

Capítulo 5.

Instrumentación, equipos y métodos de adquisición de datos.

Resumen.

En este capítulo se analiza la instrumentación, los métodos utilizados en prospección con GPR y el equipo utilizado en los trabajos prácticos que se incluyen en esta tesis. Se consideran cuatro aspectos principales:

- *Consideraciones generales sobre la emisión de la energía. Básicamente se trata del análisis de las antenas de radar, resumido en dos ecuaciones: la ecuación del radar y la ecuación de transmisión. Para llegar a comprender estas dos ecuaciones es necesario diferenciar entre antenas isotrópicas y antenas direccionales además de introducir conceptos como direccionalidad, ganancia y efectividad de una antena. La direccionalidad se define como la potencia radiada por la antena por unidad de ángulo sólido dada una dirección de radiación. La ganancia se define como la potencia recibida por una antena. El tercer parámetro, la efectividad, es la relación entre la potencia que emite una antena y la potencia que recibe. Se trata, por lo tanto, de un balance energético. Tanto la ecuación del radar como la ecuación de transmisión son dos formas de determinar la efectividad de una antena. La primera ecuación expresa un balance de potencias cuando tanto la antena emisora como la antena receptora son la misma. La segunda ecuación es el balance de potencias en el caso de una antena emisora distinta de la receptora. La ecuación del radar, por lo tanto, es un caso particular de la ecuación de transmisión. El análisis de*

las antenas de radar se completa con los diagramas de radiación. Se trata de representaciones gráficas del frente de ondas que radia una antena cualquiera, en función de las diferentes direcciones del espacio. Estos diagramas indican las direcciones del espacio para las que se tiene una mayor sensibilidad de la antena. La zona en la que la radiación es máxima recibe en nombre de lóbulo principal. Las zonas que rodean a este lóbulo y en las que también se observa radiación de energía (aunque de menor amplitud) son las llamadas lóbulos secundarios.

- *El segundo aspecto analizado son los componentes de un equipo de radar de subsuelo. Un equipo básico se compone de una unidad central, normalmente con monitor incorporado y de una serie de antenas conectadas a la primera mediante un cable que puede ser óptico o metálico. Este equipo básico se puede complementar con una serie de accesorios. Dentro de estos elementos complementarios tenemos dos tipos de instrumentos: los que sirven para visualizar y almacenar los radargramas (impresoras, pantallas, unidades de registro, etc) y los empleados para situar los perfiles (marcadores y odómetros). Además, es posible utilizar otros equipos que no forman parte del radar de subsuelo para complementar el estudio. La mayor parte de los equipos complementarios que se utilizan en campo se emplean para situar con precisión los perfiles analizados. Se trata, por lo tanto, de material topográfico de posicionamiento (fitas, banderolas, taquímetros, cintas métricas, sistemas GPS, etc.) y de material fotográfico. Otro equipamiento que a menudo hay que utilizar es aquel que sirve como porte del radar (vehículos para transportar la unidad central y las antenas, carros para llevar la fuente de alimentación, etc.) y para manejo de las antenas (poleas, sogas, andamios, etc).*
- *A continuación se recopilan y comentan los distintos métodos existentes para la adquisición de datos con los diferentes tipos de antenas. Estos métodos se pueden agrupar en perfiles, adquisiciones puntuales, CMP, tomografía (y transiluminación), WARR y adquisiciones de datos en sondeos.*
- *Finalmente se describe el radar de subsuelo que se ha utilizado en los trabajos de campo y en los ensayos que se incluyen en la presente tesis. Se trata de un radar de subsuelo diseñado para analizar principalmente los tiempos de llegada de la energía reflejada en las discontinuidades del medio. Se explican las características técnicas del equipo y las características de radiación de las antenas con las que se ha trabajado a partir de los diagramas de radiación que para estas antenas han calculado distintos autores, de los pulsos que emiten y de los espectros de amplitud de dichas señales.*

5.1 Introducción.

En este capítulo se describe el equipo utilizado, su funcionamiento y los métodos de adquisición de datos. Se hace especial énfasis en el funcionamiento de las antenas y en los tipos de estudio que se pueden llevar a cabo con cada una de ellas.

Un equipo de georradar básico, esquemáticamente, consta de una unidad de control central, una o varias antenas conectadas a ella y un sistema de grabación o de impresión de datos. La unidad de control funciona gracias a un programa informático implementado que controla la emisión, la recepción y el registro de la energía. Opcionalmente, pueden añadirse al equipo básico algunos accesorios tales como teclados, odómetros y material topográfico y fotográfico.

El equipo utilizado y casi todos los que podemos encontrar en la actualidad en el mercado se alimentan con corriente continua. Una batería de 12 voltios es suficiente en muchos casos para llevar a cabo un trabajo de campo de unas cuatro horas de duración.

En esta tesis se ha utilizado una unidad central de georradar comercial de la casa "*Geophysical Survey Systems Inc.*" ("*GSSI*"), modelo "SIR-10". Las antenas que complementan el equipo, de la misma casa comercial, van desde una frecuencia central de 100 MHz hasta los 1000 MHz. El equipo pertenece al Laboratorio de Geofísica de la Universidad Politécnica de Cataluña.

5.2. Origen y desarrollo del radar.

El georradar nace como aplicación al estudio del interior de la Tierra partiendo de los radares aéreos que se desarrollaron durante la Segunda Guerra Mundial para la detección de aviones y barcos. Un radar puede definirse, de forma sencilla, como un sistema que permite detectar y situar un objeto por medio de la emisión y la recepción de ondas electromagnéticas que se propagan en el medio en el cual está inmerso el objeto y que se reflejan en éste.

Partiendo de la detección de objetos en el aire (un medio sencillo en el cual uno de los principales factores a tener en cuenta es la reflexión de la energía en la superficie de la Tierra), y aunque la emisión de la energía se realizaba en una banda de frecuencias que, en principio, se consideró excesivamente elevada para obtener resultados prácticos debido a la fuerte atenuación que podía sufrir la onda al propagarse en un medio material absorbente, se fue aplicando a otros medios más complejos en los que la onda se atenuaba más rápidamente (por ejemplo, el hielo), y finalizó con ensayos para realizar este tipo de estudios en el subsuelo terrestre obteniéndose resultados buenos aunque sin alcanzar la penetración que se obtenía en el caso del hielo.

El rápido desarrollo de la electrónica, de la informática, de las técnicas de detección y de amplificación de las señales electromagnéticas y del procesado de datos por ordenador ha mejorado visiblemente la resolución de las técnicas iniciales de radar.

El desarrollo posterior de sistemas de georradar cada vez más complejos y precisos ha permitido que este tipo de estudios no solo se puedan aplicar al subsuelo terrestre sino que también puedan ser utilizados sobre estructuras como firmes de carretera, muros o puentes. Estas aplicaciones presentan un campo de estudio interesante ya que no existen otros métodos de prospección geofísica que tengan una resolución adecuada para realizarlos con éxito.

El desarrollo del georradar se ha debido, principalmente a la necesidad de obtener una resolución alta en los estudios de zonas superficiales, utilizando un método que puede considerarse no destructivo.

La utilización de este tipo de radiación para localizar objetos enterrados se atribuye a Hülsmeier en una patente alemana de 1904. Sin embargo, la primera publicación de investigaciones utilizando ondas electromagnéticas, método en el que está basado el georradar, se realizó entre 1910 y 1911 por Leimbach y Löwy en Alemania. En ella se determinaba la posibilidad de penetración de ondas de radio en determinadas formaciones litológicas (yesos, sal gema y arenas secas), así como su poca penetrabilidad en otro tipo de formaciones, como puede ser el caso de las arcillas. Los mismos autores propusieron, ya en 1912, un método para de

búsqueda de aguas subterráneas y de formaciones metálicas, consistente en emitir a diferentes frecuencias con una antena situada en la superficie del terreno y en registrar en otra los máximos y mínimos de las señales que se producían por la interferencia entre la onda que se propagaba de forma directa por el medio y la onda que se reflejaba en el contacto entre el medio y la capa anómala que se deseaba localizar.

A partir de este experimento, se desarrollan y aplican métodos basados en la propagación de ondas electromagnéticas en Alemania (patente de Hülsenbeck en 1926 en Alemania), siendo utilizados en la antigua Unión Soviética por Petrovsky en 1940 para iniciar estudios sobre hielo. Durante los años que siguen a estos estudios los métodos se perfeccionan. Se desarrollan los sistemas de sondeo por ecos de radio (*RES*) para estudios en hielos polares (Evans, 1965; Cook, 1960). Al mismo tiempo se desarrolla teóricamente la propagación de ondas electromagnéticas en medios estratificados, por ejemplo, los trabajos de Wait (1951, 1952, 1953, 1957, 1958, 1959, 1960 y 1962) y de Brekovskikh (1973).

Es a partir de los años 50 cuando se empiezan a utilizar estos métodos aplicados a la investigación y a los estudios de ingeniería. Los problemas a solventar para poder realizar estas aplicaciones fueron principalmente la fuerte atenuación producida en la señal en los medios que se deseaban estudiar. En 1960, Cook expuso la forma de obtener señales de pocos periodos (pulsos de corta duración), mediante una antena emisora de banda ancha por caída de potencial. Es a partir de entonces cuando se inicia un rápido desarrollo de esta tecnología que finaliza a principios de los años setenta con la comercialización de georradars de pulsos de corta duración denominados en inglés "*Ground-Penetrating Radar (GPR)*" o "*Ground-Probing Radar*". Estos pulsos tienen una duración que varía entre 0.5 ns y 100 ns, perteneciendo normalmente sus frecuencias centrales a la banda situada entre los 2 GHz y los 10 MHz, aunque también se pueden encontrar equipos que utilizan frecuencias más elevadas.

La amplia banda de frecuencias que es posible utilizar permite que se pueda aplicar este método a muy diferentes campos, tanto a estudios de subsuelo como al análisis de estructuras. Los estudios que permite realizar son muy variados, y se utiliza tanto como única técnica aplicada, como complemento de otros métodos de prospección o como técnica principal complementada por otros métodos.

Uno de los campos más habituales de aplicación es en ingeniería civil, por ejemplo para la detección de roca base en terreno edificable, para la localización de armaduras en muros de hormigón y la búsqueda o cartografiado de tuberías o fugas de agua, entre otros.

También se utiliza en estudios geotécnicos y de control de calidad como por ejemplo: en el control de calidad de diferentes tratamientos realizados en el terreno, en el estudio del estado de túneles, cubicando el material necesario para reparación de obras civiles y analizando terrenos en busca de bolsas de arcilla, grava u oquedades.

Se ha utilizado también en estudios ambientales, aplicándolo para localizar y ubicar de vertedero.

Su campo de aplicaciones incluye también estudios de minería. Por ejemplo: estado de las galerías de las minas, ubicar de materiales en canteras, estratigrafía en canteras, etc.

Y otra de sus aplicaciones es en investigaciones arqueológicas y en estudios de patrimonio: para realizar una búsqueda arqueológica; localizar deterioros en monumentos, complementando estudios patológicos; como control de calidad en restauraciones; para determinación de niveles culturales, etc.

García (1997) recoge algunos ejemplos de estas aplicaciones, sobre todo en el caso de la obra civil.

5.3. Consideraciones teóricas sobre la emisión de energía.

En este apartado se comentan los aspectos básicos de la emisión de energía de un radar cualquiera: la ecuación de transmisión y la ecuación del radar. Ambas se desarrollan en numerosos tratados tanto de telecomunicaciones como de electromagnetismo (por ejemplo Cardama et al., 1993; Olver, 1992 y Marshall et

al., 1982). También se comentan los conceptos de direccionalidad y de ganancia de las antenas. Para una información más completa sobre este tema puede consultarse cualquier tratado existente dedicado a radares y antenas o a dipolos y emisión de ondas electromagnéticas (por ejemplo, Cardama et al., 1993 o Levanon, 1988).

5.3.1. Direccionalidad y ganancia.

Una primera clasificación de las antenas en dos grandes grupos se realiza en función de las características del campo radiado. Diferenciamos de este modo entre antenas isotrópicas y antenas direccionales.

Las primeras radian la energía en todas direcciones del espacio por igual y no tienen direcciones privilegiadas. Si se considera que el medio en el que la antena radia la energía es homogéneo e infinito (sin discontinuidades), el frente de ondas que se propaga a partir de su radiación es esférico. Estas antenas son llamadas ideales, ya que en la práctica es imposible conseguir una perfecta isotropía en la emisión.

Las antenas direccionales son aquellas que tienen una dirección privilegiada de radiación. La emisión que produce no es homogénea para todas las direcciones.

El parámetro que caracteriza a las antenas teniendo en cuenta estas consideraciones es la direccionalidad (también llamada directividad). Se define como el cociente de la densidad de potencia que se tiene a una cierta distancia de la antena direccional emisora y la densidad de potencia que se tendría en ese mismo punto si la antena emisora fuese isotrópica y radiase la misma potencia que la primera.

La densidad de potencia de una antena isotrópica es el cociente entre la potencia radiada (P_r) por ángulo sólido. La directividad D de una antena tiene la siguiente expresión (Cardama, 1993):

$$D = \frac{\delta P(\theta, \varphi, r)}{\frac{P_r}{4\pi r^2}} \quad (5.1)$$

Donde $\delta P(\theta, \varphi, r)$ es la densidad de potencia medida a una cierta distancia r en una dirección definida por los ángulos θ y φ , y $(P_r / 4\pi r^2)$ es la potencia emitida por la antena isotrópica por ángulo sólido.

Si la antena radia isotrópicamente, la densidad de potencia en un punto del espacio, a una distancia r , definido por los ángulos θ y φ queda definida como:

$$\delta P(r, \theta, \varphi) = \frac{P_r}{4\pi r^2} \quad (5.2)$$

Si la antena es direccional, esta misma densidad de potencia queda definida como:

$$\delta P(r, \theta, \varphi) = \frac{P_r}{4\pi r^2} D(\theta, \varphi) \quad (5.3)$$

Cuando se presenta un valor del parámetro de directividad pero no se facilita información acerca del ángulo para el cual ha sido medido, se considera que es el valor en la dirección de máxima radiación de potencia por la antena. Si se tiene este valor de la directividad en la dirección de máxima radiación de potencia y se posee el diagrama de radiación de la antena, la directividad de la misma en cualquier dirección puede obtenerse a partir del producto entre la directividad y el mencionado diagrama de radiación.

El diagrama de radiación de las antenas directivas presenta un lóbulo principal importante y varios lóbulos secundarios de menor importancia. Para este tipo de antenas se puede estimar la directividad considerando que la radiación que se produce es uniforme dentro de un ángulo sólido definido por los anchos del haz situados a 3 dB en los dos planos principales del diagrama de radiación (Cardama, 1993).

Otro parámetro que define a las antenas es la ganancia. Se relaciona con la potencia entregada a la antena y se define de forma análoga a la directividad. La

diferencia que existe entre la ganancia y la directividad es que no toda la potencia entregada a la antena es radiada por ella al espacio, ya que se producen pérdidas dentro de la antena.

