos patios (norte y sur), además de otra construcción adyacente a la iglesia en el lado sur, que alberga la capilla de Santa Bárbara.

Desde 1987 se han localizado restos del circo romano de la ciudad de Valencia. Estos hallazgos obligaron a replantearse la importancia que tenía Valencia durante el Alto Imperio. La ciudad de Valencia fue fundada en el año 138 A.C., siendo cónsul romano Décimo Junio Bruto y se creía que era una ciudad de escasa relevancia dado que no se había encontrado ninguna construcción importante y, además, existía un importante circo romano a tan sólo 25 km. de la ciudad, en Sagunto. Los últimos hallazgos arqueológicos indican que el Circo de Valencia sería el edificio más grandioso de la Valencia romana, con unos 350 m. de largo y 50 m. de ancho, y un aforo para más 10.000 personas.

5.8.2. Geología

La ciudad de Valencia se asienta sobre terrenos cuaternarios del Pleistoceno Superior. El tipo de suelo sobre el que se sitúa la ciudad está conformado por limos arenosos de inundación, que se extienden a lo largo de todo el territorio que conforma la Huerta y el centro histórico de Valencia (Mapa Geológico de España, MAGNA 50, hoja 722).

5.8.3. Materiales y metodología

En este estudio geofísico se ha empleado el equipo de georradar GSSI modelo SIR-3000, con dos antenas de frecuencias centrales 200 MHz y 400 MHz.

A tenor de los datos e indicaciones proporcionados tras las investigaciones arqueológicas realizadas y estudio de documentación histórica, en las zonas prospectadas se realizaron 24 perfiles de georradar, tanto transversales como longitudinales. Los rangos

empleados en los registros han sido de 200 ns, 150 ns, 100 ns, 80 ns, 60 ns y 40 ns; siendo la profundidad máxima alcanzada de unos 8 m.

El estudio con georradar en el conjunto arquitectónico de San Juan del Hospital se realizó con la generación de modelos tridimensionales (3D) de los datos de georradar. Para ello, se planificó perfiles transversales y longitudinales en la nave central, el altar mayor, la zona de tránsito y el patio sur. Se alcanzó una profundidad máxima de unos 8 metros suficiente para estudiar el nivel romano en el subsuelo de la ciudad de Valencia de acuerdo con los estudios arqueológicos. No obstante, el estudio presentado en este trabajo de investigación se restringe al análisis del subsuelo de la iglesia (perfiles del P11 al P18).

La determinación de los elementos constructivos en el subsuelo de las zonas estudiadas se ha realizado mediante el procesado de los radargramas con el programa RADAN. Durante el procesado de los radargramas se ha determinado las constantes dieléctricas del subsuelo. Asimismo se han aplicado diversos filtros, deconvolución, y en algunos casos migración y transformada de Hilbert.

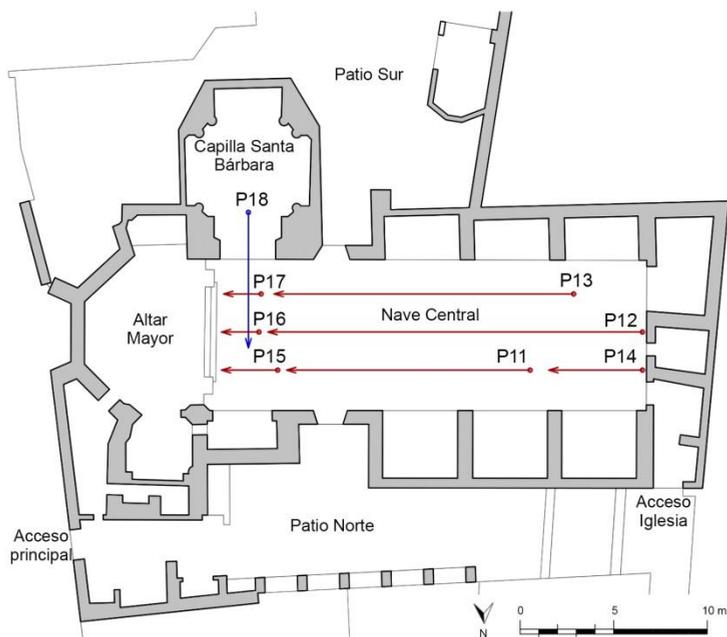


Figura 5.83. Ubicación de los perfiles de georradar en la zona estudiada: nave central de la Iglesia de San Juan del Hospital de Valencia.

5.8.4. Resultados

Los resultados más relevantes, en concordancia con los objetivos planteados, tras el análisis de los radargramas tomados en el interior de la Iglesia de San Juan del Hospital son los siguientes:

1. *Niveles culturales y geológicos*

El estudio del espacio subterráneo de la iglesia ha permitido detectar tres eventuales niveles en el subsuelo:

- El primero situado de 0 m a 2,10 m. de profundidad. Se corresponde con el nivel cultural cristiano.
- El segundo de 2,10 m. a 4,50 m. de profundidad. Se corresponde con el nivel cultural árabe.
- El tercero a partir de 4,50 m. de profundidad. Se corresponde con el nivel cultural romano.

2. *Cripta*

Una estructura abovedada en el subsuelo que está referenciada entre los 8 m. y los 11,50 m. del perfil P11, a 0,45 m. de profundidad. Dicha estructura está referenciada entre los metros 14 y 17 del perfil P12, y entre los metros del 11,50 al 14 del perfil P13.

3. *Estructuras lineales*

Estructuras superficiales en el subsuelo que están referenciadas en los metros del 8,50 al 13 del perfil P12; y a lo largo del perfil P13, hasta alcanzar la longitud de 10,50 m.

4. *Otras*

- Una gran estructura en el subsuelo que está referenciada desde el inicio del perfil P11 hasta los 5,70 m. Esta estructura también se distingue en el perfil P14, entre los 1,80 m. y los 2,60 m., a 1m. de profundidad. Dicha estructura se corresponde con el trazado de las gradas del antiguo Circo Romano de la ciudad de Valencia.

- Estructuras en todo el perfil P12, a partir de los 5 m. de profundidad. Cabe destacar la situada entre los metros 6,5 y 13 del citado perfil. Dichas estructuras podrían corresponderse con restos arqueológicos romanos, de los cuales se desconoce su naturaleza.

Las estructuras y niveles detectados en el subsuelo de la Iglesia de San Juan del Hospital quedan perfectamente sintetizados en el radargrama del perfil P12, que atraviesa longitudinalmente el espacio interior del templo por su eje central:

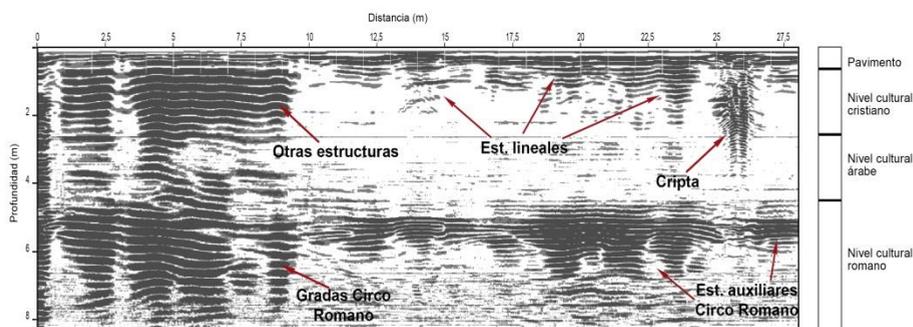


Figura 5.84. Radargrama del perfil P12, que atraviesa longitudinalmente la iglesia por el eje central de la misma.

5.8.5. Modelización de los resultados en 2D

Como se ha especificado en el apartado anterior, dado que las estructuras y niveles del subsuelo de la iglesia objeto de estudio aparecen reflejados en su totalidad en un único perfil, la modelización bidimensional se realizará en base a dicho perfil P12. Así pues, las estructuras y niveles existentes en el subsuelo de la iglesia se modelizan como sigue:

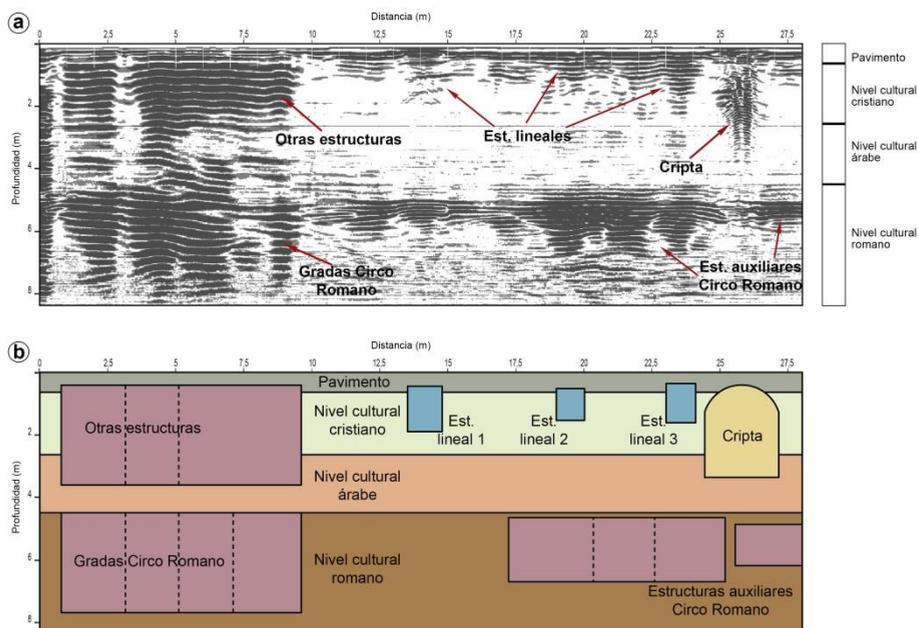


Figura 5.85. a- Interpretación del perfil P12. b- Modelización de los niveles y las estructuras subterráneas detectadas en el perfil P12.

5.8.6. Modelización de los resultados en 3D

El modelo tridimensional de la nave central de la Iglesia de San Juan del Hospital obtenido mediante georradar permite identificar tres niveles culturales en el subsuelo. Dichos niveles se corresponderían con los niveles culturales cristiano, árabe y romano.

En el horizonte perteneciente al nivel cultural cristiano, se distinguen diferentes estructuras aisladas, entre las que destacan estructuras lineales y una cripta bajo el Altar mayor de la iglesia.

En el nivel cultural romano, se detecta una estructura que coincide con el recorrido de las gradas del Circo Romano de la ciudad de Valencia a su paso por la nave central de la iglesia objeto de estudio. Además, se distingue otra estructura situada entre las gradas y la “spina” del circo romano y que podría tratarse de una eventual estructura auxiliar del citado Circo Romano.

En las siguientes figuras se muestra la modelización tridimensional elaborada para el subsuelo de la Iglesia de San Juan del Hospital de Valencia.

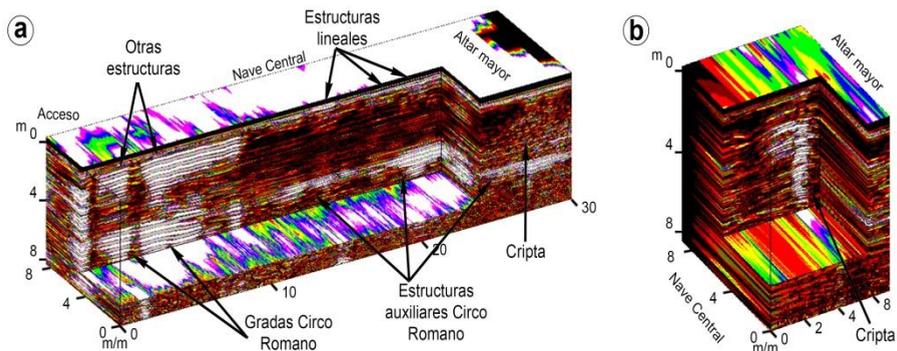


Figura 5.86. a- Modelo 3D del subsuelo de la nave principal de la iglesia. b- Modelo 3D del subsuelo del Altar mayor de la iglesia.

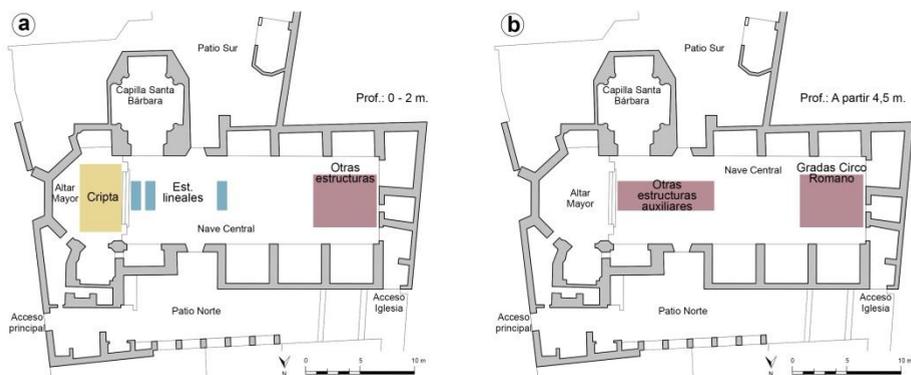


Figura 5.87. Situación en planta de las estructuras enterradas en el subsuelo de la Iglesia de San Juan del Hospital resultantes de la interpretación de los datos 2D y 3D obtenidos por georradar: a- Estructuras existentes en el nivel cultural cristiano (0 - 2 m.), b- Estructuras del nivel cultural romano (a partir de 5 m. de profundidad).

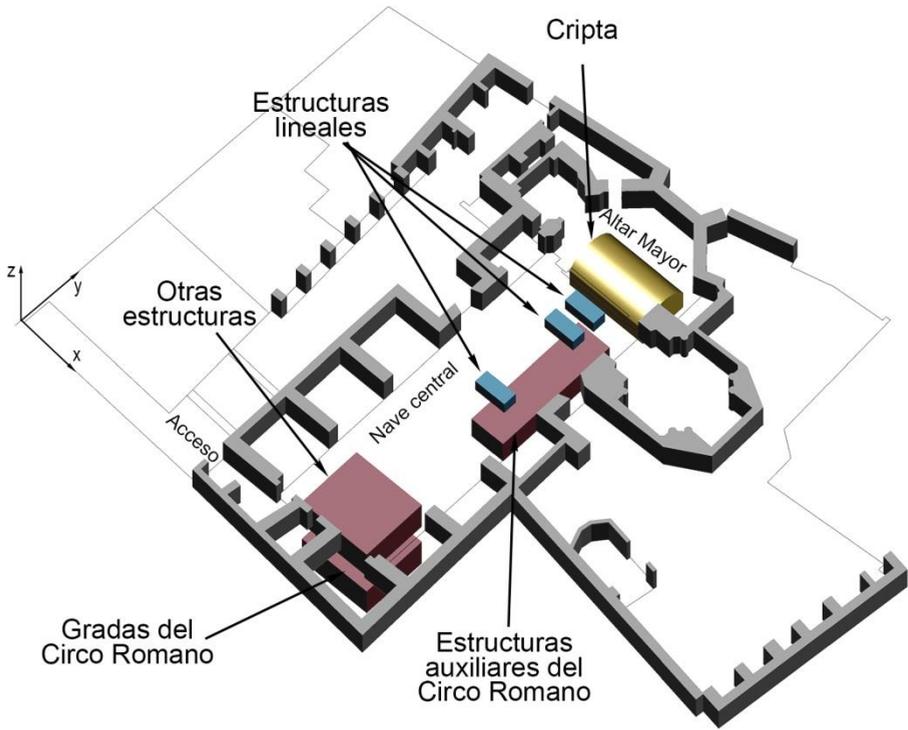


Figura 5.88. Modelización tridimensional del subsuelo de la Iglesia de San Juan del Hospital, donde se observa las estructuras detectadas en el subsuelo de la iglesia.

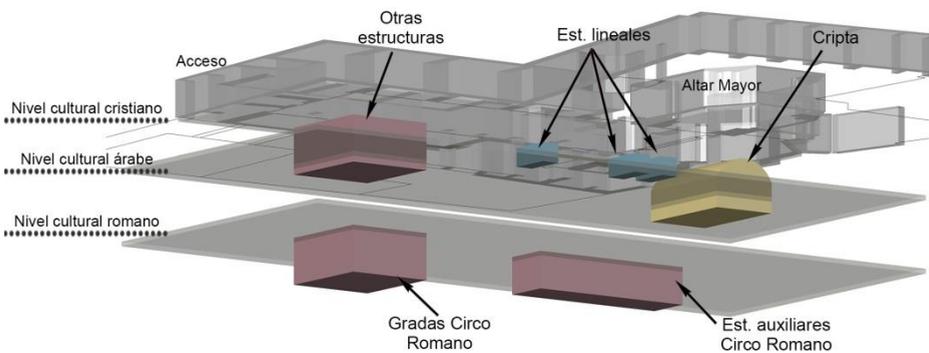


Figura 5.89. Plano contrapicado de la modelización tridimensional del subsuelo de la Iglesia de San Juan del Hospital, donde se observa las estructuras y niveles culturales identificados a distintas profundidades.

5.9. CRIPTA DEL MONASTERIO DE SAN MIGUEL DE LOS REYES DE VALENCIA

5.9.1. Descripción del edificio

El objeto de estudio consistió en analizar los mausoleos ubicados en la Cripta y el subsuelo con el fin de determinar la posición exacta de las tumbas de los fundadores del Monasterio de San Miguel de los Reyes (1546-1835), así como detectar posibles elementos arqueológicos que pudiesen existir en el subsuelo de dicho espacio.

El Monasterio de San Miguel de los Reyes está situado en la periferia del área urbana de la ciudad de Valencia, en el tramo final de la Avda. de la Constitución, colindando con el término municipal de Tavernes Blanques. En 1546 los Duques de Calabria, D. Fernando de Aragón y Dña. Germana de Foix, fundaron un Monasterio bajo la orden de San Jerónimo, con el propósito de que fuera su mausoleo familiar. El lugar elegido fue el antiguo monasterio de San Bernat, tras la expulsión de los monjes cistercienses. El proyecto consistió en una iglesia central, remodelada a partir de la antigua iglesia cisterciense, con un claustro al norte y otro al sur. Parte del anterior monasterio de San Bernat se conservó en el claustro norte, mientras que el claustro sur se construyó totalmente nuevo.

Parte de los resultados del análisis del subsuelo de este edificio se recogen en el artículo publicado por García *et al.* (2007).

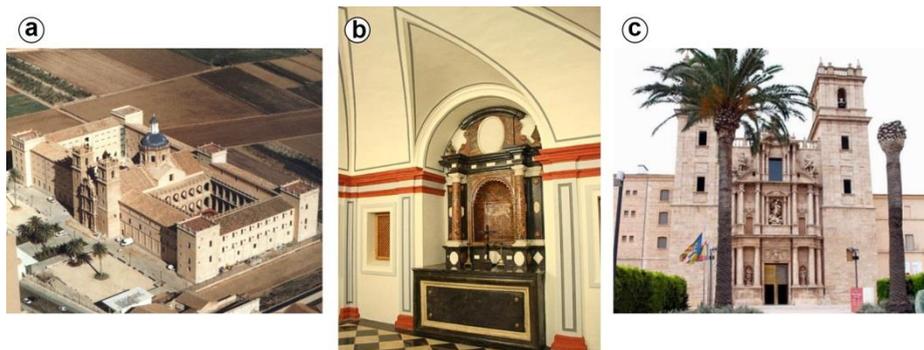


Figura 5.90. Imágenes del Monasterio de San Miguel de los Reyes: a- Conjunto monumental del Monasterio, b- Altar mayor de la Cripta, c- Fachada principal de la Iglesia del Monasterio.

La nueva iglesia fue erigida entre 1623 y 1644, sobre la antigua iglesia de San Bernat. La Cripta ubicada bajo el Altar mayor se supone que se albergan los restos de los fundadores del Monasterio de San Miguel de los Reyes desde el siglo XVIII.

El edificio se utilizó como monasterio hasta la Desamortización de Mendizábal en 1835. Desde entonces pasó a ser propiedad del gobierno de la ciudad y adoptó diferentes usos hasta 1874. Fue en este año cuando se convirtió en una cárcel, uso que se prolongó hasta el año de 1966. Tras un largo periodo de abandono, el antiguo monasterio fue restaurado (1997-1999) para alojar la Biblioteca Valenciana.

5.9.2. Geología

La ciudad de Valencia se asienta sobre terrenos cuaternarios del Pleistoceno Superior. El tipo de suelo sobre el que se sitúa la ciudad está conformado por limos arenosos de inundación, que se extienden a lo largo de todo el territorio que conforma la Huerta y el centro histórico de Valencia (Mapa Geológico de España, MAGNA 50, hoja 722).

5.9.3. Materiales y metodología

En este estudio geofísico se ha utilizado un equipo de georradar GSSI modelo SIR-3000, perteneciente a la Universidad Politécnica de Valencia, con 3 antenas de frecuencia central de 1,5 GHz, 900 MHz y 400 MHz.

El empleo de estas tres antenas ha permitido estudiar con detalle los siguientes rangos de profundidades:

- Hasta 0,80 m. de profundidad (antena 1,5 GHz, registro 20 ns).
- Hasta 1 m. de profundidad (antena 900 MHz, registro 30 ns).
- Hasta 3 m. de profundidad (antena 400 MHz, registro 50 ns y 80 ns).

