

Índice de figuras.

	Página
Figura 3.1. Variación de la parte real y de la parte imaginaria de la permitividad dieléctrica compleja en función de la frecuencia, a partir del modelo de Debye, para el valor de la permitividad a alta frecuencia de 81 y a baja frecuencia de 3.2 (valores de Duke, 1990).....	135
Figura 3.2. Variación de la velocidad frente a la permitividad dieléctrica relativa. Los puntos de la gráfica son valores experimentales obtenidos para diferentes materiales (Reynolds, 1997). La curva está obtenida a partir de la ecuación 3.27.....	141
Figura 3.3. Refracción y reflexión de la energía incidente en un contacto horizontal. a) Onda electromagnética polarizada horizontalmente (paralela al plano de incidencia). b) Polarizada verticalmente (perpendicular al contacto).....	148
Figura 4.1. Modos de vibración de la molécula de agua. ω_{M1} , ω_{M2} y ω_{M3} son la frecuencias propias de cada uno de los modos. Para las frecuencia de la banda de las microondas los procesos de orientación de las moléculas de agua entran en resonancia, de forma que la molécula absorbe energía del pulso incidente, transformándola en calor.....	159
Figura 4.2. Variación de la velocidad con la frecuencia en el rango de frecuencias de trabajo del georradar para un medio con $\epsilon_r=10$. a) Conductividad de 10 S/m, 1 S/m y 0.8 S/m. b) Conductividad de 0.8 S/m, 0.5 S/m, 0.2 S/m y 0.1 S/m. c) Conductividad de 2 mS/m, 1 mS/m y 0.8 mS/m.....	162
Figura 4.3. Variación de la profundidad pelicular de penetración d en función de la conductividad (en mS/m) para dos valores extremos de la constante dieléctrica relativa: la que presenta el aire, $\epsilon_r=1$ y la del agua, $\epsilon_r=81$	168
Figura 4.4. Curvas de d (en m) en función de σ (en mS/m) para diferentes valores de permitividad dieléctrica (efectiva) característicos de materiales del subsuelo.	169
Figura 4.5. Curvas patrón que presentan los valores de d (en m) en función de la permitividad dieléctrica relativa efectiva, para diferentes valores de la conductividad. Estas curvas son aplicables únicamente en el caso de poder realizar la aproximación de pequeñas pérdidas. Dentro de este supuesto d no depende de la frecuencia. a) Medios de conductividad alta. b) Medios con conductividad media. c) Medios de conductividad baja. d) Medios muy resistivos.....	172
Figura 4.6. Curvas patrón que permiten obtener d (en m) en función de ϵ_r efectiva, para el caso general (incluyendo aquellos medios en los que no se cumple la relación $\sigma \ll \omega \epsilon$. Frecuencia de 10 MHz. a) Medios de conductividad alta. b) Medios con conductividad media. c) Medios de conductividad baja. d) Medios muy resistivos (casi transparentes).....	176
Figura 4.7. Curvas patrón que permiten obtener d (m) en función de ϵ_r efectiva, para el caso general (incluyendo aquellos medios en los que no se cumple la relación $\sigma \ll \omega \epsilon$. Frecuencia de 1 GHz. a) Medios de conductividad alta. b) Medios con conductividad media. c) Medios de conductividad baja. d) Medios muy resistivos (casi transparentes).....	178

Figura 4.8. Valores de la conductividad (en mS/m) en función de ϵ_r para que se cumpla que $P=tgD=1$, representadas frecuencias de 1 MHz, 5 MHz y 10 MHz.....	180
Figura 4.9. Valores de σ (en mS/m) en función de ϵ_r que cumplen $P=1$ calculados para las frecuencias más usuales en prospección con radar de subsuelo (desde los 100 MHz a los 1000 MHz).....	180
Figura 4.10. Esquema que muestra la relación entre la potencia generada por una antena y la potencia captada por un receptor tras una reflexión (Reynolds, 1997).....	185
Figura 4.11. Esquema de la propagación de un frente de ondas esférico.....	188
Figura 4.12. Esquema de las zonas de Fresnel.....	189
Figura 4.13. Esquema del registro obtenido en un medio en el que existen dos reflectores cuya distancia entre ellos varía (Lorenzo, 1994). A partir de una cierta distancia entre ambos, las anomalías pueden separarse en el registro como eventos diferentes.....	191
Figura 4.14. Relación entre la duración de una señal, la anchura del pulso y su anchura de banda (Lorenzo, 1994).....	192
Figura 4.15. Espesor mínimo detectable para velocidades situadas entre la velocidad media del aire y la del agua frente a: a) duración del pulso (en ns) y b) frecuencias (en MHz).....	195
Figura 4.16. Esquema que muestra el área iluminada por la antena a una profundidad h desde la superficie del medio.....	198
Figura 5.1. Relación entre el rango del radar, la atenuación y la sensibilidad del equipo según Davis y Annan (1989). El rango marcado con punteado es el de trabajo de los radares actuales. Marcado con líneas, el rango de trabajo de los radares más antiguos.....	212
Figura 5.2. Esquema de un modelo de radiación de una antena. Pueden observarse tanto el lóbulo principal como los lóbulos secundarios.....	214
Figura 5.3. Esquema del funcionamiento de un radar aéreo.....	215
Figura 5.4. Esquema simplificado de las diferentes componentes de un equipo de georradar.....	216
Figura 5.5. Esquema de una antena de 100 MHz de "GSSI" (según Hänninen et al., 1992). La espira que hace de dipolo emisor es del tipo mariposa.....	224
Figura 5.6. Esquema de adquisición de datos mediante perfiles.....	227
Figura 5.7. Esquema de la adquisición de datos puntual.....	228
Figura 5.8. Esquema de la obtención de datos con CMP.....	229
Figura 5.9. Esquema de la transiluminación. Las antenas emisora y receptora se sitúan en superficies opuestas.....	231
Figura 5.10. Tomografía GPR. Esquema de la realización de una tomografía con georradar (a). División del plano en celdas (b).....	232
Figura 5.11. Esquema de un perfil de reflexión y refracción de gran ángulo.....	233
Figura 5.12. Esquema de un estudio de sondeo utilizando una antena monoestática.....	234

Figura 5.13. Estudio de sondeos utilizando antenas biestáticas. a) Un solo pozo. b) Dos pozos paralelos.....	235
Figura 5.14. Fotografía de la unidad central y del monitor del georradar SIR-10 de "GSSI" (página WEB de "GSSI": www.geophysics.com).....	237
Figura 5.15. Antena de 1 GHz de frecuencia central.....	239
Figura 5.16. Antena de 100 MHz de frecuencia central.....	239
Figura 5.17. Antena de 900 MHz de frecuencia central. (Fotografía obtenida de la página WEB de "GSSI", www.geophysics.com).....	240
Figura 5.18. Antena de 500 MHz de frecuencia central.....	240
Figura 5.19. Diagrama de radiación de la antena 3102 de "GSSI" (monoestática con una separación entre dipolos de 15 cm.) en hielo, en el plano perpendicular a la superficie (Arcone, 1996).....	243
Figura 5.20. Diagrama de radiación de la antena 3102 de "GSSI" en hielo en el plano paralelo a la superficie (Arcone, 1996).....	243
Figura 5.21. Diagrama de radiación para la antena 3102 de "GSSI" obtenido por Glover (1987) para el caso del aire ($\epsilon = 1$).....	244
Figura 5.22. Traza de georradar obtenida con una antena de dos dipolos de frecuencia central 500 MHz. La propagación se ha producido en aire y la reflexión en una plancha metálica. Los eventos observados son: evento de inicio de registro (A), onda directa aérea (B) y reflexión en la placa metálica (C). No se ha producido cambio de fase entre la onda directa y la reflexión.....	245
Figura 5.23. Espectro de amplitudes para la traza de la figura 5.22. El espectro está centrado en 500 MHz y tiene un ancho de banda de, aproximadamente 1000 MHz.....	246
Figura 5.24. Diagrama de radiación obtenido por Glover (1987) para la antena 3101 de "GSSI" en el aire.....	246
Figura 5.25. a) Pulso directo de la antena de 3100 (1 GHz), y b) De la antena de 3101 (900 MHz).....	247
Figura 5.26. Trazas de una emisión en el aire de las antenas de c) 100 MHz y d) 200 MHz.....	248
Figura 5.27. Espectro de amplitudes para el pulso de la figura 5.25.a (antena 3110, de 1 GHz).....	249
Figura 5.28. Espectro de frecuencias para el pulso de la figura 5.25.b (antena 3101, de 900 MHz).....	249
Figura 5.29. Espectro de frecuencias para el pulso de la figura 5.26.a (antena de 100 MHz).....	250
Figura 5.30. Espectro de frecuencias para el pulso de la figura 5.26.b (antena de 200 MHz).....	250
Figura 6.1. a) Dependencia de la permitividad dieléctrica relativa del agua con la temperatura, según la relación 6.1 (Wobschal, 1977). b) Dependencia de la velocidad de propagación en agua con la temperatura (ecuaciones 4.4 y 6.1)....	258
Figura 6.2. Variación de la permitividad dieléctrica relativa según Knoll y Knight (1994) con la porosidad para: a) arena seca pura de sílice; b) arcilla seca; c) mezcla seca de arcilla con arena, presentando diferentes contenidos de arcilla.	268