La ganancia se define como el cociente entre la máxima potencia radiada por la antena por unidad de ángulo sólido y la potencia total distribuida por la antena en todo el espacio (en este caso el ángulo sólido es 4π). Esto equivale a considerar el cociente entre la potencia por unidad de ángulo sólido que emite la antena y la potencia por unidad de ángulo sólido que emite una antena isotrópica que radia la misma potencia que la primera. Se expresa la ganancia G como:

$$G = \frac{\frac{P_{\text{max. radiada}}}{\Omega}}{\frac{P_{\text{total}}}{4\pi}} \quad (5.4)$$

Donde Ω es la unidad de ángulo sólido, $P_{\text{max. radiada}}$ es la potencia máxima radiada por la antena y P_{total} es la potencia total de la antena distribuida por todo el espacio.

Si nos encontramos con antenas que presentan una cierta direccionalidad (es el caso de las antenas más comunes empleadas en prospección geofísica) la definición de directividad de la antena es similar a la que se ha presentado de ganancia. En este caso se puede decir que la direccionalidad de una antena es el cociente entre la potencia máxima entregada a la antena por unidad de ángulo sólido entre la potencia total radiada dividida entre 4π :

$$G_d = \frac{\frac{P_{\text{max. entregada}}}{\Omega}}{\frac{P_{\text{total}}}{4\pi}} \quad (5.5)$$

siendo G_d la ganancia de una antena direccional.

La ganancia de una antena y su direccionalidad, en la misma dirección del espacio, están relacionadas entre sí mediante un parámetro que relaciona la potencia que es entregada a la antena y la potencia radiada por ésta. Este parámetro es el que se

denomina la eficiencia de la antena, η_{ef} , y permite estimar las pérdidas de potencia que tienen lugar en su interior:

$$G(\theta, \varphi) = \eta_{ef} D(\theta, \varphi) \quad (5.6)$$

En el caso de antenas perfectas (aquellas en las que no se producen pérdidas de potencia y por lo tanto se emite toda la potencia que le es entregada), el factor de direccionalidad y el de ganancia de la antena coinciden. Pero en antenas reales, a consecuencia de las pequeñas pérdidas que se producen en el interior de la antena, el factor de ganancia es algo menor que el de direccionalidad. Únicamente pueden considerarse iguales G y D cuando se trata de antenas que radian a muy alta frecuencia, ya que entonces las pérdidas internas son despreciables (Cardama, 1993), pero no es el caso de las antenas utilizadas en prospección con radar.

5.3.2. Ecuación de transmisión.

Esta ecuación es la expresión del balance de potencias (o energético) que se realiza entre la potencia radiada por una antena emisora y la recibida por una antena receptora. Es una relación importante ya que la potencia emitida determina en gran medida la mínima señal detectable que se tiene en la antena receptora.

Si se considera el caso de una antena isotrópica situada en un medio no atenuante y homogéneo (es el caso del espacio libre), la densidad de energía una distancia r de la antena emisora es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia entre la antena emisora y el punto donde se realiza la medida, y directamente proporcional a la potencia radiada (ecuación 5.2).

La mayoría de las antenas de georradar son direccionales, ya que no interesa emitir fuera del medio estudiado. De esta forma la ecuación 5.2, que proporciona la densidad de potencia para una antena isotrópica, se tiene que modificar ligeramente para considerar su direccionalidad, ya que concentran la potencia radiada en unas direcciones concretas (ecuación 5.3). Teniendo en cuenta la relación entre direccionalidad y ganancia se puede definir la densidad de potencia como:

$$\delta P = \frac{P_r D(\theta, \varphi)}{4\pi r^2} = \frac{P_e G(\theta, \varphi)}{4\pi r^2} \quad (5.7)$$

Siendo en este caso P_e la potencia entregada a la antena.

Por otro lado, la potencia que recibe una antena se relaciona con la densidad de potencia del frente de ondas como su producto con la que se denomina área efectiva, A_{ef} , que es el área de captación de energía del frente de ondas que alcanza la antena receptora. Esta área efectiva también está relacionada con la directividad (D) de la antena receptora y con la longitud de onda (λ) tal como se muestra, por ejemplo, en Cardama (1993) mediante la expresión:

$$A_{\text{ef}} = D \frac{\lambda^2}{4\pi} = DL_0 \quad (5.8)$$

Siendo la expresión:

$$L_0 = \frac{\lambda^2}{4\pi} \quad (5.9)$$

la que se denomina pérdida en el espacio libre (la pérdida de potencia que tiene lugar entre la transmisión y la recepción de la señal si las dos antenas involucradas son isotrópicas).

De esta forma puede escribirse la potencia recibida por una antena (P_c) mediante la expresión:

$$P_c = \frac{P_r}{4\pi r^2} D_t A_{\text{ef}} \quad (5.10)$$

Donde P_c es la potencia captada por la antena receptora, D_t es la directividad de la antena transmisora y A_{ef} es el área efectiva de la antena receptora.

La ecuación de transmisión, como la relación entre la potencia emitida (P_r) y la recibida (P_c), se puede expresar como el cociente:

$$\frac{P_c}{P_r} = D_t D_r \left(\frac{\lambda}{4\pi r} \right)^2 \quad (5.11)$$

La expresión 5.11 es la relación conocida como ecuación de transmisión. La ecuación de transmisión relaciona la potencia emitida por una antena con la potencia que recibe otra antena, a partir de la densidad de potencia a una distancia r de la antena emisora. Esta relación, que se suele dar en decibelios, indica la pérdida de potencia que ha habido por diferentes causas desde que ha sido radiada hasta que ha sido recibida por una segunda antena. Puede decirse pues que la ecuación de transmisión es un balance energético. A este cociente también se le denomina sensibilidad del radar (Ulriksen, 1982):

$$S = \frac{P_r}{P_c} \quad (5.12)$$

El valor de la sensibilidad suele darse en decibelios:

$$Q = 10 \log(S) = 10 \log \frac{P_r}{P_c} \quad (5.13)$$

5.3.3. Ecuación del radar.

Esta ecuación es un caso particular de la ecuación de transmisión. Esta última relaciona la potencia que, a partir de la energía que emite una antena emisora, recibe la antena receptora tras una reflexión de la energía en un objeto, con la ganancia de dicha antena, su longitud de onda y con la potencia del pulso emitido en el caso ideal de que no exista atenuación de la señal excepto por dispersión geométrica de la energía.

La ecuación del radar es una referencia importante para definir un sistema de radar ya que relaciona las características de la antena emisora y las propiedades del medio (que producen una atenuación de la señal) con la potencia emitida por dicha antena y la potencia recibida tras una reflexión.

Conociendo la potencia máxima que puede emitir una antena y determinando: cual es la mínima potencia que debe tener una señal recibida para que se pueda discriminar del ruido de fondo, los factores de atenuación de la señal en un medio dado y la frecuencia central del pulso emitido, es posible determinar la máxima profundidad que se alcanzará.

Llamando P_c a la potencia recibida por la antena, P_r a la potencia radiada, G a su ganancia, θ el tamaño angular del reflector, ω la frecuencia angular del pulso emitido y r la distancia entre la antena y el reflector, se puede escribir la relación:

$$P_c = \frac{P_r G^2 \theta}{\omega^2 r^4 (4\pi)^3} \quad (5.14)$$

Si se considera el término de atenuación de la señal al propagarse por un medio no ideal (absorbente), se añade un término más a la ecuación 5.14. Este término de atenuación de la señal puede tomarse como un factor exponencial que depende de un coeficiente α (variable para cada tipo de medio) y de la distancia r a la que se encuentra el reflector de la antena (Lorenzo, 1994):

$$A(r, \alpha) = e^{-2\alpha r} \quad (5.15)$$

Siendo $A(r, \alpha)$ la atenuación de la amplitud de la señal durante una distancia r .

El coeficiente 2 que aparece en el término exponencial es debido a que la distancia total recorrida por la onda es dos veces la distancia r entre la antena y el reflector.

Como el georradar tiene una antena emisora y una antena receptora se suele escribir la ecuación del radar a partir de la ecuación de transmisión (ecuación 5.11), considerando que la energía que recibe la antena receptora no es una emisión directa de la receptora, sino que llega tras sufrir una reflexión. Para ello se considera la directividad de las antenas en función de su ganancia y de su efectividad, la longitud de onda en función de la velocidad y la frecuencia, la sección eficaz del reflector y el coeficiente de reflexión del mismo. De este modo se obtiene una relación entre la potencia emitida por una antena y la recibida por la otra tras la reflexión. Este balance suele darse en decibelios, en forma del factor Q

de sensibilidad del aparato. Este factor Q queda definido a partir de las ecuaciones 4.12 y 4.13.

El principal factor que limita la sensibilidad es el ruido termal de fondo en el receptor, ya que siempre tendrá que cumplirse, para poder tener una relación correcta señal/ruido, que la potencia captada sea mayor que este ruido termal. Ulriksen (1982) da el siguiente valor de este ruido termal, medido en Watios:

$$P_{\text{term.}} = 1.6 \cdot 10^{-20} \cdot \Delta f \quad (5.16)$$

Siendo $P_{\text{term.}}$ el ruido y Δf la anchura de banda del receptor.

Los equipos comerciales actuales trabajan con un valor de Q situado entre los 120 dB y los 160 dB. Los valores de Q entre los que trabajan los equipos más antiguos están comprendidos entre los 80 dB y los 120 dB. Davis y Annan (1989) determinaron la penetración (o rango del radar) en función de este factor Q y de la atenuación α dependiente del medio y de la frecuencia (ver la figura 5.1). De forma general, el rango del radar (penetración) disminuye conforme aumenta la atenuación. También puede observarse que el rango del radar es mayor para valores mayores de la sensibilidad Q del equipo.

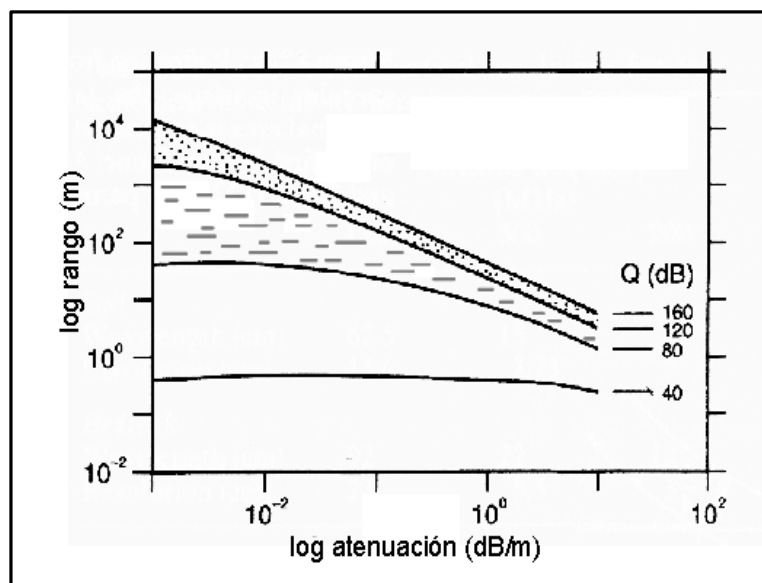


Figura 5.1. Relación entre el rango del radar, la atenuación y la sensibilidad del equipo según Davis y Annan (1989). El rango marcado con punteado es el de trabajo de los radares actuales. Marcado con líneas, el rango de trabajo de los radares más antiguos.

5.3.4. Diagramas de radiación.

Los diagramas de radiación son representaciones gráficas del frente de ondas que radia una antena en las diferentes direcciones del espacio. Estos diagramas indican en qué dirección del espacio la antena es más sensible, así como el área efectiva (ángulo efectivo) que podrá ser detectada por la energía radiada por la antena. Las gráficas representan la densidad de potencia relativa a una distancia dada (medida en dB) en función de las tres direcciones del espacio. El tamaño y la forma de los lóbulos de radiación del campo electromagnético generado por una antena dependen también de la constante dieléctrica del medio en el cual se produce la emisión.

La representación suele realizarse en coordenadas esféricas mediante un esquema tridimensional, aunque en muchas ocasiones es suficiente considerar un corte de este diagrama tridimensional, representando de este modo el diagrama de radiación en dos dimensiones. Estas representaciones suelen realizarse, en el caso del georradar, considerando la dirección en la cual tenemos una discontinuidad, es decir, en la dirección en la cual tenemos el contacto entre el aire y el medio a estudiar, que suele ser la de radiación máxima (se trabaja con antenas direccionales).

La zona en la que la radiación es máxima se denomina haz principal o lóbulo principal, y las zonas que lo rodean y que presentan una amplitud de onda menor se denominan lóbulos secundarios. El lóbulo secundario de mayor amplitud suele ser el más próximo al lóbulo principal (ver la figura 5.2). Un parámetro importante de este diagrama es la anchura del lóbulo o del haz a 3 dB, que se define como la distancia angular entre las direcciones del diagrama de radiación donde la energía es la mitad del valor máximo. Esta potencia mitad equivale a 3 dB menos que la máxima. Otro parámetro de interés es el ancho del lóbulo entre ceros, que se define como la distancia angular entre las dos direcciones del espacio en las que el lóbulo principal alcanza el mínimo valor.

El cociente entre el lóbulo principal y el mayor de los lóbulos secundarios se denomina relación de lóbulo principal a secundario e indica la relación de energía emitida en el haz principal de la radiación.

Las antenas del georradar suelen ser antenas de media longitud de onda, es decir, antenas con una espira que funciona como un dipolo, emitiendo energía según un modelo de radiación ya conocido (Duke, 1990). El modelo de radiación de las antenas de georradar es diferente si se considera la antena en un mismo medio homogéneo o si se consideran discontinuidades en el medio por el que se propaga la energía. También existen modificaciones que dependen de las características electromagnéticas de los medios en contacto (Conyers y Goodman, 1997; Arcone, 1996). De forma general, conforme aumenta la permitividad dieléctrica efectiva de un medio, la direccionalidad de la antena aumenta también. Esto conlleva una anchura del lóbulo de radiación menor, de forma que un mayor porcentaje de energía se propaga en la dirección deseada y una parte menor es la que se propaga por el exterior del medio a analizar. La dependencia entre la anchura del lóbulo principal y la constante dieléctrica efectiva del medio viene dada por la expresión 5.17, siendo \mathbf{b} el ángulo entre la vertical y el límite del haz principal (semianchura del lóbulo) y ϵ_r la permitividad dieléctrica efectiva relativa del medio que se está estudiando y que se encuentra en contacto con el aire.

$$\mathbf{b} = \arcsin \frac{1}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad (5.17)$$

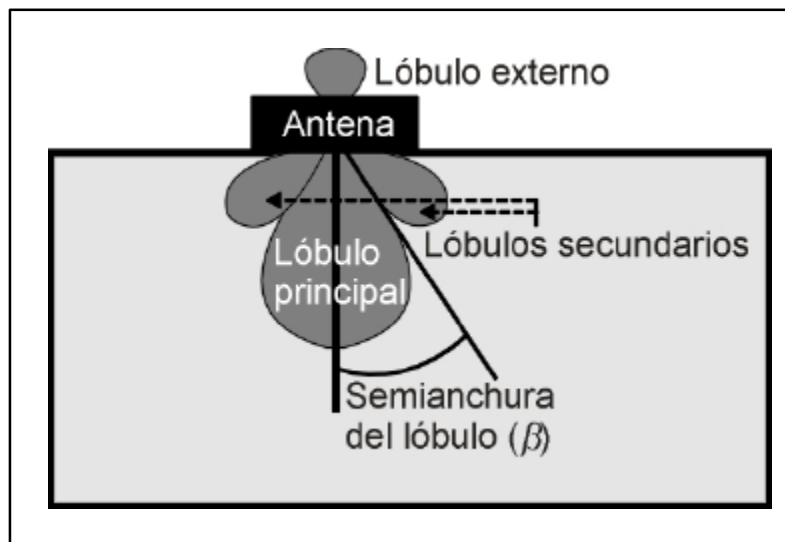


Figura 5.2. Esquema de un modelo de radiación de una antena. Pueden observarse tanto el lóbulo principal como los lóbulos secundarios.