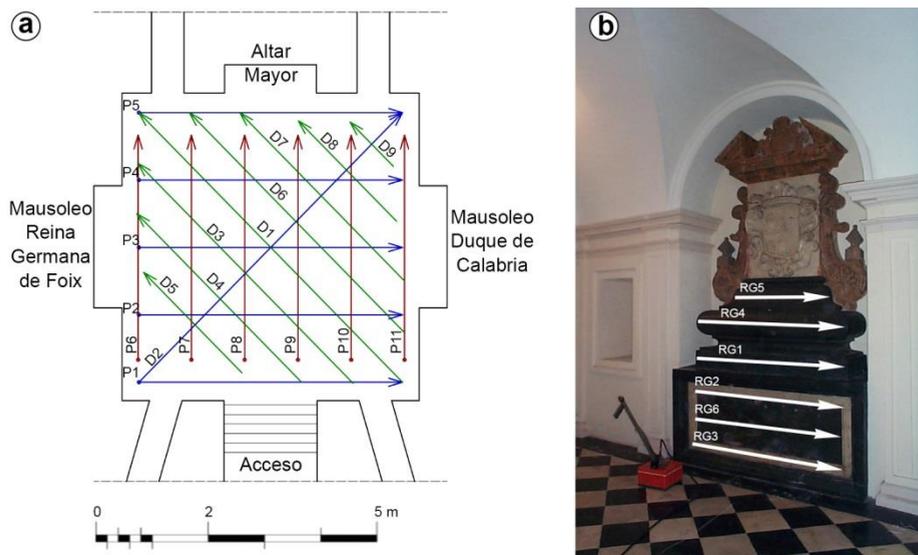


Figura 5.91. a- Ubicación de los perfiles de georradar en el subsuelo de la Cripta del Monasterio de San Miguel de los Reyes, b- Localización de los perfiles sobre el Mausoleo de la reina Germana de Foix, en el interior de la Cripta.

Teniendo en cuenta las peculiaridades de la planta de la cripta, y en consonancia con objetivos propuestos en este estudio, se proyectaron 20 perfiles de georradar en la solera (5 perfiles transversales, 6 longitudinales y 9 diagonales). Asimismo se realizaron 6 perfiles en los dos mausoleos laterales, 5 perfiles en el altar y 3 perfiles en los muros.

Dependiendo de la profundidad a estudiar se emplearon las 3 antenas anteriormente citadas con los cuatro rangos de registro (20 ns, 30 ns, 50 ns y 80 ns) en cada uno los perfiles diseñados. Esto ha permitido investigar con detalle 3 rangos de profundidades desde 0 hasta 3 m.

Los datos obtenidos (radargramas) en el área estudiada se han procesado con el programa RADAN. Durante el procesamiento de los radargramas se han determinado las constantes dieléctricas del subsuelo. Asimismo se han aplicado diversos filtros, deconvolución, y en algunos casos la transformada de Hilbert.

5.9.4. Resultados

Tras el análisis de los registros de georradar en el interior de la Cripta, se extraen los siguientes resultados:

1. Niveles culturales y geológicos

En el subsuelo de la cripta, se identifican cuatro niveles:

- Un primer nivel correspondiente al pavimento, que abarca desde la superficie hasta una profundidad de unos 0,15 m.
- Un segundo horizonte, de relleno, desde los 0,15 m. de profundidad hasta los 0,40 m.
- Un tercer horizonte conformado por un segundo nivel de relleno, desde los 0,40 m. hasta los 1,20 m. de profundidad.
- Un cuarto y último nivel de terreno natural, detectado a partir de 1,20 m. de profundidad.

2. Tumba

Se observa una zona de posibles enterramientos en el subsuelo de la cripta delimitada por los perfiles diagonales D1, D2, D3, D4, D6, D7 y D8, que se corresponden con los perfiles transversales P1, P2, P3 y P4, y con los longitudinales P7, P8 y P9, a una profundidad a partir de 1,30 m desde la solera de la cripta.

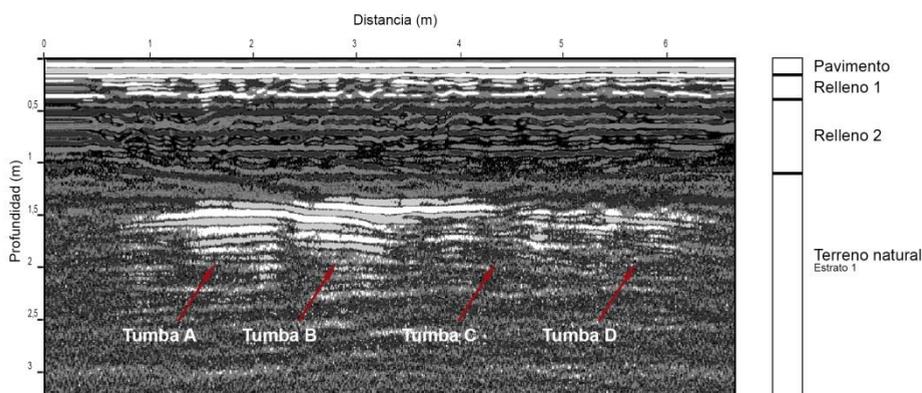


Figura 5.92. Radargrama del perfil D1 tomado en la solera de la cripta, donde se observa la existencia de una zona de posibles enterramientos en el subsuelo (Tumbas A, B, C y D).

3. Estructuras lineales

Se ha registrado un elemento constructivo singular en los dos mausoleos correspondientes a los perfiles RG5 y DC5.

4. Patología

- Zonas anómalas

En la zona de los perfiles DC4 y RG4 realizados en los mausoleos del Duque de Calabria y de la Reina Germana, respectivamente, se ha detectado zonas anómalas, que podrían apuntar bien a elementos constructivos de los mausoleos o bien a pequeños espacios huecos.

En la parte central del altar se observa la existencia de una zona destinada a un relicario o a una urna, siendo sus dimensiones en la parte superior del altar de 0,35 x 0,35 x 0,45 m., en los perfiles A1, A2, A-BAJO1, A-BAJO2 y A-BAJO.

En los restantes perfiles efectuados en ambos mausoleos no se han registrado oquedades ni elementos internos significativos, lo que implica, en general, que son macizos en su zona inferior a partir de los perfiles DC1 y RG1. Asimismo, no se han registrado oquedades ni elementos singulares en los muros investigados.

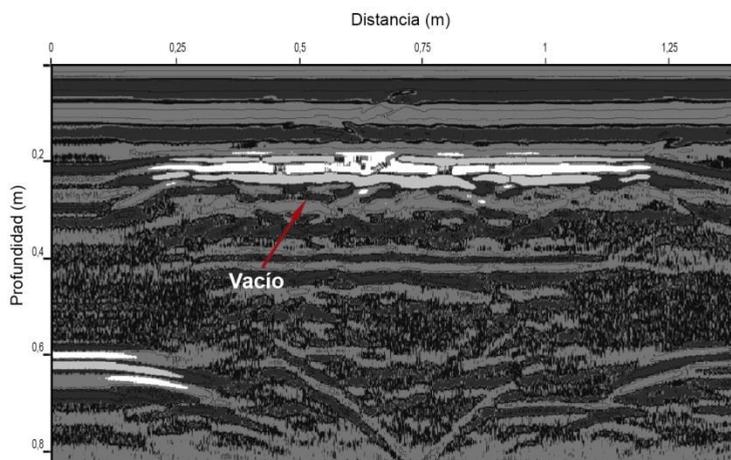


Figura 5.93. Radargrama del perfil RG4, perteneciente al Mausoleo de la Reina Germana de Foix, donde se observa la existencia de una zona anómala: vacío u oquedad.

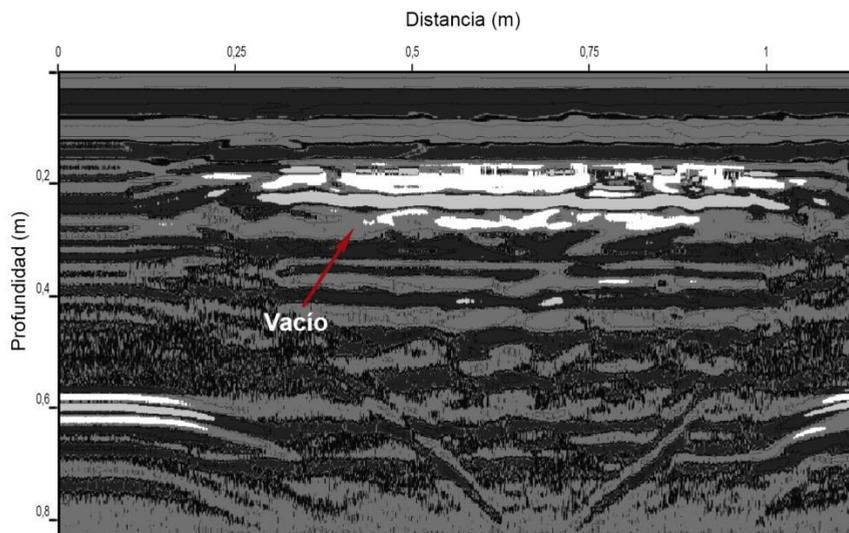


Figura 5.94. Radargrama del perfil DC4, perteneciente al Mausoleo del Duque de Calabria, donde se distingue una zona anómala: vacío u oquedad.

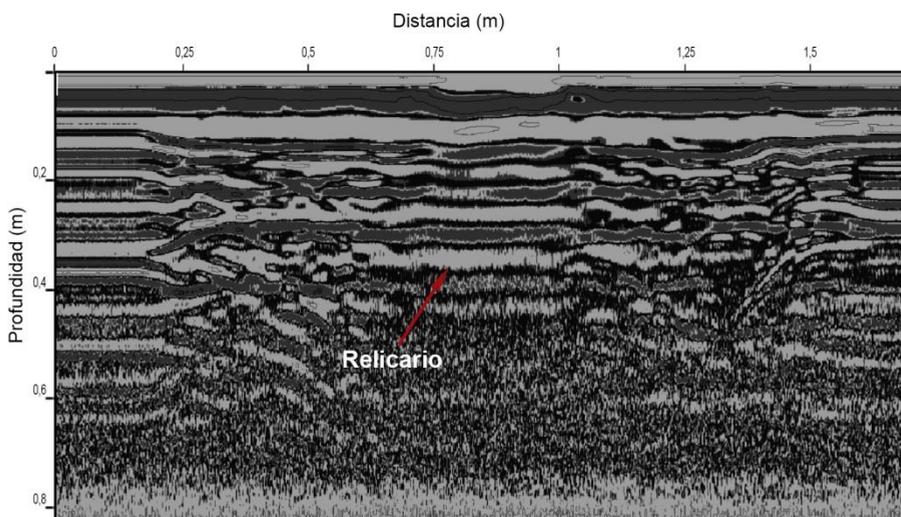


Figura 5.95. Radargrama del perfil A1 realizado en la parte superior del altar de la cripta, donde se identifica la presencia de una zona destinada a un relicario o a una urna.

5.9.5. Modelización de los resultados en 2D

La modelización bidimensional de la Cripta del Monasterio de San Miguel de los Reyes se realiza en base a la interpretación de los radargramas más representativos de dicha estancia, considerando no sólo el subsuelo de la cripta sino también los espacios de mausoleos y el altar. A partir de dicha interpretación, se ha establecido la representación gráfica de la modelización bidimensional de los niveles culturales y estratos geológicos, así como de las estructuras identificadas bajo las capas superficiales ya sea de elementos horizontales (subsuelo) o de elementos verticales (muros).

La modelización para los niveles y las estructuras detectados en el perfil diagonal del subsuelo D1 se muestran en la figura siguiente:

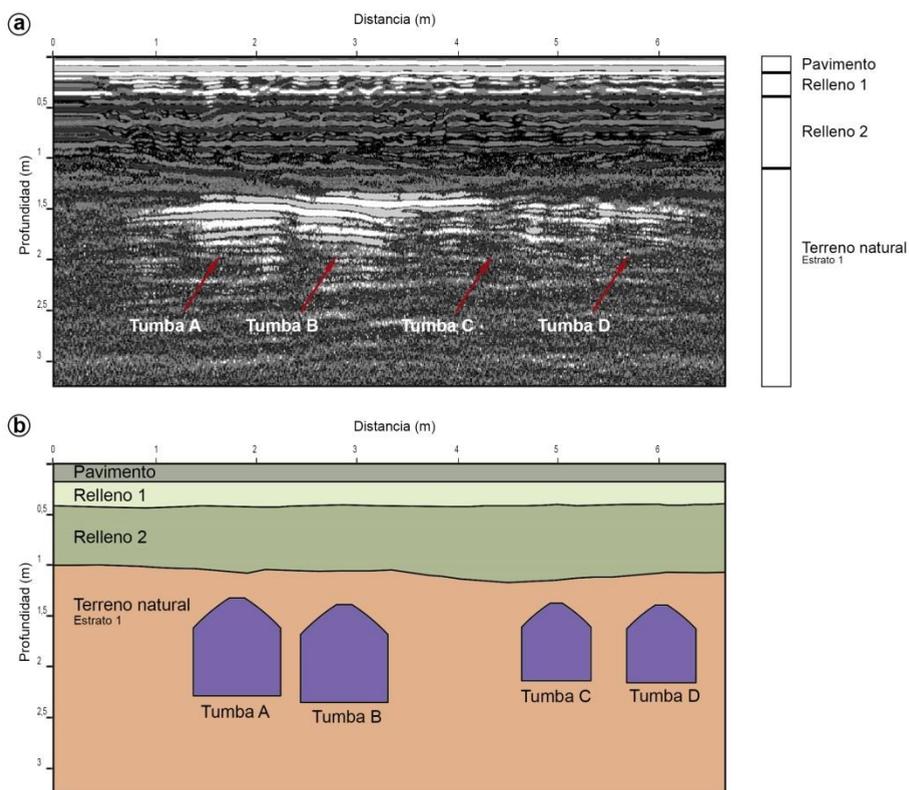


Figura 5.96. a- Interpretación del perfil D1. b- Modelización de los niveles (pavimento, relleno 1, relleno 2 y terreno natural) y estructuras detectadas (Tumbas A, B, C y D) en el perfil D1.

Los vacíos u oquedades identificados tras los mausoleos de la Reina Germana de Foix y el Duque de Calabria se modeliza como sigue. Se ha tomado como ejemplo el mausoleo de la Reina Germana de Foix:

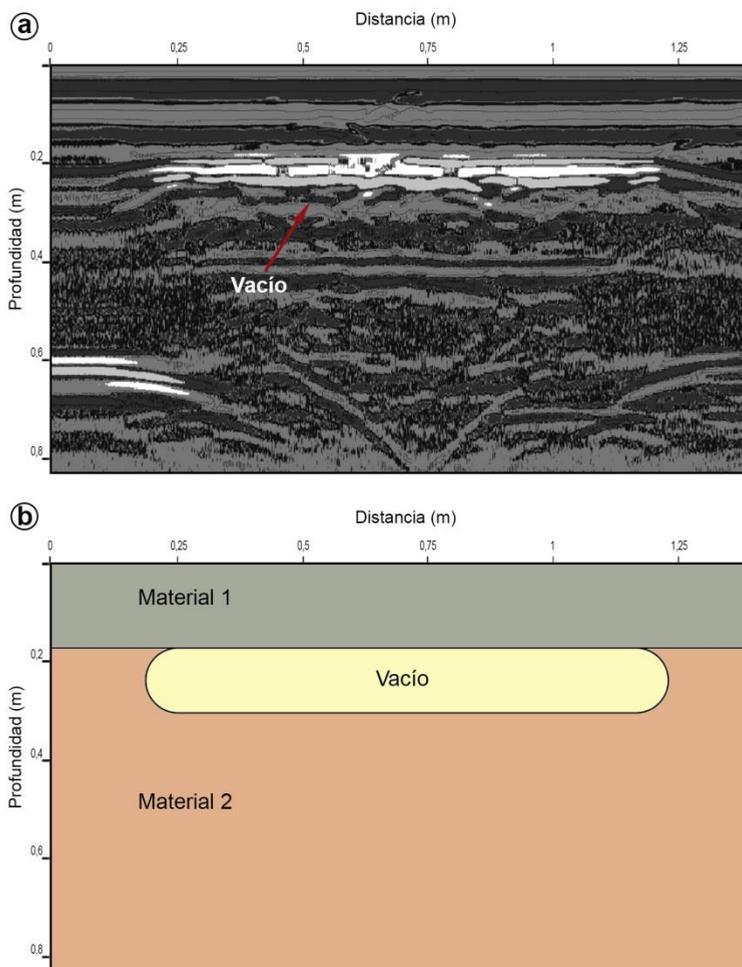


Figura 5.97. a- Interpretación del perfil RG4. b- Modelización de la anomalía detectada (vacío) en el perfil RG4.

Finalmente, el relicario detectado en el altar de la Cripta, se ha modelizado como si de una estructura subterránea se tratara. De esta manera, la modelización de dicha estructura detectada se engloba dentro del grupo denominado como “otras estructuras”, definido al inicio de este capítulo.

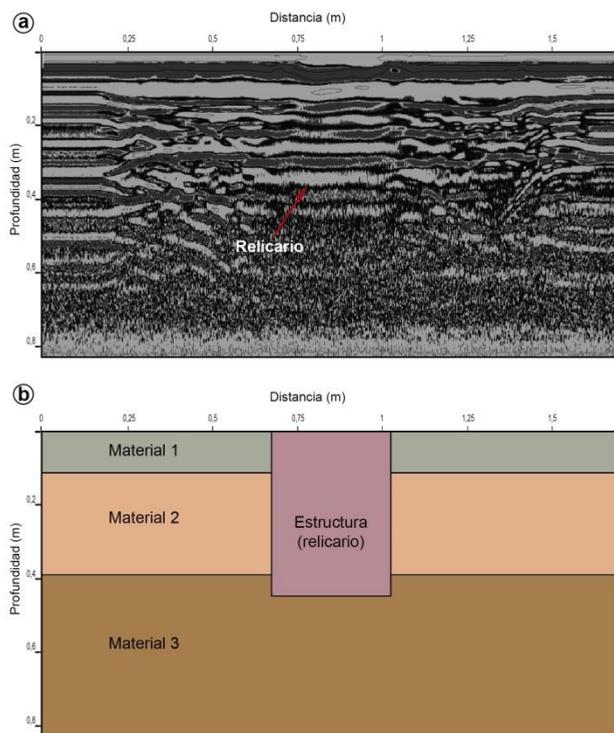


Figura 5.98. a- Interpretación del perfil A1. b- Modelización de la estructura detectada (relicario) en el perfil A1.

5.9.6. Modelización de los resultados en 3D

La modelización tridimensional de los datos de georradar de este caso de estudio se ciñe al análisis del subsuelo de la Cripta, a pesar de que para la modelización bidimensional se había analizado también los perfiles tomados sobre elementos verticales (muros y mausoleos). El objetivo principal era encontrar las tumbas de la Reina Germana de Foix y del Duque de Calabria.

Se disponía de documentación histórica (no expresa) que hacía suponer que los restos de los fundadores se encontraban en la Cripta, situada bajo del Altar mayor de la iglesia del Monasterio. Además, todo apuntaba a que los enterramientos se deberían de haber realizado en el interior de sus mausoleos. Sin embargo, tras el análisis mediante

georradar se descubrió que los mausoleos eran macizos y no podían contener ningún resto.

La inmediata cuestión que surgía entonces era localizar el lugar de sepultura de los fundadores de dicho Monasterio. Por este motivo, se inspeccionó el subsuelo de la cripta y tras su análisis mediante la modelización tridimensional de los datos de georradar, se localizó un área de enterramientos. En esta sección del subsuelo, se identificaron cuatro zonas (cuatro tumbas). Dos de ellas seguramente corresponderían a las tumbas de los Duques de Calabria (los fundadores del Monasterio) y las otras dos, probablemente pertenecerían a las hermanas de la Duquesa. No obstante, como ya se ha indicado en otros apartados de este capítulo, no es competencia de este trabajo de investigación determinar la correspondencia de las tumbas con los cuerpos enterrados en ella, sino establecer la modelización de las estructuras halladas en el espacio estudiado.

Así pues, se ha determinado la extensión en superficie de dichos enterramientos detectados para su cartografiado en planta, dado que el análisis de los datos en 2D resultaba restrictivo en este aspecto.

A continuación, se presenta la modelización tridimensional y la localización de los elementos subterráneos identificados en el subsuelo de la Cripta del Monasterio de San Miguel de los Reyes.

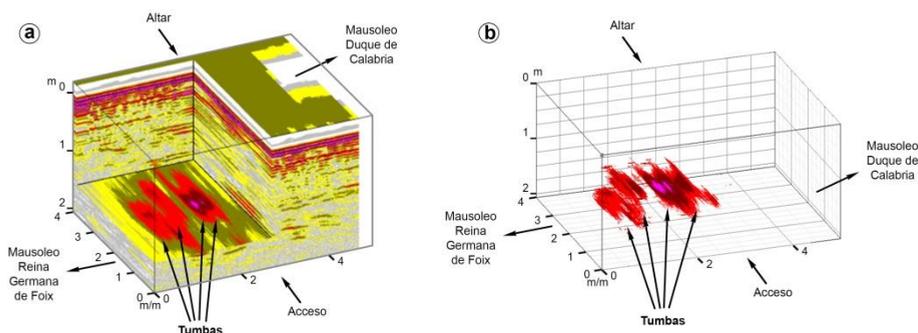


Figura 5.99. a- Modelo tridimensional de los datos de georradar obtenidos en el subsuelo de la Cripta del Monasterio de San Miguel de los Reyes, donde se distingue los niveles del subsuelo y la reflexión de los enterramientos en el subsuelo. b- Modelo tridimensional filtrado, donde se muestra de forma aislada las tumbas detectadas en el subsuelo.

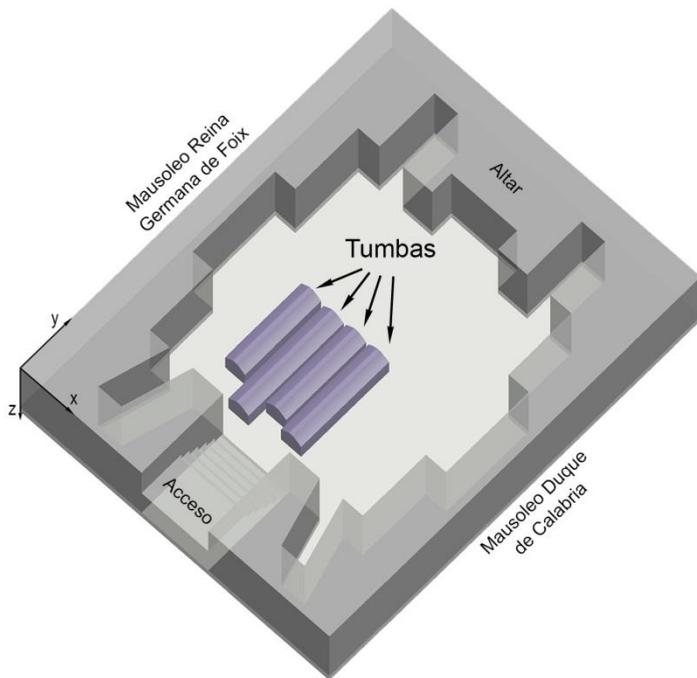


Figura 5.100. Modelización tridimensional de las tumbas detectadas en el subsuelo de la Cripta del Monasterio de San Miguel de los Reyes.