Figura 6.3. Variación de la conductividad según Knoll y Knight (1994) con la porosidad para: a) arena seca pura; b) arcilla seca; c) mezcla seca de arcilla con arena para diferentes contenidos de arcilla.....	270
Figura 6.4. Dependencia de los parámetros electromagnéticos según Knoll y Knight (1994) con el contenido en arcilla de una mezcla seca de arcilla y arena. a) Permitividad dieléctrica efectiva. b) Conductividad efectiva.....	271
Figura 6.5. Variación de la permitividad dieléctrica con la saturación según Knoll y Knight (1994) en una mezcla de porosidad 0.36 con: a) bajo contenido de arcillas (un 0.063) y b) alto contenido en arcillas (un 0.375).....	272
Figura 6.6. Variación de la conductividad efectiva con la saturación según Knoll y Knight (1994) para una mezcla con: a) bajo contenido en arcillas (6.3%) y b) alto contenido en arcillas (37.5%).....	274
Figura 6.7. Gráfica que muestra la variación de la velocidad de propagación de una onda electromagnética con la porosidad del medio. Se han considerado seis medios diferentes (tres matrices y dos condiciones: totalmente saturado y no saturado). En la leyenda, entre paréntesis, se indican las permitividades relativas consideradas para cada matriz.....	277
Figura 6.8. Gráfica que muestra la variación de la permitividad dieléctrica relativa con el porcentaje de porosidad de un medio, según el modelo de la expresión 6.6. Las curvas están obtenidas para tres materiales diferentes considerando los dos casos extremos: saturación total y saturación cero. En la leyenda se indica, entre paréntesis la permitividad dieléctrica relativa considerada para la matriz sólida en cada caso.....	277
Figura 6.9. Dependencia de la permitividad dieléctrica efectiva con la porosidad, comparando los resultados de tres modelos trifásicos (ecuaciones 6.5, 6.5 y 6.6) para un grano de $\epsilon_r=5$	280
Figura 6.10. Resultados obtenidos por Saarenketo (1996) para arcillas compuestas por cuarzo y moscovita principalmente, que presentan una elevada capacidad de intercambio de cationes. a) Conductividad. b) Permitividad dieléctrica relativa.....	282
Figura 6.11. Variación de la permitividad en un medio trifásico (arena, agua y aire) según el modelo de Hara y Sakayama (1984). La permitividad dieléctrica relativa para el material sólido se ha considerado de 5. La escala de tonos está referida a los distintos valores que alcanza la permitividad medida en cada caso.....	287
Figura 6.12. Variación de la permitividad dieléctrica efectiva con la porosidad y la saturación para un modelo de tres fases y dos elementos sólidos, compuesto por arena ($\epsilon=6$), arcilla ($\epsilon=3$), agua ($\epsilon=81$) y aire ($\epsilon=1$), considerando un porcentaje de un 1% de arcilla sobre el total de la fase sólida..	289
Figura 6.13. Variación ϵ con la porosidad y la saturación para el medio de tres fases y dos elementos sólidos, formado por arena, arcilla, agua y aire, con un porcentaje de arcilla del 5% del total del sólido, según el modelo utilizado por Knoll y Knight (1994).....	291
Figura 6.14. Modelo de cuatro fases utilizado por Knoll y Knight para un medio de tres fases formado por arena, agua y aire. En este caso se ha supuesto que el porcentaje de arcilla en el material matriz es nulo.....	292
Figura 6.15. Modelo utilizado por Knoll y Knight (1994) para un medio de tres fases y dos elementos sólidos formado por arena y arcilla (fase sólida), agua (fase líquida), aire (fase gaseosa). El porcentaje de arcilla respecto al elemento sólido es del 10%.....	293

Figura 6.16. Modelo SSC para un medio formado por tres agua, aire y arena. Variación de la permitividad del medio en función de la porosidad y de la saturación, S_a	295
Figura 6.17. Gráfica obtenida por Cook (1975) en la que se presenta la penetración de las ondas de georradar en función de la frecuencia para diferentes tipos de rocas. La banda para cada una de las rocas está limitada por la función del radar, considerada para este trabajo entre 100 dB y 150 dB...	300
Figura 7.1. Cabecera de un registro obtenido con el georradar SIR 10 de la casa GSSI.....	310
Figura 7.2. Traza correspondiente a la cabecera de la figura 7.1.....	310
Figura 7.3. Radargrama formado por numerosas trazas de amplitud. En el eje vertical se indican los tiempos dobles de propagación (en nanosegundos) y su conversión a distancias para una velocidad de propagación media de 10 cm/ns. En el eje horizontal la distancia sobre el medio se indica a partir de unas marcas verticales. En este caso la distancia entre dos marcas verticales representa una distancia horizontal de 1 m.....	320
Figura 7.4. Escalas utilizadas para la representación de los registros: (a) lineal y (b) no lineal. La escala de colores seleccionada es una gradación de tonos de gris y azul, diferenciando las distintas fases de las amplitudes de los pulsos.....	321
Figura 7.5. Asociación de la escala de colores no lineal de la figura 7.4.b a las diferentes amplitudes de una traza obtenida con georradar.....	322
Figura 7.6. Registro obtenido en la Catedral de Valencia. (a) Radargrama de trazas de amplitud. (b) Radargrama de colores asociados a intervalos de amplitudes, según la escala de la figura 7.4.b.....	323
Figura 7.7. Registro de campo sin tratamiento aplicado, obtenido en Alcántara (Extremadura). Se observan efectos de bandas y de rizado. Las primeras son líneas continuas en toda la longitud espacial del registro. El segundo son las oscilaciones que se observan sobre las anomalías.....	330
Figura 7.8. Aplicación de filtros horizontales paso bajas. (a) Registro de la figura 7.7 tratado con un FIR horizontal de ventana cuadrada y $N=20$. (b) Registro de la figura 7.7 tratado con un IIR horizontal de $TC=10$	333
Figura 7.9. Aplicación de filtros horizontales para disminuir el ruido de fondo de baja frecuencia. (a) Registro tratado mediante un filtro FIR horizontal paso altas de ventana cuadrada, con una constante temporal de valor $N=200$, aplicado a todo el registro (ventana temporal entre los 3 y los 512 puntos de muestreo). (b) El mismo registro tratado mediante un filtro IIR paso altas horizontal de $TC=200$, aplicado a una ventana de anchura vertical comprendida entre los 100 y los 300 puntos de muestreo (correspondientes a unos tiempos dobles de propagación de 58.6 ns y 175.8 ns, respectivamente).....	335
Figura 7.10. Resultado de aplicar al radargrama de la figura 7.7 dos filtros IIR horizontales en distintas zonas del registro: un paso bajas con $TC=20$, aplicado a una ventana vertical desde 3 a 512 puntos de muestreo, y un paso altas con un $TC=200$ aplicado a una ventana de anchura vertical comprendida entre los 100 y los 300 puntos de muestreo.....	336
Figura 7.11. Segmento de 222 puntos de muestreo de un registro de campo obtenido en Alcántara (Extremadura). Rango y muestreo del registro original: 100 ns y 512 puntos por traza. Rango del segmento seleccionado: 40.36 ns.....	339
Figura 7.12. Espectros de frecuencias de distintas trazas del registro 7.11. (a) Traza a 0.5 m del inicio del registro. (b) Traza a 2 m. (c) Traza a 4 m. (d) Traza a 5 m. (e) Traza a 7 m. (f) Traza a 9 m. (g) Traza a 11 m. (h) Traza a 13 m. (i) Traza a 15 m. (j) Traza a 17 m. (k) Traza a 18 m.....	342

Figura 7.13. Aplicación, siempre al registro de la figura 7.11, de filtros IIR verticales paso bajas con distintas constantes temporales (TC) de corte dadas en muestras. (a) TC=2; 103.3 c/sc. (b) TC=5; 39.4 c/sc. (c) TC=10; 20.7 c/sc. (d) TC=15; 13.8 c/sc. (e) TC=20; 10.3 c/sc. (f) TC=30; 6.9 c/sc. (g) TC=40; 5.2 c/sc. (h) TC=50; 4.1 c/sc. (i) TC=100; 2.1 c/sc. (j) TC=150; 1.4 c/sc. (k) TC=200; 1.03 c/sc. (l) TC=250; 0.83 c/sc.....	345
Figura 7.14. Espectro de una traza del radargrama de la figura 7.13.i.....	346
Figura 7.15. Aplicación de un filtro paso banda al registro de la figura 7.11 con un TC=20 para el filtro paso altas y con un TC=7 para el filtro paso bajas. (a) Registro resultante y (b) espectro de amplitud característico de una traza del radargrama.....	347
Figura 7.16. Ejemplo de aplicación de deconvolución sobre un registro complejo. (a) Registro de campo obtenido en Paiporta (Valencia). (b) Resultado obtenido tras aplicar una deconvolución con $l=42$, $a=5$, 1% de ruido blanco y una ganancia final de 1 dB.....	355
Figura 7.17. Deconvolución aplicada sobre un registro simple y pequeño (duración vertical: 39 ns, duración horizontal: 5.5 m). (a) Segmento de un registro de campo obtenido en la Catedral de Valencia. (b) Resultado tras aplicar una deconvolución predictiva con $l=16$ ns, $a=5$ ns, un 2% de ruido blanco y una ganancia de 1 dB.....	357
Figura 7.18. Segmento de un registro obtenido en la catedral de Valencia, de una duración de 38.5 ns y de una longitud horizontal de 8 metros. Se trata de un registro con un elevado nivel de ruido. (a) Registro en una escala lineal de colores asociados a las amplitudes. (b) Registro en amplitudes.....	358
Figura 7.19. Resultado obtenido tras aplicar una deconvolución predictiva al registro de la figura 7.18. Los parámetros de la deconvolución han sido: $l=15$ ns, $a=3$ ns, un ruido blanco del 1% y una ganancia final de 1 dB. Podemos observar que gran parte del ruido del registro ha sido eliminado. (a) Resultado en colores asociados a amplitudes. (b) Resultado en amplitudes.....	358
Figura 7.20. Registro característico de reflectores finitos. Se observa una hipérbola muy nítida.....	360
Figura 7.21. Esquema que explica el motivo de los registros del tipo que se presenta en la figura 7.20, suponiendo un medio homogéneo en con un único elemento anómalo finito. (a) Durante la adquisición de datos la antena registra el elemento anómalo antes de estar situada sobre él. Las trayectorias de propagación de las ondas son mayores cuanto mayor es la distancia entre el elemento y la antena. Esto produce una variación en los tiempos dobles de propagación y en la atenuación de la señal. (b) Esquema del posible registro obtenido en este caso. La primera señal está causada por el acoplamiento entre la antena y el suelo. La reflexión en el elemento anómalo se observa como una hipérbola, marcada por la línea discontinua.....	361
Figura 7.22. Aplicación de migración a un registro de campo (a) en el que se observa una típica hipérbola de georradar. (b) Resultado obtenido. La hipérbola ha colapsado en un evento plano de longitud pequeña. La velocidad calculada en este caso a partir de la ecuación de la hipérbola es aproximadamente de 7 cm/ns.....	364
Figura 7.23. Sección sobremigrada. La velocidad utilizada en este caso para migrar el registro de la figura 7.22.a ha sido más elevada que la velocidad que ha ocasionado el característico evento hiperbólico.....	366
Figura 7.24. Transformada de Hilbert en amplitud de una única traza. (a) Traza original sin tratar. (b) Traza resultante del proceso. Este registro obtenido es la envolvente de la traza (a).....	375