5.4. Georradar. Componentes.

Un equipo de radar de subsuelo funciona de la misma forma que cualquier otro sistema de radar, es decir, consiste en una antena emisora, una antena receptora, un sistema de control de la radiación y una unidad de almacenamiento de registros. La figura 5.3 muestra el esquema de funcionamiento de un radar aéreo tradicional.

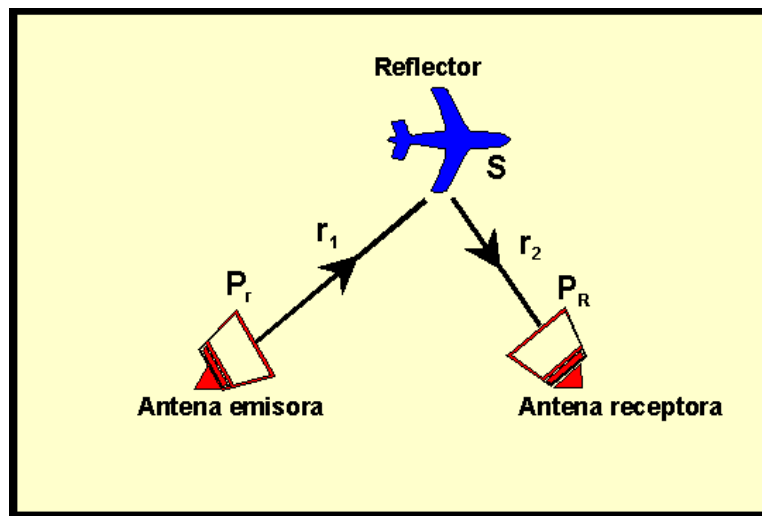


Figura 5.3. Esquema del funcionamiento de un radar aéreo.

En la figura 5.4 se muestra un esquema de las diferentes componentes de un radar de subsuelo y del proceso de detección de discontinuidades, junto con un registro característico (radargrama).

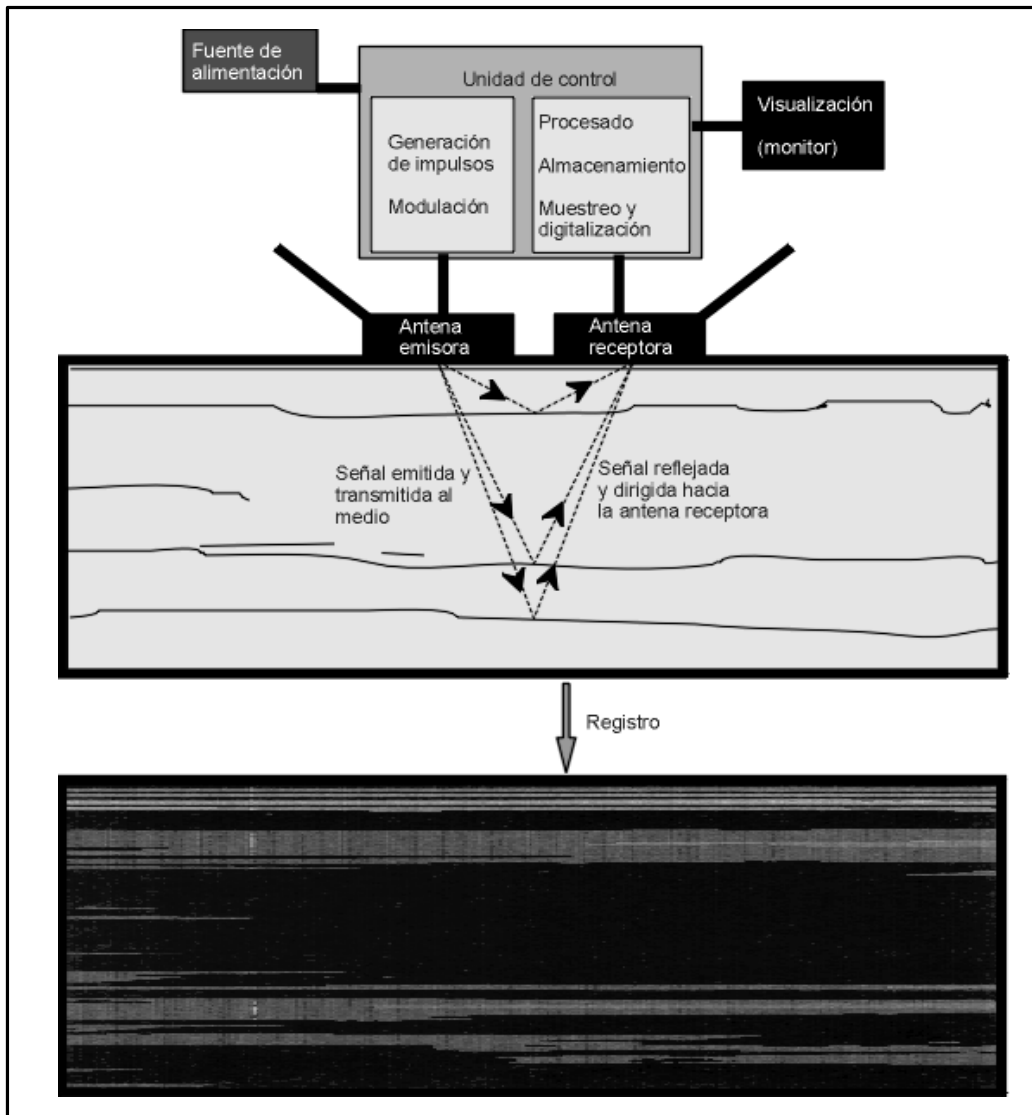


Figura 5.4. Esquema simplificado de las diferentes componentes de un equipo de georradar.

5.4.1. Unidad central.

La unidad central o unidad de control de un georradar es donde se realiza la coordinación y control de las antenas, de los diversos accesorios que se pueden añadir al equipo básico y de la señal emitida. También coordina el almacenamiento de la señal en algún tipo de soporte (magnético, fotográfico, en papel) y, en algunos casos, permite realizar el tratamiento básico de las señales durante la adquisición de datos. Esta unidad lleva implementado un programa

informático que realiza el procesado básico de la señal e incorpora utilidades que permiten actuar sobre la señal emitida y sobre los registros que se adquieren: filtrados y modificación de la ganancia del registro, entre otros procesados.

La unidad de control suele ir conectada a un monitor para visualizar la señal que se está adquiriendo. Se puede seleccionar la forma de visualización del registro en campo, optando por un registro de trazas de amplitud o bien por una serie de escalas de colores o de tonos de gris, donde cada tono engloba un intervalo de amplitudes de la onda registrada. En los casos de radares más sencillos únicamente se puede visualizar la señal, sin poder efectuar ningún tipo de tratamiento que mejore la calidad de imagen durante la adquisición de datos de campo. En otros equipos esta unidad central es un ordenador personal portátil al que se le ha cargado un programa para efectuar el control de las antenas y el procesado básico de las señales.

La fuente de alimentación de la unidad central es de corriente continua. Consiste, en muchos casos, en una batería de 12 voltios.

5.4.2. Accesorios y equipos complementarios.

El equipo básico consta de una unidad central, una o varias antenas (se explican en este mismo capítulo) y una unidad de registro de datos. A estos elementos básicos se les pueden añadir algunos accesorios para facilitar las tareas de adquisición de datos. Con la misma finalidad se pueden utilizar equipos complementarios.

Accesorios.

Los accesorios con los que puede complementarse este equipo básico son diversos. Podemos separarlos en dos grupos: los complementos para la visualización y almacenamiento de los registros y los accesorios para situar los perfiles.

Dentro de los accesorios para visualización se incluyen los siguientes elementos:

1. Impresoras. En casi todas las unidades centrales se puede conectar una impresora que permite obtener los registros en papel durante los trabajos de adquisición de datos en campo.
2. Pantallas. Se pueden conectar a la unidad central para tener una visión clara de los registros que se adquieren.
3. Programas informáticos. Gestionan estos accesorios y permiten un amplio tratamiento de datos.
4. Unidades de registro de datos en soporte magnético (cinta o disco) u óptico.

Para situar los perfiles se suelen utilizar dos tipos de accesorios:

1. Marcadores. Se conectan tanto a la unidad central como a las antenas y permiten introducir una marca en el registro cada vez que se presiona un pulsador. Esto permite introducir marcas para indicar el inicio y el final del perfil y para advertir sobre algún elemento especial dentro del perfil. También permite introducir marcas en el registro que indican puntos equiespaciados sobre el perfil. Por ejemplo, se puede introducir una marca cada metro de distancia. Estas marcas, si la velocidad de desplazamiento de la antena no es constante dividen el radargrama en intervalos desiguales.
2. Odómetros. Conectados a la unidad central se añaden a las antenas. En ocasiones están implementados en un soporte con ruedas sobre el que se sitúa la antena. Este sistema permite determinar la posición de los distintos puntos del radargrama con mayor precisión que en el caso de los marcadores.

Equipos complementarios.

Para efectuar el estudio se pueden utilizar equipos complementarios que simplifican el trabajo y que permiten mayor precisión en la interpretación final de los datos. Estos equipos no se conectan a la unidad central, pero son útiles tanto durante los trabajos de campo como durante el procesado posterior de los registros. Se pueden agrupar en equipos para tratamiento de datos y visualización

de radargramas, equipos para situar perfiles y otros equipos complementarios para porte del radar y de las antenas y para facilitar su manejo.

Dentro de los equipos para tratamiento de datos y visualización de radargramas se incluye todo el material informático para visualizar los registros gráficos y para pasar los datos a otros tipos de soporte: impresoras, plotters, escáners, ordenadores personales, programas informáticos, etc... Se utilizan tras la adquisición de datos en los trabajos posteriores.

Entre los equipos para situar los perfiles se encuentran aquellos instrumentos que pueden facilitar el posicionamiento de los perfiles en un plano. Entre otros, destacan:

1. Material topográfico para posicionamiento: fitas, cintas métricas, taquímetros, entre otros. Normalmente se utilizan fitas o banderolas para situar los puntos de inicio y de final del perfil. Las cintas métricas se utilizan para situar marcas sobre el terreno indicando la distancia a la que se encuentra la antena del inicio del perfil en cada instante. También se utilizan para, junto con la brújula, situar los puntos de inicio y de final de perfil respecto a una referencia conocida. Para situar topográficamente los puntos del perfil se pueden utilizar taquímetros, estaciones totales y otros instrumentos topográficos.
2. Material topográfico para posicionamiento por satélite, sistemas GPS. Algunas unidades de radar modernas llevan implementado este sistema para posicionar con exactitud y de forma rápida los diferentes puntos del perfil.
3. Equipos fotográficos. Para determinar la situación exacta del perfil es muy práctico obtener material gráfico de cada uno o de algunos de los perfiles realizados. Esta información fotográfica es de gran ayuda al interpretar los resultados en laboratorio.

Los equipos destinados a porte del equipo y al manejo de antenas son muy diversos:

1. Para transportar el material hay que tener en cuenta el tipo de terreno donde se debe efectuar el estudio. La utilización de un vehículo cuando existen accesos

sencillos (carreteras o caminos amplios) puede facilitar los trabajos de campo. Sin embargo hay que tener en cuenta la posibilidad de zonas no accesibles con el vehículo escogido. Por el interior de edificios puede ser útil un pequeño carro o plataforma con ruedas para poder desplazar tanto la unidad central y el monitor con su fuente de alimentación. Muchos equipos comerciales se presentan con un armazón que puede montarse en forma de mochila. Esto facilita el acceso con el equipo a un mayor número de zonas.

2. Para facilitar el manejo de las antenas en los perfiles trazados se incluyen elementos que dependen de cada caso estudiado y de la problemática de acceso a las zonas de interés. Dentro de este grupo se incluyen, entre otros equipos, una grúa para acceder a zonas elevadas (en ocasiones se necesita estudiar una cubierta, una bóveda o la parte superior de un muro), cuerdas, poleas y andamios.

5.4.3. Antenas.

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

Las antenas se conectan con la unidad de control mediante un cableado que puede ser metálico u óptico. Este último es el más adecuado para el caso de frecuencias bajas (por debajo de los 100 MHz), ya que los metálicos generan corrientes parásitas que quedan registradas en la señal como ruido electrónico de fondo (ruido termal). Este efecto es más notable cuando se trabaja con bajas frecuencias, necesarias para rangos mayores de tiempo doble de propagación.

Las antenas se utilizan para realizar dos funciones básicas en la prospección con georradar: deben radiar la energía que se les suministra en forma de potencia con la direccionalidad y las características adecuadas a la aplicación pensada, y deben recibir la parte que se refleja en las discontinuidades electromagnéticas del medio y regresa hacia la superficie sobre la que se coloca la antena. Cuando utilizamos las antenas en estudios de prospección es importante que la mayor parte de la energía radiada lo haga en una única dirección. Esto permite mejorar la relación

señal / ruido, permitiendo obtener registros nítidos con un rango más elevado (mayor profundidad de estudio). La disminución del ruido se produce porque al emitir la energía únicamente hacia el interior del medio de estudio se evitan las reflexiones en objetos externos. Por este motivo es habitual el empleo de antenas direccionales y apantalladas.

Una forma muy común de caracterizar a las antenas es por la frecuencia central de su emisión. La longitud de onda del pulso emitido depende de esta frecuencia y de la velocidad de la onda en el medio a través de la conocida expresión:

$$\lambda = \frac{v}{f} \quad (5.18)$$

Siendo v la velocidad de propagación de la onda electromagnética en el medio donde se produce la propagación (si la onda se propaga en el aire, esta velocidad puede tomarse como la velocidad de propagación de una onda electromagnética en el vacío, c), λ la longitud de la onda en dicho medio y f la frecuencia del pulso emitido.

De este modo, las antenas que se utilizan en prospección con radar de subsuelo quedan determinadas totalmente por la frecuencia del pulso que emiten al radiar, ya que la longitud de onda de la energía radiada dependerá de las características del medio por el que se propaga. Se puede definir una antena dando únicamente la frecuencia central a la que está emitiendo y su ancho de banda. Normalmente, en los radares de subsuelo esta banda tiene una anchura frecuencial aproximadamente del mismo orden que su frecuencia central.

Cada tipo de antena se ha de escoger debidamente de acuerdo con las necesidades de su utilización. En la tabla 5.1 se presenta la división general por bandas frecuenciales según Cardama et al. (1993). Junto a la frecuencia se añade la longitud de onda en el vacío, donde $c \approx 3 \times 10^8$. En la tabla 5.2 se muestran las bandas de frecuencias de las ondas electromagnéticas más altas con la longitud de onda en el vacío, la energía de la radiación y la denominación de cada una de las bandas. El georradar trabaja con frecuencias situadas entre las microondas y las ondas de radio.