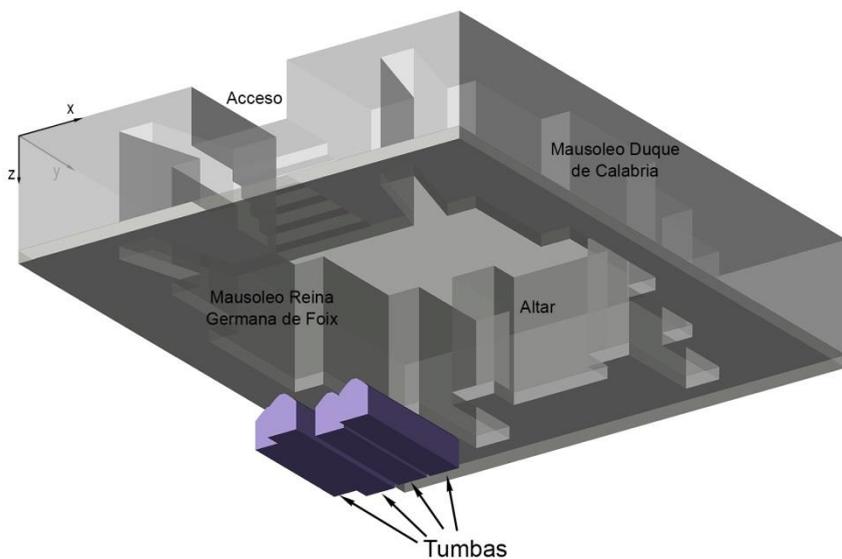


Figura 5.101. Plano contrapicado de la modelización tridimensional del subsuelo de la Cripta del Monasterio de San Miguel de los Reyes, donde se observa las tumbas detectadas.

5.10. IGLESIA ARCIPRESTAL DE SANTIAGO DE VILLENA

5.10.1. Descripción del edificio

El objeto de este estudio es localizar y georreferenciar niveles y estructuras subterráneas, mediante la técnica geofísica de georradar, en la Iglesia Arciprestal de Santiago, Villena (Alicante).

La iglesia se encuentra situada en la plaza de Santiago, situada al sur de la localidad, a las faldas del Castillo de la Atalaya, en el casco histórico del pueblo.

A pesar de que existen noticias de la existencia del templo ya en 1434, la imagen actual de la Iglesia Arciprestal de Santiago quedó definida a lo largo del siglo XVI, cuando se amplió el templo.

Aunque la iglesia ha sufrido transformaciones a lo largo de su historia se la considera como uno de los conjuntos más representativos del gótico mediterráneo: una nave central de grandes dimensiones, capillas en los espacios entre los estribos y escasa incidencia de la luz natural. A pesar de ello, también están presentes elementos renacentistas, como son la puerta de acceso a la sacristía, el aula capitular, las dos ventanas del primer piso de la torre y especialmente la pila bautismal esculpida en alabastro del siglo XVI. La Capilla de la Comunión se inició en 1786 y se terminó en 1881.

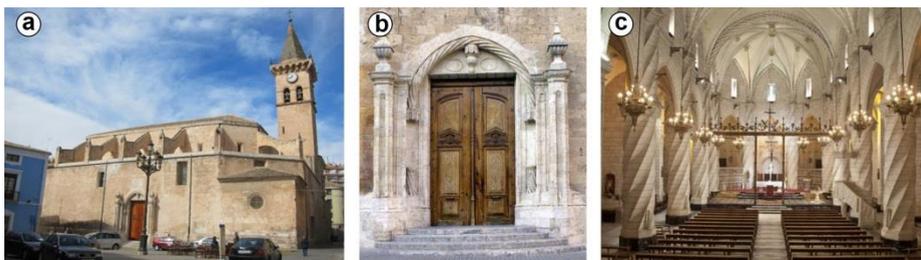


Figura 5.102. Imágenes de la Iglesia Arciprestal de Santiago de Villena: a- Fachada principal, b- Interior de la iglesia.

La Iglesia Arciprestal de Santiago fue declarada Monumento Nacional Histórico-Artístico en 1931. Sin embargo, durante la Guerra Civil Española (1936-1939), la iglesia sufrió diversos desperfectos, entre los que se cuenta la pérdida de todo el arte mueble y de gran parte de la verja que cerraba el Altar mayor, construida en 1553. También desapareció el retablo de la capilla mayor, y se destruyeron los escudos labrados en la fachada recayente a la calle Ramón y Cajal, así como el órgano y la mayor parte de los documentos del archivo del templo.

5.10.2. Geología

El casco histórico de Villena está construido sobre un terreno conformado por mantos de arroyada difusa y abanicos aluviales. Este terreno se caracteriza por la presencia de conglomerados, arenas y arcillas, generalmente encostradas. Al oeste de la población se identifican yesos y arcillas del periodo Triásico (Mapa Geológico de España, MAGNA 50, hoja 845).

5.10.3. Materiales y metodología

Para el estudio se ha empleado el equipo de georradar SIR-3000 con una antena de frecuencia central de 200 MHz, con rangos desde los 200 ns hasta los 600 ns. Esto ha permitido alcanzar una profundidad máxima de estudio de 9,5 m. En el procesado de los registros, se ha aplicado la función de ganancia (4/5 puntos) y filtros.

Con el objeto de estudiar zonas específicas de la iglesia, se ha tomado una serie de perfiles para su análisis en 2D, siendo un total de 10 perfiles: 4 en el altar (P87, P92, P93 y P95), 5 longitudinales en la nave central (P1, P3, P9, P10 y P40) y 1 cubriendo el presbiterio (P11).

El subsuelo de la Iglesia Arciprestal de Santiago se ha estudiado mediante *amplitude slices* o secciones horizontales obtenidas a partir del modelo tridimensional de los datos del georradar. El estudio con el modelo en 3D se ha centrado en la zona de la nave principal, los

cruceros y las capillas laterales. Para ello se ha empleado un total de cinco perfiles transversales (desde el perfil P4 hasta el perfil P8) con orígenes en dichas capillas laterales.

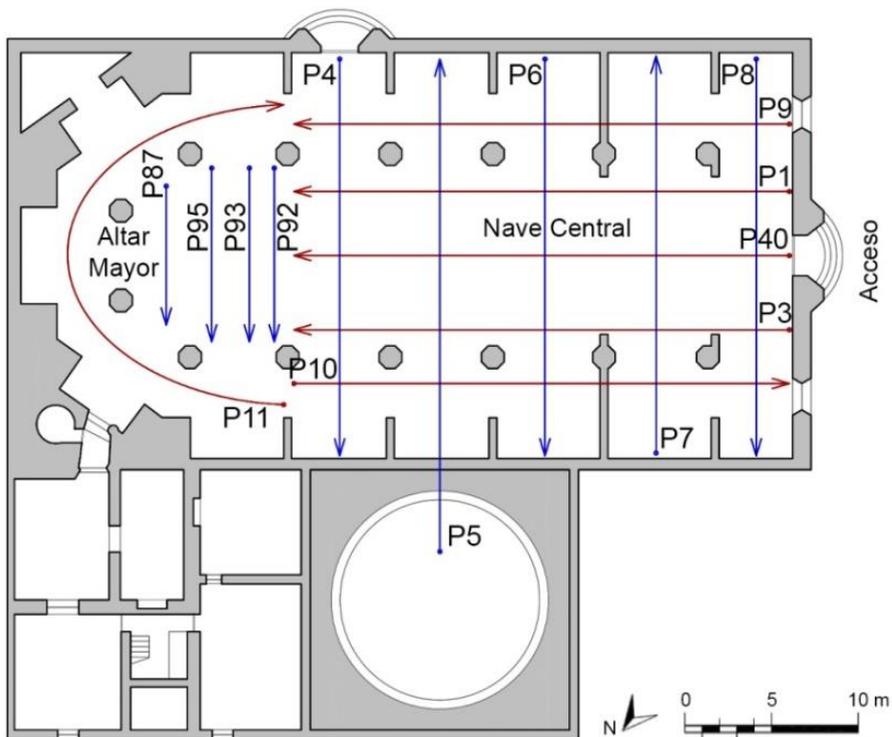


Figura 5.103. Ubicación de los perfiles de georradar en la zona estudiada de la Iglesia Arciprestal de Santiago de Villena.

5.10.4. Resultados

Del análisis de los datos de georradar en 2D y en 3D, se extraen los siguientes resultados:

1. Niveles culturales y geológicos

Se identifican tres diferentes niveles:

- El primer nivel alcanza el primer medio metro de profundidad. Dicho horizonte se corresponde con los diversos niveles de pavimentación del suelo de la iglesia.

- El segundo nivel está comprendido entre 0,50 m. y 1,00 - 2,50 m. de profundidad.
- Por último, el tercer nivel se observa desde los 2,50 m. hasta la profundidad máxima de prospección para este estudio, 9,50 m.

2. Cripta

- Una estructura abovedada bajo el Altar de la iglesia, localizada en el perfil P93 desde los 2,50 m. hasta los 4 m. Esta misma estructura se distingue en el perfil P95, entre los metros 2,50 y 4,50. También se observa unas reflexiones generadas por dicha estructura en el perfil P92, a los 2 m. de longitud.
- Una estructura abovedada, también bajo el Altar de la iglesia, que nuevamente se detecta en los perfiles P93 y P95, entre los metros 5 y 6,50 (perfil P3), y desde el metro 6,50 hasta el metro 8 (perfil P95). También se percibe ligeras reflexiones generadas por dicha estructura abovedada en el perfil P87, a los 4 m. de longitud aproximadamente.

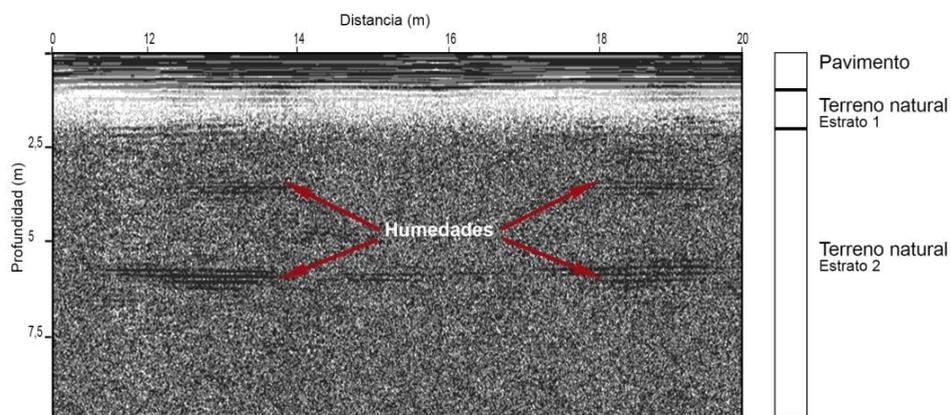


Figura 5.104. Fragmento del radargrama del perfil P1, tomado en la nave principal de la iglesia, donde se distingue los tres niveles que componen el subsuelo y las humedades.

3. Patología

- Humedades

Se observa reflexiones en las profundidades comprendidas entre los 2 m. y los 6 m., distribuidas por todo el subsuelo de la iglesia. El estudio mediante secciones horizontales del modelo 3D de georradar permite localizar y cartografiar más adecuadamente dicha patología.

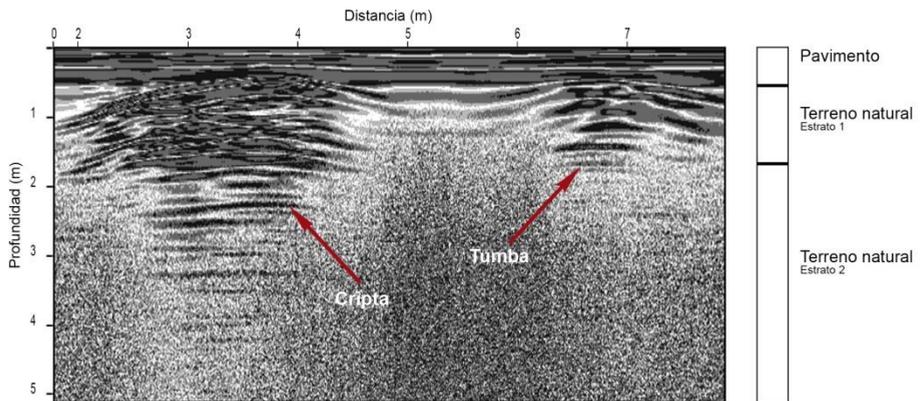


Figura 5.105. Fragmento del radargrama del perfil P95, perteneciente al área del Altar mayor.

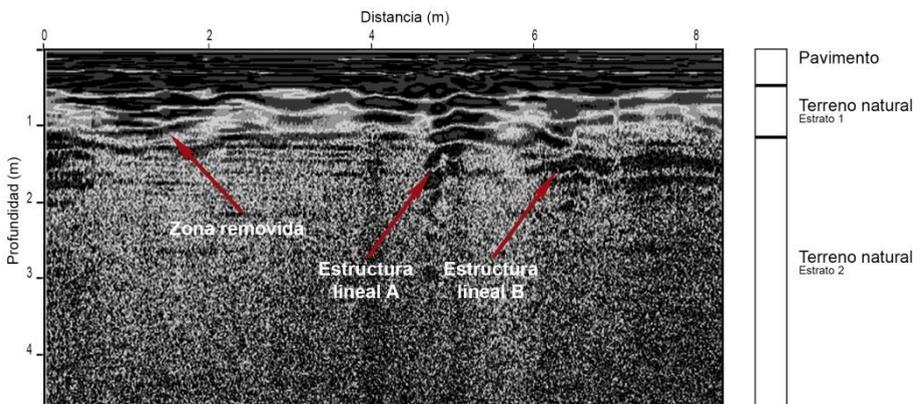


Figura 5.106. Fragmento del radargrama del perfil P3, tomado en la nave principal de la iglesia, próximo a una de las naves laterales.

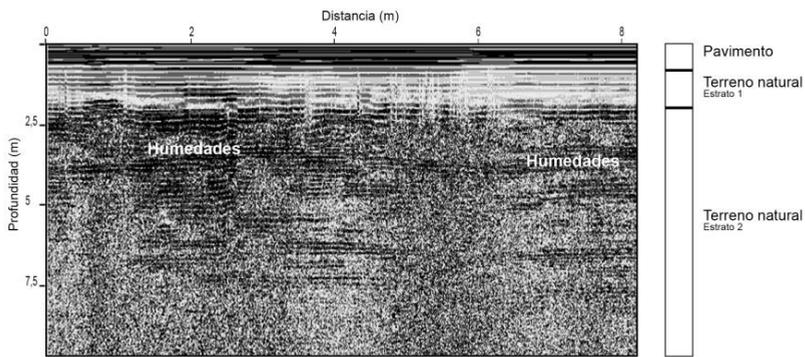


Figura 5.107. Fragmento del radargrama del perfil P10, realizado sobre una de las naves laterales de la iglesia. En el radargrama se observa la patología de humedades presente en el subsuelo de la iglesia.

5.10.5. Modelización de los resultados en 2D

A continuación se muestra la modelización bidimensional de la Iglesia Arciprestal de Santiago de Villena:

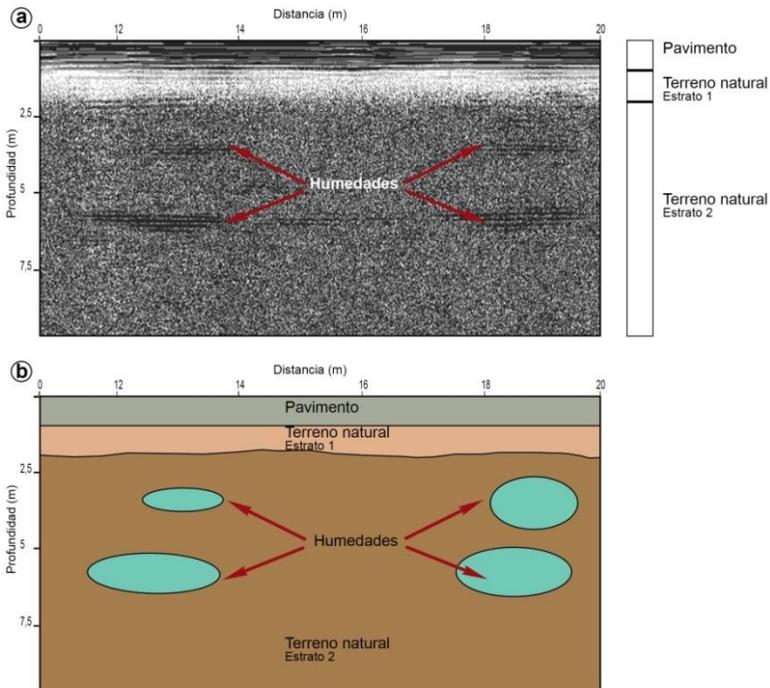


Figura 5.108. a- Interpretación del perfil P1. b- Modelización de niveles y patología en el perfil P1.

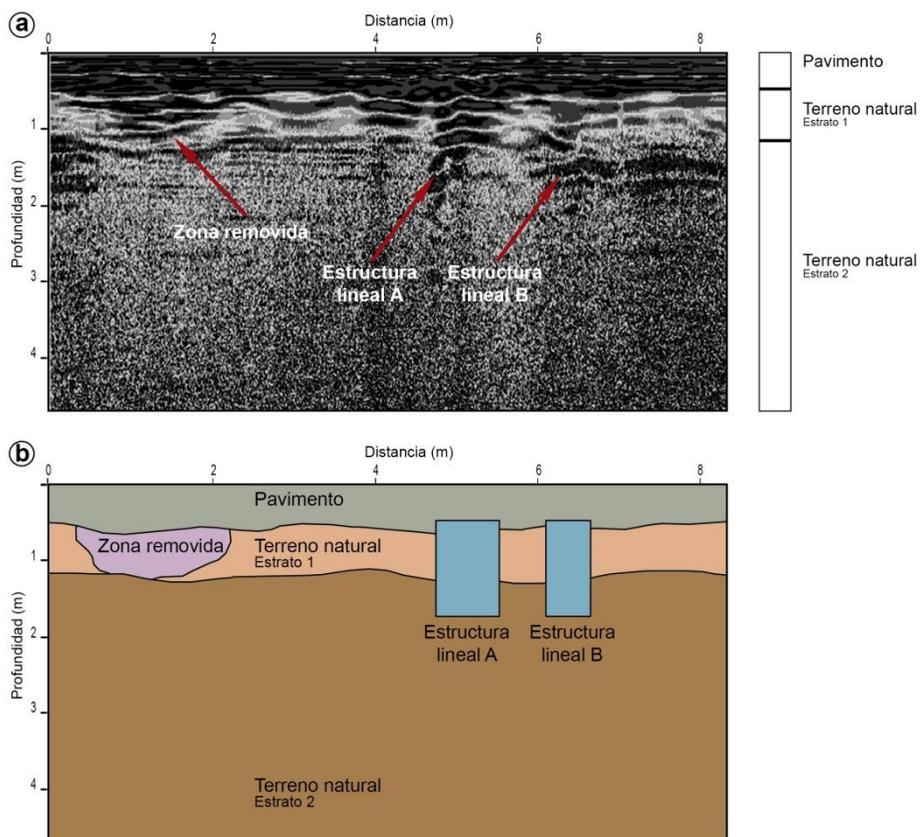


Figura 5.109. a- Interpretación del perfil P3. b- Modelización de los niveles y las estructuras detectadas (zona removida y estructuras lineales) en el perfil P3.

La modelización bidimensional, derivada de la interpretación de los perfiles de georradar; ha permitido determinar los horizontes del subsuelo, así como detectar la preexistencia de estructuras subterráneas como un par de criptas bajo el altar y una zona removida junto a dos estructuras lineales a los pies de la iglesia. Asimismo, se ha hallado la patología de afección al subsuelo: las humedades.

La interpretación y localización de la patología identificada (humedades) requiere de un estudio más exhaustivo, apoyándose por ejemplo, en el empleo de secciones horizontales del subsuelo obtenidas a partir de la modelización tridimensional de datos de georradar.

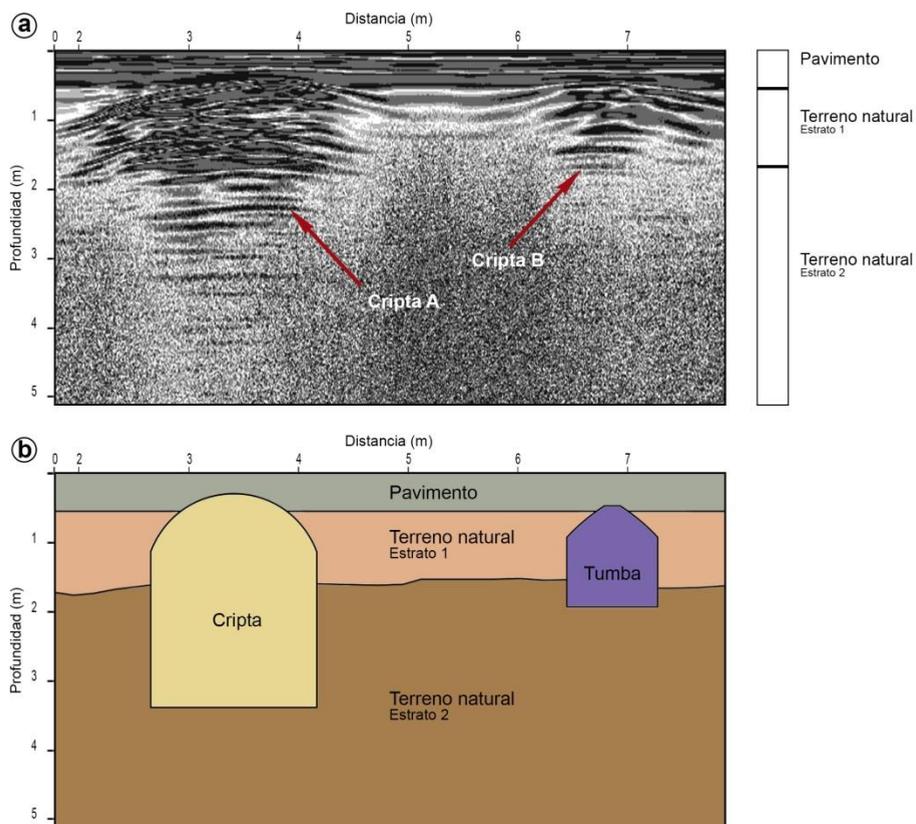


Figura 5.110. a- Interpretación del perfil P95. b- Modelización de los niveles y las estructuras detectadas (criptas) bajo el Altar mayor en el perfil P95.

