

El Método de Georadar

Néstor Bonomo y Matías de la Vega

4.1. Introducción

El presente capítulo se dedica al método electromagnético de georadar -GPR de aquí en más por *ground penetrating radar*. Este método frecuentemente permite detectar y ubicar estratos y objetos enterrados con alta precisión, obteniéndose mapas detallados del subsuelo. Las prospecciones de GPR con objetivos arqueológicos normalmente requieren de tiempos relativamente cortos, pudiendo ser realizadas con costos razonables y bajo condiciones no destructivas de investigación. Por sí mismo o en conjunción con los otros métodos geofísicos de prospección, el GPR constituye una poderosa herramienta para la investigación arqueológica (Conyers 1997, Leckebusch 2003).

En las primeras secciones de este capítulo se presentan someramente los principios del método de GPR y se discute cómo diseñar una adecuada prospección orientada a la detección y localización de objetos arqueológicos específicamente. Luego se describen los principios básicos del procesamiento de los datos adquiridos. Por último, se explican las principales formas de visualización de los datos procesados y las técnicas básicas para la interpretación de los mismos.

4.2. Generalidades del Método de Georadar

4.2.i Bases del método

En el método de georadar se emiten pulsos electromagnéticos desde la superficie del suelo, los que se propagan dentro del mismo y se reflejan en las discontinuidades que hallan a su paso. La energía de los pulsos reflejados se mide sobre la superficie mediante dispositivos receptores. Por un lado el tiempo que tarda el pulso desde que es emitido hasta que es detectado en la superficie da una medida de la profundidad de un dado reflector, conocidas las posiciones de la fuente y del receptor, y la velocidad de propagación de los pulsos en el tipo de suelo particular. Por el otro, la comparación de las amplitudes de los pulsos emitido y recibido, brinda información adicional acerca de la composición del subsuelo.

Una disposición típica para una prospección con radar consiste en un par de antenas: una emisora y otra receptora, ubicadas ambas sobre la superficie del suelo. Emisor y receptor son desplazados conjuntamente sobre toda el área de interés, obteniéndose para cada posición de los mismos el tiempo que tarda el pulso en recorrer los trayectos de ida y vuelta hasta cada reflector. De esta manera se estiman las profundidades de los reflectores para cada posición sobre la superficie.

En los equipos de georadar más utilizados las antenas emisora y receptora se encuentran en la misma unidad o caja; incluso ambas funciones de emisión y recepción pueden ser realizadas por una única antena. Esta configuración de emisor y receptor y la metodología asociada son referidas como monoestáticas. Alternativamente, las antenas emisora y receptora pueden ubicarse en cajas distintas, en un montaje denominado biestático.

Para describir el funcionamiento básico del método, en la Figura 4.1 se muestra una secuencia en la cual el emisor y el receptor son desplazados conjuntamente sobre el suelo, emitiéndose pulsos y midiendo las correspondientes señales reflejadas. Para cada posición de emisión se muestra la correspondiente señal recibida como función del tiempo. Este tipo de gráficos se denomina traza o barrido *-trace o scan*. En cada caso, los tiempos de ida y vuelta t_{i-v} registrados por el receptor para los pulsos recibidos se vinculan con las profundidades p de los reflectores según la siguiente expresión matemática:

$$p = t_{i-v}v/2 \quad (4.1)$$

donde v es la velocidad de propagación promedio a lo largo del recorrido. En la ecuación (4.1), el factor 2 se debe a que el tiempo de tránsito entre el sistema de GPR y la superficie de interés es la mitad del tiempo de ida y vuelta. Por ende, mediante la ecuación (4.1) se obtiene la profundidad de los reflectores para cada posición sobre la superficie, una vez que se han medido en las correspondientes trazas los tiempos t_{i-v} para los pulsos reflejados, y conocida la velocidad v .

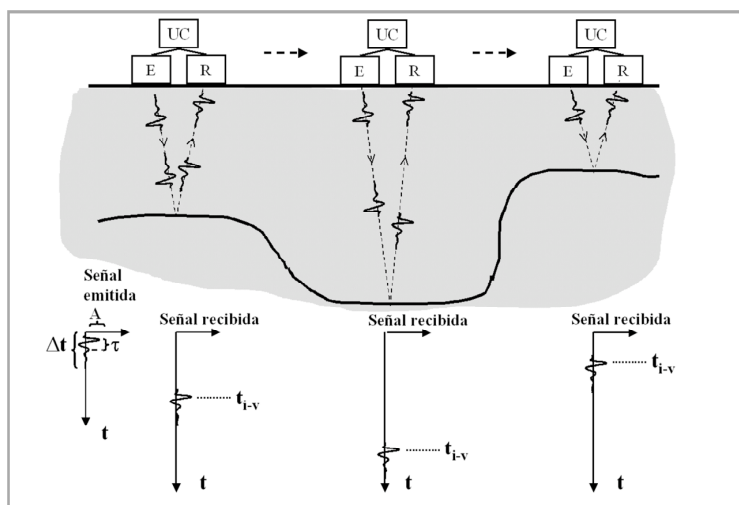


Figura 4.1. Secuencia en la cual un emisor y un receptor son desplazados conjuntamente sobre el suelo, emitiendo pulsos y midiendo las correspondientes señales reflejadas en una interfaz con profundidad variable. Para las tres posiciones esquematizadas en la figura se muestra la correspondiente señal recibida como función del tiempo, indicándose el tiempo de ida y vuelta t_{i-v} . También se muestra la señal emitida como función del tiempo. Esta se caracteriza por su extensión temporal t , amplitud A y período temporal τ .