La banda que se denomina de radio frecuencias es la que comprende las zonas de MF, HF y VHF, mientras que la banda denominada de microondas comprende las zonas de UHF, SHF y EHF. Los georradars utilizan bandas de frecuencia situadas entre 3 GHz y los 10 MHz aproximadamente, es decir, que trabajan con las bandas de radiofrecuencias y de microondas (entre las bandas de HF y de UHF).

Banda	Frecuencia	Longitud de onda	Denominación
ELF	Menor a 3 KHz	> 100 Km	Frecuencia extremadamente baja
VLF	3-30 KHz	100-10 Km	Muy baja frecuencia
LF	30-300 KHz	10-1 Km	Baja frecuencia
MF	0.3-3 MHz	1000-100 m	Frecuencia media
HF	3-30 MHz	100-10 m	Alta frecuencia
VHF	30-300 MHz	10-1 m	Muy alta frecuencia
UHF	0.3-3 GHz	100-10 cm	Ultra alta frecuencia
SHF	3-30 GHz	10-1 cm	Super alta frecuencia
EHF	30-300 GHz	10-1 mm	Extremadamente alta frecuencia

Tabla 5.1. Bandas de frecuencia y longitudes de onda correspondientes a cada banda para la propagación en el vacío (Cardama et al., 1993).

Frecuencia (Hz)	Longitud de onda en el vacío	Energía del fotón	Tipo de radiación
$\sim 10^{23} - 5 \cdot 10^{19}$	$3 \cdot 10^{-15} \text{ m} - 6 \cdot 10^{-12} \text{ m}$	1 GeV - 200 KeV	Rayos g
$\sim 5 \cdot 10^{19} - 3 \cdot 10^{17}$	$6 \cdot 10^{-12} \text{ m} - 10^{-9} \text{ m}$	200 KeV - 1.2 KeV	Rayos X
$\sim 3 \cdot 10^{17} - 7.5 \cdot 10^{14}$	1 nm - 400 nm	1.2 KeV - 3.1 eV	Ultravioleta
$\sim 7.5 \cdot 10^{14} - 4 \cdot 10^{14}$	400 nm - 750 nm	3.1 eV - 1.65 eV	Luz visible
$\sim 4 \cdot 10^{14} - 3 \cdot 10^{11}$	0.75 mm - 1 mm	1.7 eV - 10^{-3} eV	Infrarrojo
$\sim 3 \cdot 10^{11} - 10^9$	1 mm - 30 cm	10^{-3} eV - $4 \cdot 10^{-6}$ eV	Microondas
$< 10^9$	> 30 cm	$4 \cdot 10^{-6}$ eV - 0 eV	Radiofrecuencias

Tabla 5.2. Espectro de las ondas electromagnéticas.

También es posible otra agrupación de las antenas basada en las características constructivas. Cada aplicación requiere una determinada antena de características adecuadas. Debido al gran espectro de frecuencias que pueden cubrir podemos encontrar muchas antenas diferentes respecto a sus propiedades o utilidades,

aunque pueden clasificarse en tres grandes grupos: antenas alámbricas, antenas de apertura y reflectores y agrupaciones de antenas.

1. Antenas alámbricas. Están construidas mediante hilos conductores que soportan las corrientes que dan lugar a los campos electromagnéticos radiados. La disposición y geometría de estos hilos puede ser diversa, pudiendo consistir en hilos rectos que forman de este modo dispositivos dipolares, en forma de V o rómbicos, en espiras que pueden tener distintas formas (cuadradas, circulares, mariposa, etc.) o formando hélices. Las antenas de radar de subsuelo son antenas cuya disposición de los hilos conductores es una espira, usualmente con forma de mariposa (Hänninen et al., 1992; Duke, 1990). Se suelen denominar antenas de media longitud de onda, ya que la longitud de la onda en el vacío es el doble de la distancia máxima de la espira. Hänninen et al. (1992) presentan un esquema de situación y forma de un dipolo para una antena de 100 MHz de la casa "GSSI". Este esquema es el de la figura 5.5.
2. Antenas de apertura y reflectores. En las antenas que se incluyen en este grupo la onda radiada se genera gracias a una disposición de campos que se excitan mediante guías de ondas. Este tipo de antenas es muy usual en las telecomunicaciones cuando se asocian a algún tipo de reflector, siendo el reflector parabólico el más común.
3. Agrupaciones de antenas. En este grupo se engloban todas aquellas asociaciones o combinaciones de antenas que pueden realizarse utilizando cualquier tipo de antena. Las asociaciones de antena se utilizan cuando se requiere un determinado tipo de radiación que no puede conseguirse con una única antena.

Las antenas utilizadas en un georradar suelen consistir en espiras de media longitud de onda que trabajan como dipolos (figura 5.5). La longitud de estas espiras determina la frecuencia central de la emisión, ya que la onda emitida, en el vacío, tiene una longitud doble a la de la espira.

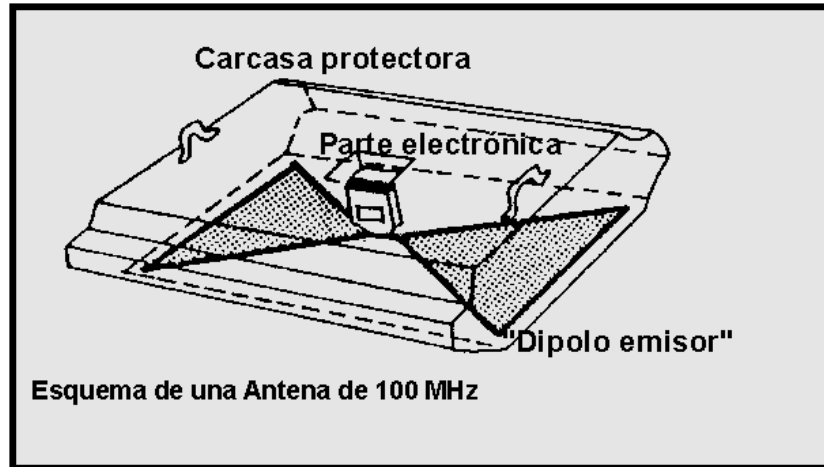


Figura 5.5. Esquema de una antena de 100 MHz de "GSSI" (según Hänninen et al., 1992). La espira que hace de dipolo emisor es del tipo mariposa.

En el aire, estas antenas emiten un lóbulo principal que forma un campo aproximadamente cilíndrico (figura 5.2). Sin embargo, cuando se sitúa la antena en contacto con el suelo, el diagrama de radiación de la antena se modifica considerablemente como consecuencia del brusco contraste entre parámetros electromagnéticos debidos al contacto aire-suelo. Este diagrama presenta un lóbulo principal en el eje vertical (en dirección hacia el interior del subsuelo). El ángulo de emisión del mencionado lóbulo forma un ángulo respecto a la vertical que depende de la permitividad dieléctrica efectiva de los materiales del suelo (ver expresión 5.17). También presenta un lóbulo secundario no muy grande, en la dirección opuesta, es decir, hacia el aire. En el plano horizontal (plano conteniendo al eje del dipolo) el diagrama de radiación presenta dos lóbulos secundarios en la dirección hacia el interior del subsuelo, alrededor del lóbulo principal (figura 5.2).

Puede deducirse de esto que, cuanto más pequeño es el valor de la permitividad dieléctrica del medio estudiado, mayor es el ángulo β de semianchura del lóbulo, es decir, la apertura del cono de emisión que forma el lóbulo principal es mayor. Esto indica que se obtiene una mayor focalización de la energía en el caso de permitividades dieléctricas efectivas elevadas.

Por otro lado, la existencia de los lóbulos secundarios ocasiona que puedan producirse reflexiones en elementos externos al medio estudiado, como puede ser

el caso de reflexiones en puentes si se está efectuando el estudio del suelo bajo el arco del puente, o bien reflexiones laterales (en farolas, coches, etc.).

Parámetros de las antenas.

La frecuencia central de una emisión es uno de los parámetros de las antenas más importantes. Éste determina la penetración de la señal emitida en los materiales del medio a estudiar.

Otra de las características de las antenas es la anchura de banda de la emisión, centrada en la frecuencia que caracteriza al equipo. Como interesa que el pulso que emite una antena tenga una duración corta (en el caso de los aparatos utilizados para muchos de los ejemplos que ilustran este libro se sitúa entre 1 ns y 10 ns), la anchura de la banda de frecuencias tiene que ser grande. De este modo, por ejemplo, una antena que emita a una frecuencia central de 100 MHz puede estar emitiendo en una banda centrada en los 100 MHz con un ancho de banda del mismo orden magnitud, o sea, situado entre los 50 MHz y los 250 MHz.

El ancho de banda de este tipo de antenas provoca una pérdida de energía por dispersión. La atenuación de la señal para una misma frecuencia central aumenta cuando la banda de frecuencias es más ancha, haciendo que la sensibilidad del aparato y el alcance del estudio disminuya.

La frecuencia central de la emisión depende del dipolo de la antena. Este parámetro limita tanto el alcance del método (rango) como su resolución (ver capítulo 4). Las emisiones a bajas frecuencias se atenúan en menor medida que las altas frecuencias, pudiendo alcanzar con las primeras profundidades mayores de estudio. Por otro lado, debido a que tienen una longitud de onda mayor que las emisiones a más alta frecuencia, la resolución obtenida es menor.

Tipos de antenas de georradar: monoestáticas y biestáticas.

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 (primer caso) y biestáticas (segundo caso).

1. Las antenas monoestáticas son a la vez emisoras y receptoras de la energía. Pueden diferenciarse dos tipos: antenas de conmutación y antenas de dos dipolos. Las primeras tienen una única espira que puede actuar como emisora y como receptora de energía. Para ello se incluye un conmutador que va modificando su actuación. Al inicio de cada traza, la antena funciona emitiendo el pulso de energía de corta duración, pasando inmediatamente a funcionar como receptora. Tras un tiempo de recepción que varía de un tipo de antena a otra, vuelve a conmutar la función y de nuevo emite un corto pulso (entre 1 ns y 100 ns), pasando a ser de nuevo receptora tras la emisión. Cuando se trabaja con este tipo de antenas habrá que tener en cuenta no superar el tiempo de conmutación cuando se selecciona el rango de estudio. Las antenas de dos dipolos presentan, en el interior de la carcasa, dos dipolos separados. Uno de ellos funciona como emisor, mientras el otro es un receptor. La separación de las dos espiras es constante, y se desplazan juntas con una única carcasa que las cubre a ambas. Las antenas monoestáticas permiten realizar con facilidad perfiles, siendo utilizadas en trabajos que requieren mayor rapidez, un número elevado de perfiles o una estructura de malla para poder analizar el medio, es decir, agrupaciones de perfiles paralelos y cruzados.
2. Las antenas biestáticas se componen de dos módulos separados. Por un lado se tiene la antena emisora y por otro la antena receptora. La independencia entre emisora y receptora permite variar la distancia entre ambas. Esta característica permite calcular velocidades aparentes de propagación de la onda, utilizando técnicas iguales a las que se emplean en prospección sísmica con estudios de punto medio común (“CMP”). También se utilizan estas antenas para estudios puntuales, obteniendo una traza en cada punto de estudio.

5.4.4. Métodos de obtención de datos con diferentes antenas.

Con las antenas monoestáticas pueden efectuarse tres tipos de adquisición de datos, dos de ellas sobre superficie y la tercera en pozos de sondeo. Las adquisiciones de datos sobre superficie pueden ser mediante perfiles o puntuales. Con las antenas biestáticas, además de los métodos anteriores, pueden aplicarse técnicas de punto medio común (“CMP”), transiluminación o reflexión de gran

ángulo (“WARR”). En pozos de sondeo estas antenas permiten realizar también estudios entre dos pozos (“*cross-hole*”).

Cada método debe seleccionarse en función del problema que se debe estudiar y los resultados que se desean.

Adquisiciones en perfiles.

Para efectuar un perfil se desplaza la antena (monoestática) o las dos antenas sin variar la separación existente entre ellas (biestáticas) a lo largo de una línea. Durante el desplazamiento se emite un elevado número de pulsos por segundo. Se pueden emitir desde 1 hasta 100 pulsos cada segundo. Esto permite que la adquisición de datos, aunque sea en realidad puntual se pueda considerar continua por la cantidad de trazas que se tienen en todo el perfil, dependiendo siempre de la velocidad de desplazamiento de la antena. Este desplazamiento debe realizarse a una velocidad lo más constante posible, siendo conveniente utilizar un odómetro durante la adquisición de datos. La antena puede estar situada tocando la superficie del medio que se desea estudiar, aunque no es imprescindible (figura 5.6).

Pueden obtenerse registros largos de forma rápida colocando, por ejemplo, las antenas sujetas a un coche que se desplaza a una velocidad constante (los equipos de última generación permiten una exhaustiva adquisición de datos a una velocidad de 80 Km/h). La reflexión en estos casos puede considerarse casi vertical.

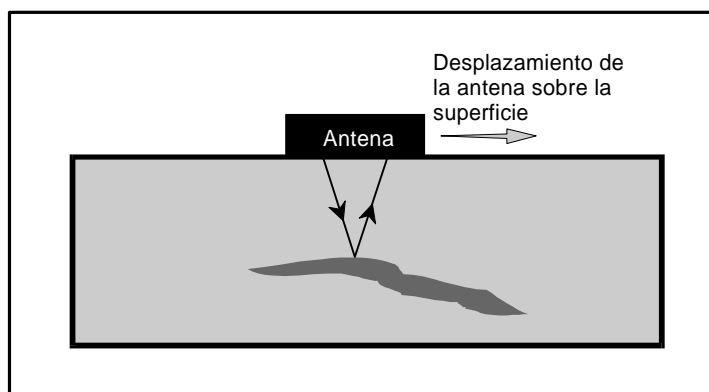


Figura 5.6. Esquema de adquisición de datos mediante perfiles.

Adquisiciones puntuales.

La adquisición de datos de forma puntual se realiza situando la antena (antena monoestática) o las dos antenas a una determinada distancia entre sí (antena biestática), en un punto dado del área de estudio. En dicho punto, y sin efectuar ningún desplazamiento de las antenas, se realiza la emisión de energía y la adquisición de datos (figura 5.7). De esta forma tenemos información del interior del medio situado en la vertical del punto donde se ha ubicado la antena. En el caso de trabajar con dos antenas biestáticas separadas entre sí una cierta distancia la información es la correspondiente a la zona central entre ambas en la que se produce la reflexión. Esta forma de adquisición de datos se suele realizar cuando el terreno impide otro tipo de prospección que implique desplazamiento de las antenas (por ejemplo en el caso de glaciares o en zonas donde la existencia de obstáculos que impide o dificulta el desplazamiento uniforme de las antenas).

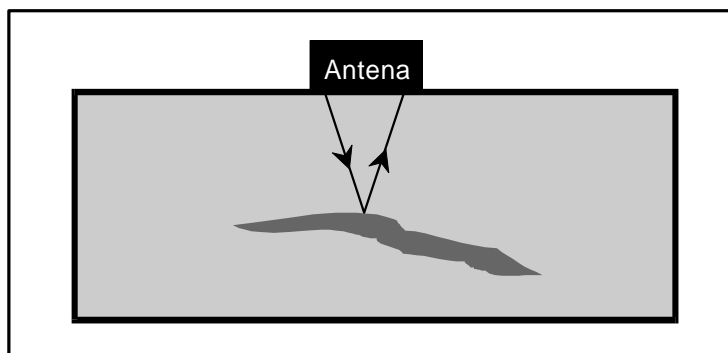


Figura 5.7. Esquema de la adquisición de datos puntual.