Figura 7.25. Transformada de Hilbert en amplitud aplicada a un sector de un registro de campo (a). El radargrama resultante (b) muestra las zonas en las que la amplitud registrada es mayor.....	275
Figura 7.26. Transformada de Hilbert en amplitud aplicada a un sector de un registro de campo (a). El radargrama resultante (b) está formado por la envolventes de cada una de las trazas que componen el registro (a).....	276
Figura 7.27. Aplicación de la transformada de Hilbert en frecuencias al registro de la figura 7.25.a. (a) Resultado directo considerando una banda de frecuencias entre 0 y 520 MHz. (b) Resultado filtrado utilizando un filtro paso banda vertical IIR con constantes temporales de corte de 25 y 100 ns. La representación, en la misma escala de colores que la mostrada en la figura 7.4.b asocia las frecuencias más altas a los colores más claros, y las más bajas a los colores más oscuros.....	277
Figura 7.28. (a) Traza obtenida con un rango de 40 ns de forma experimental con una antena de 900 MHz en una cubeta de agua con un reflector metálico en el fondo. (b) Espectro de frecuencias de esta traza. El máximo está situado cerca de los 16 ciclos/scan, lo que equivale a unos 400 MHz. El desplazamiento del máximo hacia las bajas frecuencias está ocasionado por la mayor atenuación de frecuencias altas que se produce en medios absorbentes.....	278
Figura 7.29. Efecto que produce la aplicación de un filtro FIR triangular paso bajas vertical temporal sobre la traza de la figura 7.28, con: (a) N=50, (b) N=30 y (c) N=10.....	279
Figura 7.30. Efecto que produce la aplicación de un filtro FIR triangular paso altas vertical sobre la traza de la figura 7.28 con: (a) N=5, (b) N=10 y (c) N=20..	279
Figura 7.31. Efecto que produce la aplicación de un filtro FIR cuadrado paso bajas vertical sobre la traza de la figura 7.28 con: (a) N=10, (b) N=30 y (c) N=50.....	280
Figura 7.32. Efecto que produce la aplicación de un filtro FIR cuadrado paso altas vertical sobre la traza de la figura 7.28 con: (a) N=5, (b) N=10 y (c) N=20..	281
Figura 7.33. Efecto que produce la aplicación de un filtro IIR paso bajas vertical sobre la traza de la figura 7.28, con: (a) TC=1 (frecuencia de corte, $f_c=12.8$ GHz), (b) TC=5 ($f_c=2.56$ GHz), (c) TC=10 ($f_c=1.28$ GHz), (d) TC=20 ($f_c=640$ MHz), (e) TC=30 ($f_c=427$ MHz), (f) TC=40 ($f_c=320$ MHz) y (g) TC=50 ($f_c=256$ MHz).....	281
Figura 7.34. Aplicación, sobre la traza de la figura 7.28, de un filtro IIR vertical paso alta con: (a) TC=1 ($f_c=12.8$ GHz), (b) TC=5 ($f_c=2.56$ GHz), (c) TC=10 ($f_c=1.28$ GHz), (d) TC=20 ($f_c=640$ MHz), (e) TC=30 ($f_c=427$ MHz), (f) TC=40 ($f_c=320$ MHz) y (g) TC=50 ($f_c=256$ MHz).....	282
Figura 7.35. Efecto que produce una deconvolución predictiva para una misma longitud de tiempo de predicción ($l=31$), variando el intervalo de predicción, a . El parámetro de preblanqueado ha sido, en todos los casos, de 0.1. (a) Traza original (la misma que la de la figura 7.28); (b) $a=20$; (c) $a=15$; (d) $a=10$; (e) $a=8$; (f) $a=5$; (g) $a=3$; (h) $a=1$. El número de muestras de cada traza es de 512 puntos.....	283
Figura 7.36. Aplicación de una deconvolución predictiva sobre la traza de la figura 7.28, variando en este caso la longitud de tiempo de predicción, l , para un mismo intervalo de predicción ($a=5$) y un valor del parámetro de preblanqueado de 0.1 en todos los casos. (a) $l=5$; (b) $l=10$; (c) $l=15$; (d) $l=20$; (e) $l=25$; (f) $l=30$; (g) $l=35$; (h) $l=40$; (i) $l=45$; (j) $l=50$	284

Figura 7.37. Efecto que producen las correcciones topográficas sobre un registro de campo, dada una determinada topografía del perfil por el que se ha desplazado la antena (a). Registro original y (b) registro corregido para la topografía.....	387
Figura 7.38. Esquema de la trayectoria seguida por la onda cuya atenuación se analiza considerando los factores de expansión geométrica del frente de ondas y de coeficientes de refracción y de reflexión. El esquema se corresponde con el registro de la figura 7.16. Las trayectorias se han dibujado exageradas en la figura ya que, a efectos prácticos se considera incidencia normal.....	389
Figura 7.39. Relación entre la amplitud relativa a la amplitud inicial A_0 frente al tiempo de propagación de la onda en el medio esquematizado en la figura 7.38 y con las relaciones presentadas en la tabla 7.3.....	392
Figura 7.40. Ejemplo de aplicación de ganancia sobre el registro de la figura 7.16. (a) Traza del registro 7.16 sin amplificar. (b) La misma traza tras aplicar la ganancia en cuatro tramos que muestra la gráfica (c). El registro completo sin amplificar (d) y el mismo tras aplicar la ganancia de la gráfica (e).....	394
Figura 7.41. Ejemplo de suma de trazas. (a) Registro de campo. (b) Registro tratado con la superposición de grupos de dos trazas adyacentes entre sí. (c) Superposición de grupos de cinco trazas adyacentes entre sí.....	399
Figura 7.42. Esquema del proceso seguido en un estudio con georradar, desde la planificación de la campaña hasta la obtención de resultados tras interpretar los registros.....	408
Figura 8.1. Trazas características representativas de un registro obtenido con una antena monoestática con dipolos emisor y receptor (a) y con una antena monoestática de conmutación (b), situadas frente a una superficie reflectora e inmersas en el medio en el que se produce la emisión y propagación de la onda.....	414
Figura 8.2. Esquema del ensayo estático realizado. La antena se mantiene fija frente a un reflector plano metálico, emitiendo una onda y recibiendo la señal que se refleja.....	416
Figura 8.3. Trazas de rango 5 ns obtenidas con la antena de 1 GHz situada frente a una placa metálica a una distancia de 0 cm (a), 20 cm (b), 40 cm (c), 60 cm (d) y 80 cm (e). A los 0 ns está la señal de inicio de registro. El siguiente evento corresponde con el ruido interno de la antena. La reflexión aparece en las trazas (b), (c) y (d). Se indica su tiempo de arribo con una flecha. En la traza (a) la reflexión se ha superpuesto al ruido interno, lo que impide determinar el instante de arribo de la señal. En la traza (e) no se ha registrado..	421
Figura 8.4. Registro de 5 ns obtenido mediante un ensayo dinámico con la antena de 1 GHz, superpuesto a la recta que de tiempos de llegada esperados para la reflexión. Cada 20 cm se ha introducido una marca de distancia durante la toma de datos. Las demás marcas se han dibujado interpolando las distancias.....	422
Figura 8.5. Registros estáticos de 10 ns obtenidos con la antena de 900 MHz. Se presenta una traza representativa de cada distancia. Sobre las trazas se han identificado las reflexiones. A partir de una separación antena-placa de 50 cm es difícil identificar el instante de arribo de la onda reflejada debido a la interferencia que se produce con la onda directa.....	424
Figura 8.6. Esquema de una traza donde se indican los tiempos medidos y la diferencia con el tiempo doble de propagación real que determina la distancia entre el cero de la antena y el inicio de la onda directa.....	426

Figura 8.7. Esquema de la obtención de una traza como la de la figura 8.5. Se indican las trayectorias de las ondas y los tiempos T1 y T2 que tarda la onda en recorrer estos tramos. El tiempo medido para la reflexión considerando el cero situado en el punto de arribo de la onda directa se ha indicado con una línea discontinua externa a la trayectoria de la onda reflejada. Las dimensiones para la antena de 900 MHz están tomadas de Duke (1990).....	427
Figura 8.8. Traza de 10 ns obtenida para una distancia de 80 cm entre la antena y la placa. a) Traza original. b) Traza amplificada en la sección de interés, marcada con un recuadro, para poder distinguir con mayor claridad la onda reflejada. Los elementos que aparecen en esta figura son: (A) Señal de inicio de registro. (B) Onda directa (que no ha sido amplificada en la traza (b)). (C) Onda reflejada sin amplificar. (D) Onda reflejada amplificada.....	428
Figura 8.9. Diferencia entre tiempos observados en el radargrama y tiempos calculados (conocidas distancia y velocidad), Δt . Las barras de error en cada punto corresponden con el error instrumental.....	430
Figura 8.10. Radargramas con rango 100 ns obtenidos para diferentes distancias antena-placa. Se puede ver la señal de inicio de registro a -7 ns como una línea más oscura. Posteriormente se aprecia la onda directa seguida de la reflexión en la placa metálica. El registro obtenido con la antena sobre la superficie metálica (0 cm) no permite separar la reflexión de la onda directa.....	431
Figura 8.11. Traza registrada con la antena de 500 MHz sobre la que se indica la posición del cero de la antena y los tiempos medidos para calcularla.....	432
Figura 8.12. Trazas representativas de las obtenidas en este ensayo para cada una de las distancias. La línea continua indica la posición del cero de tiempos de la antena. Las flechas señalan el instante de arribo de las reflexiones en la placa metálica.....	433
Figura 8.13. Radargramas de rango $R=100$ ns. La separación entre la antena y la placa se indica en la parte superior de cada registro. Las flechas indican la posición de la reflexión.....	434
Figura 8.14. Radargramas de rango $R=50$ ns. La separación entre la antena y la placa se indica en la parte superior de cada registro. Las flechas indican la posición de la reflexión.....	435
Figura 8.15. Resultados indicados sobre una traza de $R=100$ ns obtenida con una separación entre la antena y la placa de 2 m. Se indica el cero de tiempos para esta antena y su posición respecto al inicio de la onda directa.	437
Figura 8.16. Traza obtenida emitiendo al aire con la antena de 1 GHz. El rango es de 5 ns. Puede verse la señal interna de la antena como un evento inicial cuya longitud es de 1.6 ns.....	441
Figura 8.17. Radargrama de $R=5$ ns obtenido con la antena de 1 GHz en movimiento, acercándola hacia una placa metálica desde una distancia de 1 m. Se observa la longitud de la señal inicial, el tiempo para que se empiece a producir un acoplamiento importante y las deformaciones de la señal, posiblemente por efectos de campo cercano producidos por la placa metálica...	443
Figura 8.18. Traza de longitud 5.5 ns obtenida con la antena de 900 MHz. La longitud de la onda directa se indica sobre el registro.....	445