La aplicación del método de georadar en sus versiones monoestática o biestática con cobertura simple *-single fold*, tal como la de la Figura 4.1- en general permite obtener planos verticales e incluso planos 3D del subsuelo con alta resolución de los reflectores enterrados. Alternativamente, se pueden utilizar otras metodologías. En el caso de cobertura múltiple *-multiple folding*- se utiliza una antena emisora y otra receptora dispuestas en montaje biestático. Estas usualmente son ubicadas en forma simétrica a ambos lados de un punto fijo central -la distancia entre ambas antenas se denomina *offset*. Una vez adquirida esta traza, ambas antenas se desplazan una distancia fija y en sentidos opuestos respecto de dicho centro, adquiriéndose una segunda traza. El proceso se repite hasta adquirir un conjunto de trazas -una para cada valor de *offset*-, todas ellas relacionadas con un mismo punto medio común; de esta manera se obtiene una gran cantidad de información para el punto medio común seleccionado. Luego el proceso completo se repite para una posición media común distinta, hasta cubrir el área de interés.

En algunos casos es apropiado utilizar mediciones de tipo *borehole*. En este caso el receptor, el emisor o ambos se desplazan verticalmente dentro de perforaciones en el suelo, generando así imágenes por transmisión. Este método es poco utilizado en arqueología debido a su potencialidad destructiva, limitándolo normalmente a situaciones en las cuales ya se dispone de desniveles adecuados para ubicar las antenas.

4.2.ii Componentes principales de un equipo de GPR

Los pulsos de georadar son producidos mediante circuitos electrónicos que alimentan una antena emisora. El dispositivo emisor se ubica en una primera caja vinculada mediante un cable con una segunda caja en la cual se aloja la unidad de control. Con esta unidad interactúa el operador. El dispositivo receptor puede ubicarse en la misma caja que el emisor, o diferenciado en una tercera caja, que a su vez se conecta mediante cable con la unidad de control o con el dispositivo emisor. Todas estas unidades en general cuentan con mecanismos que hacen más cómodos su traslado y operación -por ejemplo, ruedas, manijas, arneses, etc.

Mediante la unidad de control es posible definir el lapso de tiempo durante la cual se van a registrar datos provenientes del subsuelo, cuántos datos se registran, etc. A veces, esta unidad cuenta con una pantalla incorporada y software para la visualización de datos, lo cual permite un análisis preliminar de los datos prácticamente en simultáneo con su adquisición. El procesamiento y el análisis precisos de los datos adquiridos se realizan mediante software luego de haber transferido los datos a una computadora.



Figura 4.2.
Componentes de un equipo de GPR.

En la Figura 4.2 se muestra un equipo de GPR, en el cual el emisor y el receptor se ubican en una misma unidad. Esta es desplazada manualmente por el operador. La unidad de control yace sobre el piso y cuenta con una interfaz gráfica que permite observar resultados preliminares.

4.2.iii Procesos físicos que modifican las señales de GPR que se propagan en el suelo

Cada pulso emitido se caracteriza por los siguientes parámetros físicos fundamentales: frecuencia temporal f , o, simplemente, frecuencia- amplitud, polarización y extensiones espacial y temporal. Por ejemplo, en el caso de la Figura 4.1 los pulsos emitidos poseen una extensión temporal t y una amplitud A , ambas señaladas en la misma. El lapso de tiempo entre dos lóbulos contiguos del mismo signo se denomina período temporal, y lo simbolizamos mediante τ . Este parámetro se relaciona con la frecuencia temporal f a través de la siguiente fórmula:

$$f = 1/\tau \quad (4.2)$$

Por ende, la frecuencia temporal es la cantidad de veces que vibra el pulso por unidad de tiempo. Otro parámetro que mencionaremos a menudo es la longitud de onda, que simbolizamos mediante λ , la cual se define como la distancia espacial entre dos lóbulos del mismo signo. Esta se relaciona a la frecuencia y a la velocidad de propagación en el medio según la expresión:

$$\lambda = v/f \quad (4.3)$$

Asimismo, la propiedad de polarización se vincula con la dirección en la cual el pulso vibra en el espacio. Por último, la extensión espacial se define como un análogo de la extensión temporal antes mencionada. Algunas de estas características fundamentales, como la polarización y la extensión espacial, quedan establecidas de antemano por la forma en que fue construido el sistema de control y la antena emisora. Otras se pueden establecer inicialmente a través de la unidad de control, como son los casos de la amplitud y la frecuencia. El pulso, una vez emitido, se propaga en el suelo con independencia del sistema que lo generó. A medida que el mismo avanza, las características del pulso son modificadas debido a la interacción con el suelo a través de distintos mecanismos físicos. Estos mecanismos serán brevemente descriptos en esta sección. A través de los mismos, los pulsos reciben la información vinculada con las características de la porción de suelo que transitan, la cual va a ser recibida y luego procesada e interpretada durante las etapas de procesamiento y análisis de datos.

La mayoría de los sistemas de radar utilizados en investigaciones arqueológicas emiten pulsos con extensiones temporales pequeñas. En general, la antena emisora es diseñada para que dichos pulsos sean emitidos en una dirección perpendicular a la superficie del suelo y de modo que los mismos no se extiendan en el espacio más allá de una región de forma aproximadamente cónica la cual se proyecta por debajo del emisor (Figura 4.3.I) y que se denomina huella. Esto obedece a la necesidad de "ilumi-

nar" con la mayor intensidad posible aquellas discontinuidades que se ubican inmediatamente por debajo del sistema, respecto de otras que pudieran ubicarse hacia zonas laterales. Como se observa en la Figura 4.3.II, cerca de la fuente emisora el pulso ilumina una pequeña área mientras que a profundidades mayores dicha área aumenta considerablemente. Si se consideran dos superficies de interés, ambas de por ejemplo 1cm^2 , separadas por una distancia d , la más distante será iluminada con una intensidad mucho menor que la más cercana -la tasa de decaimiento es $1/d^2$. Es así que a medida que el pulso se propaga en el suelo el mismo ilumina áreas iguales cada vez con menor intensidad. Este primer fenómeno, es consecuencia de la divergencia geométrica del campo electromagnético.