Punto medio común ("Common Mid Point", "CMP").

Conocidos también por el nombre de punto común en profundidad ("*Common Depth Point*", "*CDP*") o punto de reflexión común ("*Common Reflection Point*", "*CRP*"), este tipo de estudios se realiza con antenas biestáticas desplazando la emisora y la receptora en direcciones opuestas, respecto a un punto central entre ambas. Las dos antenas deben quedar siempre equidistantes a dicho punto central (figura 5.8), y al realizarse la adquisición de datos se obtiene un registro que, representado en una gráfica distancia-tiempo, tiene la forma de una hipérbola si únicamente tenemos un reflector bajo las antenas. La ecuación de esta hipérbola depende del tiempo de propagación, de la distancia entre antenas, de la velocidad de propagación de la onda por el medio (y por lo tanto de sus características

electromagnéticas) y de la profundidad a la que se localiza la superficie reflectora. En el capítulo 7 de procesado de datos se comenta la forma de trabajar con este tipo de datos y se definen las ecuaciones de la hipérbola. A partir de los datos conocidos de distancia entre antenas y de tiempos de propagación, es posible obtener los parámetros del medio (velocidad efectiva de propagación y profundidad del reflector). En el caso de tener más de una superficie reflectora bajo las antenas, el resultado en la gráfica distancia-tiempo es una hipérbola por cada una de las superficies reflectoras. La determinación de las diferentes velocidades y profundidades depende de los parámetros mencionados antes y de las velocidades y profundidades de las capas situadas por encima del reflector considerado.

Este método de prospección permite obtener una aproximación de las velocidades efectivas de propagación de la onda en diferentes materiales.

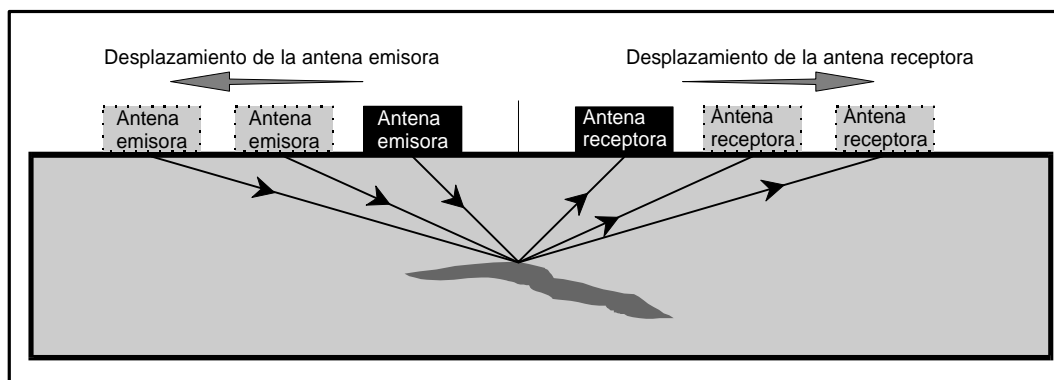


Figura 5.8. Esquema de la obtención de datos con CMP.

Los registros que resultan contienen información de diferentes ondas electromagnéticas, de manera que se puede analizar la onda directa que se ha propagado por el aire, la onda directa que se propaga por el primer medio y las diferentes reflexiones que quedan registradas con forma de hipérbolas. Las refracciones de aquellas ondas que han incidido en la discontinuidad con ángulo crítico se observan en los registros como rectas. La detección de estas ondas refractadas críticamente en las diferentes interfaces de los medios permite estimar velocidades de propagación como la inversa de la pendiente de cada una de las rectas registradas. Hay que tener en cuenta que solo se producen estas ondas cuando la velocidad de los medios en contacto aumenta con la profundidad, lo que quiere decir que la permitividad relativa disminuye. No se producen si en la

discontinuidad electromagnética la velocidad del medio inferior es menor que la del medio superior, lo que sucede a menudo el terreno (un aumento del contenido de agua de un medio hace que la velocidad de propagación de la onda electromagnética disminuya).

Transiluminación y tomografía.

Estos métodos de estudio se aplican a muros y medios que tienen dos superficies paralelas en las que se puedan situar las antenas. Suele aplicarse, con antenas de alta frecuencia, a elementos constructivos: muros, columnas, etc.; y con antenas de baja frecuencia a túneles (siempre que existan dos túneles paralelos), a minas (realizando el estudio entre dos galerías paralelas), etc. El estudio de pozos de sondeo que se comenta más adelante es una variación de la transiluminación.

En la transiluminación se coloca la antena emisora sobre una de las superficies y la receptora en la superficie opuesta (figura 5.9). Una de las antenas permanece fija sobre una de las superficies mientras que la otra se desplaza a lo largo de la superficie opuesta. La antena receptora capta la onda que se propaga de forma directa por el medio. Las variaciones en la velocidad de propagación dan información de los cambios laterales. La posición de ambas antenas y la distancia existente entre ambas debe ser conocida en todo momento, de tal forma que se puede conocer la velocidad de propagación de la onda para cada una de estas posiciones. También es posible efectuar un cálculo de atenuaciones si además de realizar medidas de tiempo de propagación se efectúan medidas de amplitud de las ondas.

Este método permite realizar tomografías con GPR (figura 5.10.a). Con la tomografía se pueden obtener imágenes bidimensionales de variaciones de velocidad dentro de un mismo medio. Estas variaciones de velocidad se corresponden con cambios o variaciones suaves de la permitividad dieléctrica efectiva, que a su vez se relaciona con cambios de material o variaciones en las condiciones de éste (humedad, zonas de fractura, compactación, etc.). También se realizan tomografías en las que se analizan los cambios de amplitud en la onda, trabajando sobre atenuaciones en lugar de hacerlo sobre velocidades.

Para obtener estos resultados se miden los tiempos de propagación de la onda entre el receptor y el emisor (figura 5.10).

En estudios tomográficos el plano entre las antenas emisora y las receptora se divide en celdas (figura 5.10.b). Cada registro es una función de la velocidad y de la longitud de cada celda que atraviesa la onda durante su propagación. Partiendo de unos valores iniciales para las velocidades de cada celda y los tiempos de propagación dentro de cada una de ellas (para el tramo de cada trayectoria que intersecta con la celda), se realiza la inversión de datos. Es necesario un sistema de ecuaciones sobredimensionado que se obtiene efectuando una medida para cada posición de la antenna emisora y de la receptora, como se indica en la figura 5.10.

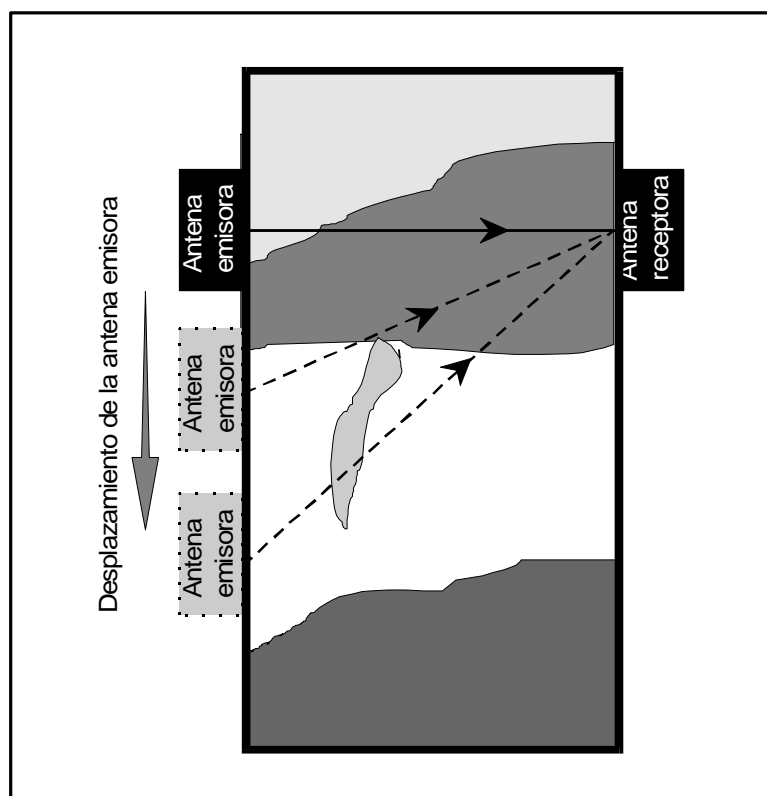


Figura 5.9. Esquema de la transiluminación. Las antenas emisora y receptora se sitúan en superficies opuestas.

Los valores de la velocidad asociada a cada celda base se ajustan mediante un proceso iterativo realizando la suma de tiempos esperados para cada trayectoria según el modelo de celdas y comparando con el resultado experimental. El resultado final de distribución de velocidades por el interior del medio se obtiene cuando la diferencia entre los tiempos calculados y observados es mínima. El

resultado final es un corte bidimensional del medio, entre la zona de emisión y la de recepción, en el que se aprecian las variaciones de velocidad. Esto permite determinar zonas de velocidad anómala. Se han realizado interesantes trabajos con este método, como el estudio del interior de la base del Nathan Hale Monument, en Connecticut (U.S.A.), realizado por Liu et al. (1998). La diferencia de velocidades determinada mediante tomografía permitió determinar que la estructura era hueca.

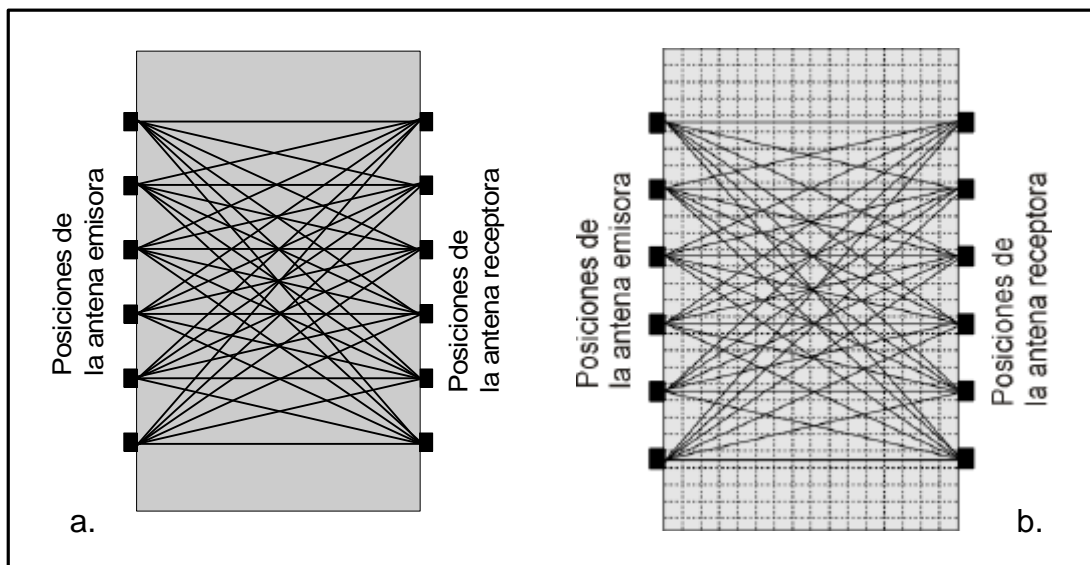


Figura 5.10. Tomografía GPR. Esquema de la realización de una tomografía con georradar (a). División del plano en celdas (b).

Reflexión y refracción de gran ángulo ("Wide Angle Reflexion and Refraction", "WARR").

Este método de estudio se realiza con antenas biestáticas. Consiste en dejar fija una de las dos (la emisora o la receptora) y desplazar la otra aumentando la distancia entre ambas. En la figura 5.11 se presenta un esquema de este método de adquisición de datos. Este tipo de aplicación se realiza en medios donde las superficies reflectoras son, aproximadamente, planas y paralelas a la superficie. En este caso, realizando la hipótesis de medios homogéneos (sin variaciones diferenciales de velocidad en la propagación de las ondas) es posible estimar las velocidades verticales de cada material entre discontinuidades. La permitividad dieléctrica efectiva del medio se calcula una vez conocida la velocidad de propagación de la onda.

Los registros obtenidos mediante reflexión de gran ángulo, como se aprecia en la figura 5.11, contienen diferentes eventos: la onda aérea (onda que se propaga directamente por el aire de una antena a otra), la onda directa (que se propaga por el medio superior), las ondas reflejadas (una por cada contraste electromagnético brusco en el medio) y las ondas refractadas críticamente siempre que se produzcan las condiciones adecuadas para que se generen (registradas como rectas en el radargrama, una por cada discontinuidad electromagnética del medio siempre y cuando la velocidad de propagación sea mayor en el medio inferior que en el superior). La onda aérea se propaga con una velocidad próxima a $c=30 \text{ cm/ns}$. La onda directa lo hace con la velocidad del primer medio, igual que la primera reflexión. Si existen reflexiones posteriores, las ondas registradas contienen información acerca de la velocidad de todos los medios que atraviesan durante su propagación. Los resultados de este método se representan en gráficas tiempo-distancia. Hay que tener en cuenta que una de las fases registradas en los radargramas es la onda directa por el aire. Los datos se procesan de forma similar a los de sísmica de reflexión.

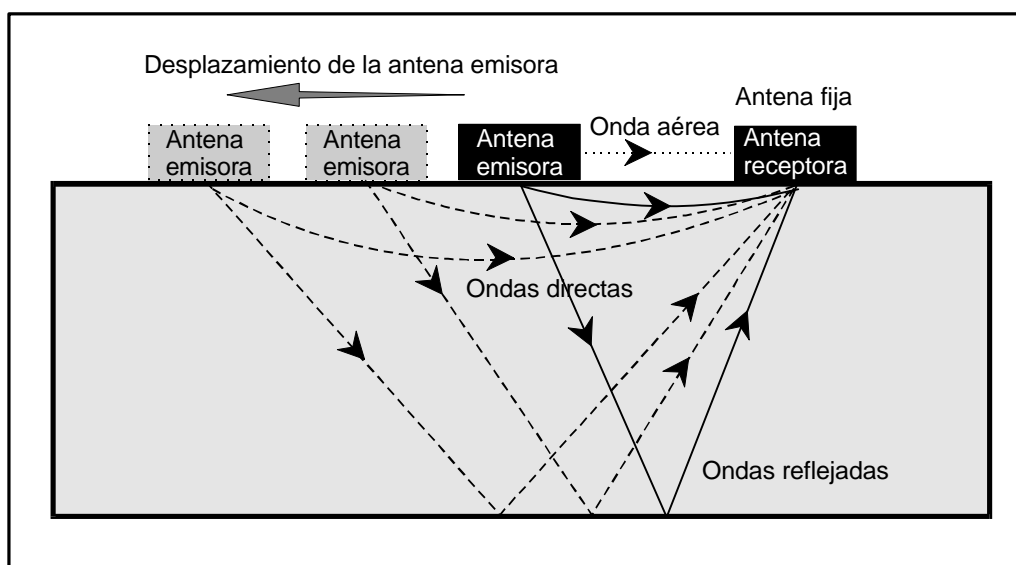


Figura 5.11. Esquema de un perfil de reflexión y refracción de gran ángulo.

Sondeos.