5.10.6. Modelización de resultados en 3D

Tal y como se ha indicado anteriormente, para realizar el estudio del subsuelo en la nave principal se ha elaborado un modelo 3D de los datos de georradar. A partir de este modelo, se ha obtenido una serie de secciones horizontales del subsuelo cada medio metro de profundidad. De esta manera, se ha podido estudiar de forma más precisa la localización y extensión de la patología de humedades identificada en los radargramas analizados.

Así pues, la modelización tridimensional se presenta como sigue:

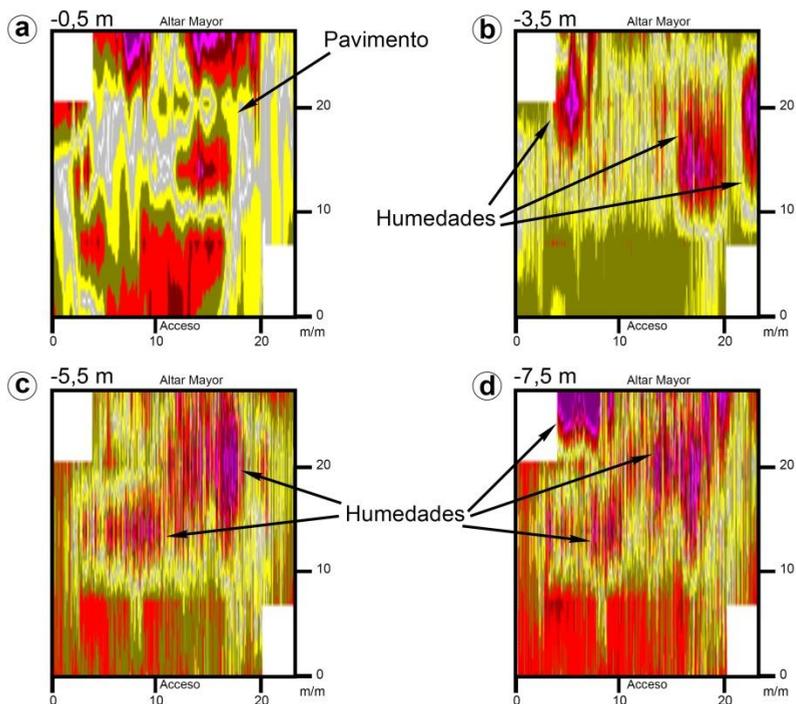


Figura 5.111. Secciones horizontales del subsuelo a partir del modelo 3D de georradar a distintas profundidades: 0,50 m. (a), 3,50 m. (b), 5,50 m. (c), 7,50 m. (d). En la figura se observa la localización y extensión de la patología de humedades en el subsuelo de la nave principal de la iglesia.

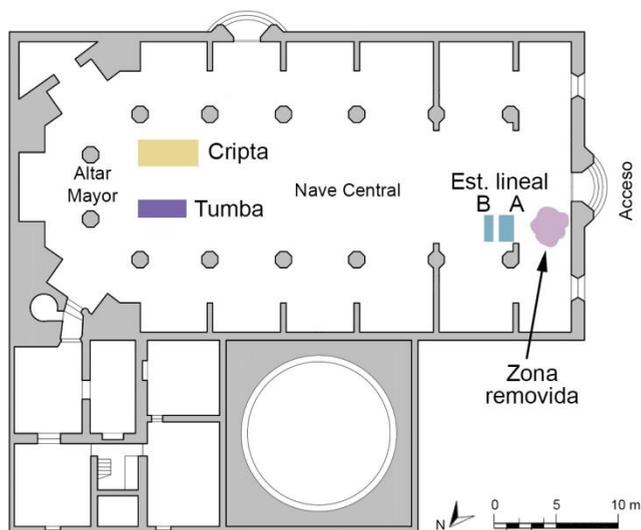


Figura 5.112. Situación en planta de las estructuras enterradas en el subsuelo de la Iglesia Arciprestal de Santiago de Villena resultante de la interpretación de los datos 3D.

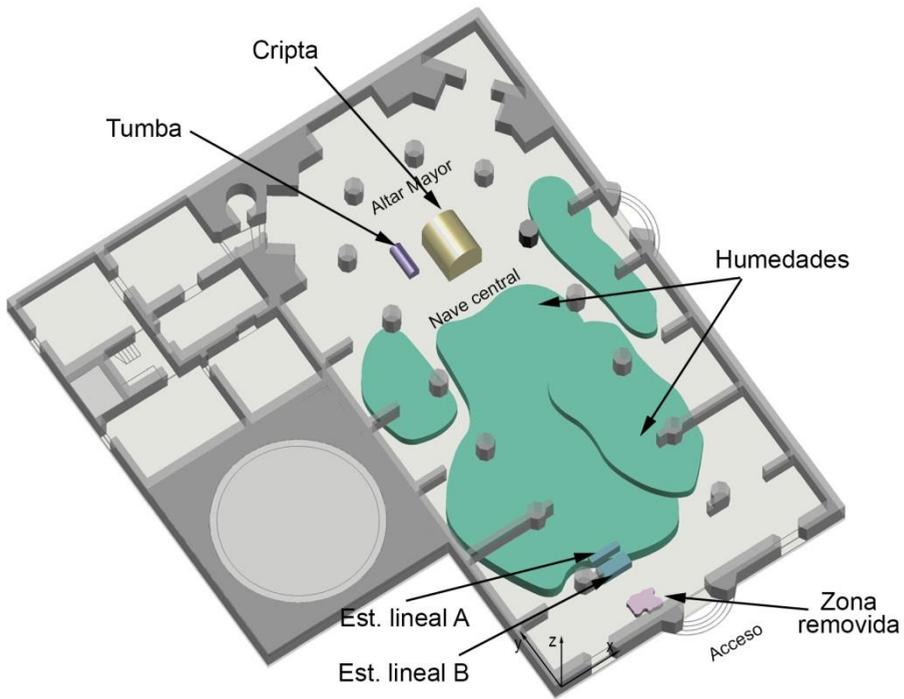


Figura 5.113. Modelización tridimensional de la patología y estructuras detectadas en el subsuelo de la Iglesia Arciprestal de Santiago de Villena.

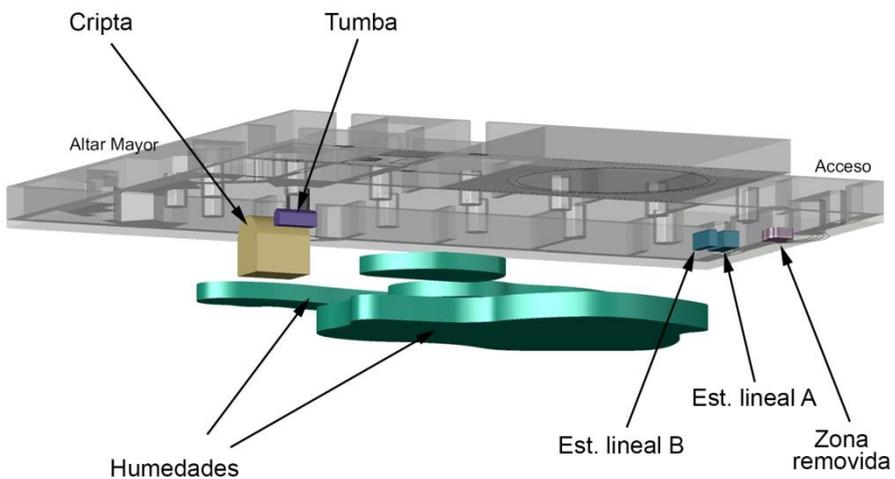


Figura 5.114. Plano contrapicado de la modelización tridimensional del subsuelo de la Iglesia Arciprestal de Santiago de Villena, donde se observa las estructuras identificadas en el subsuelo, así como los niveles en los cuales se identifica la patología de humedades.

6 CATALOGACIÓN DE LAS ESTRUCTURAS MEDIANTE GPR: CARTOGRAFIADO DEL SUBSUELO

El conocimiento del subsuelo de los edificios históricos religiosos es de gran importancia para su conservación y puesta en valor. Las estructuras subterráneas y las lesiones existentes en el subsuelo de dichas construcciones afectan e influyen directamente sobre el resto de elementos constructivos que componen el edificio, no sólo desde el punto de vista del comportamiento estructural sino también desde el punto de vista de la conservación del patrimonio.

El cartografiado del subsuelo del patrimonio histórico religioso mediante la técnica del georradar permite obtener información acerca de los niveles del subsuelo y de las estructuras enterradas o preexistentes en dicho espacio subterráneo. Se trata, como ya se ha indicado previamente, de un método no destructivo que facilita

información relevante sobre la parte de la construcción que permanece oculta, enterrada, sin alterar o dañar ningún elemento del edificio.

Del análisis del subsuelo de diversas iglesias y capillas de la Comunidad Valenciana, ampliamente desarrollado en el capítulo anterior, se extrae algunos aspectos comunes presentes en el subsuelo de esta tipología edificatoria. Por regla general, el eje central de estos edificios, que recorre toda la nave principal desde el acceso hasta el altar mayor, contiene documentación significativa respecto a los niveles culturales y geológicos. Asimismo, gran parte de las estructuras subterráneas presentes en las iglesias suelen identificarse al estudiar este ámbito del subsuelo del edificio.

Es habitual encontrar un primer nivel conformado por el pavimento de la iglesia. Dicho nivel suele componerse de diferentes capas de pavimentación superpuestas, fruto de las diversas intervenciones llevadas a cabo sobre el edificio a lo largo de los años.

Las estructuras más comunes suelen ser aquellas destinadas a enterramientos. Abundan las criptas y las tumbas, especialmente en las áreas próximas al altar mayor de la iglesia, y en las capillas o naves laterales. También se puede encontrar estructuras lineales pertenecientes a antiguos muros enterrados o cimentaciones en desuso dispersadas por la superficie construida.

La patología más común en los edificios históricos religiosos es la humedad. Dicha lesión suele presentarse en varios niveles y distribuida indistintamente por toda la extensión de la iglesia y el exterior. Cabe resaltar asimismo la presencia de zonas removidas, posiblemente como consecuencia de antiguas excavaciones para cavidades destinadas a enterramientos.

Es importante incidir en el hecho de que este tipo de estructuras subterráneas y la presencia de los citados niveles es propia exclusivamente de los edificios históricos religiosos. Por consiguiente, en otra tipología edificatoria, de carácter histórico o no, se podrá hallar otros tipos diferentes de estructuras, patología y niveles culturales y geológicos.

Cabe señalar la influencia de la geología en el proceso de identificación de los niveles y contactos geológicos presentes en el subsuelo. Del mismo modo, la historia del edificio y la arqueología desempeñan un papel fundamental a la hora de interpretar los datos obtenidos mediante la mencionada técnica de prospección, no sólo para el caso de los niveles culturales, sino también en el caso de hallar otro tipo de estructuras cuya función es distinta del común enterramiento en criptas o tumbas. La interpretación y significado de “otras estructuras” depende en gran medida de la localización de la iglesia y de la historia del edificio.

Por tanto, el cartografiado y análisis del subsuelo de los edificios históricos religiosos constituye un trabajo interdisciplinar en el que intervienen diferentes agentes. Por un lado, cabe distinguir aquéllos encargados de la toma de datos del subsuelo mediante técnicas no destructivas, como podría ser el georradar. Por otro lado, es también necesaria la presencia de agentes encargados del análisis y la interpretación de los datos obtenidos, desde el punto de vista arquitectónico y constructivo, así como de personal especializado que arroje luz sobre los hallazgos obtenidos desde el punto de vista histórico y arqueológico.

De esta manera, es importante contar con la presencia de geofísicos para la fase de toma de datos y documentación, así como para la interpretación de los radargramas. Asimismo, se requiere la participación de topógrafos que colaboren en el levantamiento de planos para establecer la correspondencia entre los elementos enterrados y el edificio en superficie.

Del mismo modo, resulta fundamental consultar los datos obtenidos mediante georradar con arqueólogos para la interpretación histórica y poder, de esta manera, extraer conclusiones sobre el tipo de estructuras presentes en el subsuelo y su función histórica. Por último, y no por ello menos importante, cabe tener presente la relevancia de la figura del arquitecto y de especialistas en construcciones históricas para la interpretación de las tipologías constructivas de las estructuras

enterradas, así como para el estudio y la determinación de las causas de las lesiones y la patología que afecte a la construcción religiosa objeto de análisis.

No obstante, independientemente de las interpretaciones y modelizaciones realizadas en el subsuelo de los edificios religiosos y la participación de diferentes especialistas, la última palabra sobre los niveles, estructuras y patologías del subsuelo la tiene siempre una cata o excavación arqueológica que ayude a definir exactamente la tipología de estructuras enterradas, la naturaleza y características de los niveles del terreno y las causas de las lesiones que afectan al espacio subterráneo.

El siguiente inventario se presenta como un catálogo de niveles, estructuras y lesiones comúnmente existentes en el subsuelo de los edificios históricos de carácter religioso. El objetivo de dicha catalogación de elementos subterráneos es facilitar la interpretación de los registros obtenidos mediante la técnica de prospección no destructiva del georradar.

Así pues, la modelización y catalogación de los niveles, las estructuras y las lesiones del subsuelo permite definir pautas para la interpretación de los datos geofísicos, así como para el cartografiado del subsuelo y la posterior intervención arquitectónica –de conservación y restauración- en edificios patrimoniales religiosos, por parte de técnicos no especialistas en el ámbito de la Geofísica.

Dicho inventario se muestra a través de fichas-catálogo que recopilan documentación gráfica (radargramas y modelizaciones) de los elementos analizados, así como información sobre los aspectos técnicos relativos a la toma de datos. En estas fichas, se incluye también en un apartado destinado a la descripción de la señal emitida por el elemento del subsuelo que se cataloga, tratando así de ofrecer una explicación técnica de aquello que se ha detectado e identificado durante la prospección mediante georradar.

6.1. CATALOGACIÓN DE NIVELES CULTURALES/GEOLÓGICOS EN EL SUBSUELO DE EDIFICIOS HISTÓRICOS RELIGIOSOS

Cabe señalar que la diferenciación de horizontes debe ir siempre acompañada de estudios históricos y sondeos geotécnicos, e incluso de catas arqueológicas, que ayuden a esclarecer si los niveles hallados son exclusivamente geológicos o también de carácter cultural. Habitualmente suelen presentarse de forma combinada.

Los horizontes superiores suelen estar conformados por niveles antrópicos, esto es, un horizonte superficial de pavimento y otro inmediatamente inferior de relleno para nivelar el terreno. En áreas de gran relevancia histórica y arqueológica, los niveles culturales pueden alcanzar mayores profundidades, abarcando diferentes períodos históricos. En caso contrario, afloran directamente los estratos geológicos, estableciéndose la diferenciación entre las capas por la diferente naturaleza geológica de las mismas o por la presencia de mayor o menor grado de humedad. Incluso es posible documentar la profundidad a la que se encuentra el nivel freático, si existe.

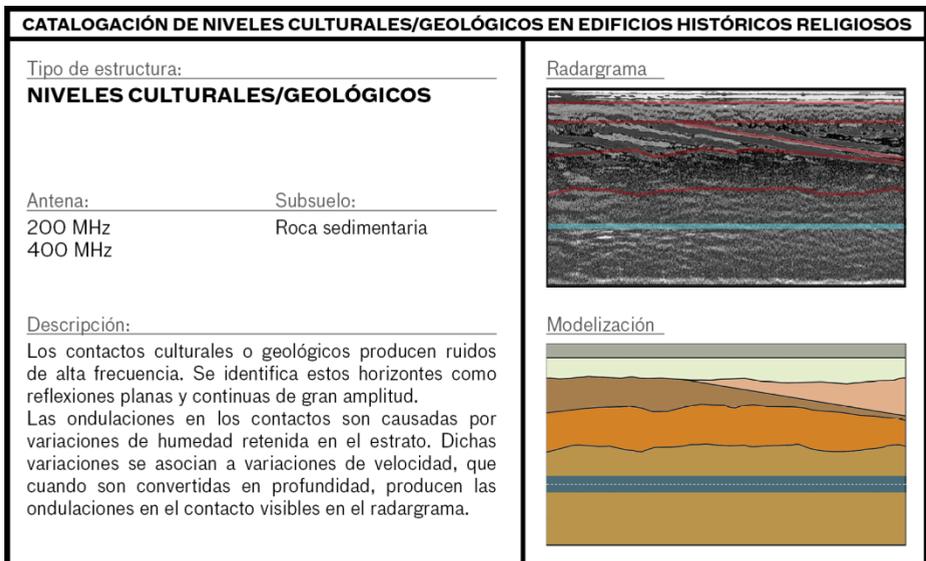


Figura 6.1. Ejemplo de ficha de catalogación de niveles culturales/geológicos en el subsuelo de edificios históricos religiosos.

6.2. CATALOGACIÓN DE ESTRUCTURAS SUBTERRÁNEAS EN EL SUBSUELO DE EDIFICIOS HISTÓRICOS RELIGIOSOS

A continuación se presenta una serie de fichas para catalogar las estructuras propias del subsuelo de edificios históricos religiosos.

6.2.1. Pavimentos

A pesar de que los pavimentos forman parte de los niveles culturales del subsuelo de edificios históricos religiosos, se consideran asimismo estructuras dado su carácter de construcción antrópica.

Los pavimentos suelen estar constituidos por diferentes capas de pavimentación pertenecientes a distintos períodos constructivos del edificio. Además, están constituidas, cada una de ellas por materiales de agarre (morteros) y materiales de pavimentación propiamente dichos (habitualmente cerámicos). Esta estructura suele variar de espesor, en función principalmente de la composición de capas que la configuran. Normalmente suele alcanzar una profundidad comprendida entre los 0,25 m. y los 0,50 m. y se suele asentar sobre una capa de relleno.

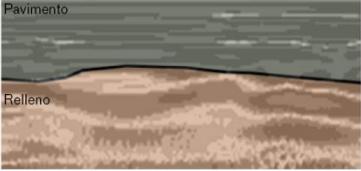
CATALOGACIÓN DE ESTRUCTURAS SUBTERRÁNEAS EN EDIFICIOS HISTÓRICOS RELIGIOSOS	
<p>Tipo de estructura:</p> <p>PAVIMENTO</p>	<p>Radargrama</p> 
<p>Antena:</p> <p>400 MHz</p>	<p>Subsuelo:</p> <p>Roca sedimentaria</p>
<p>Descripción:</p> <p>Las reflexiones del pavimento tienden a ser continuas y de gran amplitud. Se trata normalmente de reflexiones horizontales planas superpuestas, mostrando así la complejidad de dicha estructura que habitualmente es el resultado de diversos niveles de pavimentación montados unos sobre otros. Es frecuente hallar un nivel de relleno, de profundidad variable, bajo dicha estructura.</p>	<p>Modelización</p>  <p>Pavimento</p> <p>Relleno</p>

Figura 6.2. Ejemplo de ficha de catalogación de pavimentos en el subsuelo de edificios históricos religiosos.

6.2.2. Criptas

Las criptas son espacios subterráneos abovedados cuya función principal era la de servir de lugar de enterramiento.

Este tipo de estructuras se suele localizar bajo el altar de la iglesia o en las proximidades del mismo. En ocasiones, se puede hallar también alguna cripta en las capillas o naves laterales.

Las criptas suelen identificarse a partir de los 0,50 m. de profundidad y habitualmente alcanzan los 2 m. – 2,50 m. de profundidad máxima. Las dimensiones de estas estructuras suelen estar comprendidas entre los 2 m. y los 5 m. de lado, y suelen presentar forma rectangular en planta.

Se puede identificar este tipo de estructura en la iglesia de Alfafar (tomada como ejemplo para la elaboración de la presente ficha), así como en las iglesias de Ares del Maestre, Pobla de Vallbona, Villena y en las iglesias del Sagrado Corazón de Jesús y de San Juan del Hospital de Valencia.

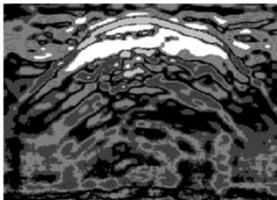
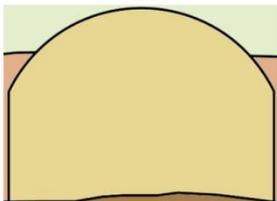
CATALOGACIÓN DE ESTRUCTURAS SUBTERRÁNEAS EN EDIFICIOS HISTÓRICOS RELIGIOSOS	
<u>Tipo de estructura:</u> CRIPTA	
<u>Antena:</u> 400 MHz	<u>Subsuelo:</u> Roca sedimentaria
<u>Descripción:</u> La cripta es una estructura abovedada que se identifica por reflexiones hiperbólicas de gran amplitud. El arco produce un número de reflexiones discontinuas en los bordes de las piedras que lo conforman. Las reflexiones bajo el arco pueden ser ondas aéreas y otras reflexiones producidas por el suelo, interfiriendo todas ellas entre sí.	
<u>Radargrama</u> 	
<u>Modelización</u> 	

Figura 6.3. Ejemplo de ficha de catalogación de criptas en el subsuelo de edificios históricos religiosos.

6.2.3. Estructuras abovedadas

Las estructuras abovedadas se asemejan a las criptas por su morfología y dimensiones. Se trata de recintos subterráneos destinados al culto como espacio adicional en una iglesia.

De igual manera que sucede con las criptas, estas estructuras se ubican bajo el altar principal de la iglesia y en los alrededores del mismo, ocupando el subsuelo de otras estancias como la sacristía, capillas, o dependencias adicionales.

Se suele detectar este tipo de estructura a partir de los 0,50 m. y el espacio vacío se suele prolongar hasta alcanzar una profundidad de unos 2,50 m. – 3,00 m.