Figura 8.19. Registro obtenido para diferentes distancias entre la antena y la placa. Desde 100 cm hasta 40 cm se distinguen separadas las ondas directa y reflejada. Entre los 40 y los 30 cm, aunque las ondas se observan separadas, han sufrido alguna pequeña modificación, lo que hace suponer que ya se ha producido acoplamiento de señales. Para distancias menores a los 30 cm este acoplamiento es evidente. Las flechas señalan las ondas reflejadas.....	446
Figura 8.20. Diferentes posiciones de la antena para que en los registros no haya una zona de "incertidumbre". a) Situación de la antena utilizando una plancha de nylon. b) Situación de la antena en el aire sin material de sustentación. c) Zona de "incertidumbre" en el medio situando la antena sobre su superficie.....	447
Figura 8.21. Traza y radargrama obtenidos con la antena de 500 MHz para determinar los efectos internos de la antena. La onda directa tiene una longitud total de 14.96 ns. Los periodos del pulso de mayor amplitud tienen una duración de 9.45 ns.....	449
Figura 8.22. Traza con el ruido interno (principalmente la onda directa) de la antena de 200 MHz. La longitud de la onda directa es de 9.5 ns, quedando su inicio situado a 3 ns de inicio de registro.....	450
Figura 8.23. Valores experimentales de la atenuación en aire y ajuste suponiendo solamente atenuación por expansión geométrica. Antena de 900 MHz.....	456
Figura 8.24. Valores experimentales de la atenuación en aire y ajuste suponiendo solamente atenuación por expansión geométrica. Antena de 500 MHz.....	457
Figura 8.25. Resultado de ajustar los puntos experimentales mediante la ecuación 8.5.....	459
Figura 8.26. Registros obtenidos con la antena de 200 MHz con un rango de 50 ns. Se trata de una de las series utilizada para analizar el comportamiento de la amplitud. Al pie de cada traza se indica la distancia entre antena y placa. La línea horizontal junto a cada traza indica la posición de la onda reflejada.....	460
Figura 8.27. Valores experimentales y ajuste obtenido mediante la ecuación 8.4 para los registros de $R=100$ ns.....	462
Figura 8.28. Valores experimentales y ajuste obtenido mediante la ecuación 8.4 para los registros de $R=50$ ns.....	462
Figura 9.1. Esquema del dispositivo utilizado para los ensayos con agua.....	469
Figura 9.2. Fotografía de la cubeta con agua, preparada para una de las medidas. Las placas metálicas que cubren el fondo son visibles bajo el agua....	475
Figura 9.3. Registros obtenidos con la antena 3101 (900 MHz) en agua. La reflexión en el metal situado en el fondo de la cubeta es visible y se indica sobre la figura con un guión blanco. Rangos y espesores: a) $R=10$ ns, $h=10$ cm. b) $R=20$ ns, $h=20$ cm. c) $R=40$ ns, $h=30$ cm. d) $R=40$ ns, $h=40$ cm.....	477
Figura 9.4. a) Espectro de frecuencias correspondiente a una traza al aire. b) Traza obtenida con la antena de 900 MHz (3101) en el aire con un rango de registro de 10 ns.....	478
Figura 9.5. Espectros de frecuencia obtenidos con la antena 3101 (900 MHz) para la reflexión en la base de la cubeta. a) 10 cm de agua. b) 20 cm de agua. c) 30 cm de agua. d) 40 cm de agua.....	480
Figura 9.6. Dependencia de la velocidad de propagación de la onda en el medio con la frecuencia, comparada con la velocidad calculada con la expresión simplificada 4.4.....	481

Figura 9.7. Diferencia entre las velocidades calculadas teniendo en cuenta la dependencia con la frecuencia y sin considerar esta dependencia.....	482
Figura 9.8. Registros obtenidos con la antena 3100 (1 GHz) para profundidades de agua de: a) 10 cm, b) 20 cm y c) 30 cm. El evento debido a la reflexión en la base de la cubeta está señalado con una línea blanca.....	485
Figura 9.9. Espectro de frecuencias para el aire centrado en los 1000 MHz. Antena de 1 GHz. a) Traza. b) Espectro.....	486
Figura 9.10. Espectros de frecuencias obtenidos con la antena 3100 con agua.	487
Figura 10.1. Espectros obtenidos en los ensayos de difracción de rayos X sobre dos muestras del suelo de cultivo utilizado. Puede observarse la mayor presencia de óxido de silicio (cuarzo) y de carbonato cálcico (calcita).....	495
Figura 10.2. Gráfica con los resultados de los ensayos de sedimentación y de granulometría.....	503
Figura 10.3. Realización de catas tras las medidas con las antenas para obtener la humedad y la compactación del suelo. a) Cilindro metálico para la adquisición de las muestras. b) Para tomar la muestra el cilindro se clava en el suelo. c) Cilindro con la muestra en su interior preparado para ser extraído. d) La extracción de la muestra debe realizarse con cuidado, quitando el material alrededor del cilindro y enrasándolo.....	507
Figura 10.4. Colocación del suelo en la cubeta (a) y compactación de una de las capas mediante impactos (b).....	512
Figura 10.5. Tres ejemplos de los espesores de suelo colocados en la cubeta para realizar las medidas de velocidad.....	512
Figura 10.6. Medidas para obtener la resistividad del material utilizado. a) Dispositivo y aparato de medida (Terrameter). b) Detalle del dispositivo Wenner empleado, con una separación entre electrodos de 4.5 cm.....	513
Figura 10.7. Cubeta tapada con plásticos para evitar la evaporación del agua de las capas más superficiales, durante un descanso en el proceso de adquisición de datos.....	514
Figura 10.8. Espectros de frecuencia obtenidos para los diferentes espesores de suelos. Antena de 900 MHz (3101). Junto a espectro se muestra un segmento del radargrama. a) 10 cm. b) 19 cm. c) 30 cm. d) 36 cm.....	518
Figura 10.9. Espectros de amplitud obtenidos para diferentes espesores de suelos. Antena de 1 GHz (3100). Junto a cada espectro hay un segmento del radargrama correspondiente. a) 10 cm. b) 19 cm. c) 30 cm. d) 36 cm.....	519
Figura 10.10. Reflexión en la placa metálica del fondo de la cubeta. a) En bandas de colores asociadas a las amplitudes según la relación especificada en la figura 7.4.b. b) En amplitud. Junto a la onda registrada puede verse el gráfico de ganancias aplicadas durante esta adquisición de datos.....	522
Figura 10.11. Registros obtenidos con la antena de 900 MHz con una ganancia constante en todo el rango de 30 dB. El rango del registro es de 10 ns. Las flechas indican aproximadamente el arribo de la reflexión.....	522
Figura 10.12. Atenuación debida a los efectos del medio material. El coeficiente de atenuación que se obtiene tiene un bajo valor, esperado por estar trabajando en un medio altamente poroso y con un bajo contenido de agua.....	526
Figura 10.13. Espectros de frecuencias para la antena de 900 MHz junto con un segmento correspondiente al registro ($R=10$ ns). Espesor del material: a) $h=14$ cm. b) $h=20.5$ cm. c) $h=28$ cm. d) $h=33$ cm. e) $h=37$ cm.....	530

Figura 10.14. Espectros de amplitud de los diferentes registros obtenidos con la antena 1 GHz. Al lado de cada espectro se muestra un segmento del radargrama donde la flecha indica el arribo de la reflexión. Espesor de suelo: a) h=14 cm. b) h=20.5 cm. c) h=28 cm. d) h=33 cm. e) h=37 cm.....	532
Figura 10.15. Resultados obtenidos con la antena de 900 MHz utilizando un rango de 10 ns y una ganancia de 15 dB, constante para todo el rango.....	535
Figura 10.16. Radargramas obtenidos con la antena 1 GHz. Rango de 10 ns. Ganancia lineal con inicio en 11 dB y final en 65 dB.....	535
Figura 10.17. Ajuste para obtener la atenuación para medios materiales. a) Antena de 900 MHz (3101 de GSSI). b) Antena de 1 GHz (3100 de GSSI). Los resultados de los dos ajustes se muestran en la tabla 10.14.....	537
Figura 10.18. Espectros de frecuencia de registros de la antena de 900 MHz. Espesor de la muestra de suelo: a) 10 cm. b) 20 cm. c) 30 cm. d) 37 cm.....	540
Figura 10.19. Espectros de amplitud de registros de la antena de 1 GHz. Espesor de suelo: a) 10 cm. b) 20 cm. c) 30 cm. d) 37 cm.	542
Figura 10.20. Ejemplo de cuatro registros obtenidos con la antena de 900 MHz, cada uno de ellos con un espesor de suelo diferente.....	544
Figura 10.21. Ejemplo de cuatro registros obtenidos con la antena de 1 GHz, cada uno de ellos con un espesor de suelo diferente.....	545
Figura 10.22. Ajuste para obtener la atenuación para medios materiales. a) Antena de 900 MHz. b) Antena de 1 GHz. Los resultados de los dos ajustes se muestran en la tabla 10.18.....	547
Figura 10.23. Frecuencia central en función del espesor de la muestra para cada uno de los casos analizados. La conductividad del caso 1 es la menor, mientras que la mayor es la del caso 3. Se observa un mayor desplazamiento hacia las bajas frecuencias al aumentar la conductividad.....	554
Figura 10.24. Ancho de banda para cada espesor de la muestra, considerando cada uno de los casos analizados y cada antena. Se observa una tendencia en todos los casos hacia un mayor estrechamiento cuando mayor es el espesor de la muestra. Esta tendencia es más acusada cuando más conductor es el medio.....	555
Figura 11.1. Proceso seguido para la obtención de velocidades a partir de tablas y conversión de tiempos en distancias. a) Información sobre los materiales existentes en la zona utilizando los datos que proporcionan unos sondeos. b) Registro en el que se observan distintas anomalías y los tiempos dobles de propagación registrados. c) Permitividades asociadas a cada uno de los materiales identificados y velocidades calculadas utilizando estos valores y la ecuación 4.4. Escala de profundidades obtenida. d) Interpretación final tras convertir los tiempos dobles de propagación en distancias.....	567
Figura 11.2. Resultado obtenido con el modelo CRIM para un suelo formado por una matriz sólida (75% de limo y 25% de arena), agua y aire. Las curvas de la gráfica se definen para un mismo valor de ρ_r que se indica sobre cada una de ellas. La permitividad resultante queda en función de la porosidad y de la saturación del suelo.....	571
Figura 11.3. Obtención de la permitividad dieléctrica efectiva a partir de medidas realizadas en la gradas del teatro romano de Sagunto. i) Fotografía donde se ven los cambios de materiales en profundidad. ii) Esquema del perfil realizado sobre las gradas. iii) Registro obtenido en las gradas que se ven en la fotografía. Se incluyen los tiempos dobles de propagación. iv) Interpretación final a partir de la información proporcionada.....	576