Para finalizar esta breve introducción a los diferentes métodos de adquisición de datos con georradar hay que hablar de las aplicaciones en sondeos. En estudios de sondeos también es posible utilizar los dos tipos de antenas: monoestáticas y

biestáticas. Ya se ha comentado que, en algunos casos (cuando existan dos sondeos paralelos), el tipo de dispositivo que puede emplearse es similar al utilizado para una tomografía o transiluminación.

En el caso de realizar un estudio de un único sondeo con una antena monoestática (figura 5.12) se debe desplazar ésta por el pozo.

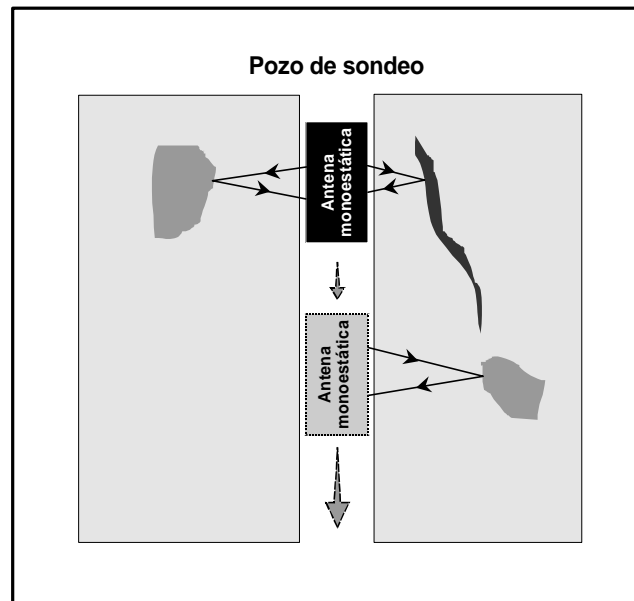


Figura 5.12. Esquema de un estudio de sondeo utilizando una antena monoestática.

Los registros se realizan de forma similar a los de perfiles. Hay que tener en cuenta la direccionalidad de la antena, ya que los radargramas pueden ser el resultado de las reflexiones en una única dirección o de reflexiones en todas las direcciones.

Con antenas biestáticas se puede proceder de igual manera que con monoestáticas (figura 5.13.a) en un sólo sondeo, o pueden utilizarse de forma similar a las tomografías (figura 5.13.b).

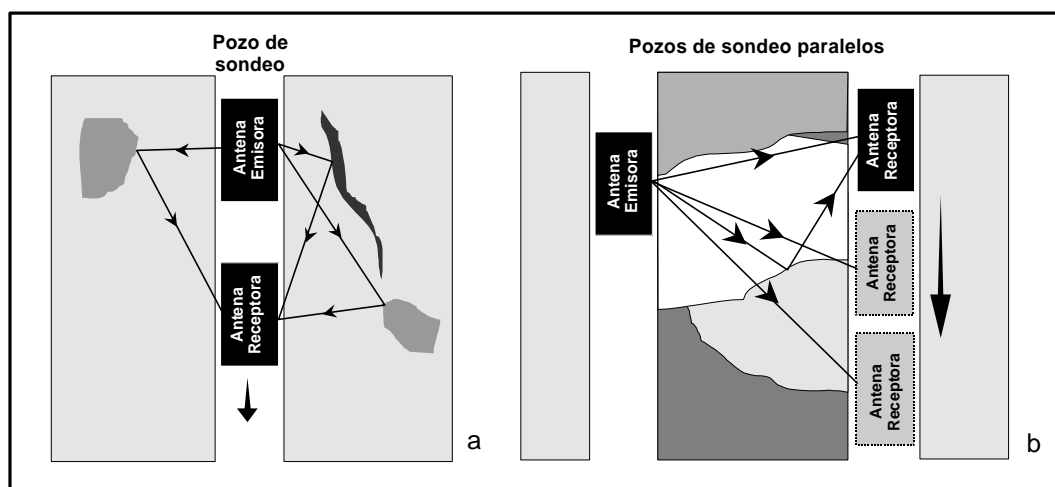


Figura 5.13. Estudio de sondeos utilizando antenas biestáticas. a) Un solo pozo. b) Dos pozos paralelos.

5.5. Equipo de radar de subsuelo utilizado.

Para finalizar este capítulo se describe el equipo empleado para realizar los trabajos prácticos y la experimentación de esta tesis: un georradar modelo SIR-10 de la casa "Geophysical Survey Systems Inc." ("GSSI"). Se analizan dos aspectos: las características físicas del equipo y las de radiación.

5.5.1. Características físicas.

Este modelo de georradar está pensado principalmente para aplicaciones en ingeniería. Está compuesto por una unidad central, modelo *MF-10*, con diversos periféricos. Uno de ellos es un monitor en color, modelo *CD-10*, que permite la visualización de los registros durante la adquisición de datos y el acceso a los diferentes menús de trabajo del equipo mediante un sencillo teclado. El cable de conexión entre la unidad central y el monitor tiene una longitud de 3 metros. Además del teclado el monitor tiene de una pequeña pantalla de 7.5 pulgadas. Otros periféricos que deben conectarse al ordenador son las antenas (pueden

conectarse hasta cuatro). De forma opcional admite la conexión de un teclado de ordenador, una impresora y un odómetro.

La fuente de alimentación para la unidad central puede ser de corriente alterna (una batería de 12 voltios) o de corriente continua (de 110 voltios o de 220 voltios) con transformador.

Unidad central.

Las funciones de la unidad central son tres: control de la emisión de pulsos electromagnéticos, control de la recepción de energía y almacenamiento de los datos. Para esto último dispone de una unidad de grabación en cinta magnética. Un programa informático permite el acceso a cada una de estas funciones dejando modificar parámetros. Con este programa se pueden determinar características de la señal emitida: número de pulsos por segundo, número de muestras por cada traza emitida, rango máximo del registro, canales con antenas conectadas, modelo de antena y velocidad de transmisión de datos. Permite también un sencillo tratamiento de datos durante el proceso de adquisición: utilización de filtros verticales (aplicados a cada una de las trazas) u horizontales (suma de trazas para una determinada ventana horizontal) y aplicación de ganancia (amplificación de la señal). Así mismo es posible determinar diferentes parámetros para el registro: punto temporal de inicio de registro e introducción de marcas de distancia (con o sin odómetro). Y parámetros de visualización de dicho registro: selección del tipo de visualización (trazas de amplitud o colores asociados a diferentes bandas de amplitud), selección de la coordenada del eje vertical (temporal si se introduce el cero en la selección de permitividad dieléctrica y espacial -profundidades calculadas a partir de la permitividad dieléctrica- si se introduce cualquier otro valor en este campo) y situación (en coordenadas) de puntos de interés en el registro. Este programa también permite la opción del almacenaje del radargrama en cinta o su salida por impresora.

La emisión de pulsos por la antena conectada se coordina en la unidad central mediante un reloj interno que emite pulsos de duración de entre 1 y 10 ns con una frecuencia de 50 kHz (Lorenzo, 1994). Cada pulso activa los dipolos o el dipolo de la antena que pasa a emitir con la frecuencia central característica de cada modelo. Mientras no emite estos pulsos, la unidad central permanece recibiendo

las señales provenientes de los diferentes reflectores del medio que se estudia. Para la recepción de las señales se utiliza una técnica de muestreo con la información que se recibe cada $2 \cdot 10^{-5}$ s. El proceso se detalla en la tesis doctoral de E. Lorenzo Cimadevila (1994). La precisión de la señal final depende del número de pulsos de reflexión utilizados para su reconstrucción, pudiendo seleccionar este parámetro desde la unidad central (trazas por segundo).

La figura 5.14 muestra la unidad central junto con el monitor del georradar SIR-10.



Figura 5.14. Fotografía de la unidad central y del monitor del georradar SIR-10 de “GSSI” (página WEB de “GSSI”: www.geophysics.com).

Antenas.

Las antenas son otra parte importante del equipo. Éstas actúan como un transductor electromagnético que transforma los impulsos eléctricos que recibe de la unidad central en una serie de pulsos u ondas electromagnéticas de corta duración que se emiten en el medio a estudiar. Las utilizadas en todos trabajos que se presentan en esta tesis son antenas monoestáticas. La ventaja de este tipo de antenas frente a las biestáticas es su mayor facilidad de manejo para trabajos de campo. El inconveniente es que no permiten efectuar la estimación de las velocidades del medio con perfiles de punto medio común o de reflexión de gran ángulo. De esta forma la estimación de la velocidad si se han empleado antenas monoestáticas debe realizarse a partir de experimentación de laboratorio o mediante el conocimiento de los materiales que componen el medio. Otra función de las antenas es captar la energía reflejada y transformarla en pulsos eléctricos que envía a la unidad central.

Cada antena se caracteriza por su frecuencia central y por la duración del pulso emitido. Las señales radiadas por una antena presentan un espectro de amplitudes centrado en una frecuencia determinada. A esta frecuencia se le llama frecuencia central de la antena. La duración de esta señal radiada es un parámetro que determina la resolución de la antena. La anchura de la banda de frecuencias del espectro de amplitudes es inversamente proporcional a la duración del pulso (ecuación 4.25 y figura 4.11). Una duración menor de la señal emitida equivale a un mayor ancho de banda alrededor de la frecuencia central.

Las antenas son direccionales. Están apantalladas en todas sus superficies excepto en aquella por la que se produce la emisión y recepción de la señal. El apantallamiento es una característica importante cuando se realiza un estudio en el interior de un edificio o en cualquier área cerrada o parcialmente cerrada. Cuando las señales, debidas a reflexiones externas al medio de estudio, alcanzan las superficies apantalladas se atenúan fuertemente y no se registran en el radargrama. Esto mejora la relación señal/ruido al eliminar los eventos procedentes del exterior del medio de interés.

Todas las antenas utilizadas en los ejemplos que se presentan en esta tesis (trabajos de campo y de experimentación) han sido fabricadas por la misma casa que la unidad central: "Geophysical Survey Systems Inc". ("GSSI"). Las frecuencias centrales de trabajo han sido 1000 MHz, 900 MHz, 500 MHz y 100 MHz. La selección, en cada caso, de la antena se ha realizado teniendo en cuenta el tipo de trabajo, el lugar de trabajo, la resolución requerida y la profundidad de penetración deseada. Para trabajos muy superficiales y que requerían precisión (interior de muros, pavimentos, etc.) las antenas seleccionadas han sido las de 1000 MHz y 900 MHz. En trabajos que requerían una penetración media (alrededor de los dos metros) la antena seleccionada ha sido la de 500 MHz (localización de elementos arqueológicos). Para mayores profundidades (hasta unos nueve metros) se utilizó la antena de 100 MHz (localización de estructuras geológicas superficiales, niveles culturales, etc.). En muchos de los ejemplos presentados se han utilizado varias antenas para obtener informaciones complementarias o para analizar zonas de características diferentes.

Las antenas de frecuencia central de 1 GHz y de 100 MHz consisten básicamente en un dipolo emisor con un conmutador que controla los tiempos de emisión de

señal y de recepción. Este sistema genera un pequeño retardo en la señal registrada que hay que tener en cuenta al analizar los datos. Se trata de antena monoestáticas de conmutación. La figura 5.15 muestra una fotografía de una de estas dos antenas. La otra se presenta en la figura 5.16



Figura 5.15. Antena de 1 GHz de frecuencia central.



Figura 5.16. Antena de 100 MHz de frecuencia central.

Las antenas de 500 MHz y de 900 MHz de frecuencia central poseen dos dipolos triangulares de media longitud de onda, uno de ellos como circuito emisor y el otro como circuito receptor. Los registros obtenidos con estas antenas no presentan retardo. Son antenas monoestáticas de dos dipolos. Estas dos antenas pueden verse en las fotografías de las figuras 5.17 (900 MHz) y 5.18 (500 MHz).



Figura 5.17. Antena de 900 MHz de frecuencia central. (Fotografía obtenida de la página WEB de "GSSI", www.geophysics.com).



Figura 5.18. Antena de 500 MHz de frecuencia central.

5.5.2. Características de radiación.

La información que los fabricantes de “GSSI” ofrecen acerca de sus antenas es escasa. La tabla 5.3 muestra las características que los fabricantes incluyen en sus catálogos: la frecuencia central del pulso, la anchura temporal del pulso (para el aire), el peso y el tamaño. A partir de la anchura de pulso indicada puede suponerse una anchura de banda de frecuencias para el aire que, en casi todos los casos coincide con el valor de la frecuencia central. Tanto la anchura del pulso como la anchura de banda son parámetros calculados y obtenidos considerando el aire como medio.

La teoría de radiación de una antena (con las mismas características que las utilizadas en este trabajo) está desarrollada con detalle en numerosos tratados, por ejemplo en Marshall et al. (1989) y en Lorrain y Corson (1972).

Modelo	Frecuencia central (MHz)	Anchura del pulso (ns)	Peso (Kg)	Tamaño (cm)
3100	1000	1	1.8	3.8x10x16.5
3101	900	1.1	2.3	8x18x33
3102	500	2	7	18x39x42
3207	100	10	13	25x96x56

Tabla 5.3. Características publicadas por “GSSI” para las cuatro antenas consideradas.

En los trabajos realizados por Glover (1987) y por Duke (1990) se realiza una descripción detallada de las antenas, de sus propiedades físicas y de los diferentes modelos de radiación. En la tesis doctoral de Lorenzo (1994) se recopila un resumen de estos dos trabajos. En ella se describen las características geométricas del dipolo para las antenas modelo 3101 y 3102, recogidas en la tabla 5.4, siendo el dipolo del tipo presentado en la figura 5.4.

Modelo	Frecuencia	Longitud (m)	Anchura (m)	Diagonal (m)
3101	900 MHz	0.146	0.102	0.178
3102	500 MHz	0.241	0.127	0.272

Tabla 5.4. Características de los dipolos de espira de las antenas 3101 y 3102 de GSSI (Duke, 1990).

También se puede encontrar información detallada sobre las características técnicas relativas a antenas en las investigaciones realizadas por Arcone en 1996 y por Roberts en 2000.

Arcone (1996) realiza un estudio en glaciares antárticos utilizando la antena modelo 3102 de GSSI. y elabora un estudio sobre dicha antena y sobre la radiación de la misma en hielo ($\epsilon_r=3.2$). La antena modelo 3102 de GSSI es una antena de dos dipolos (uno receptor y otro transmisor) separados entre sí unos 15 centímetros, confinados en dos semicilindros metálicos con el fin de apantallar las antenas para que la mayor parte de la emisión/recepción se produzca hacia el interior del medio estudiado. La frecuencia central del tren de ondas emitido en aire es de 500 MHz. El diagrama de radiación de esta antena en hielo obtenido por Arcone (1996) se muestra en las figuras 5.19 (diagrama vertical de radiación) y en la figura 5.20 (diagrama horizontal).