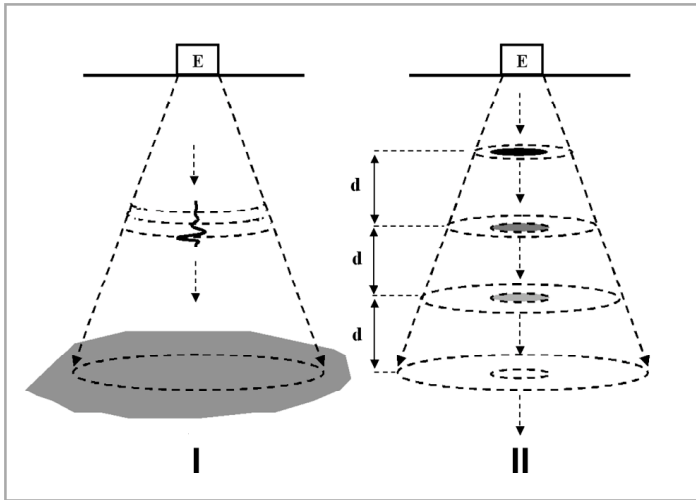


Figura 4.3. I: Esquema de la región iluminada por una señal de GPR. II: Disminución en la intensidad que ilumina un área constante con el aumento de la profundidad, a medida que ésta se incrementa en un valor fijo d .

Por lo que acabamos de decir, un pulso que se refleja en un reflector profundo y retorna hacia el receptor cuenta con menos energía por unidad de área que si se refleja en uno superficial. Si la discontinuidad que produce dicha reflexión fuera suficientemente profunda, el pulso que retorna podría no ser detectado por el sistema receptor debido a su bajísima intensidad por unidad de área. El límite de profundidad hasta el cual un reflector puede ser detectado se denomina profundidad de penetración. Este límite depende no sólo de la divergencia geométrica de la señal sino también de otros fenómenos físicos, tal como veremos.

El fenómeno de absorción produce una pérdida de intensidad en el pulso a medida que el mismo se propaga como consecuencia de la transformación de parte de su energía electromagnética en calor. La principal magnitud física que determina el fenómeno de absorción es la conductividad eléctrica, acerca de la cual no nos extendemos por el momento. Cuanto mayor distancia recorre el pulso, más disminuye su intensidad debido a la absorción. El grado de absorción depende de las características

del medio particular, en especial de la humedad. A mayor grado de humedad mayor absorción. Asimismo, la absorción aumenta para frecuencias mayores del pulso.

En general, en los sondeos con georadar no es conveniente una absorción alta, pues la misma reduce la profundidad de penetración impidiendo investigar zonas profundas. Sin embargo, en algunos casos en los cuales sólo interesan objetivos superficiales, las diferencias en la absorción que ocurran en distintas posiciones sobre el campo pueden ayudar en la interpretación del subsuelo. Por ejemplo, las señales adquiridas sobre un muro de adobe enterrado pueden presentar una mayor atenuación que las adquiridas sobre el sedimento que lo rodea, debido a una mayor proporción de arcillas en la composición del primero, las cuales son buenas absorbentes de la radiación electromagnética de georadar. Por ende, la diferente atenuación que se observe en ambas zonas puede ser un indicador de la existencia de tal tipo de construcción.

Es un hecho conocido que cuando un pulso electromagnético incide sobre una discontinuidad, como resultado, se generan dos pulsos que emergen de la misma -Figura 4.4.I. Puede pensarse que una parte del pulso que ha incidido sobre la superficie de discontinuidad se reflejó, como en un espejo, y que la otra parte se transmitió a través de la misma. La permitividad eléctrica⁽¹⁾ y la permeabilidad magnética son las magnitudes físicas que determinan el fenómeno de reflexión y transmisión. Como la mayoría de los materiales que se encuentran en las capas accesibles con un GPR poseen permeabilidad magnética similar a la del vacío, la dependencia respecto de esta muchas veces no se tiene en cuenta.

Si un pulso incide sobre la superficie de discontinuidad -Figura 4.4.II- con un ángulo θ_p medido respecto de la dirección perpendicular a dicha superficie, los pulsos reflejados y transmitidos se alejan formando ángulos θ_r y θ_t , respectivamente, ambos medidos respecto a la referencia mencionada. Las relaciones matemáticas que vinculan estos ángulos con las permitividades relativas ϵ_A y ϵ_B y las permeabilidades relativas μ_A y μ_B de ambos medios son las siguientes:

$$\sin(\theta_i) = \sin(\theta_r) \quad (4.4)$$

$$\frac{\sin(\theta_i)}{\sqrt{\epsilon_A \mu_A}} = \frac{\sin(\theta_r)}{\sqrt{\epsilon_B \mu_B}} \quad (4.5)$$

La primera (4.4) es la ley de reflexión e indica que el ángulo con el cual se ha reflejado el pulso es el mismo con el que ha incidido. La expresión matemática (4.5) es la ley de Snell que indica que el ángulo de transmisión difiere del ángulo de incidencia. Esta diferencia se hace mayor para altos contrastes en las permitividades y en las permeabilidades de los medios ubicados a ambos lados de dicha interfaz y para ángulos de incidencia grandes.