Igualmente, presentan una forma rectangular en planta y su extensión puede variar, presentando unas dimensiones entre los 2 m. y los 7 m. de lado.

Tras el estudio realizado en diferentes iglesias, se ha detectado este tipo de estructura, sobre todo, en la Iglesia de Nuestra Señora del Socorro de Peñíscola (empleada como ejemplo en la siguiente ficha).

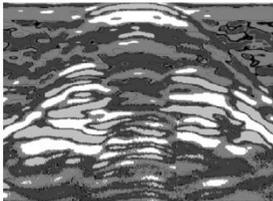
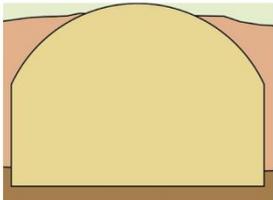
CATALOGACIÓN DE ESTRUCTURAS SUBTERRÁNEAS EN EDIFICIOS HISTÓRICOS RELIGIOSOS	
<p>Tipo de estructura:</p> <p>ESTRUCTURA ABOVEDADA</p>	<p>Radargrama</p> 
<p>Antena:</p> <p>400 MHz</p>	<p>Subsuelo:</p> <p>Roca sedimentaria</p>
<p>Descripción:</p> <p>Los espacios vacíos producen buenas reflexiones, pero surgen complicaciones cuando la energía que pasa por dicho espacio se acelera, distorsionando cualquier reflexión debido a la variación de velocidad que tiende a levantar las reflexiones inferiores.</p> <p>La estructura abovedada produce reflexiones hiperbólicas de gran amplitud. Las reflexiones producidas por el suelo se levantan debido al espacio vacío.</p>	<p>Modelización</p> 

Figura 6.4. Ejemplo de ficha de catalogación de estructuras abovedadas en el subsuelo de edificios históricos religiosos.

6.2.4. Tumbas

Las tumbas son pequeñas cámaras destinadas al enterramiento individual y suelen estar selladas por la parte superior. Es frecuente encontrar estas estructuras en la nave central de la iglesia, en el espacio inmediato a los pies del altar, así como en las naves o capillas laterales. Menos frecuente pero también plausible es hallar este tipo de estructuras a lo largo del recorrido del eje principal de la iglesia, en la nave central.

Las tumbas se suelen localizar a partir de unos 0,30 m. – 0,50 m. de profundidad, especialmente cuando no se tiene constancia de su existencia; y normalmente alcanzan una profundidad máxima de 1,30 m. aproximadamente. Por lo que respecta a las dimensiones, el ancho de estas estructuras varía entre 1 m. y 2 m. y la longitud suele estar comprendida entre los 2 m. y los 3 m.

Aludiendo al estudio realizado, se puede hallar estas estructuras en las iglesias de Alfajar, Ares del Maestre (tomada como ejemplo en esta ficha), en la Iglesia del Sagrado Corazón de Jesús, en la cripta del Monasterio de San Miguel de los Reyes y en Villena.

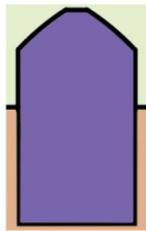
CATALOGACIÓN DE ESTRUCTURAS SUBTERRÁNEAS EN EDIFICIOS HISTÓRICOS RELIGIOSOS	
<p>Tipo de estructura:</p> <p>TUMBA</p>	<p>Radargrama</p> 
<p>Antena:</p> <p>400 MHz</p>	<p>Subsuelo:</p> <p>Roca sedimentaria</p>
<p>Descripción:</p> <p>Sobre las tumbas es frecuente encontrar una zanja vertical estratificada, normalmente inalterada. La tapa de la tumba, con forma ligeramente arqueada en este caso, produce una reflexión hiperbólica al entrar en contacto con el espacio interior. La onda de reflexión en el interior de la tumba se ve ralentizada por la presencia de algún material. En el caso contrario, la base aparecería directamente bajo la reflexión de la tapa.</p>	<p>Modelización</p> 

Figura 6.5. Ejemplo de ficha de catalogación de tumbas en el subsuelo de edificios históricos religiosos.

6.2.5. Estructuras lineales: restos murarios

Los elementos subterráneos denominados como estructuras lineales son frecuentemente restos murarios, bien de la iglesia tras haber sufrido una ampliación, bien de otras construcciones que han quedado sepultadas bajo el templo. La localización de estas estructuras en el edificio no sigue un patrón establecido, pueden encontrarse tanto por las naves laterales como por la central. No obstante, en algunas ocasiones, aparecen como prolongación de actuales elementos constructivos como columnas.

Generalmente, estas estructuras lineales suelen ser de 1 m. de ancho y su profundidad está comprendida entre los 0,30 m. y los 2 m. En cuanto a su extensión en superficie, cabe señalar que puede variar notablemente de un caso de estudio a otro, por lo que es conveniente estudiar cada caso de forma individualizada.

Este tipo de estructuras están presentes en las iglesias analizadas de Alfajar, Ares del Maestre, Paterna (empleada para la elaboración de la siguiente ficha), Iglesia de San Juan del Hospital de Valencia, y Villena.

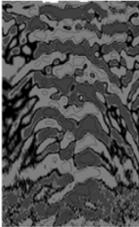
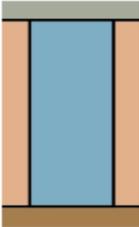
CATALOGACIÓN DE ESTRUCTURAS SUBTERRÁNEAS EN EDIFICIOS HISTÓRICOS RELIGIOSOS	
<p>Tipo de estructura:</p> <p>ESTRUCTURA LINEAL</p>	<p>Radargrama</p> 
<p>Antena:</p> <p>400 MHz</p>	<p>Subsuelo:</p> <p>Roca sedimentaria</p>
<p>Descripción:</p> <p>La estructura lineal se caracteriza por la concentración de reflexiones de gran amplitud formando un elemento vertical de proporción rectangular.</p> <p>Se distingue claramente estas estructuras del material que las rodea, que bien puede ser un nivel de relleno o el propio terreno natural, por la diferencia de amplitud de las reflexiones generadas por la distinta naturaleza de los materiales.</p>	<p>Modelización</p> 

Figura 6.6. Ejemplo de ficha de catalogación de estructuras lineales (restos murarios) en el subsuelo de edificios históricos religiosos.

6.2.6. Cimentaciones

Las cimentaciones son los elementos estructurales subterráneos encargados de transmitir las cargas de la edificación al suelo. Este tipo de estructuras pueden asemejarse a las estructurales lineales, pero se diferencian de éstas fundamentalmente en la función que desempeñan y en sus dimensiones.

Estas estructuras se sitúan como prolongación de elementos estructurales como columnas, pilares y muros de carga. Se registran desde el nivel del pavimento, aproximadamente a unos 0,25 m. de profundidad hasta alcanzar los 1,50 m.

A pesar de que las cimentaciones pueden presentar longitudes variables, dependiendo de si se trata de cimentaciones aisladas o corridas, el ancho documentado a través de este estudio está alrededor de los 2 m. Cabe destacar que esta dimensión también estará en función del elemento estructural que la cimentación soporte.

A través del estudio realizado, se ha localizado cimentaciones en la Iglesia del Sagrado Corazón de Jesús de Valencia.

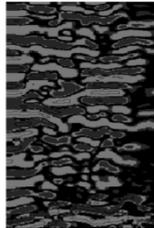
CATALOGACIÓN DE ESTRUCTURAS SUBTERRÁNEAS EN EDIFICIOS HISTÓRICOS RELIGIOSOS	
<p>Tipo de estructura: _____ CIMENTACIONES</p>	<p>Radargrama </p>
<p>Antena: _____ Subsuelo: _____ 400 MHz Roca sedimentaria</p>	<p>Modelización </p>
<p>Descripción: _____ Las cimentaciones se muestran como reflexiones de gran amplitud. En los edificios históricos, este tipo de estructura suele estar conformado por mampostería. La heterogeneidad de los materiales que caracteriza dicha estructura aparece ilustrada en las múltiples reflexiones obtenidas. Se distingue los límites de la estructura por el contraste de amplitudes con respecto al medio que la rodea.</p>	

Figura 6.7. Ejemplo de ficha de catalogación de cimentaciones en el subsuelo de edificios históricos religiosos.

6.2.7. Instalaciones

Las instalaciones son el conjunto de elementos y redes cuya función es la de suministrar y permitir el funcionamiento de los servicios propios de los edificios. A pesar de que sí que es posible encontrar instalaciones en construcciones históricas, este tipo de estructuras no suelen ser habituales en los edificios históricos de carácter religioso.

Se trata, por tanto, de unas estructuras relativamente recientes y modernas instaladas para acondicionar el edificio religioso a sus necesidades. Así pues, resulta difícil establecer pautas sobre su localización, profundidad o dimensiones habituales, dado que no es corriente encontrar este tipo de estructuras salvo que se haya llevado a cabo una intervención arquitectónica considerable y se haya incorporado instalaciones de este tipo en el subsuelo de la iglesia.

Se ha documentado la existencia de instalaciones de calefacción en el subsuelo de la iglesia de Jalance, tomada como ejemplo para esta ficha.

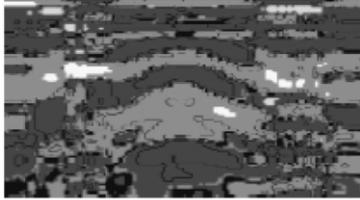
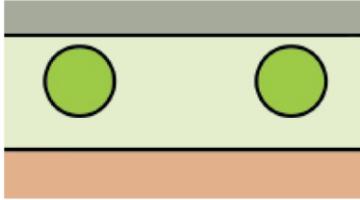
CATALOGACIÓN DE ESTRUCTURAS SUBTERRÁNEAS EN EDIFICIOS HISTÓRICOS RELIGIOSOS	
<u>Tipo de estructura:</u> INSTALACIONES	<u>Radargrama</u> 
<u>Antena:</u> 400 MHz	<u>Subsuelo:</u> Roca sedimentaria
<u>Descripción:</u> Las instalaciones producen unas marcadas reflexiones hiperbólicas debido al metal de las tuberías embebidas en el subsuelo. Las tuberías producen múltiples reflexiones hiperbólicas que dificultan la interpretación de subsuelo más profundo. Para definir correctamente lo que se encuentra bajo dichas instalaciones es necesario el empleo de antenas de mayor frecuencia en condiciones óptimas del terreno.	<u>Modelización</u> 

Figura 6.8. Ejemplo de ficha de catalogación de instalaciones en el subsuelo de edificios históricos religiosos.

6.2.8. Otras estructuras

El término “otras estructuras” engloba todas aquellas estructuras cuya naturaleza o bagaje cultural es singular, a veces incluso significativo en el ámbito histórico, y no tienen cabida en ninguno de los grupos anteriores. Estas otras estructuras singulares, suelen localizarse en la nave central y, muy frecuentemente, en el eje principal de la iglesia. La morfología, profundidad y dimensiones depende de cada caso.

Cabe señalar que en la identificación de estas estructuras desempeña un papel fundamental el estudio histórico y arqueológico, cuando se trata de estructuras de carácter cultural, y el estudio y conocimiento de la geología, en el caso de estructuras geológicas o naturales.

Algunas de estas estructuras identificadas en el estudio realizado son las gradas del Circo Romano en el subsuelo de la Iglesia de San Juan del Hospital o unos hornos árabes bajo la iglesia de Paterna. También cabe destacar el *bufador* identificado en la iglesia de Peñíscola.

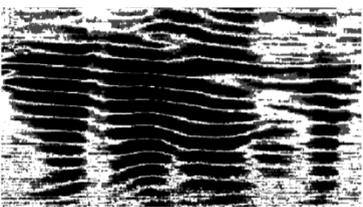
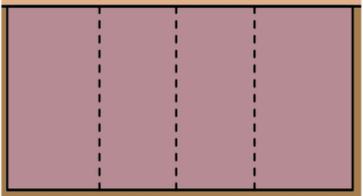
CATALOGACIÓN DE ESTRUCTURAS SUBTERRÁNEAS EN EDIFICIOS HISTÓRICOS RELIGIOSOS	
<p>Tipo de estructura:</p> <p>OTRAS ESTRUCTURAS-Gradas Circo Romano</p>	<p>Radargrama</p> 
<p>Antena:</p> <p>200 MHz</p>	<p>Subsuelo:</p> <p>Roca sedimentaria</p>
<p>Descripción:</p> <p>La presencia de otras estructuras se distingue por las reflexiones de gran amplitud en un área determinada del radargrama. Para determinar su naturaleza influyen factores arqueológicos. En este caso, la morfología no ayuda explícitamente a concluir que se trata de las gradas del Circo Romano, pero sí lo hacen sus dimensiones y su ubicación, coincidente con la profundidad y trayectoria de dichas gradas definida por previas excavaciones arqueológicas en otros puntos de la ciudad.</p>	<p>Modelización</p> 

Figura 6.9. Ejemplo de ficha de catalogación de otras estructuras (Gradas del Circo Romano) en el subsuelo de edificios históricos religiosos.

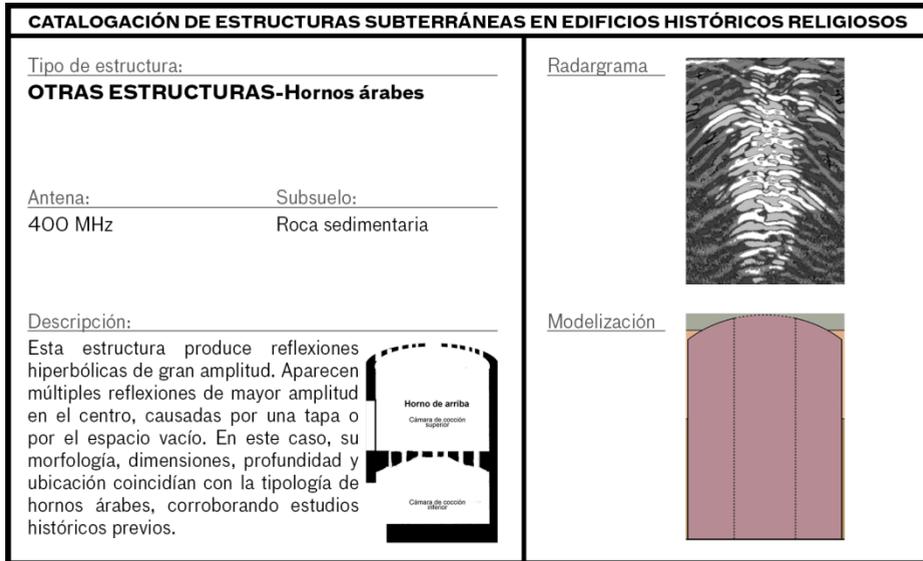


Figura 6.10. Ejemplo de ficha de catalogación de otras estructuras (Hornos árabes) en el subsuelo de edificios históricos religiosos.

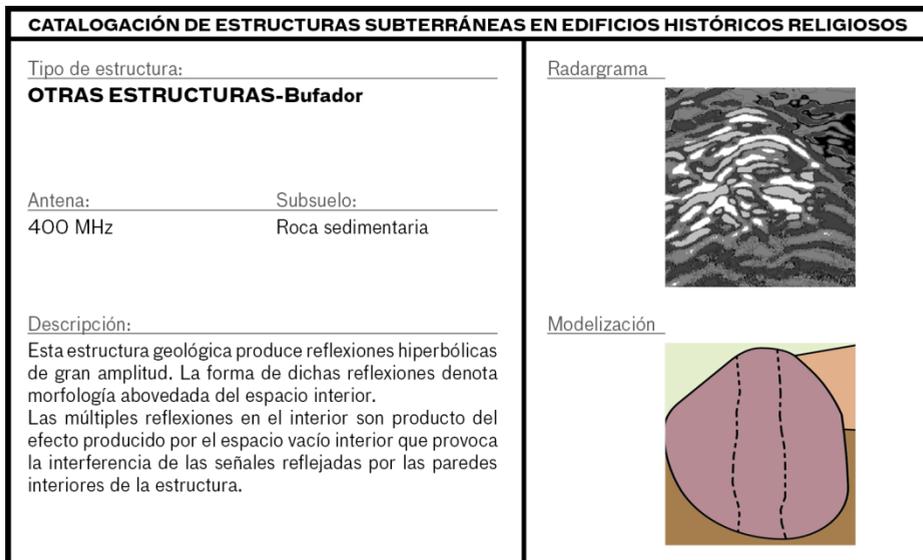


Figura 6.11. Ejemplo de ficha de catalogación de otras estructuras (*bufador*) en el subsuelo de edificios históricos religiosos.

6.3. CATALOGACIÓN DE LESIONES EN EL SUBSUELO DE EDIFICIOS HISTÓRICOS RELIGIOSOS

En las siguientes fichas se muestra una catalogación de lesiones características del subsuelo de edificios históricos religiosos.

6.3.1. Humedades

La humedad hace referencia a la cantidad de agua o vapor de agua presente en la superficie o el interior de un elemento o en el aire. La localización de esta lesión puede detectarse a cualquier profundidad y puede presentar cualquier extensión en superficie. Es habitual que esta patología se identifique tanto en el interior como en el exterior del edificio.

Cabe destacar la importancia de estudiar detenidamente dicha patología con el fin de determinar la causa que está originando los problemas en el edificio. Sólo de esta manera será posible erradicar el problema, en caso de que sea posible. Para ello, resulta imprescindible la consulta y el análisis con técnicos especialistas en la materia pertenecientes al ámbito de la construcción.

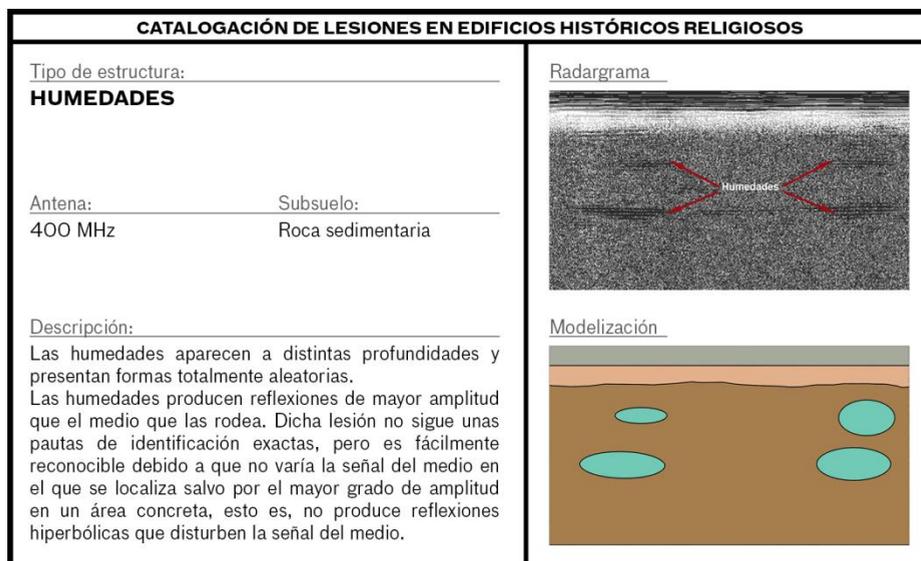


Figura 6.12. Ejemplo de ficha de catalogación de lesiones, humedades en este caso, en el subsuelo de edificios históricos religiosos.

6.3.2. Zonas anómalas

Dentro del grupo de zonas anómalas se puede englobar aquellas lesiones o anomalías singulares de los edificios históricos religiosos.

a. Zonas removidas

Las zonas removidas responden a partes del subsuelo en las que se ha llevado a cabo una remoción o compactación de tierras, bien sea por la preexistencia de otras estructuras, bien sea por la consolidación del suelo en un punto concreto.

Este tipo de lesión aparece generalmente en las capillas o naves laterales de las iglesias. A pesar de que sería necesario realizar un estudio histórico y arqueológico, incluso alguna cata, para determinar el origen de estas zonas removidas, es probable que sean consecuencia del terraplenado de anteriores estructuras subterráneas, como criptas o tumbas.

Se ha hallado esta patología en las iglesias de Ares del Maestre, Villena y en la Iglesia del Sagrado Corazón de Jesús de Valencia.

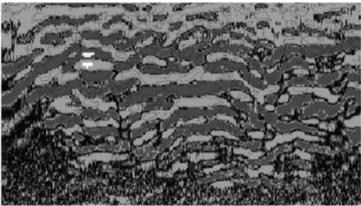
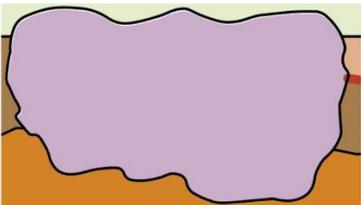
CATALOGACIÓN DE LESIONES EN EDIFICIOS HISTÓRICOS RELIGIOSOS	
<p>Tipo de estructura:</p> <p>ZONAS REMOVIDAS</p>	<p>Radargrama</p> 
<p>Antena:</p> <p>400 MHz</p>	<p>Subsuelo:</p> <p>Roca sedimentaria</p>
<p>Descripción:</p> <p>Las zonas removidas son visibles en los radargramas como concentraciones de gran cantidad de reflexiones hiperbólicas de gran amplitud, las cuales producen concentraciones de pequeñas reflexiones cuando las amplitudes son representadas a través de secciones horizontales a distintas profundidades.</p>	<p>Modelización</p> 

Figura 6.13. Ejemplo de ficha de catalogación de zonas removidas, un tipo de lesión en la categoría de zonas anómalas, en el subsuelo de edificios históricos religiosos.

b. Vacíos

Los vacíos son huecos, oquedades, recipientes o espacios que no contienen nada.

Se trata de una lesión singular presente en el subsuelo de edificios históricos religiosos, que puede presentar cualquier tamaño y dimensión y que, además, puede estar y alcanzar cualquier profundidad.

Este tipo de lesión se suele asociar a aquellas señales registradas de gran amplitud (espacio vacío) cuya respuesta no es coincidente con ninguna otra estructura o lesión anteriormente citadas.

Algunos ejemplos de esta patología pueden encontrarse en la iglesia de Ares del Maestre, a los pies de la nave central, con una morfología similar a un pozo; así como también las paredes del Cripta del Monasterio de San Miguel de los Reyes de Valencia, coincidiendo posiblemente con la preexistencia de unas tumbas para alojar los restos de los fundadores del monasterio.