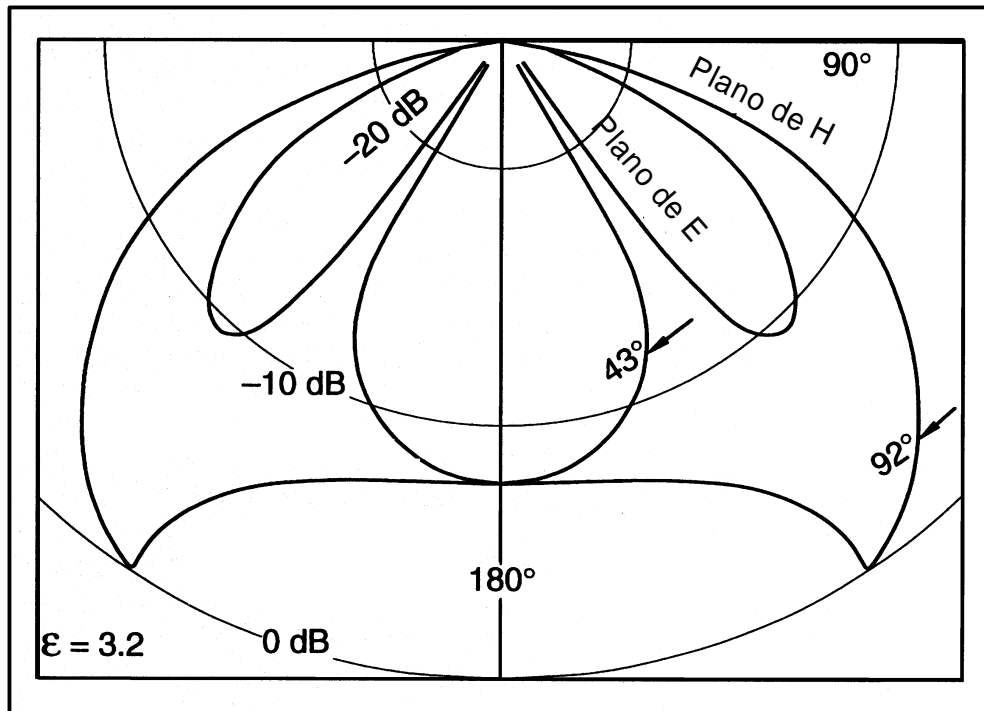


Figura 5.19. Diagrama de radiación de la antena 3102 de "GSSI" (monoestática con una separación entre dipolos de 15 cm.) en hielo, en el plano perpendicular a la superficie (Arcone, 1996).

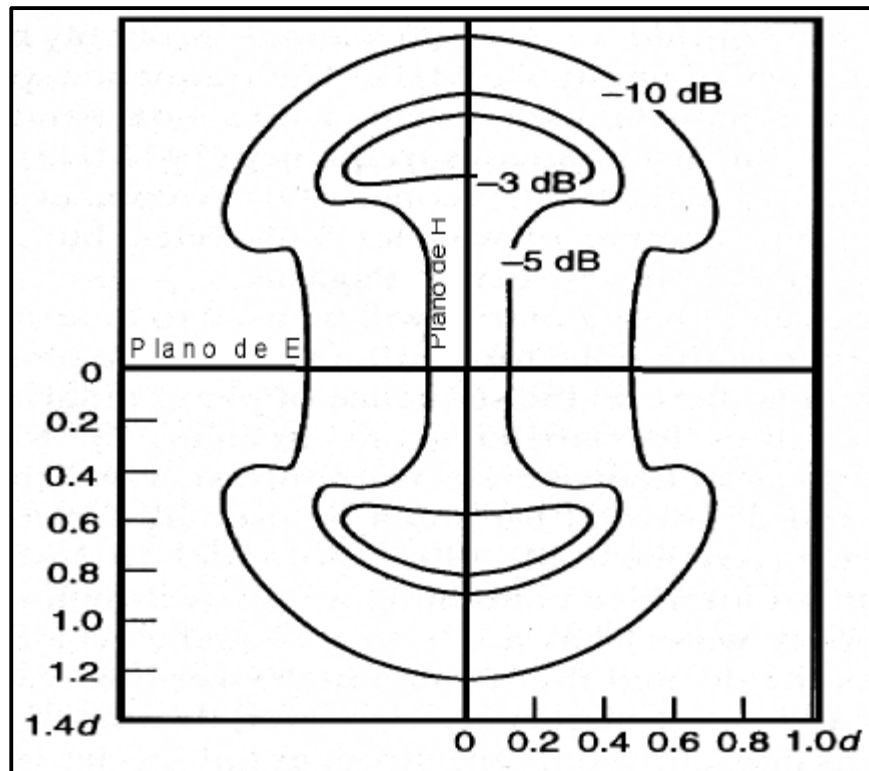


Figura 5.20. Diagrama de radiación de la antena 3102 de "GSSI" en hielo en el plano paralelo a la superficie (Arcone, 1996).

La fase de las ondas recibidas depende de la permitividad dieléctrica de los medios en contacto. Arcone (1996) considera la polaridad de estas fases mediante el signo de los cuatro primeros semiperiodos de cada evento (utilizando dos semiperiodos cuando la amplitud de la señal es pequeña). Para esta antena concluye que, en el caso de reflexión en contactos que sitúan el material de baja ϵ sobre el material de más elevada permitividad dieléctrica, las fases de la reflexión serán $+-+$ siendo las del pulso inicial $+-+$ (no se produce un cambio de fase). Mientras que en el caso de un material de pequeña ϵ situado debajo de uno con ϵ elevada (es el caso de cavidades en el interior de un medio material) se produce un cambio de fase, siendo la polaridad del evento registrado $-++$.

El diagrama de radiación que presenta Lorenzo (1994) para esta misma antena fue obtenido por Glover (1987) para la radiación de una antena en el aire de forma experimental (figura 5.21).

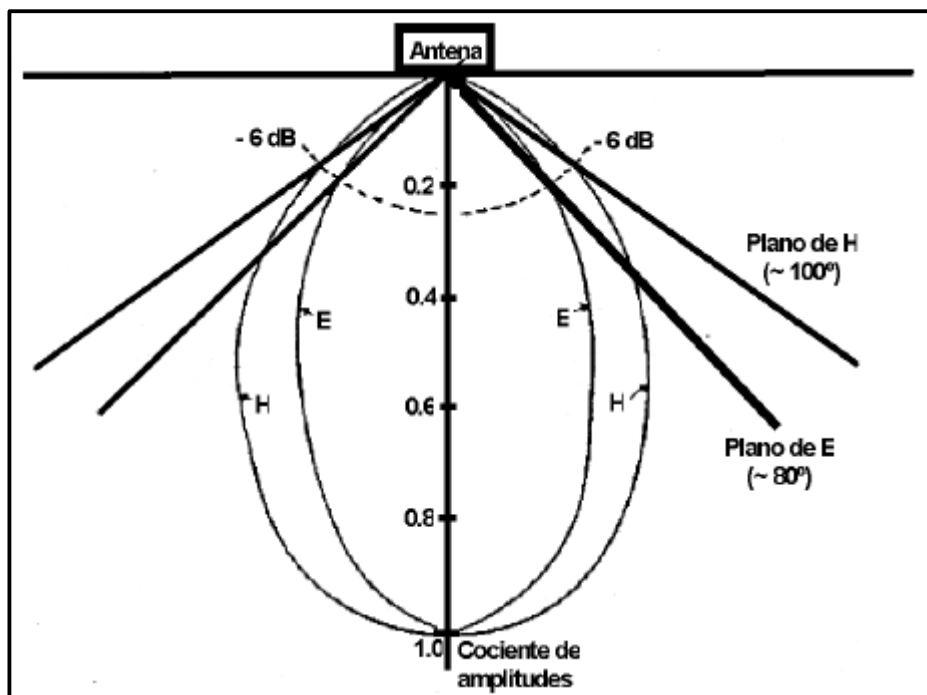


Figura 5.21. Diagrama de radiación para la antena 3102 de "GSSI" obtenido por Glover (1987) para el caso del aire ($\epsilon = 1$).

En los dos diagramas se observa que la máxima energía se radia según la normal a la superficie de la antena, presentando el mayor ángulo de radiación para la dirección longitudinal de los dipolos. La anchura de los lóbulos obtenida por

Arcone (1996) para el hielo es de 43° en el caso del campo eléctrico y de 92° para el campo magnético. Los valores que presenta Glover (1987) para el aire son de 40° a 50° para el campo eléctrico y unos 100° para el magnético. Duke (1990) estudia la variación del ángulo de anchura del lóbulo en función de diferentes valores de la permitividad dieléctrica, apreciando su disminución cuando aumenta el valor de ϵ . A partir de los resultados de los distintos autores y considerando la focalización de la energía, puede considerarse que la mayor parte de la energía radiada por la antena se concentra en un cono asimétrico de unos 90° , de tal manera que la huella de la antena es una elipse.

En la figura 5.22 se presenta un pulso obtenido con la antena mencionada. El medio de propagación es aire y la reflexión se produce en una plancha metálica situada a 1 metro de distancia. Se pueden observar sus características: un impulso inicial generado para marcar el inicio de la señal (A), un pulso debido al acoplamiento entre el transmisor y el receptor (onda directa propagada por el aire) (B) y las reflexiones en las superficies de contacto (C). En la reflexión que aparece en la figura no ha habido cambio de fase, siendo el signo del evento reflejado igual al del evento causado por el acoplamiento de la señal.

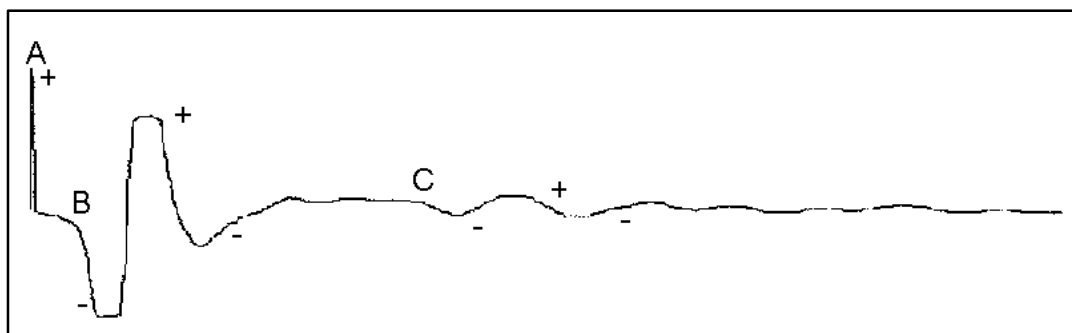


Figura 5.22. Traza de georradar obtenida con una antena de dos dipolos de frecuencia central 500 MHz. La propagación se ha producido en aire y la reflexión en una plancha metálica. Los eventos observados son: evento de inicio de registro (A), onda directa aérea (B) y reflexión en la placa metálica (C). No se ha producido cambio de fase entre la onda directa y la reflexión.

En la figura 5.23 se presenta el contenido de frecuencias de la traza de la figura 5.22. Se aprecia el ancho de banda centrado en los 500 MHz aproximadamente, de anchura dos veces la frecuencia central. Las amplitudes son valores relativos a la amplitud en el foco.

Glover (1987) también analiza la antena de 1 GHz obteniendo para ella el diagrama de radiación que se presenta en la figura 5.24 y que incluye Lorenzo (1994) en su tesis doctoral.

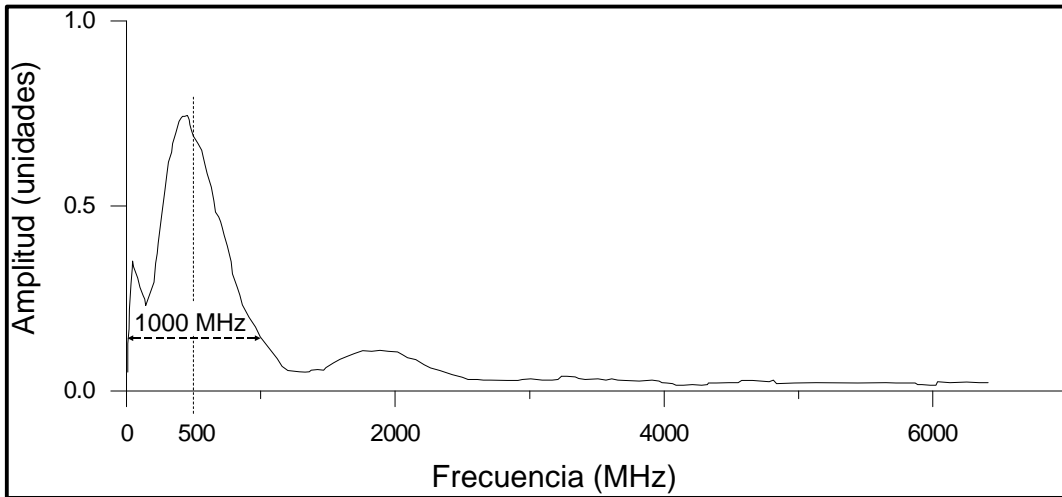


Figura 5.23. Espectro de amplitudes para la traza de la figura 5.22. El espectro está centrado en 500 MHz y tiene un ancho de banda de, aproximadamente 1000 MHz.

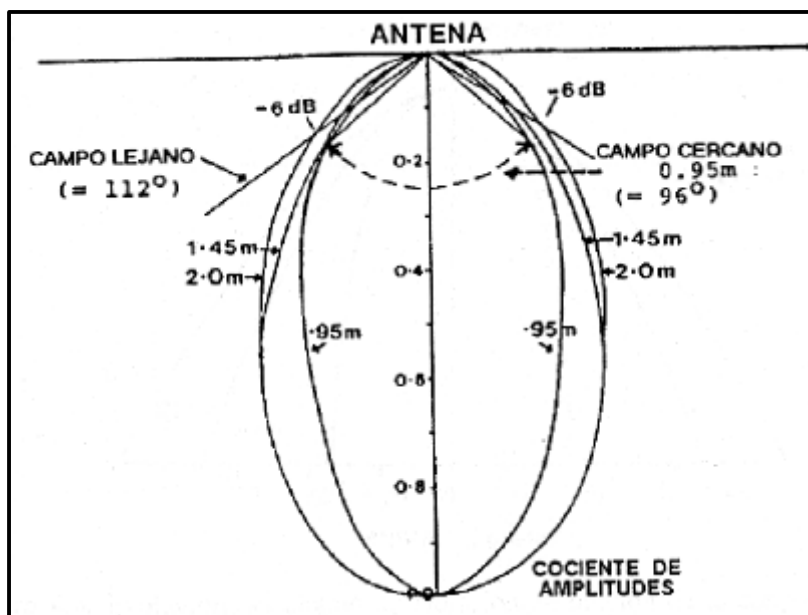


Figura 5.24. Diagrama de radiación obtenido por Glover (1987) para la antena 3101 de "GSSI" en el aire.

La figura 5.25 muestra la forma del pulso emitido por las antenas 3101 de "GSSI" (de 900 MHz de frecuencia central) y 3100 (1000 MHz). En los dos casos la duración del pulso es aproximadamente del orden de 1 ns.

En las figuras 5.22, 5.25 y 5.26, aparece un impulso al inicio de la traza. Es una señal electrónica que indica el comienzo del registro y en las cuatro gráficas está situada a los 0 ns.