Las ecuaciones (4.4) y (4.5) dan las direcciones en las cuales se propagan los pulsos que resultan del proceso de reflexión-transmisión, para un ángulo de inciden-

¹ La permitividad es la propiedad física que describe cómo el campo eléctrico modifica y a su vez es modificado por el medio. La permeabilidad es el equivalente correspondiente al campo magnético.

cia dado y para parámetros del subsuelo conocidos. Análogamente, es posible obtener ecuaciones matemáticas que calculen las amplitudes de los pulsos que resultan, como funciones de los parámetros mencionados. En el caso más sencillo de incidencia aproximadamente normal ($\theta_i \cong 0^\circ$) el cociente entre la amplitud reflejada y la incidente R está dado por:

$$R = \frac{\sqrt{{}_A\epsilon_A} - \sqrt{{}_B\epsilon_B}}{\sqrt{{}_A\epsilon_A} + \sqrt{{}_B\epsilon_B}} \quad (4.6)$$

$$T = 1 - R$$

A partir de estas ecuaciones puede verse que cuanto mayor contraste presentan la permitividad y la permeabilidad relativas en dicha interfaz, más intensa es la señal reflejada y menos intensa la transmitida. Recíprocamente, cuanto menor es el contraste, la señal reflejada es más débil y la transmitida más intensa. Es por ello que si no hay contraste suficiente, la señal reflejada en una dada superficie de discontinuidad puede no ser percibida en el detector y por lo tanto la interfaz correspondiente no ser detectada. Por el contrario, si el contraste es grande, la interfaz va a ser detectada con facilidad. Asimismo, si el cambio en la permitividad o en la permeabilidad no se produce en forma abrupta, es decir, si se produce gradualmente a lo largo de cierto espesor, es probable que la señal reflejada resulte débil. Si el espesor fuese suficientemente grande, la señal reflejada podría ser directamente inexistente.

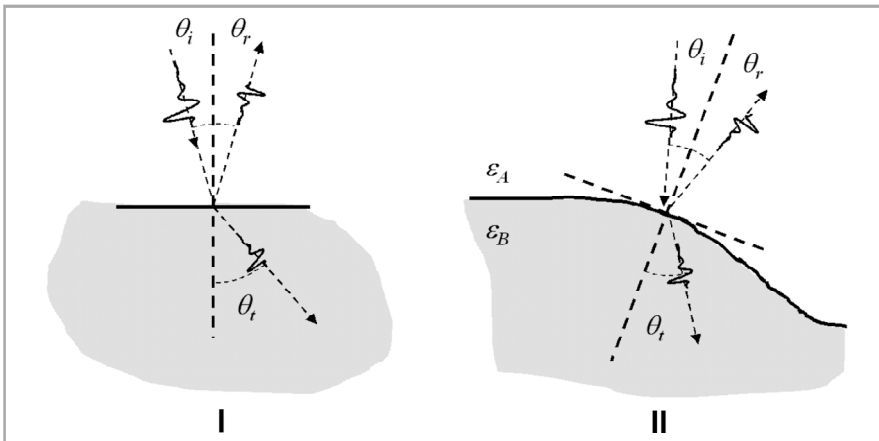


Figura 4.4. Esquema de la reflexión y la transmisión de un pulso electromagnético en una interfaz que separa dos medios con distinta permitividad. Los ángulos de incidencia θ_i , de reflexión θ_r y de transmisión θ_t son medidos respecto de la dirección perpendicular a la superficie. I: interfaz horizontal, II: interfaz inclinada.

Es común que el suelo en estudio presente más de una discontinuidad entre su superficie y la profundidad de penetración. Cuando el pulso que ha sido emitido al-

canza la primer interfaz, una porción de su energía se refleja y retorna en dirección de la superficie, mientras que otra parte se transmite en dirección de la segunda interfaz (Figura 4.5.I). Este último pulso a su vez se subdivide cuando alcanza a la segunda interfaz (Figura 4.5.II). La porción de energía que retorna en dirección de la superficie proveniente de esta interfaz más profunda es nuevamente subdividida al alcanzar la interfaz más superficial (Figura 4.5.III). De este modo, sólo una fracción pequeña de la energía inicialmente irradiada vuelve al sistema de georadar proveniente del reflector más profundo (Figura 4.5.IV), debido a las sucesivas reducciones ocurridas por reflexión-transmisión. El aspecto de las señales recibidas será entonces como en la Figura 4.5.V: los pulsos centrados en los tiempos t_{i-v1} y t_{i-v2} corresponden a las reflexiones en la primera y segunda discontinuidades detectadas, respectivamente. En el caso que el contraste en la interfaz más superficial sea muy alto, se tendrá que prácticamente toda la energía provendrá de la reflexión en la primer interfaz, siendo insignificante la intensidad del pulso que retorne proveniente de la segunda interfaz, por lo que ésta puede no ser detectada. En general, cuando las interfaces más superficiales presentan muy altos contrastes, las profundidades de penetración disminuyen.