Figura 11.4. Adquisición de datos para determinar la velocidad de propagación en grasa industrial.....	577
Figura 11.5. Registro obtenido con la antena 3101 (900 MHz) para determinar la velocidad de propagación en aceite.....	578
Figura 11.6. Adquisición de datos para determinar la velocidad de propagación en un muro de ladrillo.....	579
Figura 11.7. Registro obtenido para analizar la velocidad de propagación en un muro de ladrillo.....	579
Figura 10.8. Adquisición de datos con la antena de 1 GHz (3100 de GSSI) para la obtención de la permitividad relativa de un muro de ladrillos. a) Reflexión contra una plancha metálica a 0.6 m de la antena. b) Reflexión contra el muro situado a 0.6 m.....	583
Figura 11.9. Registros de amplitud obtenidos para estimar la permitividad relativa de un muro de ladrillo. a) Registros de reflexión en la placa metálica (traza superior) y en el muro de ladrillo (traza inferior). b) Registro obtenido al aire para poder eliminar de los radargramas anteriores el ruido interno de la antena. c) Registro resultante para la reflexión en el metal. d) Registro resultante para la reflexión en la superficie del muro de ladrillo.....	584
Figura 11.10. Registros obtenidos para determinar la permitividad del agua de uso doméstico a partir de comparación de amplitudes. a) Reflexión en una placa metálica situada a 80 cm de distancia de la antena de 900 MHz. b) Reflexión en la superficie del agua, situada a 80 cm de distancia de la misma antena.....	585
Figura 11.11. Registros obtenidos manteniendo la antena 3101 (900 MHz) sobre la superficie de una cubeta de agua en cuya base hay una plancha de nylon de 9.5 cm de grosor, sobre una placa metálica.....	586
Figura 11.12. Registros obtenidos con la antena 3101 (900 MHz) para la reflexión en: a) superficie de un suelo arcilloso húmedo; b) superficie metálica. Rango del registro: 30 ns. Ganancia constante para todo el rango de 12 dB.....	587
Figura 11.13. Trazas para la reflexión en la superficie del suelo (a) y para la reflexión en la superficie metálica (b). La separación entre estas superficies y la antena es de 1 m. El rango del registro son 30 ns.....	588
Figura 11.14. Esquema que muestra el efecto de un reflector de dimensiones finitas. La antena, por sus características de emisión detecta el elemento antes de quedar situada sobre su vertical, produciendo un registro hiperbólico.....	589
Figura 11.15. Registro obtenido en el muro de ladrillo con la barra metálica situada en la superficie posterior. Pueden verse las hipérbolas debidas a la reflexión en la barra (A) y a la reflexión en el borde del muro (B).....	591
Figura 11.16. Regresión por mínimos cuadrados realizada con los datos de la hipérbola generada en la barra metálica.....	592
Figura 11.17. Regresión realizada con los datos de los puntos de la hipérbola causada por la reflexión producida en el contorno del muro.....	593
Figura 11.18. Resultados del análisis de la hipérbola observada en la figura 7.22. a) Distancias horizontales frente a tiempos dobles de propagación. Puede verse la forma hiperbólica. b) Regresión realizada con estos mismos datos, según la ecuación 11.15.....	594

Figura 11.19. Registro que muestra la presencia de una tumba en el subsuelo, bajo el pavimento de la catedral de Valencia (a). El rango del registro es de 100 ns. La conversión de tiempos dobles de propagación a profundidades se ha realizado mediante la regresión (b), obteniendo una velocidad de 7.2 cm y un $T_0 = 32.6$. El coeficiente de correlación es de 0.96.....	595
Figura 12.1. Fotografía del estado del teatro en los años 50 (Lara, 1991).....	607
Figura 12.2. Dibujos que nos muestran el aspecto del teatro antes de las reformas llevadas a cabo durante el siglo XX.....	608
Figura 12.3. Detalle del teatro romano de Sagunto. Puede observarse la zona de la gradas de la <i>ima cavea</i> (a) y de la <i>prima sedes</i> (b), de altura algo menor, con el recubrimiento de caliza en parte de ellas, parte de la <i>orchestra</i> (c), el <i>proscænium</i> (d) (con piso de madera actualmente), parte del edificio escénico (e) y, al fondo del actual escenario, las escaleras de una de las valvas (f) (<i>valvae hospitalia</i>).....	611
Figura 12.4. Detalles de las gradas de la figura anterior. a) Gradas de la <i>prima sedes</i> antes de realizar las obras. b) Gradas de la <i>media cavea</i> tras las obras. Se observa el contacto entre la obra actual y la roca tallada en forma de graderío. c) Gradas de la <i>ima cavea</i> . Puede verse el contacto entre el recrecido moderno (parte más superficial formada por piedras de tamaño irregular no cementadas) y los sillares anteriores. La losa de caliza de Teruel de unos 5 cm de espesor culmina las nuevas gradas, sobre el recrecido de las originales.....	612
Figura 12.5. Plano del teatro romano. Se indican los distintos sectores estudiados.....	614
Figura 12.6. Perfil n. 38 realizado en el interior del <i>postcaenium</i> en uno de los muros. La longitud de este perfil es de 80 centímetros y se pueden apreciar las marcas cada 20 centímetros sobre el muro. El perfil cruza contacto entre el hormigón utilizado en la intervención de 1990-93 (c), una piedra de un color ligeramente azulado (b) y la roca más antigua(a).....	615
Figura 12.7. Detalle de tres zonas donde se realizaron perfiles de calibración en las gradas. a) Las medidas de espesor se realizaron utilizando una cinta métrica. b) Zona de la <i>media cavea</i> . Las gradas talladas se diferencian del recrecido posterior. c) Gradas de la <i>ima cavea</i> . El recrecido está colocado sobre sillares soportados por materiales cementados.....	618
Figura 12.8. Esquema de la situación de los perfiles de calibración P100 y P200 realizados en la <i>Ima Cavea</i> (figura 12.7.c). Los espesores medidos permiten obtener velocidades de propagación a partir de los tiempos dobles de propagación de las distintas reflexiones.....	619
Figura 12.9. Registro obtenido en el perfil P100 (i) e interpretación realizada teniendo en cuenta los datos disponibles (materiales y espesor de los mismos) en esta zona (ii). Las diferentes zonas son: a y b) superposición de la onda directa con la primera reflexión en la superficie del medio. c) Contacto entre los elementos romanos y la reconstrucción de 1990-93. d) Contacto entre los sillares y la roca del macizo. e) Efecto lateral debido a una barandilla metálica...	621
Figura 12.10. Registro obtenido en el perfil P200 (i) interpretación realizada a partir de los datos conocidos (ii). Los eventos que se observan en el radargrama pueden estar asociados con: a y b) Superposición de la onda directa con la primera reflexión. c) Reflexiones en distintas capas de materiales de la reconstrucción de 1990-93. d1 y d2) Contacto entre distintas épocas constructivas. e) Contacto entre los sillares romanos y la roca del macizo. f) Efecto de contorno lateral.....	622
Figura 12.11. Fotografías de muros en los que se realizaron los perfiles de calibración (i, ii-perfil P50-, iii) y esquema de una sección de los muros (iv).....	626

Figura 12.12. Radargrama de calibración obtenido en el perfil de la figura 12.11(i) e interpretación (ii). Cada uno de los eventos observados está asociado con: a) Reflexión en la superficie (acoplada con la onda directa). b) Reflexión en el contacto entre las piedras de la mampostería y el mortero. c) Reflexión en elementos de refuerzo (posiblemente metálicos). d) Reflexión en discontinuidades o en anomalías del hormigón. e) Reflexiones ocasionadas en el contacto entre la parte posterior del muro y el aire. f) Reflexiones ocasionadas en irregularidades del mortero romano.....	627
Figura 12.13. Registro obtenido en las gradas del teatro. Puede observarse el menor espesor del recrecido en la zona izquierda del radargrama.....	630
Figura 12.14. Registro de rango 35 ns obtenido en las gradas (i). Interpretación realizada a partir de los resultados de los perfiles de calibración (ii). Los principales eventos observados son: a y b) registros de inicio: superposición de onda directa con las primeras reflexiones, c) reflexiones producidas en posibles refuerzos metálicos, d) reflexión en el contacto entre el recrecido y las gradas romanas y e) reflexión entre el contacto de los restos romanos con la roca del macizo.....	631
Figura 12.15. Registro obtenido en los perfiles de la <i>ima cavea</i> (i) junto con la interpretación realizada a partir de los parámetros obtenidos durante la calibración (ii).....	632
Figura 12.16. Registro obtenido en la <i>orchestra</i> cerca de las gradas, en el que puede haberse detectado la presencia de una grada oculta bajo los materiales de relleno (a). La anomalía (b) puede asociarse con el contacto entre los materiales de relleno y la roca.....	635
Figura 12.17. Registro obtenido sobre el escenario. Se observan las reflexiones producidas en los soportes metálicos de la tarima (a), las reflexiones en lo que sería la zona aérea, el contacto entre el aire y los materiales de relleno (c), los eventos que pueden estar asociados con restos de muros romanos (b) y la entrada de la señal en el macizo calcáreo (d).....	637
Figura 12.19. Radargrama obtenido en uno de los muros del teatro. Se observan cambios laterales que ponen de manifiesto dos zonas diferenciadas que se han denominado (1) y (2) y que se corresponden con la intervención y con los restos romanos, respectivamente. El evento denominado (3) se asocia con la reflexión en la superficie posterior del muro.....	638
Figura 12.20. Registro de 31 ns obtenido en un muro de 80 cm de espesor. El evento marcado como (1) se asocia con un refuerzo metálico. El evento marcado como (2) se asocia con la superficie posterior del muro.....	639
Figura 12.21. Segmento de un plano de la ciudad de Valencia que incluye los tres puentes estudiados (marcados en color gris). En negro se ha marcado la zona de la que se dispone de datos de sondeos mecánicos.....	641
Figura 12.22. Información estratigráfica de la zona entre los puentes de San José y de Serranos.....	642
Figura 12.23. Fotografía del puente de serranos y esquema de los perfiles realizados, las distancias y la situación del canal. El perfil interior tiene una longitud de 14 m y el exterior de 23 m.....	643
Figura 12.24. Registro obtenido con la antena de 500 MHz en el perfil exterior del puente de San José, junto con un esquema interpretativo, siendo P1 y P2 los dos pilares del puente, m1 los materiales de relleno y m2 las gravas. Las anomalías observadas son: (1) reflexión en la superficie; (2,3,4 y 5) anomalías superficiales asociadas con las zapatas; (6) posible reflexión en el contacto entre materiales de relleno y gravas.....	644