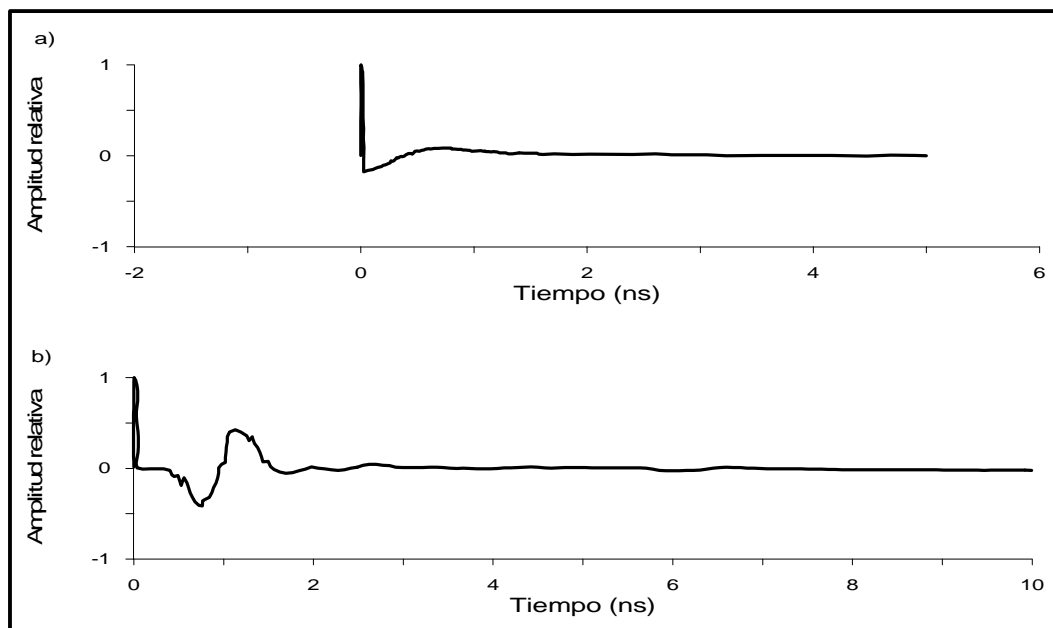


Figura 5.25. a) Pulso directo de la antenna de 3100 (1 GHz), y b) De la antenna de 3101 (900 MHz).

La figura 5.26 muestra los pulsos de las antenas 3207 (100 MHz) y 5106 (200 MHz).

En los cuatro casos la onda mostrada se ha obtenido emitiendo en el aire, sin reflector o con un reflector a cierta distancia de la antenna, de forma que se trata principalmente de la onda directa o el acoplamiento entre dipolos y del ruido interno de la antenna. Esto permite observar la forma de la señal de la antenna y su duración. La duración de los pulsos es menor para frecuencias más altas, siendo de unos 2.2 ns para la antenna de 500 MHz, de 1.1 ns para la antenna de 900 MHz, de 1 ns para la antenna de 1 GHz, de 5 ns para la de 200 MHz y de 10 ns para la de 100 MHz.

En la traza de la antenna de 900 MHz (figura 5.25) aparece claramente la onda directa que se propaga por el aire entre los dos dipolos. También puede observarse una reflexión situada a los 6 ns de tiempo doble de propagación, producida por una pared situada aproximadamente a 1 metro de distancia de la antenna (figura 5.25.b).

La traza de la figura 5.26.a es altamente ruidosa debido al acoplamiento que se ha producido entre el ruido de la antena (señal emitida y reverberaciones internas) y la reflexión en una superficie próxima (el suelo). Esto ha ocurrido porque se trata de una antena no apantallada, por lo que emite por distintas superficies, de manera que se producen fuertes reflexiones laterales externas.

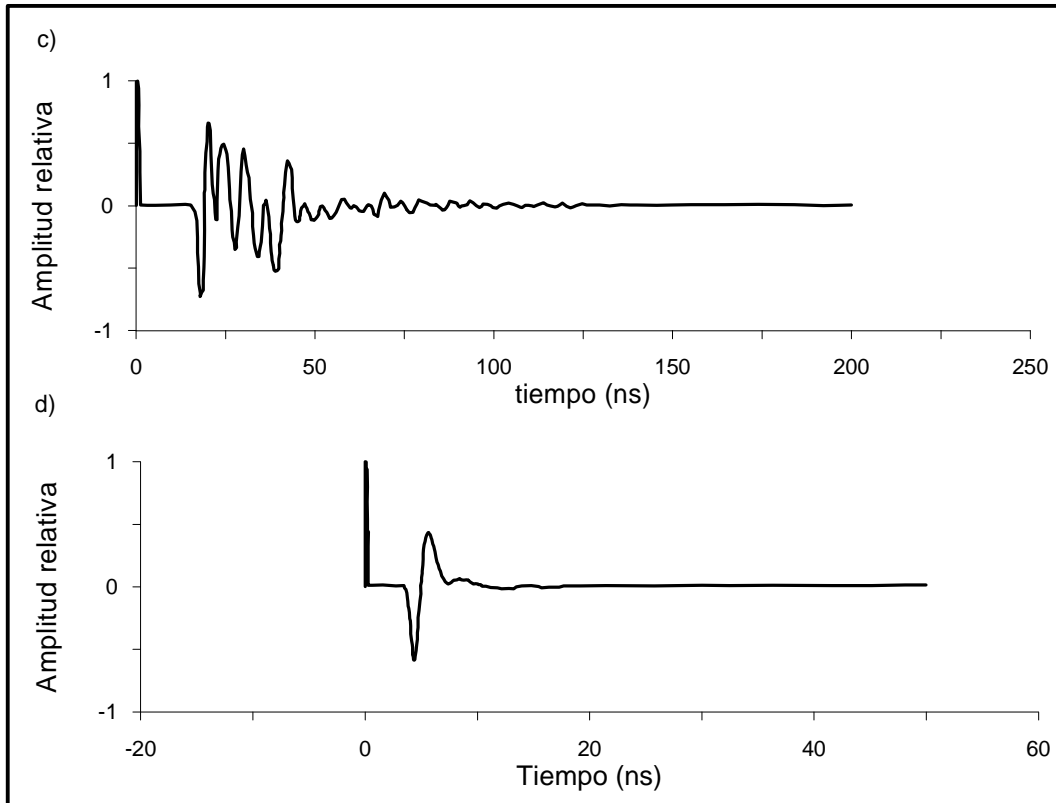


Figura 5.26. Trazas de una emisión en el aire de las antenas de c) 100 MHz y d) 200 MHz.

En las figuras 5.27, 5.28, 5.29 y 5.30 se presentan los espectros de amplitud de las cuatro trazas de las figuras 5.25 y 5.26. En los cuatro casos, al igual que ocurría con la antena de 500 MHz ya analizada, el ancho de banda es aproximadamente dos veces el valor de la frecuencia central.

Los espectros aquí mostrados son de las trazas obtenidas radiando hacia el aire (medio sin reflectores), de forma que corresponden con la frecuencia de la onda producida por acoplamiento entre el emisor y el receptor. Los resultados se corresponden con lo que indica el fabricante de las antenas.

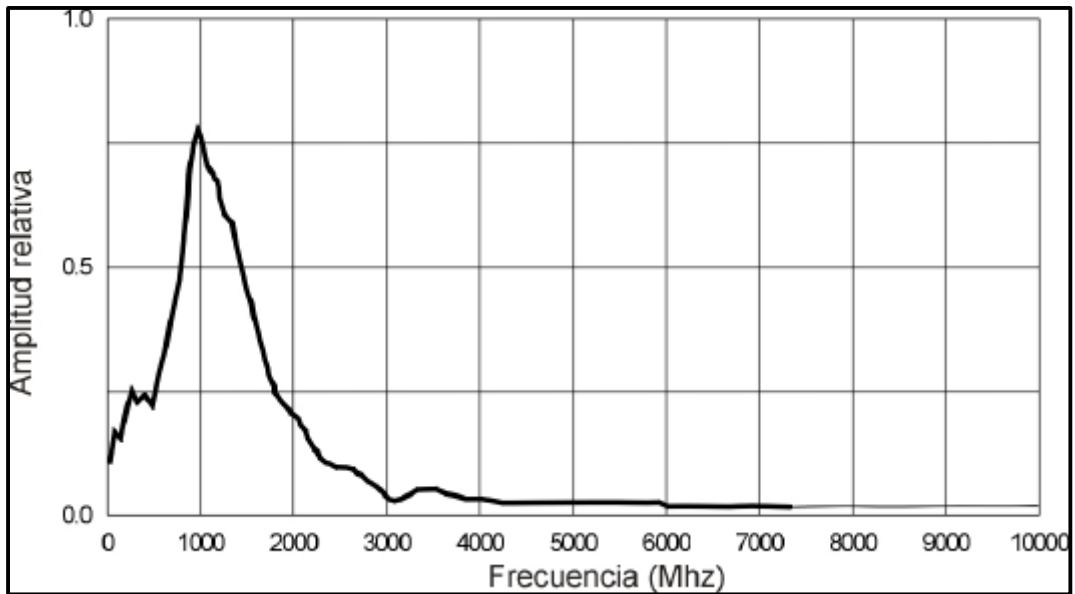


Figura 5.27. Espectro de amplitudes para el pulso de la figura 5.25.a (antena 3110, de 1 GHz).

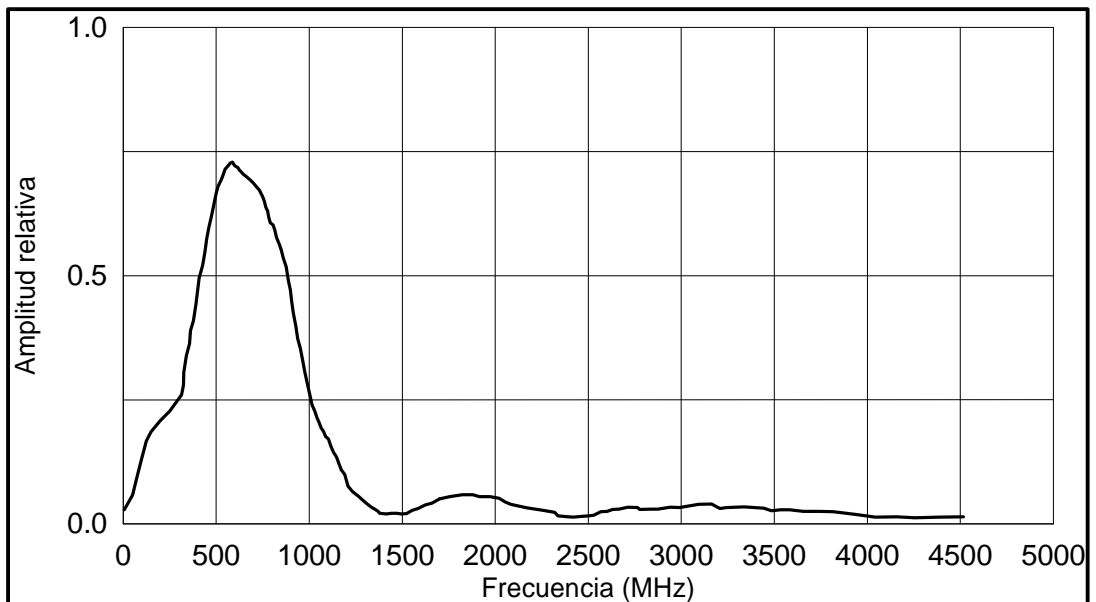


Figura 5.28. Espectro de frecuencias para el pulso de la figura 5.25.b (antena 3101, de 900 MHz).

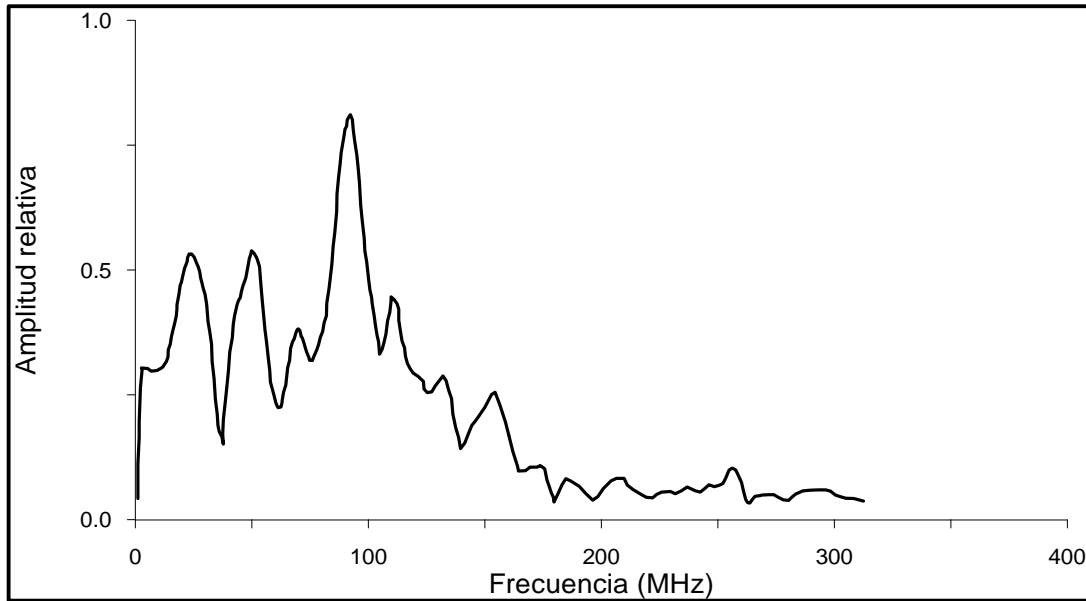


Figura 5.29. Espectro de frecuencias para el pulso de la figura 5.26.a (antena de 100 MHz).

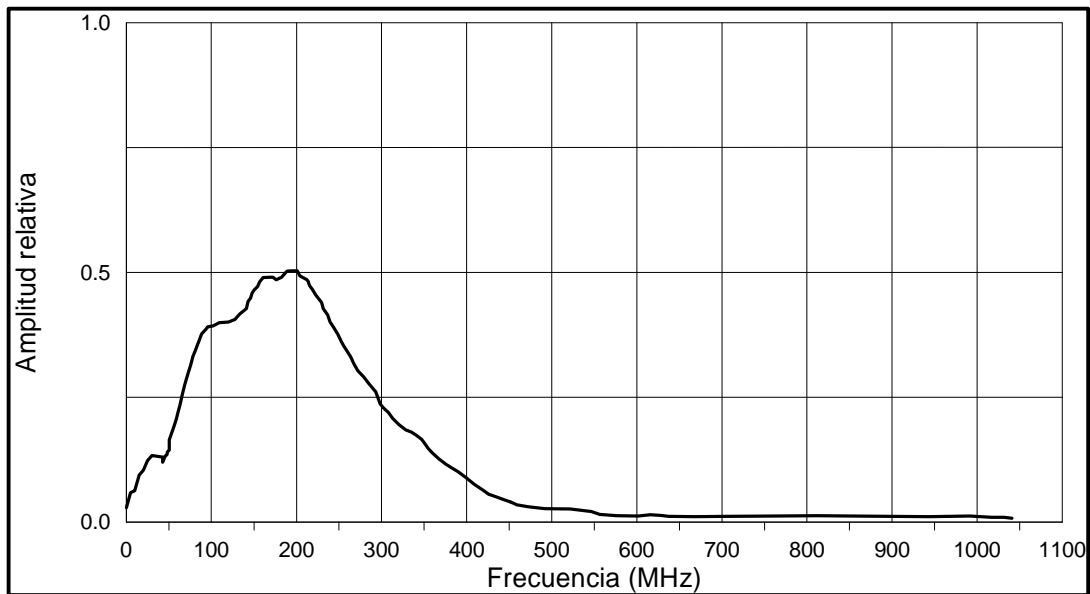


Figura 5.30. Espectro de frecuencias para el pulso de la figura 5.26.b (antena de 200 MHz).