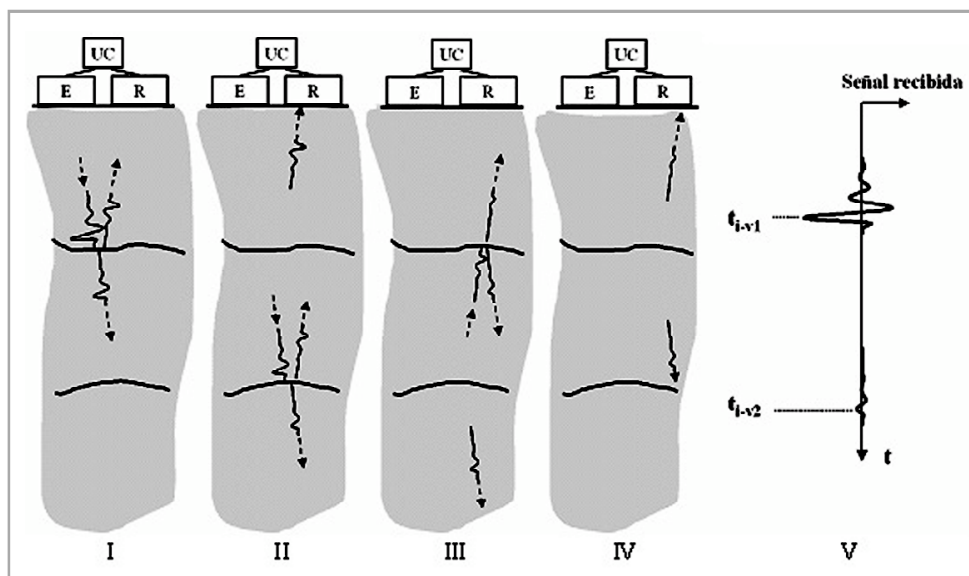


Figura 4.5

Sucesivas reflexiones y transmisiones en las interfaces del subsuelo. I: el pulso emitido se divide al alcanzar la interfaz más superficial. II: la señal que ilumina la segunda superficie se refleja y transmite. A su vez, el pulso que había sido reflejado en la interfaz superficial es detectado por el GPR. III. La señal que retorna desde la discontinuidad más profunda hacia la superficie es nuevamente subdividida al alcanzar la interfaz más superficial. Parte de la energía emitida se pierde en dirección de profundidades mayores. IV: sólo una fracción pequeña de la energía inicialmente irradiada vuelve al sistema de georadar proveniente del reflector más profundo. V: Señales recibidas como funciones del tiempo: los pulsos centrados en los tiempos t_{i-v1} y t_{i-v2} y corresponden a las reflexiones en la primera y segunda discontinuidades, respectivamente.

En casos en los cuales se tiene una superficie de discontinuidad rugosa ocurre un fenómeno llamado dispersión angular que disminuye aún más la intensidad disponible. Esto ocurre porque parte de las energías reflejada y transmitida en tal tipo de interfaz se desvían en ángulos amplios, en direcciones muy distintas de las que indican las ecuaciones (4.4) y (4.5) (Figura 4.6.I), produciéndose así una merma adicional en la energía que retorna hacia el detector. El fenómeno de dispersión también se produce en medios que presentan importantes fluctuaciones en la permitividad (Figura 4.6.II), por ejemplo, un pedregal. Este tipo de medios produce una gran cantidad de señales secundarias, debido a las múltiples reflexiones-transmisiones que ocurren en su interior, la mayoría de las cuales son percibidas por el receptor un poco desplazadas en el tiempo respecto de las señales de interés. Por lo tanto estas señales secundarias aparecen parcial o totalmente superpuestas a las primarias, resultando una composición con un aspecto muchas veces distinto al de la señal emitida. En estas situaciones, a veces directamente es imposible discernir las señales de interés. Aunque los rebotes múltiples en general producen trazas complejas, la observación de este tipo de señal podría indicar en algunos casos la presencia de estructuras de interés arqueológico tales como depósitos de residuos, por ejemplo concheros.

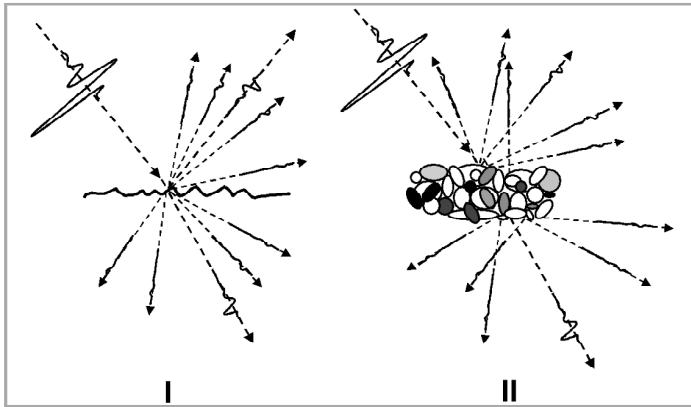


Figura 4.6. Esquemas de la dispersión angular de un pulso electromagnético en una superficie rugosa (I) y en un medio no homogéneo (II).

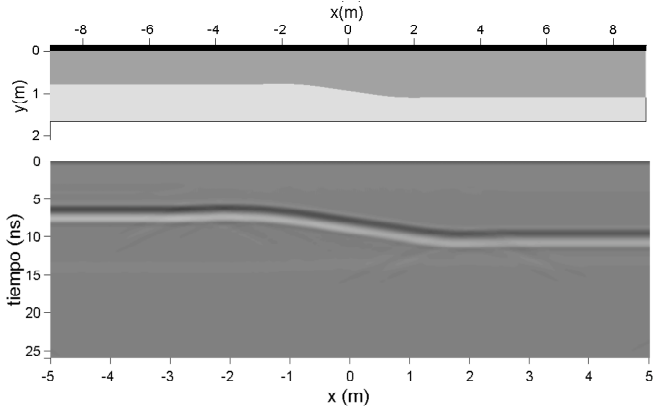
La divergencia geométrica de los pulsos que se propagan en el subsuelo, la absorción de parte de la energía a lo largo de su trayectoria, la reflexión-transmisión en las sucesivas interfaces y la dispersión de la energía en rugosidades y objetos pequeños o en discontinuidades menores producen mermas considerables en las intensidades de los pulsos que alcanzan al receptor provenientes de las distintas discontinuidades de interés. Por ende, se hace imprescindible amplificar las señales recibidas. Esto puede realizarse durante la fase de medición mediante hardware electrónico o durante el procesamiento posterior utilizando software. Dado que la atenuación es mayor para las señales más tardías, las cuales provienen de discontinuidades más lejanas, es común definir una amplificación creciente hacia los tiempos mayores. Estos temas serán discutidos en las secciones posteriores.