Figura 12.25. Registro obtenido en el perfil exterior del puente de San José con la antena 3107 de GSSI, junto con un esquema interpretativo. Las zonas marcadas como A y B pueden ser las relacionadas con la situación de las zapatas. Los materiales asociados a cada zona son: (m1) rellenos, (m2) rellenos bajo el freático, (m3) gravas y (m4) limos arcillosos. Las anomalías más representativas se asocian con: (1) la superficie; (2 y 3) elementos superficiales relacionados con las zapatas; (4 y 5) nivel freático; (6) tubería; (7) contacto entre materiales de relleno y gravas; (8) contacto entre gravas y limos.....	645
Figura 12.26. Esquema del puente de Trinidad, los perfiles trazados, la situación del canal del río Turia, la carretera (1) y una tubería (2).....	646
Figura 12.27. Dos registros obtenidos durante el estudio del puente de Trinidad. Las anomalías más características son: (A) efecto de las zonas conflictivas donde pueden estar las zapatas y efectos de la carretera, (B) reflexión externa en la arcada del puente y (C) otras reflexiones externas.....	647
Figura 12.28. Fotografías del puente de Serranos durante los trabajos de adquisición de datos. Pueden verse las dos antenas utilizadas para el estudio...	648
Figura 12.29. Registro obtenido en el perfil interno del puente de Serranos con la antena 3207 de GSSI. Se observa: (1) los efectos de la superficie, (2) zonas problemáticas, (3) posible nivel freático, (4) reflexión externa en la arcada del puente, (5) otras reflexiones externas y reflexiones múltiples.....	649
Figura 13.1. a) Fotografía de la fachada sur de la iglesia de San Jorge, en la que se encuentra la entrada principal al templo. b) Fotografía del interior de la iglesia.....	657
Figura 13.2. Plano de la iglesia de San Jorge y situación de los perfiles. Las flechas contra los muros (perfiles P7, P8, P9, P10 y P11) indican perfiles verticales sobre la superficie del muro. Los demás perfiles se realizan sobre el suelo.....	658
Figura 13.3. Mosaico de fotografías que ilustra los estilos presentes en la Catedral de Valencia.....	660
Figura 13.4. Maquetas realizadas con motivo de la exposición de cartografía de la Catedral de Valencia para ilustrar las tres principales épocas constructivas medievales (Gavara, 1997). a) Primera etapa constructiva de la Catedral, antiguo templo románico. b) Segunda etapa constructiva. c) Tercera etapa constructiva.....	661
Figura 13.5. Plano de la Catedral de Valencia en la que se distinguen las zonas principales estudiadas y los perfiles trazados. (1) Nave principal. (2) Naves laterales. (3) Deambulatorio. (4) Transepto. (5) Altar.....	662
Figura 13.6. Efectos visibles de la humedad en los muros de la iglesia de San Jorge. Se indican con flechas las zonas más dañadas. a) Desprendimiento de losas decorativas de mármol en el interior del templo. b) Manchas de humedad y desprendimiento del yeso que recubre el interior de los muros. c) Eflorescencias y desprendimiento de la cal que recubre el exterior de los muros.....	664
Figura 13.7. Registro obtenido en el muro Este de la iglesia de San Jorge, en el perfil P8.....	665
Figura 13.8. Corte esquemático de los muros de la iglesia de San Jorge. El encofrado de materiales regulares y con buena cohesión se rellena de unos materiales irregulares de poca cohesión, en algunas ocasiones, cementados con barro u otro tipo de mortero.....	666

Figura 13.9. Cuatro segmentos de registros adquiridos en el muro Este de la iglesia. Los denominados P7, P8 y P9 tienen un rango de 21.5 ns y se han adquirido en una zona donde el espesor del muro es de 65 cm. El llamado P10 es de 30 ns y se ha adquirido en una zona donde el muro tiene un grosor de 110 cm.....	668
Figura 13.10. Cambio en la saturación de un medio para diferente porosidad cuando las permitividades efectivas calculadas en las dos zonas han sido de 6 y de 9.5.....	670
Figura 13.11. Variación de la saturación en una zona en función de otra, conocidos los valores de la permitividad efectiva en ambas ($\epsilon_-=6$ y $\epsilon_+=9.5$) y la permitividad de la matriz ($\epsilon_m=5$), para diferentes valores de la porosidad.....	671
Figura 13.12. Segmento de un registro obtenido en el perfil P13. La separación entre las líneas verticales es de 1 m. La longitud total del registro son 10 m.....	672
Figura 13.13. Registro obtenido en el perfil P6, en la zona Sur de la iglesia. El rango de este segmento es de 100 ns. La separación entre líneas verticales es de 1 m. Los efectos observados a tiempos mayores son ruido electrónico amplificado por la ganancia utilizada.....	673
Figura 13.14. Registro obtenido en el perfil P14 (figura 13.2), cruzando el perfil P13. La situación de las anomalías producidas en la reflexión de la humedad en la canalización cegada puede distinguirse en la zona central del registro.....	674
Figura 13.15. Plano de un proyecto de desecación de la Catedral del año 1925 (Gavara, 1997).....	677
Figura 13.16. Pavimento de mármol de la Catedral de Valencia. Puede verse una zona con eflorescencias. Perfil realizado con la antena 3101 de GSSI.....	679
Figura 13.17. Radargramas obtenidos los perfiles para analizar la humedad del suelo de la Catedral de Valencia. a) Registro obtenido en una zona en la que se observan eflorescencias. b) Registro obtenido en una zona seca.....	681
Figura 13.18. Esquema que muestra la interpretación de los radargramas de la figura 13.17. La relación entre velocidades en la zona A es: $v_A/v_{aA}=1.43$, y en la zona B: $v_B/v_{aB}=1.37$. La relación entre permitividades es: $\epsilon_A/\epsilon_a=2.04$ en la zona A, y $\epsilon_B/\epsilon_b=1.88$ en la zona B.....	682
Figura 14.1. Fachadas Norte y Este de la iglesia de San Jorge. En la zona Norte (fachada principal y torre) existen los mayores problemas de fisuras.....	689
Figura 14.2. Fotografía de las grietas y despegues que afectan a la iglesia de San Jorge. a) Escalera de acceso a la torre. b) Muro Norte. c) Grietas próximas a la bóveda en el muro Norte.....	690
Figura 14.3. Fotografía del interior de la torre de la iglesia de San Jorge. En la parte superior se observa el desprendimiento del rebozo de yeso, zonas reparadas con cemento y fisuras, incluso en estas zonas reparadas.....	691
Figura 14.4. Registro obtenido en el perfil P12 e interpretación del mismo. Las reflexiones en las dos superficies del muro (C y E) permiten calcular la velocidad media de propagación en cada sector. A: Anomalías de pequeño tamaño asociadas a oquedades y fisuras. B y D: Reflexión continua asociada a un cambio de materiales en el interior del muro.....	692
Figura 14.5. Registro obtenido en el perfil P11 e interpretación. A: anomalías localizadas en la zona más dañada del muro. Son reflexiones intensas asociadas a daños internos. B: Otras anomalías de pequeño tamaño, también asociadas con fisuras y oquedades internas. C: Reflexiones que pueden corresponder con cambios de materiales.....	693