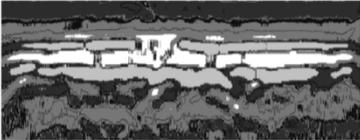
CATALOGACIÓN DE LESIONES EN EDIFICIOS HISTÓRICOS RELIGIOSOS	
<p>Tipo de estructura:</p> <p>VACÍOS</p>	<p>Radargrama</p> 
<p>Antena:</p> <p>400 MHz</p>	<p>Subsuelo:</p> <p>Roca sedimentaria</p>
<p>Descripción:</p> <p>Los espacios vacíos u oquedades en partes del subsuelo generan reflexiones de gran amplitud producidas por las ondas aéreas y/o por la base del hueco. Dichas reflexiones interfieren entre sí, dando lugar a representaciones del tipo que aparece en el radargrama adjunto.</p>	<p>Modelización</p> 

Figura 6.14. Ejemplo de ficha de catalogación de vacíos, un tipo de lesión en la categoría de zonas anómalas, en el subsuelo de edificios históricos religiosos.

El listado de niveles, estructuras y lesiones presentes en los edificios históricos de carácter religioso puede variar o aumentar con respecto a lo presentado en este capítulo, dependiendo del caso concreto de estudio. Cabe destacar que cada edificio requiere de un análisis pormenorizado y singular.

En este trabajo de investigación se ofrece unas pautas a seguir para el análisis y la interpretación de los elementos existentes en el subsuelo de los edificios históricos de carácter religioso enfocada a aquéllos técnicos no especialistas en la materia de la Geofísica. Así, la interpretación y catalogación de los elementos enterrados en construcciones históricas religiosas sirve como guía interpretativa en un ámbito multidisciplinar.

Para ello, se ha tomado como referencia una serie de construcciones de dicha tipología edificatoria pertenecientes al ámbito de la Comunidad Valenciana. En este sentido, cabe resaltar que los niveles, las estructuras y las lesiones identificadas en este tipo de edificios son característicos no sólo de un tipo de construcciones concretas, sino también de un ámbito geográfico y una cultura – mediterránea- específicos. Por tanto, las anomalías del subsuelo de una misma tipología edificatoria –construcciones históricas religiosas- podrán variar de una localización geográfica a otra, de igual manera que podrán verse alteradas en función de otros factores culturales y religiosos.

La catalogación de niveles, estructuras y lesiones en el subsuelo de edificios históricos de carácter religioso puede enfocarse también desde otra perspectiva diferente a la interpretativa. De esta manera, la catalogación puede servir para identificar estos elementos y detectar sus principales características enfocándolo al ámbito de la conservación y restauración de los edificios, e incluso como base de datos para formar parte de un HBIM.

Así, en las siguientes páginas se muestra unas fichas tipo para la catalogación de estructuras y lesiones en futuras obras de conservación y restauración de edificios históricos de carácter religioso.

NOMBRE EDIFICIO		FICHA: EHR_A_01
Datos Generales del Edificio		
Nombre:	<input type="text"/>	
Dirección:	<input type="text"/>	
Comunidad Autónoma:	<input type="text"/>	
Coordenadas GPS:	<input type="text"/>	
Tipo de edificio:	<input type="text"/>	
Breve descripción: (Técnicas constructivas)	<input type="text"/>	
<input type="checkbox"/> Imágenes localización edificio	<input type="checkbox"/> Imágenes generales edificio	<input type="checkbox"/> Planos generales edificio
Datos Prospección del Subsuelo		
Técnica empleada:	<input type="text"/>	Archivo: <input type="text"/>
Antena:	<input type="text"/>	Nº Expediente: <input type="text"/>
Prof. máx.:	<input type="text"/>	
Geología:	<input type="text"/>	
Autor:	<input type="text"/>	
Título proyecto prospección:	<input type="text"/>	
Año proyecto prospección:	<input type="text"/>	
Entidad contratante:	<input type="text"/>	
Patología previa		
<input type="checkbox"/> Cimentación	<input type="checkbox"/> Estructura/muros	<input type="checkbox"/> Superficie
<input type="checkbox"/> Coronación	<input type="checkbox"/> Otros elementos	
Observaciones:	<input type="text"/>	
Evidencias en superficie		
<input type="checkbox"/> Estructuras enterradas	<input type="checkbox"/> Lesiones del subsuelo	
Observaciones:	<input type="text"/>	
<input type="checkbox"/> Radargramas	<input type="checkbox"/> Modelo GPR 3D	<input type="checkbox"/> Modelización 2D
<input type="checkbox"/> Modelización 3D		

Figura 6.15. Ficha (tipo A) de catalogación de elementos del subsuelo para futuras intervenciones de restauración de edificios históricos de carácter religioso: Datos generales.

NOMBRE EDIFICIO	FICHA: EHR_B_01																																						
<p>Elementos Subterráneos</p> <hr/> <p>Tipo de elemento detectado</p> <table style="width: 100%; border: none;"> <tr> <td><input type="checkbox"/> Nivel</td> <td><input type="checkbox"/> Estructura</td> <td><input type="checkbox"/> Patología</td> <td><input type="checkbox"/> Otros elementos</td> </tr> <tr> <td><input type="checkbox"/> Conocido</td> <td><input type="checkbox"/> Desconocido</td> <td><input type="checkbox"/> Documentado</td> <td><input type="checkbox"/> No documentado</td> </tr> </table> <p>Observaciones: <input style="width: 90%;" type="text"/></p> <hr/> <p>Detección de Niveles</p> <p>Tipo:</p> <table style="width: 100%; border: none;"> <tr> <td><input type="checkbox"/> Nivel Cultural</td> <td><input type="checkbox"/> Nivel Geológico</td> <td><input type="checkbox"/> Nivel freático</td> <td><input type="checkbox"/> Otro</td> </tr> </table> <p>Especificaciones:</p> <table style="width: 100%; border: none;"> <tr> <td><input type="checkbox"/> Nivel Cultural</td> <td><input type="checkbox"/> Nivel Geológico</td> <td><input type="checkbox"/> Nivel freático</td> <td><input type="checkbox"/> Otro</td> </tr> <tr> <td><input type="checkbox"/> Pavimento</td> <td><input type="checkbox"/> Relleno</td> <td><input type="checkbox"/> Terreno natural</td> <td><input type="checkbox"/> Otro</td> </tr> </table> <p>Observaciones: <input style="width: 90%;" type="text"/></p> <hr/> <p>Detección de Estructuras</p> <p>Tipo:</p> <table style="width: 100%; border: none;"> <tr> <td><input type="checkbox"/> Pavimento</td> <td><input type="checkbox"/> Cripta</td> <td><input type="checkbox"/> Estructura abovedada</td> <td><input type="checkbox"/> Tumba</td> </tr> <tr> <td><input type="checkbox"/> Estructura lineal</td> <td><input type="checkbox"/> Cimentaciones</td> <td><input type="checkbox"/> Instalaciones</td> <td><input type="checkbox"/> Otras</td> </tr> </table> <p>Especificar: <input style="width: 90%;" type="text"/></p> <p>Localización: <input style="width: 90%;" type="text"/></p> <p>Dimensiones (m): Largo: <input style="width: 150px;" type="text"/> Ancho: <input style="width: 150px;" type="text"/></p> <p>Profundidad (m): Máx.: <input style="width: 150px;" type="text"/> Mín.: <input style="width: 150px;" type="text"/></p> <p>Descripción técnica: <input style="width: 90%;" type="text"/></p> <hr/> <p>Detección de Patología</p> <p>Tipo:</p> <table style="width: 100%; border: none;"> <tr> <td><input type="checkbox"/> Humedades</td> <td><input type="checkbox"/> Zonas removidas</td> <td><input type="checkbox"/> Vacíos</td> <td><input type="checkbox"/> Otra</td> </tr> </table> <p>Especificar: <input style="width: 90%;" type="text"/></p> <p>Localización: <input style="width: 90%;" type="text"/></p> <p>Dimensiones (m): Largo: <input style="width: 150px;" type="text"/> Ancho: <input style="width: 150px;" type="text"/></p> <p>Profundidad (m): Máx.: <input style="width: 150px;" type="text"/> Mín.: <input style="width: 150px;" type="text"/></p> <p>Descripción técnica: <input style="width: 90%;" type="text"/></p> <p>Fichas Anexo:</p> <table style="width: 100%; border: none;"> <tr> <td><input type="checkbox"/> Imágenes</td> <td><input type="checkbox"/> Planos</td> <td><input type="checkbox"/> Radargramas</td> <td><input type="checkbox"/> Modelo GPR 3D</td> <td><input type="checkbox"/> Modelización 2D</td> <td><input type="checkbox"/> Modelización 3D</td> </tr> </table>		<input type="checkbox"/> Nivel	<input type="checkbox"/> Estructura	<input type="checkbox"/> Patología	<input type="checkbox"/> Otros elementos	<input type="checkbox"/> Conocido	<input type="checkbox"/> Desconocido	<input type="checkbox"/> Documentado	<input type="checkbox"/> No documentado	<input type="checkbox"/> Nivel Cultural	<input type="checkbox"/> Nivel Geológico	<input type="checkbox"/> Nivel freático	<input type="checkbox"/> Otro	<input type="checkbox"/> Nivel Cultural	<input type="checkbox"/> Nivel Geológico	<input type="checkbox"/> Nivel freático	<input type="checkbox"/> Otro	<input type="checkbox"/> Pavimento	<input type="checkbox"/> Relleno	<input type="checkbox"/> Terreno natural	<input type="checkbox"/> Otro	<input type="checkbox"/> Pavimento	<input type="checkbox"/> Cripta	<input type="checkbox"/> Estructura abovedada	<input type="checkbox"/> Tumba	<input type="checkbox"/> Estructura lineal	<input type="checkbox"/> Cimentaciones	<input type="checkbox"/> Instalaciones	<input type="checkbox"/> Otras	<input type="checkbox"/> Humedades	<input type="checkbox"/> Zonas removidas	<input type="checkbox"/> Vacíos	<input type="checkbox"/> Otra	<input type="checkbox"/> Imágenes	<input type="checkbox"/> Planos	<input type="checkbox"/> Radargramas	<input type="checkbox"/> Modelo GPR 3D	<input type="checkbox"/> Modelización 2D	<input type="checkbox"/> Modelización 3D
<input type="checkbox"/> Nivel	<input type="checkbox"/> Estructura	<input type="checkbox"/> Patología	<input type="checkbox"/> Otros elementos																																				
<input type="checkbox"/> Conocido	<input type="checkbox"/> Desconocido	<input type="checkbox"/> Documentado	<input type="checkbox"/> No documentado																																				
<input type="checkbox"/> Nivel Cultural	<input type="checkbox"/> Nivel Geológico	<input type="checkbox"/> Nivel freático	<input type="checkbox"/> Otro																																				
<input type="checkbox"/> Nivel Cultural	<input type="checkbox"/> Nivel Geológico	<input type="checkbox"/> Nivel freático	<input type="checkbox"/> Otro																																				
<input type="checkbox"/> Pavimento	<input type="checkbox"/> Relleno	<input type="checkbox"/> Terreno natural	<input type="checkbox"/> Otro																																				
<input type="checkbox"/> Pavimento	<input type="checkbox"/> Cripta	<input type="checkbox"/> Estructura abovedada	<input type="checkbox"/> Tumba																																				
<input type="checkbox"/> Estructura lineal	<input type="checkbox"/> Cimentaciones	<input type="checkbox"/> Instalaciones	<input type="checkbox"/> Otras																																				
<input type="checkbox"/> Humedades	<input type="checkbox"/> Zonas removidas	<input type="checkbox"/> Vacíos	<input type="checkbox"/> Otra																																				
<input type="checkbox"/> Imágenes	<input type="checkbox"/> Planos	<input type="checkbox"/> Radargramas	<input type="checkbox"/> Modelo GPR 3D	<input type="checkbox"/> Modelización 2D	<input type="checkbox"/> Modelización 3D																																		

Figura 6.16. Ficha (tipo B) de catalogación de niveles, estructuras y lesiones del subsuelo para futuras intervenciones de restauración de edificios históricos de carácter religioso: Detalles.

7 CONCLUSIONES

Tras una breve introducción en la que se ha presentado el estado del arte de la aplicación de técnicas de georradar a la Ingeniería Civil y al Patrimonio Histórico-Artístico, y de una revisión de la teoría de la propagación de ondas electromagnéticas, el presente trabajo de investigación ha expuesto la aplicación de esta técnica de prospección en una selección de edificios singulares de carácter religioso de la Comunidad Valenciana. En este ámbito, se ha analizado el subsuelo y se ha elaborado el cartografiado del mismo. La información resultante se ha recopilado en fichas de catalogación enfocadas al ámbito de la restauración y conservación del patrimonio, otorgándole una perspectiva multidisciplinar.

En el presente capítulo, se recoge una discusión general de la investigación, relacionando los resultados con experiencias previas de otros autores, así como las principales conclusiones extraídas del estudio presentado. Asimismo, se establece una serie de recomendaciones y futuras líneas de investigación.

7.1. DISCUSIÓN

Las técnicas no destructivas ofrecen múltiples posibilidades para la documentación e interpretación de las anomalías y estructuras existentes en los edificios patrimoniales. De igual manera sucede, más específicamente, con las técnicas geofísicas no invasivas de prospección del subsuelo. Sin embargo, cada una de ellas presenta una serie de ventajas e inconvenientes, como se ha documentado en el estado del arte del presente trabajo de investigación.

La combinación de dos o más técnicas no destructivas en un mismo estudio puede ser un método de trabajo efectivo para contrastar los datos obtenidos y corroborar la fiabilidad de los resultados. Diversidad de investigaciones en el patrimonio arquitectónico reflejan la conveniencia de integrar varios métodos para ampliar y mejorar el análisis del objeto de investigación.

En el caso del patrimonio cultural, resulta interesante apoyar las investigaciones en revisiones documentales históricas e, incluso, en estudios geotécnicos de zonas próximas al objeto de estudio cuando se pretende obtener datos relativos a la geología. No obstante, la técnica del georradar permite lograr resultados fehacientes sin necesidad de ser contrastados, a priori, con otras técnicas. Se trata de un método no invasivo que permite realizar una rápida toma de datos; de esta manera, aumenta la efectividad y reduce costes. Se caracteriza por ofrecer resultados de señal e imagen de alta resolución, además de representaciones tridimensionales de los elementos de análisis. Su idoneidad para detectar y delinear anomalías subterráneas se pone de manifiesto a través de su aplicación en infinidad de proyectos relacionados con el patrimonio cultural.

En el caso de estudio presentado, la técnica del georradar ha proporcionado el material gráfico (imágenes en 2D y 3D) a partir del cual detectar, interpretar y catalogar las anomalías del subsuelo en los edificios históricos de carácter religioso de la Comunidad Valenciana. Estudios similares sobre el análisis mediante la técnica del georradar de estructuras subterráneas del ámbito religioso han sido abordados por

expertos profesionales en la materia, como García *et al.* (2007), Cataldo *et al.* (2012) o Forte y Pipan (2008), entre otros. En estas investigaciones se demuestra que el georradar es una técnica muy eficaz para el cartografiado y la interpretación del subsuelo y que, por tanto, no requiere de otros métodos para obtener resultados contrastados. Algunos autores como Conyers (2012), además de documentar este tipo de estructuras, también han intentado establecer unos criterios para la interpretación de las mismas. El propósito de Conyers no es, sin embargo, catalogar las estructuras subterráneas de una tipología edificatoria concreta, sino unificar criterios para su interpretación de manera que ésta pueda ser accesible por parte de técnicos no especialistas en la materia –como pueden ser los profesionales de la arqueología-.

La presente investigación focaliza el cartografiado del subsuelo y la catalogación de estructuras subterráneas, aún más si cabe, hacia un enfoque multidisciplinar del ámbito de la conservación y restauración del patrimonio cultural religioso. La combinación del georradar con la modelización (en 2D y 3D) de los datos derivados del estudio con georradar hace todavía más efectiva la interpretación y catalogación de los resultados. De esta manera, permite ampliar la interpretación a otros técnicos especialistas del ámbito de la restauración, como arquitectos o arqueólogos (que no necesariamente tienen que tener conocimientos previos sobre el georradar y las imágenes derivadas de su uso –radargramas-). Así pues, la información resultante, recopilada en fichas de catalogación, otorga una perspectiva multidisciplinar mucho más amplia.

Por tanto, se trata de sistematizar el estudio, análisis de datos e interpretación de resultados con otros especialistas del ámbito de la restauración. Por otro lado, la inminente obligatoriedad de incluir todos los datos en registros BIM o HBIM, hace que ese trabajo multidisciplinar, combinado, ponga aún más en valor el patrimonio cultural y ensalce el patrimonio enterrado.

7.2. CONCLUSIONES

1. Limitada explotación del patrimonio cultural español por parte de las administraciones públicas: repercusión en I+D+I

Del análisis estadístico realizado se concluye que las aportaciones económicas realizadas por la Unión Europea y las diferentes administraciones españolas, tanto para la investigación como para la conservación y restauración del patrimonio cultural nacional, son importantes, aunque están sujetas a los vaivenes de la economía.

España posee un patrimonio cultural de los más ricos de Europa. Sin embargo, actualmente, existe un déficit entre la importancia relativa de su patrimonio cultural y el protagonismo del país en los proyectos europeos de mejora y conservación del patrimonio cultural. La menor participación española se debe a la reducida explotación económica que se hace de los bienes patrimoniales en el país, lo que tiene una repercusión directa en la investigación, la innovación y la competitividad.

2. Profesionales en Geomática y Topografía como parte integrante en los equipos multidisciplinares en la conservación y restauración del patrimonio cultural: nuevas oportunidades de mercado.

Las investigaciones y los proyectos de conservación y restauración demandan por un lado, una cualificación técnica determinada y, por otro lado, una capacitación multidisciplinar. En este sentido, las directrices de proyectos de este tipo contemplan la participación de diversas disciplinas, entre las que cabe citar la ausencia de la Ingeniería en Geomática y Topografía. Asimismo, dichas directrices hacen referencia a la necesidad de recopilar y elaborar documentación histórica, archivos de diversa índole, modelizaciones en 2D y 3D, etc. Sin embargo, en ninguna convocatoria se alude al estudio del subsuelo, al espacio bajo cota cero, como parte fundamental de la documentación, análisis y desarrollo de proyectos relacionados con el patrimonio

cultural. La utilización del georradar para el cartografiado del subsuelo, se realiza de manera puntual y esporádica, y sólo cuando la actuación de investigación o de conservación así lo requiere.

El cartografiado del subsuelo por métodos no destructivos y la interpretación a través de modelos digitales, creados por técnicos especialistas en Geomática y Topografía, pueden contribuir a mejorar la imagen de esta disciplina y potenciar su participación en proyectos culturales nacionales y europeos, aportando rentabilidad económica al sector. Esto se traduciría en una oportunidad laboral y de negocio para los ingenieros en Geomática y Topografía, que podrían ampliar los campos de actuación tradicionales, especialmente en épocas de crisis como la actual, en las que se debe buscar con más ímpetu nuevos nichos de trabajo.

3. Cartografiado del subsuelo para la puesta en valor del patrimonio cultural: su explotación y conservación preventiva.

La modelización y catalogación del subsuelo en edificios singulares religiosos favorece la revalorización del patrimonio cultural. Esta nueva perspectiva del cartografiado del subsuelo aporta un valor añadido a la investigación del patrimonio arquitectónico histórico-religioso, dado que permite conocer y documentar los niveles culturales y estructuras del subsuelo y, por tanto, incrementa el archivo patrimonial. Asimismo, contribuye a la mejora de los proyectos de restauración, optimizando parámetros relativos a la construcción –como seguridad y salud, y prevención de riesgos laborales-, y a la conservación preventiva.

La propuesta expuesta en el presente trabajo de investigación ofrece una ventaja competitiva. Ésta consiste en la potenciación del valor arquitectónico histórico-religioso a través de la faceta investigadora por medios innovadores como es el cartografiado del subsuelo, su interpretación y su divulgación. Por otro lado, este tipo de estudios constituye una forma de preservación del subsuelo y de las estructuras allí contenidas, frente a posibles daños causados por

actuaciones imprudentes como consecuencia de la ausencia de estudios previos. Así, el conocimiento y análisis del subsuelo de los edificios singulares podrían servir para evitar daños o lesiones.

4. Aspectos comunes en el subsuelo del patrimonio cultural religioso de la Comunidad Valenciana.

Tras el análisis y cartografiado del subsuelo de diversos edificios singulares religiosos de la Comunidad Valenciana, se concluye que este espacio enterrado está conformado por niveles, tanto culturales como geológicos. Las estructuras más destacadas en esta categoría edificatoria son: criptas, estructuras abovedadas, tumbas, estructuras lineales (restos murarios), cimentaciones, instalaciones y otras estructuras singulares de alto valor histórico, arqueológico o natural. Por su parte, la patología más frecuente en el subsuelo de las edificaciones religiosas es la humedad. Aunque también es común hallar zonas removidas como consecuencia de terraplenado de determinadas áreas o simple remoción de tierras; así como vacíos con distintas causas.

5. Técnica no destructiva de georradar como herramienta eficiente para el cartografiado del subsuelo del patrimonio cultural religioso.

El georradar se muestra como una técnica de prospección geofísica eficiente para obtener con éxito la cartografía del subsuelo y determinar los niveles, las estructuras y la patología presentes en el espacio enterrado de edificios singulares religiosos. Además, se trata de una técnica no destructiva, respetuosa con el patrimonio, que facilita información de elementos ocultos sin dañar el edificio, como sí sucede con otras técnicas como catas, excavaciones o sondeos. La aplicación de dicho método en el análisis del subsuelo de esta tipología edificatoria ha permitido lograr con éxito uno de los principales objetivos planteados al inicio de esta investigación.

6. Modelización tridimensional como instrumento de ayuda para la interpretación de los resultados de georradar: nuevas perspectivas para la restauración y conservación del patrimonio cultural.