4.2.iv Señales de reflexión originadas en distintos tipos de objetos enterrados

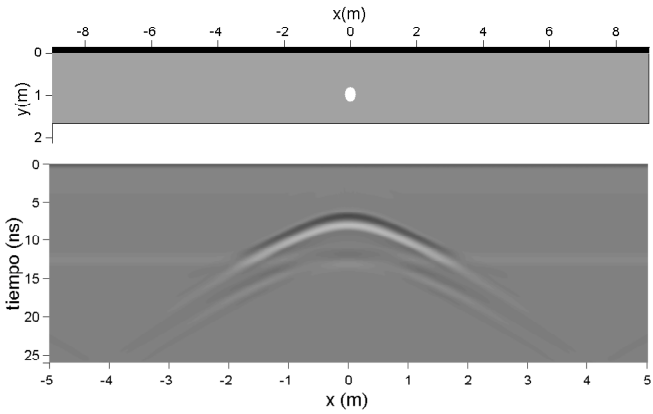
Al conjunto de las trazas adquiridas a lo largo de una línea sobre la superficie del suelo se lo denomina perfil. Por extensión, a la propia línea también se la llama con el mismo nombre. Por ejemplo, en la situación de la Figura 4.1 se ha mostrado un perfil compuesto por tres trazas. Normalmente, las trazas de un perfil dado son graficadas de manera simultánea, obteniéndose de este modo una representación bidimensional de la señal proveniente del subsuelo. Este tipo de gráfico, donde el eje x representa cierta coordenada espacial medida sobre la superficie del suelo -típicamente, en un montaje monoestático, la posición del emisor-receptor-, el eje y representa el tiempo transcurrido a partir de la emisión del pulso, y por medio de una escala de colores se representa la intensidad de la señal, se denomina radargrama. En la Figura 4.7 se muestran los radargramas que resultan cuando se consideran diversos tipos de superficies enterradas. La Figura 4.7.I muestra el caso de una interfaz con pendiente suave. Vemos aquí que la señal guarda similitud con el perfil de la superficie reflectora. En la Figura 4.7.II se representa un objeto de sección aproximadamente circular. En este caso la forma de la señal es claramente diferente a la del objeto enterrado. Observamos que se recibe señal proveniente del objeto, es decir, se detecta el objeto, aún en posiciones del emisor-receptor lateralmente muy alejadas respecto de la ubicación del mismo. Ello ocurre como consecuencia de que la huella de la fuente que se está utilizando subtiende un ángulo bastante amplio, iluminando lateralmente el objeto. También puede verse que a medida que la distancia entre el objeto enterrado y la fuente-receptor se incrementa, disminuye la intensidad de la señal recibida como respuesta, lo que se debe principalmente a la mayor atenuación producida al incrementarse la longitud del trayecto recorrido por el pulso. Por último, la Figura 4.7.III representa una superficie que posee un desnivel abrupto. Vemos aquí que la señal en el radargrama puede interpretarse como una composición de las señales características de las Figuras 4.7.I y 4.7.II. Claramente pueden observarse las diferencias entre las señales que provienen de los distintos objetos en cada uno de los casos presentados.

En general, aquellos objetos que producen respuestas como la de la Figura 4.7.I son denominados reflectores, mientras que aquellos que producen señales como la de la Figura 4.7.II son llamados difractores o, a veces, difractores puntuales. En estos últimos casos, la señal se caracteriza por poseer una forma de V invertida. Algunos objetos arqueológicos suelen tener respuestas de georadar similares a las de los reflectores mientras que otros presentan señales parecidas a las de los difractores puntuales. Entre los primeros podemos mencionar pisos o techos con perfiles no abruptos, mientras que entre los segundos registramos urnas funerarias, cañerías, paredes, diversos enseres, etc. En general los difractores puntuales suelen ofrecer menor área para reflejar la energía del radar, por lo que son más difíciles de identificar dada su menor intensidad.

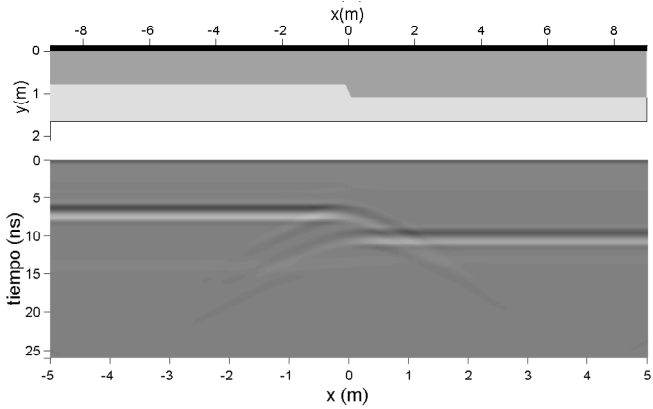
Como veremos más adelante, la identificación de señales características como las mencionadas es parte importante del proceso de interpretación de los radargramas.



I



II



III

Figura 4.7. Respuestas características de GPR para distintos tipos de reflectores.

I: interfaz con pendiente suave. II: objeto de sección circular.

III: superficie que posee un desnivel abrupto.

Un adecuado proceso de identificación adquiere gran relevancia cuando existen en los radargramas grandes cantidades de señales secundarias sin interés -reflexiones múltiples, señales provenientes de raíces de vegetales, etc.- entre las cuales es necesario distinguir aquéllas producidas por los objetos arqueológicos.

4.3 Diseño de la prospección

La cuidadosa elección del equipo de GPR a utilizar, la evaluación de sus limitaciones y la determinación adecuada de los parámetros de los sondeos son fundamentales para la obtención de datos acordes a las expectativas del investigador. Por el contrario un diseño no cuidado de la experiencia puede conducir a datos insuficientes o de baja calidad, resultando en predicciones pobres o incompletas de las estructuras enterradas. En esta sección se describen los principales factores a tener en cuenta durante la elección del equipo a utilizar y el diseño de la experiencia. Luego de introducir los conceptos de resolución vertical, resolución horizontal y de ancho de banda, se brindan pautas para una adecuada elección de la frecuencia de operación. Asimismo mencionamos los factores secundarios que podrían ser relevantes en esta elección. A continuación se evalúan distintos tipos de sondeo -cobertura simple, múltiple, etc.- comentando sus ventajas y desventajas, cómo distribuir los perfiles sobre el área en estudio y la mejor manera para seleccionar los parámetros de la adquisición de datos.