Figura 14.6. Registros obtenidos en el perfil P1 (a) y en el perfil P2 (b) para determinar la posible existencia de zonas anómalas que pueden provocar las lesiones del muro Norte y de la torre de la iglesia. La separación entre líneas verticales es de 1 m sobre la superficie.....	695
Figura 15.1. Fotografías que muestran las excavaciones y el panel explicativo que detalla las diferentes épocas constructivas encontradas: romano-república, romano-imperial, visigótico, islámico y bajo medieval. Se identifican las zonas del panel con las de las fotografías mediante letras minúsculas.....	704
Figura 15.2. Plano antiguo en el que aparecen la planta y el alzado de la cripta de los Canónigos (Gavara, 1996).....	705
Figura 15.3. Registros obtenidos en los perfiles P1 y P5 (figura 13.5). (1) Posible muro. (2) Posibles pudrideros o enterramientos. (3) Posibles tumbas. (4 y 7) Anomalías asociadas con una cripta (Canónigos). (5) Tres tumbas conocidas. (6) Posibles pudrideros. (8) y (9) Posibles reflexiones asociadas con otra de las criptas de la Catedral.....	706
Figura 15.4. Espectro de frecuencias con el máximo centrado entre los 320 MHz y los 380 MHz, la traza que se corresponde con este espectro y el segmento del registro P1 del que se ha extraído la traza.....	708
Figura 15.5. Segmento de 31 m y 55 ns del registro obtenido en el perfil P4. (1) anomalía asociada a uno de los pudrideros de la Catedral. (2), (3), (4) zonas anómalas relacionadas con posibles restos debajo el edificio. (5) Tumba.....	709
Figura 15.6. Segmento del perfil P5 (figura 15.3) con la anomalía producida por la reflexión de la señal ocasionada por la presencia de tres sepulcros. Se indica también la posición de las lápidas y de la dirección de deslizamiento de la antena.....	710
Figura 15.7. Segmentos de dos radargramas obtenidos en las naves laterales de la Catedral en los que se ha registrado un posible sepulcro. La separación entre líneas verticales es de 1 m.....	712
Figura 15.8. Segmentos de cinco radargramas obtenidos a lo largo de las naves laterales (P6, P7, P8 y P9) y de la nave principal (P1). Los perfiles son paralelos entre sí. La separación entre líneas verticales es de 1 m. La parte derecha de los registros corresponde con el inicio de los perfiles que coincide con el muro principal actual de la iglesia. Los recuadros sobre cada radargrama indican la posición de la anomalía analizada.....	714
Figura 15.9. a) Segmento de 45 ns de rango y de 36 m de longitud del perfil denominado P2, realizado en la zona que, en la época medieval, correspondía con el exterior anexo a la Catedral. b) Ampliación de una zona de especial interés, entre los 11 m y los 31 m. Las anomalías más interesantes son las marcadas con (1), posiblemente asociadas con restos de muros.....	715
Figura 15.10. Radargramas obtenidos en el perfil P1 en la iglesia de San Jorge, utilizando dos antenas diferentes. Las dos últimas imágenes son dos detalles de la zona anómala de mayor importancia, ampliados a partir de los dos radargramas mostrados.....	718
Figura 15.11. Esquema de los dos radargramas de la figura 15.10, donde se indican las zonas más significativas.....	719
Figura 15.12. Registro obtenido con la antena 3102 (de 500 MHz) en el perfil P2 (iglesia de San Jorge).....	720
Figura 15.13. Espectros de frecuencia de tres de las trazas que forman parte del radargrama de la figura 15.12. En el registro se indica la traza que corresponde con cada uno de los espectros.....	721

Figura 15.14. Fotografía de uno de los muros exteriores (en ruinas) del antiguo convento. Los sedimentos recientes que se han ido depositando alcanzan casi la ventana de la primera planta, a la derecha de la imagen.....	724
Figura 15.15. Fotografía aérea de los terrenos que pertenecieron a la antigua fortaleza de Alcántara (castro romano). Los perfiles trazados para su estudio aparecen dibujados sobre la fotografía.....	725
Figura 15.16. Plano de los restos actuales del convento: claustro e iglesia (actualmente ermita). Sobre el mapa se indican los perfiles trazados para el estudio con radar de subsuelo (Pa, Pb y Pc). La zona (1) es una excavación arqueológica actual en el interior de la iglesia.....	726
Figura 15.17. Uno de los registros obtenidos con la antena de 500 MHz en el perfil P1. El rango es de 40 ns y la longitud de 50 m. Destacan dos zonas anómalas en la primera mitad del registro, una de ellas puede corresponder con la situación del aljibe. Cada línea vertical representa un metro de distancia horizontal.....	727
Figura 15.18. Fotografía de la zona del perfil P1. Preparación de los trabajos de adquisición de datos en la zona. Al fondo puede verse la ermita y las ruinas del claustro.....	728
Figura 15.19. Radargramas de la zona del perfil P2. La separación entre líneas verticales equivale a 1 m. El rango de los registros es de 40 cm. En los dos primeros (de longitud 5 m) aparecen dos zonas anómalas de cierta importancia (S1 y S2). En el tercer registro (de longitud 2 m) se observa únicamente la anomalía S1. La distancia entre los dos perfiles extremos es de 15 m.....	729
Figura 15.20. Segmentos de los radargramas de P3 (a) y P4 (b), en los se ve la reflexión en el contacto entre el relleno y la pizarra. En la zona del perfil P3 se observan afloramientos de pizarra en el sector correspondiente a las importantes anomalías superficiales (centro del radargrama). El segmento de P4 está próximo a la zona de arbolado. El rango de los dos registros es de 300 ns.....	730
Figura 15.21. Segmento de los registros obtenidos en el perfil P9 (a) y el perfil P7 (b). Cada línea vertical equivale a un metro de distancia horizontal sobre la superficie. En el P9 (a) se observa un reflector continuo a 40 ns (indicado con una flecha). En el perfil P7 (b) las cuatro zonas de mayor interés se señalan con líneas discontinuas.....	732
Figura 15.22. Detalles de la excavación arqueológica efectuada en el interior de la iglesia. Los restos de los muros están señalados con flechas.....	734
Figura 15.23. a) Adquisición de datos en el perfil Pa con la antena de 500 MHz. b) Interior de la iglesia.....	734
Figura 15.24. Registro obtenido en el perfil Pa (figura 15.16). Destaca la anomalía central a 28 ns, que puede corresponder con uno de los muros buscados.....	735
Figura 15.25. Registro obtenido en el perfil Pb (figura 15.16). Se señalan las tres zonas de mayor interés debido al número de anomalías registradas.....	736
Figura 15.26. Estado actual del claustro y situación del perfil Pc.....	737
Figura 15.27. Radargrama obtenido en el perfil Pc (figura 15.16) en el que posiblemente se ha localizado el aljibe del claustro (anomalía de la izquierda del registro), actualmente enterrado por materiales de relleno y sedimentos. Otra reflexión, a la derecha del registro, puede tratarse de otro aljibe o de una construcción relacionada con el primero. La separación entre líneas verticales corresponde con una distancia de 1 m sobre la superficie.....	737

Figura 15.28. Registro de un elemento finito que se encuentra a 15 ns de la antena cuando el medio por el que se propaga la señal es el aire (línea continua) y cuando se trata de un medio material de velocidad característica 10 cm/ns (línea discontinua). La hipérbola ocasionada en la reflexión externa tiene una mayor excentricidad que la producida en el elemento interno al medio.....	739
Figura 16.1. Error en el factor de pérdidas en función de la frecuencia. La conductividad es de 25 mS/m y la permitividad relativa de 12.....	757
Figura 16.2. Errores estimados para el factor de atenuación a cada distancia...	760
Figura 16.3. Error en la amplitud relativa (dividida por la amplitud de la onda directa) frente a la distancia recorrida por la radiación.....	762
Figura 16.4. Datos experimentales para el aire (con la antena 3101 de GSSI). La línea continua representa la regresión de estos valores, y las líneas discontinuas la banda de errores esperada para cada distancia. Los puntos son las amplitudes medidas experimentalmente.....	763
Figura 16.5. Error sistemático en la velocidad con la permitividad relativa del medio, para diferentes valores de la conductividad y una frecuencia constante de 500 MHz y una permeabilidad magnética de $\mu_r=1$	766
Figura 16.6. Diferencia porcentual entre v_A y v (ecuación 16.20). Dependencia con la permitividad relativa del medio, para diferentes valores de la conductividad. La frecuencia considerada es de 500 Mhz y la permeabilidad magnética, la unidad.....	767
Figura 16.7. Relación de la diferencia entre v_A y v con la permitividad (ecuaciones 16.18 y 16.19) para diferentes frecuencias, dada una conductividad de 6 mS/m. a) Comparación una frecuencia baja (10 MHz) y dos frecuencias medias (100 y 300 MHz). b) Comparación de tres frecuencias medias con dos altas para GPR (900 y 1000 GHz).....	769
Figura 16.8. Error relativo de la velocidad con la permitividad del medio y para diferentes valores del error cometido al calcular o estimar la permitividad.....	772
Figura 16.9. Errores en la distancia para un tiempo de propagación de 100 ns, con la permitividad del medio para diferentes errores en la estimación de dicha permitividad.....	773
Figura 16.10. Error relativo en la profundidad con la permitividad relativa del medio y su error.....	775
Figura 17.1. Registro obtenido con la antena de 100 MHz (3107 de GSSI) con un rango de 300 ns en la Catedral de Valencia. Se detectan reflexiones externas al medio para tiempos superiores a los 136 ns y reflexiones internas para tiempos menores. La separación entre líneas verticales equivale a una distancia horizontal de 1 m.....	782
Figura 17.2. Modelo esquemático de la reflexión central observada en la figura 17.1, producida en un elemento situado a 150 ns de la antena, para propagación en el aire. El origen de distancias horizontales se ha situado sobre la vertical del elemento reflector, supuesto de pequeñas dimensiones, comparado con la distancia a la antena.....	784
Figura 17.3. Segmento de un registro obtenido en un túnel. Las fuertes reflexiones observadas en la parte inferior izquierda se han ocasionado en un ventilador externo al medio. La reflexión continua a lo largo de todo el registro se ha producido en el hastial tras la antena. La distancia entre marcas verticales (parte superior del radargrama) equivale a 5 m.....	785
Figura 17.4. Esquema de la adquisición de los datos de la figura 17.3 en un túnel.....	786