Las dimensiones geométricas de los resultados obtenidos mediante la técnica de georradar han permitido interpolar los datos y traducirlos, a través de la modelización, a un modelo tridimensional en el que se aprecia las magnitudes y volúmenes ocupados por las estructuras y lesiones existentes en el subsuelo de los edificios analizados. La modelización y catalogación de estos registros se muestra como una herramienta de ayuda para la interpretación de los resultados orientada a técnicos del ámbito de la restauración y conservación del patrimonio obtenidos, no especializados en la Geomática. Una vez catalogados los resultados en fichas técnicas, asociando las imágenes con la modelización de las estructuras, niveles y patología hallados en el subsuelo, la interpretación para dichos técnicos se facilita sobremanera sirviendo como fuente documental para futuras intervenciones en el edificio.

7.3. FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

Una interesante estrategia de actuación sería vincular a las Administraciones Públicas en el fomento y la potenciación del estudio del subsuelo de edificios singulares como parte del patrimonio cultural. Es de suma relevancia tomar conciencia de las ventajas que aporta este tipo de estudios para la puesta en valor y preservación del patrimonio arquitectónico; y resulta imperiosa la necesidad de estudiar y cartografiar el subsuelo de los edificios históricos como norma general de intervención en el patrimonio para su salvaguarda y revalorización.

Con el propósito de incluir este tipo de estudios en los proyectos de conservación y restauración del patrimonio, se propone una aplicación práctica podría contener los siguientes conceptos:

- a) Creación de un nuevo protocolo para abordar los proyectos de investigación y explotación de construcciones del patrimonio histórico religioso que contemple la caracterización y modelización del subsuelo.
- b) Realización de un proyecto experimental en una muestra patrimonial, que incluya: objetivos, calendario y presupuesto.
- c) Estudio de la información recabada. Elaboración de un plan de explotación optimizado de los recursos arquitectónicos implicados en el proyecto experimental.
- d) Ejecución del plan y medición de los resultados. Análisis de las desviaciones.
- e) Generalización del modelo de actuación al resto del patrimonio cultural.

Por otro lado, una futura línea de investigación sería la elaboración de una biblioteca digital sobre elementos enterrados del patrimonio arquitectónico enterrado para su inclusión en un HBIM. De esta manera, se desarrollaría la representación del subsuelo y los datos allí contenidos en edificios históricos, facilitando la interacción entre las diferentes disciplinas participantes en proyectos de restauración y conservación del patrimonio. Dado que muy probablemente no podrían realizarse catas o sondeos, el diseño digital y la elaboración de una completa librería de estructuras y materiales antiguos serían requisitos indispensables para la configuración del HBIM.

La aplicación debería poner a disposición del usuario una gran cantidad de figuras geométricas o formas arquitectónicas diversas empleadas en los diferentes periodos de la antigüedad, así como los materiales y colores que lo definen para poder texturizar adecuadamente y crear una base de datos vinculada a toda esta

información gráfica. Todo este modelo representativo visual a partir de figuras geométricas conocidas, debería ofrecer la posibilidad de tener un refinamiento o retoques a medida que se van teniendo mayor conocimiento de las estructuras allí enterradas mediante aportaciones gráficas. Todo esto permitiría actualizar el modelo tridimensional.

El HBIM sería un proyecto integrador que, además del conjunto arquitectónico del edificio, incluiría los niveles, estructuras y elementos del subsuelo sobre el que se ubica dicho edificio mediante un modelo virtual fotorrealista y una base de datos vinculada, convirtiéndose en una herramienta eficaz para la gestión, la conservación y el mantenimiento de los edificios patrimoniales. Asimismo, servirá como instrumento para el análisis y la elaboración de propuestas de restauración mediante simulaciones. No obstante, como cualquier base de datos, requerirá actualizaciones constantes e incluso posibilidades de almacenamiento en la nube para facilitar el uso compartido, así como la divulgación.

8 BIBLIOGRAFÍA

- AEERPA (*Association Européenne des Entreprises de Restauration du Patrimoine Architectural*), <http://www.aeerpa.eu/>
- Alonso Durá, A., Gomis Gomez-Ygual, J., Moreno Puchalt, J., Llopis Pulido, V., 2011. Arquitectura religiosa: análisis constructivo y structural, en *Actas del Séptimo Congreso Nacional de Historia de la Construcción*, Santiago 26-29 octubre 2011, eds. S. Huerta, I. Gil Crespo, S. García, M. Taín. Madrid: Instituto Juan de Herrera.
- Annan, A.P., 2002. GPR-History, trends, and future developments. *Subsurface Sensing Technologies and Applications*, 3 (4), 253-270.
- Annan, A.P., Davis, J.L. 1976: Impulse radar sounding of permafrost, *Radio Science*, 11, 383-394.
- Annan, A.P., Davis, J.L., Gendzwill, D. 1988: Radar sounding in potash mines, Saskatchewan, Canada, *Geophysics*, 53, 1556-1564.
- Anuario de Estadísticas Culturales (Ministerio de Educación, Cultura y Deporte), <http://www.mecd.gob.es/servicios-al-ciudadano-mecd/estadisticas/cultura/mc/naec/portada.html>
- Balanis, C.A., Rice, W.S., Smith, N.S., 1976. Microwave measurements of coal. *Radio Science*, 11 (4), 413-418.
- Balaras, C.A., Argiriou, A.A., 2002. Infrared Thermography for building diagnostics. *J. Energy Build.*, 32, 171–183.
- Barilaro, D., Branca, C., Gresta, S., Imposa, S., Leone, A., Majolino, D., 2007. Ground penetrating radar (GPR) surveys applied to the research of crypts in San Sebastiano's church in Catania (Sicily). *Journal of Cultural Heritage* 8, 73-76.
- Barilaro, D., Majolino, D., Gresta, S., Imposa, S., Schillaci, A., Leone, A., 2006. Geophysical and thermographic investigations addressed to the study of the church of "S. Maria del Rosario" in Sicily (Italy). *Contrib. Geophysics Geodesy*, 36 (2), 239-253.
- Barone, P.M., Graziano, F., Pettinelli, E., Corradini R.G., 2007. Ground-penetrating radar investigations into the construction

- techniques of the Concordia Temple (Agrigento, Sicily, Italy). *Archaeological Prospection*, 14(1), 47-59.
- Basile, V., Carrozzo, M.T., Negri, S., Nuzzo, L., Quarta, T., Villani, A.V., 2000. A ground penetrating radar survey for archaeological investigations in an urban area (Lecce, Italy). *Journal of Applied Geophysics*, 44, 15-32.
- Bauman, P.D., Heitzman, R.J., Porter, J.E., Sallomy, J.T., Brewster, M.L., Thompson, C.J., 1994. The integration of radar, magnetic, and terrain conductivity data in an archaeogeophysical investigation of a Hudson's Bay Company fur trade post. *Proceedings of the fifth international conference on ground-penetrating radar*. Kitchener, Ontario (Canada), pp. 531-546.
- Becker, H., Fassbinder, J.W.E., 2001. Magnetic Prospecting in Archaeological Sites, Monuments and Sites VI. In: ICOMOS (Ed.). *Publ. by Lipp GmbH, München*, ISBN 3-87490-675-2.
- Bergman, T., Robertson, J., Holliger, K., 1998. Finite-difference modeling of electromagnetic wave propagation in dispersive medium and attenuating media. *Geophysics*, 63, 856-867.
- Bevan, B.W., 1977 *Ground-Penetrating Radar at Valley Forge*. Geophysical Survey Systems, North Salem, New Hampshire.
- Bevan, B.W., Kenyon, J., 1975. Ground-penetrating radar for historical archaeology. *Masca Newsletter*, 11 (12), 2-17.
- Binda, L., Lenzi, G., Saisi, A., 1998. NDE of masonry structures: use of radar tests for the characterisation of stone masonries. *NDT & E International*, 31 (6), 411-419.
- Bini, M., Fornaciari, A., Ribolini, A., Bianchi, A., Sartini, S., Coschino, F., 2010. Medieval phases of settlement at Benabbio castle, Apennine mountains, Italy: evidence from Ground Penetrating Radar survey. *Journal of Archaeological Science*, 37(12), 3059-3067.
- Bogorodsky, V.V., Trepov, G.V., 1979. Mediciones por radiolocalización de espesores en formaciones de turbas (editado en ruso), *Revista de Física Técnica*, 49, 670-673.
- Bonomo, N., Osella, A., Ratto, N., 2010. Detecting and mapping buried buildings with Ground-Penetrating Radar at an ancient village in

- northwestern Argentina. *Journal of Archaeological Science*, 37(12), 3247-3255.
- Brejovsky, L.M., 1973. *Ondas en medios estratificados* (editado en ruso), 2ª ed., Ed. Nauka, Moscú.
- Brekovskikh, L.M., 1960. *Waves in layered media*, Ed. Academic Press, Inc., New York.
- Bristow, C.S., Jol, H.M., 2003. An introduction to ground penetrating radar (GPR) in sediments. *Geological Society, London, Special Publications*, 211 (1), 1-7.
- Brown, L., 1999. *A radar history of World War II*. Institute of Physics Publishing, London.
- Butler, D.K., 1984. Microgravimetric and gravity gradient techniques for detection of subsurface cavities. *Geophysics*, 49 (7), 1084-1096.
- Butler, D.K., 2008. Detection and characterization of subsurface cavities, tunnels and abandoned mines. *Near-Surface Geophysics and Human Activity*, Science Press USA Inc, 578-584.
- Butler, D.K., Simms, J. E., Cook, D.S., 1994. Archaeological geophysics investigation of the Wright Brothers 1910 Hanger site. *Geoarchaeology: an international journal*, 9, 437-466.
- Cai, J., McMechan, G.A., 1995. Ray-based synthesis of bistatic ground-penetrating radar profiles. *Geophysics*, 60 (1), 87-96.
- Campana, S., Dabas, M., Marasco, L., Piro, S., Zamuner, D., 2009. Integration of remote sensing, geophysical surveys and archaeological excavation for the study of a medieval mound (Tuscany, Italy). *Archaeological Prospection* 16, 167-176.
- Canas, J.A., García, F., Clapés, J., Osorio, R., Pérez, V., Pujades, L.G., Caselles, O., 1996a. Estudio mediante técnicas de geo-radar del subsuelo y galerías de la mina de sal abandonada de Cardona para su rehabilitación como itinerario cultural, *Geogaceta*, 20, 966-969.
- Canas, J.A., García, F., Clapés, J., Osorio, R., Pérez, V., Pujades, L.G., Caselles, O., Ugalde, A., 1996b. Aplicaciones de geo-radar para la determinación del volumen de hormigón necesario para la reparación del revestimiento de bóveda y hastiales de un túnel, *Geogaceta*, 20, 974-977.

- Canas, J.A., Pérez, V., García, F., Clapés, J., Osorio, R., Caselles, O., Pujades, L., 1996c. Ground Penetrating Radar Applications in Cultural Heritage, Int. Conf. On New Technologies in the Humanities and OWLS IV, 9-13 July, 19, Münster, Germany.
- Canas, J.A., Pujades, L.G., García, F., Ugalde, A., Clapés, J., Osorio, R., Pérez, V., Caselles, O., 1996d. Aplicación de técnicas de georadar a los muros biológicos de hormigón armado en el interior de una central nuclear, *Geogaceta*, 20, 970-973.
- Carcione, J.M., 1996a. Ground –penetrating radar: Wave theory and numerical simulation in lossy anisotropic media. *Geophysics*, Vol. 61, N. 6 (November-december, 1996), pp. 1664-1677.
- Carcione, J.M., 1996b. Ground radar simulation for archaeological applications. *Geophysical prospecting*, 44, pp. 871-888.
- Carcione, J.M., 1996c. Ground-radar numerical modeling applied to engineering problems. *European journal of environmental and engineering geophysics*, 1, 65-81.
- Carcione, J.M., 1998. Radiation patterns for 2-D forward modelling. *Geophysics*, 63(2), 424-430.
- Carta de Atenas, 1931. UNESCO,
Carta de Venecia, 1964. ICOMOS,
- Casas, A., Carmona, J.M., Permanger, A., Pinto, V., Rivero, L., Valenciano, A., 1992. Ground probing radar characterization of the settlements produced by building loads over soft sediments, 54th EAEG meeting, 1-5 June, Paris.
- Casper, D.A., Kung, K-J.S., 1996. Simulation of ground penetrating radar waves in a 2-D soil model. *Geophysics*, 61 (4), 1034-1049.
- Cataldo, R., D'Agostino, D., Leucci, G., 2012. Insights into the Buried Archaeological Remains at the Duomo of Lecce (Italy) Using Ground-penetrating Radar Surveys. *Archaeological Prospection* 19(3), 157-165.
- Cataldo, R., De Donno, A., De Nunzio, G., Leucci, G., Nuzzo, L., Siviero, S., 2005. Integrated methods for analysis of deterioration of cultural heritage: the Crypt of 'Cattedrale di Otranto'. *Journal of Cultural Heritage*, 6, 29–38.

- Cole, K.S., Cole, R.S., 1941. Dispersion and adsorption in dielectrics, I, alternating current characteristics. *Journal of Chem. Phys.*, vol. 9, 341-351.
- Convención para la Protección de los Bienes Culturales en caso de Conflicto Armado y Reglamento para la aplicación de la Convención de la Haya, 1954. UNESCO,
- Convención para la protección del patrimonio mundial cultural y natural, 1972. Patrimonio Mundial en España, <http://www.patrimonio-mundial.com/convencion.htm>
- Conyers, L.B., 1996. The use of ground-penetrating radar to map the archaeology and paleo-geography of the Ceren site, El Salvador. *Proceedings of the sixth international conference on ground-penetrating radar.* Tohoku University, Sendai (Japón), pp. 89-94.
- Conyers, L.B., 1998. Acquisition, processing and interpretation techniques for ground-penetrating radar mapping of buried pit-structures in the American Southwest. *Proceedings of the seventh international conference on ground-penetrating radar.* Lawrence, Kansas (U.S.A.). pp. 53-58.
- Conyers, L.B., 2004. *Ground-penetrating Radar for Archaeology.* Altamira Press, Walnut Creek, California.
- Conyers, L.B., 2012. *Interpreting Ground-penetrating Radar for Archaeology.* Left Coast Press, Walnut Creek, California.
- Conyers, L.B., Connell, S., 2007. The applicability of using ground-penetrating radar to discover and map buried archaeological sites in Hawaii, *Hawaiian Archaeology Journal* 11, 62-77.
- Conyers, L.B., Goodman, D., 1997. *Ground-Penetrating Radar: An introduction for archaeologists.* Ed. Altamira Press. Walnut Creek, California (U.S.A.), 240 pp.
- Cook, J., 1973. Radar exploration through rock in advance of mining. *Transactions of the Society of Mining Engineers* 254, 140-146.
- Cook, J.C., 1974. Status of Ground-probing radar and some recent experience, *Proc. on Eng. Found. Conf. on Subsurface Exploration for Underground Excavation and Heavy Construction.* Henniker, Am. Soc. of Civ. Eng., 213 pp., New Hampshire.

- Cook, J.C., 1975. Radar transparencies of mine and tunnel rocks, *Geophysics*, 40, 865-885.
- Costanzo, A., Minasi, M., Casula, G., Musacchio, M., Buongiorno, M.F., 2014. Combined Use of terrestrial laser scanning and IR thermography applied to a historical building. *Sensors* 15, 194-213.
- Chávez, R.E., Argote, D.L., Cámara, M.E., Tejero, A., 2005. GPR and Electric Tomography Methods Applied to Assess a Pre-Hispanic Settlement in Central Mexico. In 67th EAGE Conference & Exhibition.
- Cherniak, G.Ya., 1964. Métodos dieléctricos para el estudio de suelos húmedos (editado en ruso), Ed. Nedra, Moscú.
- Dabas, M., Camerlynck, C., Camps P.F.I., 2000. Simultaneous use of electrostatic quadrupole and GPR in urban context: Investigation of the basement of the Cathedral of Girona (Catalunya, Spain). *Geophysics* 65, 526-532.
- Daniels, D.J., 1996. Surface-penetrating radar. *Electronics & Communication Engineering Journal*, 8 (4), 165-182.
- Davenport, G.C., Lindemann, J.W., Griffin, T.J., Borowski, J.E., 1988. Crime scene investigation techniques, *The Leading Edge of Exploration*, 53, 64-66.
- Davis, J.L., Annan, A.P., 1989. Ground-penetrating radar for high-resolution mapping of soil and rock stratigraphy, *Geophys. Prospec.*, 37, 531-551.
- De Roo, B., Bourgeois, J., De Maeyer, P., 2013. On the way to a 4D archaeological GIS: state of the art, future directions and need for standardization. En *Proceedings of the 2013 Digital Heritage International Congress*, Vol. 2, pp. 617-620.
- Dolphin, L. T., Beatty, W. B., Tanzi, J. D., 1978. Radar probing of Victorio Peak, New Mexico. *Geophysics*, 43 (7), 1441-1448.
- Dolphin, L.T., Bollen, R.L., Oetzel, G.N., 1974. An underground electromagnetic sounder experiments, *Geophysics*, 39, 49-55.
- Dore, C., Murphy, M., 2012. Integration of Historic Building Information Modeling (HBIM) and 3D GIS for recording and managing cultural heritage sites. En 18th International Conference

- on Virtual Systems and Multimedia (VSMM), 2012. IEEE, pp. 369-376.
- Dore, C., Murphy, M., 2015. Historic Building Information Modelling (HBIM). Handbook of Research on Emerging Digital Tools for Architectural Surveying, Modeling, and Representation, 233 pp.
- Ebrahimzadeh, V., 2004. Microgravity investigations of foundation conditions. *J. Earth Space Phys.* 30 (1), 11-14.
- Emslie, A.G., Lagace, R.L., 1976. Propagation of low and medium frequency radio waves in a coal seam. *Radio Science*, 11 (4), 253-261.
- EVoCH (*Economic Value of Cultural Heritage*), http://www.jcyl.es/web/jcyl/EVoCH/es/Plantilla66y33_100/1284160887673/_/_/_
- Fiedler, S., Illich, B., Berger, J., Graw, M., 2009. The effectiveness of ground-penetrating radar surveys in the location of unmarked burial sites in modern cemeteries. *Journal of Applied Geophysics* 68, 380-385.
- Finkelshtein, M.I., Kutev, V.A., Vlasov, O.P., 1979. Radiolocalización del subsuelo en terrenos de turbas (editado en ruso), Academia de Ciencias de la URSS, 219, 832-834.
- Finkelshtein, M.I., Kutev, V.A., Vlasov, O.P., 1974. Radiolocalización de aguas subterráneas en formaciones de arenas (editado en ruso), Academia de Ciencias de la URSS, 9, 1429-1433.
- Finkelshtein, M.I., Kutev, V.A., Zolotarev, V.P., 1986. Aplicaciones de radar del subsuelo en ingeniería geológica (editado en ruso), Ed. Nedra, Moscú.
- Fisher, E., McMechan, G.A., Annan, A.P., Cosway, S.W., 1992. Examples of reverse-time migration of single-channel ground-penetrating radar profiles, *Geophysics*, 52, 577-586.
- Forte, E., Pipan, M., 2008. Integrated seismic tomography and ground-penetrating radar (GPR) for the high-resolution study of burial mounds (tumuli). *Journal of archaeological science*, 35(9), 2614-2623.
- Fundación Caja Madrid, 2008. Análisis económico en el ámbito cultural, http://ipce.mcu.es/pdfs/PN_INVESTIGACION.pdf

- 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.
- García, F., Benlloch, J., Ramírez, M., 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, F., Canas, J. A., Clapés, J., Osorio, R., Pujades, L. G., Pérez, V., Caselles, O., 1996a. Aplicación de técnicas de geo-radar para el estudio del tapón de jet-grouting inyectado en los túneles del metro, *Geogaceta*, 20, 1365-1368.
- García, F., Canas, J. A., Clapés, J., Osorio, R., Pujades, L. G., Pérez, V., Caselles, O., 1996b. Aplicaciones de geo-radar para determinar oquedades en el futuro emplazamiento de las pilas de sostenimiento de un viaducto, *Geogaceta*, 20, 1361-1364.
- García, F., Ramírez, M., Rodríguez, I., Martínez, F., Tort, I., Benlloch, J., Montalvá, J.L., 2007. GPR technique as a tool for cultural heritage restoration: San Miguel de los Reyes Hieronymite Monastery, 16th century (Valencia, Spain), *J. Cult. Herit.* 8, 87-92.
- Glushnev, V.G., Slutzker, B.D., Finkelshtein, M.I., 1976. Sobre las mediciones de algunas características electrofísicas de permafrost mediante radiolocalización (editado en ruso), *Radiofísica*, 19, 59-63.
- González-Drigo, R., Pérez-Gracia, V., Di Capua, D., Pujades, L. G., 2008. GPR survey applied to Modernista buildings in Barcelona: The cultural heritage of the College of Industrial Engineering. *Journal of Cultural Heritage*, 9 (2), 196-202.
- Goodman, D., 1994. Ground-penetrating radar simulation in engineering and archaeology. *Geophysics*, 59, 224-232.
- Goodman, D., 1996. Comparison of GPR time slices and archaeological excavations. Proceedings of the sixth international conference on ground-penetrating radar. Tohoku University, Sendai (Japón), pp. 77-82.
- Goodman, D., Nishimura, Y., Rogers, J.D., 1995. GPR time slices in archaeological prospection. *Archaeological Prospection* 2, 85-89.