4.3.i Resoluciones vertical y horizontal.

En la Figura 4.5.V se ilustra una traza que incluye las señales originadas en un par de reflectores ubicados a distintas profundidades. Es claro que, si las extensiones temporales de los pulsos recibidos fuesen mayores, ambas señales se superpondrían, por lo que su individualización no sería posible y, por lo tanto, tampoco sería posible la distinción entre las correspondientes interfaces. La capacidad de diferenciar entre dos señales que se hallan próximas en el tiempo se llama resolución vertical. Por extensión, este concepto también se aplica a la distinción de las interfaces asociadas. Cuanto más cercanas las interfaces, más corto debe ser el pulso si es que se desea resolver sus señales. Esto puede lograrse aumentando la frecuencia de los pulsos emitidos o quitándoles lóbulos a los mismos. En la práctica, esto último es más complejo de conseguir, por lo que normalmente es la frecuencia emitida la que se modifica.

Para obtener una primera estimación de la resolución vertical d_v suele considerarse un pulso con una extensión temporal mínima, es decir, de un solo período T . En este caso el valor de la resolución vertical está dado por la siguiente expresión matemática:

$$d_v = \frac{vT}{4} = \frac{v}{4f} \quad (4.7)$$

donde f es la frecuencia de la radiación emitida y v es una velocidad de propagación promedio en el suelo. Esta fórmula indica que la resolución vertical disminuye cuan-

do disminuye la velocidad de propagación en el medio, aumentando a su vez con la frecuencia. Ya que en un material dado vale aproximadamente la siguiente relación:

$$v \cong \frac{c}{\sqrt{\epsilon}} \quad (4.8)$$

donde c es la velocidad de la luz en vacío ($c = 29,99$ cm/ns), se tiene que la resolución vertical es menor para permitividad ϵ y permeabilidad altas.

Debe remarcarse que en una situación real el valor de la resolución vertical es siempre superior al dado por la ecuación (4.7), o sea que éste debe ser considerado solamente como una cota inferior. Para una estimación más razonable puede considerarse un valor de d_v 4 o 5 veces mayor que el dado por la ecuación (4.7).

Análogamente a lo hecho para la resolución vertical, se define la resolución horizontal d_h en relación con la discriminación de interfaces adyacentes en la dirección horizontal. Esta se vincula directamente con el ancho de la huella emitida por la fuente -ver Figura 4.3-; cuanto más angosto es el mismo menor resulta la resolución horizontal, y por lo tanto la distancia entre dos objetos que pueden ser discriminados. Por el contrario, cuanto más amplio es el ancho de la huella, mayor es la resolución horizontal y por lo tanto la distancia mínima entre objetos distinguibles.

Es posible establecer una relación aproximada entre la resolución horizontal d_h , la frecuencia f , la velocidad de propagación promedio v , la profundidad de la interfaz p y la permitividad relativa promedio del suelo ϵ . La expresión resultante es la siguiente:

$$d_h \cong \frac{v}{4f} + \frac{p}{\sqrt{\epsilon+1}} \quad (4.9)$$

Esta ecuación muestra que la resolución horizontal mejora, es decir disminuye, a medida que la frecuencia y la permitividad crecen.

Cabe resaltar que la ecuación (4.9) es sólo una aproximación de la resolución horizontal, dado que para su obtención se supone un suelo aproximadamente homogéneo, sin discontinuidades importantes, lo que casi nunca ocurre en la realidad. Un cálculo más riguroso de los tamaños de las zonas iluminadas sobre cada interfaz debería tener en cuenta, además de las características de los pulsos emitidos -frecuencia, polarización, extensión espacial, etc.-, las propiedades de los medios enterrados -proporciones de los materiales, permitividades, etc.- y las formas y profundidades de las discontinuidades, lo que suele resultar en un planteo en extremo complejo. En términos generales, la resolución espacial puede considerarse proporcional a $1/\alpha$, donde α es el coeficiente de atenuación (Daniels *et al.* 1988), el cual da cuenta de la divergencia del haz emitido, de los fenómenos de absorción y dispersión que ocurren en el medio en el cual se propaga la señal, así como de los procesos de reflexión-transmisión en las distintas interfaces. Consecuentemente, para materiales con altas atenuaciones se obtienen mejores resoluciones horizontales que para materiales con bajas atenuaciones. En la Tabla 4.1 se muestran valores típicos de permitividad relativa, velo-

cidad de propagación en el medio, conductividad y del coeficiente de atenuación β_σ , debido exclusivamente a la absorción, para distintos tipos de materiales (Leckebusch 2003).

Material	Permitividad relativa ϵ	Velocidad de propagación v (m ns ⁻¹)	Conductividad σ (mS m ⁻¹)	Coeficiente de atenuación β_σ (dB m ⁻¹)
Aire	1	0.3	0	0
Agua salada	80	0.033	3000	600
Agua dulce	80	0.033	0.5	0.1
Granito seco	5	0.13	0.01	0.01
Arena seca	5	0.13	0.01	0.01
Arcilla húmeda	10	0.095	500	300
Suelo:				
Arenoso seco	2.6	0.19	1.4	1
Arenoso húmedo	25	0.06	69	23
Arcilloso seco	2.5	0.19	2.7	3
Arcilloso húmedo	19	0.07	500	200
Congelado	6	0.12	0.1	0.1
Caliza lacustre	50	0.04	-	-
Estrato cultural bajo agua	70	0.04	-	-

Tabla 4.1. Valores típicos de diversas propiedades físicas, para distintos tipos de materiales y grados de humedad.