Figura 17.5. Reflexiones externas modeladas considerando la posición de los elementos que han ocasionado las anomalías de la figura 17.3, respecto de la antena.....	786
Figura 17.6. Registro interpretado considerando un cambio lateral en la velocidad de propagación de la onda por el medio (capítulo 13).....	788
Figura 17.7. Tres registros obtenidos en un mismo material con diferentes condiciones de saturación y compactación. En cada uno de ellos se indica la profundidad a la que se localiza la superficie reflectora (h), el tiempo doble de propagación de la reflexión (2t) y la velocidad de propagación de la onda (v). γ_s es el peso específico del sólido, γ_n el peso específico aparente de la muestra y Sa la saturación.....	789
Figura 17.8. Zona de la discontinuidad electromagnética irradiada por la antena (huella de la antena).....	790
Figura 17.9. Esquema que muestra el diámetro del área de incidencia del lóbulo principal de la antena.....	791
Figura 17.10. Esquema que muestra la definición de la primera zona de Fresnel.....	792
Figura 17.11. Registro de 8 ns de rango en el que podemos observar dos hipérbolas. La que se encuentra centrada en el radargrama está ocasionada por una barra metálica situada tras el muro. A la derecha del registro observamos la hipérbola producida por el final del muro.....	793
Figura 17.12. Esquema del muro donde se ha obtenido el radargrama de la figura 17.11.....	793
Figura 17.13. Esquema del muro en el que se ha efectuado el ensayo donde ha podido registrarse el efecto de contorno.....	794
Figura 17.14. Registro de rango 15 ns obtenido en el muro indicado en el esquema de la figura 17.11. A la izquierda del registro se observan efectos de borde. Separación entre líneas verticales: 15 cm.	795
Figura 17.15. Esquema que determina el punto del extremo del muro que introduce efectos de contorno en el registro.....	796
Figura 17.16. Esquema explicativo para determinar el último punto del borde del muro que introduce efectos de contorno en el registro, dadas las hipótesis iniciales aplicadas.....	797
Figura 17.17. Ejemplo de registro de reflexiones múltiples obtenido durante el estudio del Teatro Romano de Sagunto. El rango son 80 ns. La separación entre líneas verticales representa un metro sobre la superficie del medio analizado.....	799
Figura 17.18. Registro obtenido en un perfil que corta transversalmente las barras cilíndricas metálicas existentes en el interior de un muro de hormigón. El rango del registro es de 4 ns. La separación entre líneas verticales en la parte superior corresponde con 20 cm de perfil.....	800
Figura 17.19. Registro obtenido en los ensayos. Medio: agua. Elementos anómalos: dos barras de acero de 17 mm de diámetro juntas, situadas en la base de la cubeta. Rango del registro: 15 ns.....	803
Figura 17.20. Registros obtenidos en el ensayos separando las barras: a) 4 cm, b) 6 cm, c) 8 cm y d) 10 cm. El rango de los radargramas es, en todos los casos, de 15 ns. Las flechas sobre los radargramas señalan el primer máximo de amplitud importante.....	804

Figura 17.21. Espectro de frecuencias de una traza del registro presentado en la figura 17.18.....	806
Figura 17.22. Registros de 15 ns obtenidos con la antena de 1 GHz (3100 de GSSI). Cada línea vertical son 10 cm sobre la pared. a) Registro del muro sin barras. b) 2 barras juntas. c) 2 barras separadas 6 cm. d) 2 barras separadas 12 cm. e) 2 barras separadas 18 cm.....	808
Figura 17.23. Registro de la antena de 900 MHz. Rango: 15 ns. Muro y dos tubos metálicos separados: a) 0 cm, b) 2 cm, c) 4 cm, d) 6 cm, e) 8 cm, f) 10 cm, g) 12 cm, h) 14 cm, i) 16 cm, j) 20 cm. La separación entre líneas verticales corresponde con 10 cm de pared.....	809
Figura 17.24. Espectro de frecuencia del registro de la figura 17.22.f, obtenido en el muro. La separación entre barras es de 10 cm. La traza utilizada es la que se corresponde con el centro de las barras.....	810

Índice de figuras de los anexos.

	Página
Figura A3.1. Esquema de los ensayos efectuados en los que se han obtenido los espectros de frecuencia que se muestran a continuación en este anexo.....	868
Figura A3.2. Registro obtenido con D=0 cm y tres espectros de frecuencia correspondientes a las tres trazas indicadas sobre el radargrama (1, 2 y 3). La longitud de registro se corresponde con 12 cm de distancia.....	869
Figura A3.3. Radargrama en el caso de D=4 cm y espectro de frecuencias obtenidos para la traza indicada sobre el registro con una línea vertical.....	870
Figura A3.4. Radargrama para D=6 cm y espectro de frecuencia para la traza indicada sobre el registro con una línea vertical.....	871
Figura A3.5. Registro cuando D=8 cm y espectros de frecuencia obtenidos para las trazas indicadas con una línea vertical sobre el radargrama (1, 2 y 3)...	872
Figura A3.6. Radargrama y espectro para el caso de D=10 cm.....	873
Figura A5.1. Factor de atenuación en función de la permitividad relativa efectiva para medios conductores, dada una frecuencia de 10 MHz.....	915
Figura A5.2. Factor de atenuación en función de la permitividad dieléctrica relativa efectiva para medios poco conductores, dada una frecuencia de 10 MHz.....	916
Figura A5.3. Factor de atenuación en función de la permitividad dieléctrica relativa efectiva para medios casi dieléctricos, dada una frecuencia de 10 MHz.	917
Figura A5.4. Factor de atenuación en función de la permitividad dieléctrica relativa efectiva para medios casi perfectamente dieléctricos, dada una frecuencia de 10 MHz.....	918
Figura A5.5. Factor de atenuación en función de la permitividad dieléctrica relativa efectiva para medios conductores, dada una frecuencia de 100 MHz.....	919

Figura A5.6. Factor de atenuación en función de la permitividad dieléctrica relativa efectiva para medios poco conductores, dada una frecuencia de 100 MHz.....	920
Figura A5.7. Factor de atenuación en función de la permitividad dieléctrica relativa efectiva para casi dieléctricos, dada una frecuencia de 100 MHz.....	921
Figura A5.8. Factor de atenuación en función de la permitividad dieléctrica relativa efectiva para medios casi perfectamente transparentes, dada una frecuencia de 100 MHz.....	922
Figura A5.9. Factor de atenuación en función de la permitividad dieléctrica relativa efectiva para medios conductores, dada una frecuencia de 200 MHz.....	923
Figura A5.10. Factor de atenuación en función de la permitividad dieléctrica relativa efectiva para medios poco conductores, dada una frecuencia de 200 MHz.....	924
Figura A5.11. Factor de atenuación en función de la permitividad dieléctrica relativa efectiva para medios casi dieléctricos, dada una frecuencia de 200 MHz.....	925
Figura A5.12. Factor de atenuación en función de la permitividad dieléctrica relativa efectiva para medios casi transparentes, dada una frecuencia de 200 MHz.....	926
Figura A5.13. Factor de atenuación en función de la permitividad dieléctrica relativa efectiva para medios conductores, dada una frecuencia de 500 MHz.....	927
Figura A5.14. Factor de atenuación en función de la permitividad dieléctrica relativa efectiva para medios poco conductores, dada una frecuencia de 500 MHz.....	928
Figura A5.15. Factor de atenuación en función de la permitividad dieléctrica relativa efectiva para medios casi dieléctricos, dada una frecuencia de 500 MHz.....	929
Figura A5.16. Factor de atenuación en función de la permitividad dieléctrica relativa efectiva para medios casi transparentes, dada una frecuencia de 500 MHz.....	930
Figura A5.17. Factor de atenuación en función de la permitividad dieléctrica relativa efectiva para medios conductores, dada una frecuencia de 900 MHz.....	931
Figura A5.18. Factor de atenuación en función de la permitividad dieléctrica relativa efectiva para medios poco conductores, dada una frecuencia de 900 MHz.....	932
Figura A5.19. Factor de atenuación en función de la permitividad dieléctrica relativa efectiva para medios casi dieléctricos, dada una frecuencia de 900 MHz.....	933
Figura A5.20. Factor de atenuación en función de la permitividad dieléctrica relativa efectiva para medios casi perfectamente transparentes, dada una frecuencia de 900 MHz.....	934
Figura A5.21. Factor de atenuación en función de la permitividad dieléctrica relativa efectiva para medios conductores, dada una frecuencia de 1 GHz.....	935
Figura A5.22. Factor de atenuación en función de la permitividad dieléctrica relativa efectiva para medios poco conductores, dada una frecuencia de 1 GHz.....	936
Figura A5.23. Factor de atenuación en función de la permitividad dieléctrica relativa efectiva para medios casi dieléctricos, dada una frecuencia de 1 GHz...	937

Figura A5.24. Factor de atenuación en función de la permitividad dieléctrica relativa efectiva para medios casi perfectamente transparentes, dada una frecuencia de 1 GHz.....	938
Figura A5.25. Penetración nominal en función de la permitividad dieléctrica relativa efectiva para medios conductores, dada una frecuencia de 100 MHz.....	939
Figura A5.26. Penetración nominal en función de la permitividad dieléctrica relativa efectiva para medios poco conductores, dada una frecuencia de 100 MHz.....	940
Figura A5.27. Penetración nominal en función de la permitividad dieléctrica relativa efectiva para medios casi dieléctricos, dada una frecuencia de 100 MHz.....	941
Figura A5.28. Penetración nominal en función de la permitividad dieléctrica relativa efectiva para medios casi perfectamente transparentes, dada una frecuencia de 100 MHz.....	942
Figura A5.29. Penetración nominal en función de la permitividad dieléctrica relativa efectiva para medios conductores, dada una frecuencia de 200 MHz.....	943
Figura A5.30. Penetración nominal en función de la permitividad dieléctrica relativa efectiva para medios poco conductores, dada una frecuencia de 200 MHz.....	944
Figura A5.31. Penetración nominal en función de la permitividad dieléctrica relativa efectiva para medios casi dieléctricos, dada una frecuencia de 200 MHz.....	945
Figura A5.32. Penetración nominal en función de la permitividad dieléctrica relativa efectiva para medios casi perfectamente transparentes, dada una frecuencia de 200 MHz.....	946
Figura A5.33. Penetración nominal en función de la permitividad dieléctrica relativa efectiva para medios conductores, dada una frecuencia de 500 MHz.....	947
Figura A5.34. Penetración nominal en función de la permitividad dieléctrica relativa efectiva para medios poco conductores, dada una frecuencia de 500 MHz.....	948
Figura A5.35. Penetración nominal en función de la permitividad dieléctrica relativa efectiva para medios casi dieléctricos, dada una frecuencia de 500 MHz.....	949
Figura A5.36. Penetración nominal en función de la permitividad dieléctrica relativa efectiva para medios casi perfectamente dieléctricos, dada una frecuencia de 500 MHz.....	950
Figura A5.37. Penetración nominal en función de la permitividad dieléctrica relativa efectiva para medios conductores, dada una frecuencia de 900 MHz.....	951
Figura A5.38. Penetración nominal en función de la permitividad dieléctrica relativa efectiva para medios poco conductores, dada una frecuencia de 900 MHz.....	952
Figura A5.39. Penetración nominal en función de la permitividad dieléctrica relativa efectiva para medios casi dieléctricos, dada una frecuencia de 900 MHz.....	953
Figura A5.40. Penetración nominal en función de la permitividad dieléctrica relativa efectiva para medios casi perfectamente dieléctricos, dada una frecuencia de 900 MHz.....	954