- Grasmueck, M., Weger, R., Horstmeyer, H., 2004. Three-dimensional ground penetrating radar imaging of sedimentary structures, fractures, and archaeological features at submeter resolution. *Geology* 32, 933-936.
- Gustafsson, J., Alkarp, M., 2007. Array GPR investigation of the cathedral of Uppsala. *Near Surface Geophysics* 5, 203-207.
- Hildebrand, J.A., Wiggins, S.M., Henkart, P.C., Conyers, L.B., 2002. Comparison of seismic reflection and ground-penetrating radar imaging at the controlled archaeological test site, Champaign, Illinois. *Archaeological Prospection*, 9 (1), 9-21.
- Holser, W.T., Brown, R.J., Roberts, F.A., Fredriksson, O.A., Unterberger, R.R., 1972. Radar logging of a salt dome. *Geophysics* 37, 889-906.
- http://portal.unesco.org/es/ev.php-URL_ID=13637&URL_DO=DO_TOPIC&URL_SECTION=201.html
- http://www.icomos.org/charters/venice_sp.pdf
- http://www.unesco.org/culture/natlaws/media/pdf/guatemala/guatemala_carta_de_atenas_1931_spa_orof
- ICOMOS (1964) International Council on Monuments and Sites, Venice Charter, www.icomos.org/venicecharter.
- Imai, T., Sakayama, T., Kanemori, T., 1987. Use of Ground-Probing radar and resistivity surveys for archaeological investigations. *Geophysics*, 52, 137-150.
- Imposa, S., 2010. Infrared thermography and georadar techniques applied to the “Sala delle Nicchie”(Niches Hall) of Palazzo Pitti, Florence (Italy). *Journal of Cultural Heritage* 11(3), 259-264.
- Instituto de Patrimonio Cultural de España (IPCE), <http://ipce.mcu.es/>
- Instituto Nacional de Estadística (INE), <http://www.ine.es/>
- Ivashov, S.I., Vyacheslav, N.S., Sheyko, A.P., Vasiliev, I.A., Isaenko, V.N., y Konstantinov, V.F., 1998. GPR detection and measurement of filled-up excavations for forensic applications. *Proceedings of the seventh international conference on ground-penetrating radar*. Lawrence, Kansas (U.S.A.), pp. 87-90.

- Johansson, E.M., Mast, J., 1994. Three-dimensional ground imaging using synthetic aperture time-domain focusing, Proc. on Advances Microwave and Millimeter Wave Detector, SPIE Proc., July 1994, vol. 2275.
- Jol, H.M. (Ed.), 2008. Ground penetrating radar theory and applications. Elsevier.
- Jol, H.M., Bristow, C.S., 2003. GPR in sediments: advice on data collection, basic processing and interpretation, a good practice guide. In: Bristow, C.S. and Jol, H.M. (eds.), GPR in Sediments, Geological Society of London, Special Publication 211, 9-27.
- Jones, F.H.M., 1987. Digital impulse radar for glaciology: instrumentation, modelling and field studies. Tesis de Máster. Universidad de British Columbia. 100 pp.
- Kong, F-N., Kristiansen, J., By, T.L., 1992. A Radar investigation of pyramids. IV Int. Conf. on GPR. Geological Survey of Finland, special paper 1, 345-349.
- Kozlovsky, E.A. (ed.), 1989. Enciclopedia de la Minería (editada en ruso), vol. 4, Ed. Enciclopedia Soviética, 285-286, Moscú.
- Lampe, B., Holliger, K., 2000. Finite-difference modeling of ground-penetrating radar antenna radiation. Proceedings of the 8th International Conference on Ground Penetrating Radar, Gold Coast, Australia, 556-560.
- Leckebusch, J., 2000. Two- and three-dimensional ground-penetrating radar surveys across a medieval choir: a case study in archaeology. *Archaeological Prospection* 7(3), 189-200.
- Leckebusch, J., 2003. Ground-penetrating radar: a modern three-dimensional prospection method. *Archaeological Prospection* 10, 213-240.
- Lee, S. MacMechan, G.A., Aiken, C.L.V., 1987. Phase field imaging: the electromagnetic equivalent of seismic migration, *Geophysics*, 52, 678-693.
- Leucci, G., 2002. Ground-penetrating radar survey to map the location of buried structures under two churches. *Archaeological Prospection* 9(4), 217-228.

- Leucci, G., 2006. Contribution of ground penetrating radar and electrical resistivity tomography to identify the cavity and fractures under the main church in Botrugno (Lecce, Italy). *Journal of Archaeological Science* 33, 1194-1204.
- Leucci, G., De Giorgi, L., 2005. Integrated geophysical surveys to assess the structural conditions of a karstic cave of archaeological importance. *Natural Hazards and Earth System Science* 5, 17-22.
- Liu, L., Zhou, C., Xiao, L., 1998. Imaging the interior of the Nathan Hale Monument in Coventry, Connecticut by GPR attenuation tomography. *Proceedings of the Seventh International Conference on Ground-Penetrating Radar. Volumen 2. University of Kansas (Lawrence, Kansas)*, pp. 775-778.
- Lorenzo Cimadevila, Enrique, 1994. *Prospección geofísica de alta resolución mediante geo-radar. Aplicación a obras civiles. Tesis doctoral. Universidad Complutense de Madrid. España.*
- Lorenzo, E., Fernández, I., Cuéllar, V., 1991. Localización de cavidades en el subsuelo mediante geo-radar, VIII Asamblea Nac. de Geodesia y Geofísica, Cádiz.
- Lorenzo, H., Cuéllar, V., Hernández, M.C., 1998. GPR detection of archaeological galleries and tunnels. *Proceedings of the seventh international conference on ground-penetrating radar. Lawrence, Kansas (U.S.A.)*, pp. 661-666.
- Lorrain, P., Corson, D.R., 1972. *Campos y ondas electromagnéticos. Ed. Selecciones científicas. 772 pp.*
- Louis, I.F., 2001. Prospecting for cavities by seismic tomography techniques: the case of Akrotiri Archaeological site. *SEG Expanded Abstracts* 20, 678-681.
- Lytle, R.J., Laine, E.F., Lager, D.L., Okada, J.T., 1976. Determination of the in situ high frequency electrical properties of permafrost rock. *Radio Science*, 11 (4), 285-293.
- Maierhofer, C., Leipold, S. Schaurich, D., Binda, L., Saisi, A., 1998b. Determination of the moisture distribution in the outside walls of S. Maria Rossa using radar. *Proceedings of the Seventh International Conference on Ground-Penetrating-Radar. Lawrence (Kansas, U.S.A.)*, pp. 509-514.

- Maierhofer, C., Leipold, S., Wiggerhauser, H., 1998a. Investigations of the influence of moisture and salt content on the dielectric properties of brick materials using radar. Proceedings of the Seventh International Conference on Ground-Penetrating-Radar. Lawrence (Kansas, U.S.A.), pp. 477-483.
- Malagodi, S., Orlando, L., Piro, S., Rosso, F., 1996. Location of archaeological structures using GPR method: three-dimensional data acquisition and radar signal processing. *Archaeological Prospection* 3, 13-23.
- Marshall, S.V., DuBroff, R.E., Skitek, G.G., 1982. Electromagnetic concepts and applications. Ed. Prentice Hall International (USA). 734 pp.
- Martínez Pino, J., 2012. La "Comisión Franceschini" para la salvaguarda del patrimonio italiano. Riesgo, oportunidad y tradición de una propuesta innovadora. *Patrimonio Cultural y Derecho*, 16, 189-208.
- Martínez-Moreno, F.J., Galindo-Zaldívar, J., Pedrera, A., González-Castillo, L., Ruano, P., Calaforra, J.M., Guirado, E., 2015. Detecting gypsum caves with microgravity and ERT under soil water content variations (Sorbas, SE Spain), *Eng. Geol.* 193, 38-48.
- Masini, N., Nuzzo, L., Rizzo, E., 2007. GPR investigations for the study and the restoration of the rose window of Troia Cathedral (southern Italy). *Near Surface Geophysics* 5(5), 287-300.
- Mellet, J.S., 1992. Location of human remains with ground-penetrating radar. IV Int. Conf. on GPR. Geological Survey of Finland, special paper, 16, 359-365.
- Ministerio de Educación, Cultura y Deporte. Plan Nacional de Abadías, Monasterios y Conventos, <http://ipce.mcu.es/conservacion/planesnacionales/abadias.html>
- Ministerio de Educación, Cultura y Deporte. Plan Nacional de Conservación Preventiva, <http://ipce.mcu.es/conservacion/planesnacionales/preventiva.html>
- Ministerio de Educación, Cultura y Deporte. Planes Nacionales, <http://ipce.mcu.es/conservacion/planesnacionales.html>

- Moropoulou, A., Avdelidis, N.P., Delegou, E.T., 2005. NDT and planning on historic buildings and complexes for the protection of cultural heritage. Cultural heritage conservation and environmental impact assessment by non-destructive testing and microanalysis. Publ. Balkema, Taylor & Francis Group, 67-76.
- Morris, R., 1962. The origin of radar. Anchor Books, New York.
- Mphil, M.M., 2012. Historic Building Information Modelling (HBIM). Tesis Doctoral. Trinity College Dublin. Irlanda.
- Murphy, M., McGovern, E., Pavia, S., 2013. Historic Building Information Modelling—Adding intelligence to laser and image based surveys of European classical architecture. ISPRS journal of photogrammetry and remote sensing, 76, 89-102.
- Nimishura, Y., Kamei, H., 1990. Proceedings of the 27th International Conference on Archaeometry, Heidelberg.
- Novo, A., Leckebusch, J., Goodman, D., Morelli, G., Piro, S., Catanzariti, G., 2013. Advances in GPR imaging with multi-channel radar systems. J. Surv. Mapp. Eng. 1 (1), 1-6.
- Nuzzo, L., Leucci, G., Negri, S., Carrozzo, M.T., Quarta, T., 2002. Application of 3D visualization techniques in the analysis of GPR data for archaeology. Annals of Geophysics 45, 321-337.
- Olsson, o., Falk, L., Forslund, O., Lundmark, L., Sandberg, E., 1987. Crosshole investigations – Results from borehole radar investigations. SKB, Stripa Project, TR.87-11.188.
- Oreni, D., Brumana, R., Cuca, B., Georgopoulos, A., 2013. HBIM for conservation and management of built heritage: Towards a library of vaults and wooden beam floors. In CIPA 2013XXV International Symposium, ISPRS Annals, Vol. 164, pp. 1-6.
- Orlando, L., 2007. Georadar and magnetic data for the planning of an archaeological excavation (case study in central Italy). Archaeological Prospection 14, 1-13.
- Owen, R.R., 1981. Cavity detection using VHF hole to hole electromagnetic techniques. Proceedings of the second tunnel detection symposium, Colorado School of mines, Golden CL, U.S. Army, 126-141.

- Padín, J., Martín, A., Anquela, A.B., 2012. Archaeological microgravimetric prospection inside don church (Valencia, Spain). *Journal of Archaeological Science*, 39(2), 547-554.
- Papaioannou, M.G., Papamarinopoulos, St. P., Stefanopoulos, P., 1996. Geophysical studies in Hermitage museum, the char's former winter palace, in St. Petersburg. Proceedings of the VI Int. Conf. on GPR (GPR'96). Sendai. Japan. Tohoku University. Faculty of Engineering, pp. 101-106.
- Pašteka, R., Terray, M., Hajach, M., Pašiaková, M., 2007. Microgravity measurements and GPR technique in the search for medieval crypts: a case study from the St. Nicholas church in Trnava, SW Slovakia. In Proceedings of the Archaeological Prospection 7th conference, Nitra, Štúdijné zvesti, Vol. 41, pp. 222-224.
- Pérez Gracia, V., 2001. Evaluación GPR para aplicaciones en arqueología y en patrimonio histórico-artístico. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Cataluña. Barcelona. España.
- Pérez Gracia, V., Canas, J.A., Pujades, L.G., Clapés, J., Caselles, O., García, F., Osorio, R., 2000. GPR survey to confirm the location of ancient structures under the Valencian Cathedral (Spain). *Journal of Applied Geophysics*, 43 (2), 167-174.
- Pérez Gracia, V., Canas, J.A., Pujades, L.G., Clapés, J., Caselles, O., García, F., Osorio, R., 1998. GPR survey to confirm the location of the ancient structures under the Valencian Cathedral (Spain) and detection of humidity problems. Proceedings of the seventh international conference on ground-penetrating radar. Lawrence, Kansas (USA), pp. 47-52
- Pérez Gracia, V., Di Capua, D., Caselles, O., Rial, F., Lorenzo, H., Gonzalez-Drigo, R., Armesto, J., 2011. Characterization of a Romanesque Bridge in Galicia (Spain). *International Journal of Architectural Heritage* 5(3), 251-263.
- Pérez Gracia, V., García, F., Clapés, J., Osorio, R., Caselles, J.O., Canas, J.A., Pujades, L.G., 1996. Técnica no destructiva aplicada a la zona más superficial del subsuelo y al patrimonio: georradar. Ed. Fundación Pascual Tomás, pp. 105-113.
- Pérez Gracia, V., García, F., Clapés, J., Osorio, R., Caselles, J.O., Canas, J.A., Pujades, L.G., 1997a. The integrated radar investigations

- in valencian churches: pathologies and archaeology. European Geophysical Society Simposia. Abstract en Annales Geophysicae. Supplement I to volume 15, 83.
- Pérez Gracia, V., García, F., Clapés, J., Osorio, R., Caselles, J.O., Canas, J.A., Pujades, I.G., 1997b. Ground penetrating radar applications in cultural heritage. Optical technologies in the humanities. Selected contributions to the Int.Conf. on new technologies in the humanities and fourth Int. Conf. on optics within life sciences. Editores D. Dirksen y G. von Bally. Ed. Springer Verlag. Münster (Alemania), pp. 213-226.
- Pérez-Gracia, V., González-Drigo, R., Di Capua, D. (2008). Horizontal resolution in a non-destructive shallow GPR survey: an experimental evaluation. *NDT & E International*, 41 (8), 611-620.
- Piro, S., Ceraudo, G., Zamuner, D., 2011. Integrated geophysical and archaeological investigations of Aquinum in Frosinone, Italy, *Archaeol. Prospect.* 18, 127-138.
- Polymenakos, L., Papamarinopoulos, S., Liossis, A., Koukouli-Chryssanthaki, C., 2004. Investigation of a monumental Macedonian tumulus by three-dimensional seismic tomography. *Archaeology Prospection* 11, 145-158.
- Quattrini, R., Malinverni, E.S., Clini, P., Nespeca, R., Orlietti, E., 2015. From Tls to Hbim. High Quality Semantically-Aware 3d Modeling of Complex Architecture. *ISPRS-International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 1, 367-374.
- Ramírez Blanco, M.J., 2001. La Lonja de Valencia y su conjunto monumental. Origen y desarrollo constructivo. Evolución de sus estructuras: Sinopsis de las intervenciones más relevantes. *Silgos XV al XX*. Tesis Doctoral dirigida por Javier Benlloch Marco. Departamento de Construcciones Arquitectónicas. Universidad Politécnica de Valencia. Valencia. España.
- Ramírez-Blanco, M., García-García, F., Rodríguez-Abad, I., Martínez-Sala, R., Benlloch, J., 2008. Ground-penetrating radar survey for subfloor mapping and analysis of structural damage in the Sagrado Corazón de Jesús Church, Spain. *Archaeological Prospection* 15(4), 285-292.

- Ranalli, D., Scozzafava, M., Tallini, M., 2004. Ground penetrating radar investigations for the restoration of historic buildings: the case study of the Collemaggio Basilica (L'Aquila, Italy). *Journal of Cultural Heritage*, 5 (1), 91-99.
- Ranalli, D., Scozzafava, M., Tallini, M., 2004. Ground penetrating radar investigations for the restoration of historic buildings: the case study of the Collemaggio Basilica (L'Aquila, Italy), *J. Cult. Herit.* 5, 91-99.
- Redman, J.D., Kunert, G., Pilon, J.A., Annan, A.P., 1996. Borehole radar for environmental applications: selected case studies. *Proceedings of the 6th International Conference on Ground Penetrating Radar*, Sendai, Japan.
- Renfrew, C., Bahn P.G., 2000. *Archaeology: theories, methods and practice*. Thames and Hudson, London.
- Reynolds, J.M., 1997. *An introduction to applied and environmental geophysics*. Ed: John Wiley & sons. 796 pp.
- Robert, A., 1996. Dielectric permittivity of concrete between 50 MHz and 1 GHz and GPR measurements for building materials evaluation. *Proceedings of the 6th International Conference on Ground Penetrating Radar*. Japan, pp. 117-122.
- Rodríguez, I., García, F., Rodríguez, Ir, Ramírez, M., Montalvo, J.L., Benlloch, J., Capuz, R., 2007. Non-destructive assessment of a buried rainwater cisterna at the Carthusian Monastery "Vall de Crist" (Spain, 14th century) derived by microgravimetric 2D modelling. *Journal of Cultural Heritage* 8, 197-201.
- Said, E., 1956. Geophysical prospection of underground water in the desert by means of electromagnetic interference fringes. *Pro. I.R.E.* 44, 24-30.
- Solla, M., Caamaño, J. C., Riveiro, B., Arias, P., 2012. A novel methodology for the structural assessment of stone arches based on geometric data by integration of photogrammetry and ground-penetrating radar. *Engineering Structures* 35, 296-306.
- Sternberg, B.K. McGill, J.W., 1995. Archaeology studies in Southern Arizona using ground-penetrating radar. *Journal of Applied Geophysics*, 33, 93-100.

- Stewart, D.C., Anderson, W.L., Grover, T.P., Labson, V.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, 1201-1210.
- Sutinen, R., 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.
- Sutton, M.-J. , Conyers, L.B., 2013. Understanding cultural history using ground-penetrating radar mapping of unmarked graves in the Mapoon Mission Cemetery, Western Cape York, Queensland, Australia. *International Journal of Historical Archaeology* 17, 782-805.
- Szareniec, E., 1976. Fundamental functions for stratified earth, *Geophys. Prospec.*, 24, 528-548.
- Szareniec, E., 1979. Towards unification of geophysical problems for horizontally stratified media, *Geophys. Prospec.*, 27, 576-583.
- Tarjov, A.G., 1965. Fundamentos de prospección geofísica por el método de ondas de radio (editado en ruso), Ed. Nedra, Moscú.
- Tohge, M., Karube, F., Kobayashi, M., Tanaka, A., Ishii, K., 1998. The use of ground penetrating radar to map an ancient village buried by volcanic eruptions. *Journal of Applied Geophysics*, 40 (1-3), 49-58.
- Tsokas, G.N., Papazachos, C.B., Vafidis, A., Loukoyiannakis, M.Z., Vargemezis, G., Tzimeas, K., 1995. The detection of monumental tombs buried in tumuli by seismic refraction. *Geophysics* 60 (6), 1735-1742.
- Turner, G., Siggins, A.F., 1994. Constant Q attenuation of subsurface radar pulses. *Geophysics*, vol. 39, N. 8 (august 1994), pp. 1192-1200.
- Udphuay, S., Paul, V.L., Everett, M.E., Warden, R.B., 2010. Ground-penetrating radar imaging of twelfth century Romanesque foundations beneath the thirteenth century Gothic abbey church of Valmagne, France. *Archaeological Prospection* 17(4), 199-212.

- Ulriksen, C.P.F., 1982. Application of impulse radar to civil engineering, Ph. D. Thesis, Dept. of Eng. Geology, Lund University of Technology, Sweden.
- Unterberger, R.R., 1974. Electromagnetic wave propagation in salt, probing into salt with radar, 4th. Symp. on Salt, vol. 2, Rock Mechanics and Geophysics, Ed. A.H. Coogan, 11-26.
- Unterberger, R.R., 1978. Radar propagation in rock salt. *Geophysical Prospecting* 26, 312-328.
- Ursin, B., 1983. Review of elastic and electromagnetic wave propagation in horizontally layered media, *Geophysics*, 48, 1063-1081.
- Van Deen, J.K., de Feitjer, J.W., 1992. Three dimensional ground probing radar, Fourth Int. Conf. on GPR, Geol. Surv. of Finland, Special Paper, 16, 35-40, Finland.
- Vaughan, C.J., 1986. Ground-Penetrating radar surveys used in archaeological investigations. *Geophysics*, 51, 595-604.
- Volk, R., Stengel, J., Schultmann, F., 2014. Building Information Modeling (BIM) for existing buildings—Literature review and future needs. *Automation in Construction*, 38, 109-127.
- von der Osten-Woldenburg, H., Chaume, B., Reinhard, W., 2002. Magnetic imaging of a late Bronze Age tumulus in France before and during excavation. *The Leading Edge* 21, 465-466.
- Wait, J.R., 1951. The magnetic dipole over the horizontally stratified earth, *Can. Jour. of Phy.*, 29, 577-592.
- Wait, J.R., 1952. A transient magnetic dipole source in a dissipative medium, *Jour. of Appl. Phy.*, 24, 1244-1245.
- Wait, J.R., 1953. Propagation of radio waves over a stratified ground, *Geophysics*, 18, 416-422.
- Wait, J.R., 1957. The transient behaviour of the electromagnetic ground wave over a spherical earth, *Trans. I.R.E.*, AP-5, 198-202.
- Wait, J.R., 1958. Introduction by an oscillating magnetic dipole over two-layer ground, *Appl. Scien. Res.*, B-7, 73-80.
- Wait, J.R., 1959. On the electromagnetic response of an imperfectly conducting thin-dyke, *Geophysics*, 14, 167-171.

- Wait, J.R., 1960. Propagation of electromagnetic pulses in a homogeneous conducting earth, *Appl. Scien. Res.*, B-8, 213,253.
- Wait, J.R., 1962. *Electromagnetic waves in stratified media*, Ed. Macmillan, New York.
- Waite, A.H., Schmidt, S.J., 1961. Gross errors in height indication from pulsed radar altimeters operating over thick ice or snow. *IRE International Convention Record* 5(2), 38-54.
- Walford, M.E.R., 1964. Radio echo sounding through an ice shelf. *Nature*, 204(4956), 317-319.
- Warhus, J.P., Hernández, J.M., Nelson, S.D., Johansson, E.M., Lee, H., 1993. Ground penetrating imaging radar for bridge inspection, *Eng. Res. Development and Technology*, Lawrence Livermore National Laboratory, UCRL-53868-92, Livermore, California.
- Xu, T., McMechan, G.A., 1997. GPR attenuation and its numerical simulation in 2.5 dimensions. *Geophysics*, 62 (1), 403-414.
- Yakubovsky, Y.V., 1973. *Prospección eléctrica* (editado en ruso), Ed. Nedra, Moscú.
- Yule, D.E., Sharp, M.K., Butler, D.W., 1998. Microgravity investigations of foundation conditions, *Geophysics* 63, 95-103.
- Zeng, X., McMechan, G.A., Cai, J., Chen, H.W., 1995. Comparison of Ray and Fourier methods for modeling monostatic ground-penetrating radar profiles. *Geophysics*, 60, 1727-1734.
- Zhadanov, M.S., 1988. *Integral transforms in geophysics*, Ed. Springer-Verlag, Inc., New York.
- Zonghou, X., Tripp, A.C., 1997. Ground-penetrating radar responses of dispersive models. *Geophysics*, 62 (4), 1127-1131.