4.3.ii Ancho de banda

La Figura 4.8.I representa una señal de 400 MHz ideal; la Figura 4.8.II muestra el espectro de frecuencias que componen la misma. En esta última puede verse que el espectro de la señal no consta de una única frecuencia -de 400 MHz- sino que posee un continuo de frecuencias componentes que ocupan todo un rango, cuyo sector más importante puede ubicarse entre los 200 MHz y los 550 MHz, aproximadamente. El valor 400MHz referido corresponde a la posición del máximo de dicha distribución de frecuencias. Este valor es normalmente denominado frecuencia central, dominante o principal. El tamaño del rango o banda de frecuencias que conforman el pulso se llama ancho de banda. Como una propiedad general puede mencionarse que cuanto menor es el ancho de banda, mayor es la extensión temporal del pulso, es decir, el mismo contiene una mayor cantidad de lóbulos. Contrariamente, cuanto más extensa es la banda de frecuencias que componen un pulso, el mismo es más corto, poseyendo menor cantidad de lóbulos.

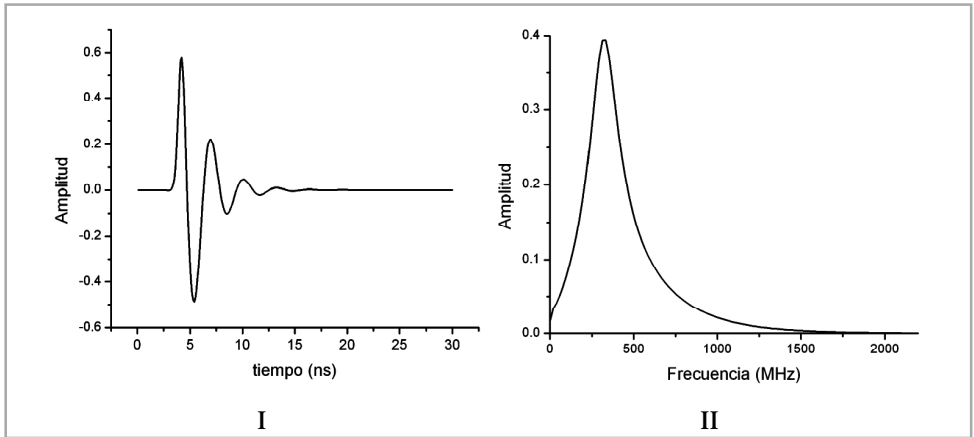


Figura 4.8. Señal ideal para una antena de georadar de 400 MHz (I) y su espectro de frecuencias (II).

En la Figura 4.9.I se muestra la señal que una antena real de 400MHz transmite en el suelo, mientras que en la Figura 4.9.II el correspondiente espectro de frecuencias. Cabe aclarar que las formas de las señales transmitidas por distintos equipos de GPR pueden variar, a veces notablemente, respecto de la que se ha mostrado en la Figura 4.9.I. Por ello, ésta sólo debe ser considerada como un ejemplo.

Las diferencias entre lo ideal y lo que realmente se transmite en el suelo normalmente se deben a distintos factores. Entre los más importantes pueden mencionarse las irregularidades en la geometría y/o materiales de la antena, las diferencias en los componentes electrónicos, las reflexiones en los elementos que comparten la caja con la antena o directamente en la caja, el acoplamiento imperfecto en la superficie aire-tierra, etc. Como consecuencia de ello muchas veces también puede observarse una pequeña modificación de la frecuencia central que penetra en el suelo respecto de la que se indica en el equipo. Es importante mencionar que los factores mencionados en general también alteran la resolución y la profundidad de penetración de la señal.

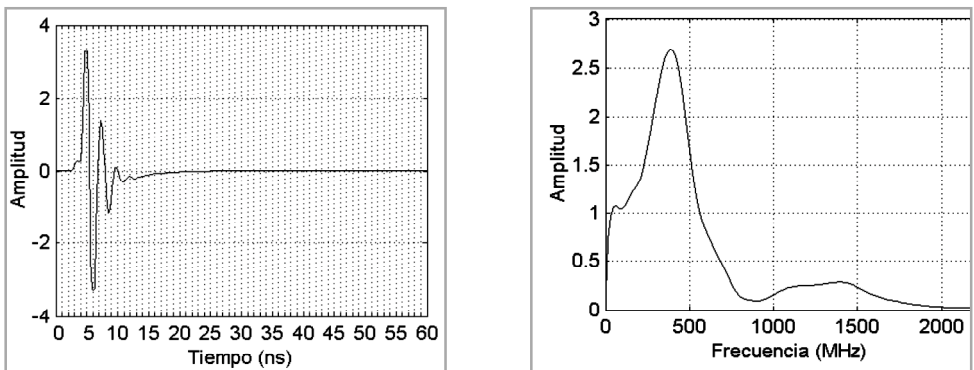


Figura 4.9. Señal de una antena real de georadar de 400 MHz (I) y su correspondiente espectro de frecuencias (II).

Las antenas comerciales de radar producen pulsos con frecuencias principales ubicadas en el rango 10 MHz a 1000 MHz. Aunque las distribuciones de frecuencias que componen los pulsos varían de antena en antena, como regla aproximada puede decirse que la mayoría de los sistemas de uso general poseen antenas cuyos espectros se extienden aproximadamente entre una frecuencia mínima igual a la mitad del valor de la frecuencia dominante y una frecuencia máxima igual a dos veces la misma. Por ejemplo, una antena de 400 MHz con estas características producirá energía dentro una banda que va desde los 200 MHz hasta los 800 Mhz, aproximadamente.

4.3.iii Selección de la frecuencia.

La evaluación de las resoluciones vertical y horizontal es fundamental para un adecuado diseño de una experiencia de georadar, dado que las mismas se vinculan con los tamaños mínimos que se pueden diferenciar a una dada frecuencia de emisión.

Para seleccionar la frecuencia de operación normalmente se consideran los tamaños característicos y profundidades de los elementos enterrados que se intenta identificar durante la campaña arqueológica -por ejemplo, vasijas, muros, etc.- para luego seleccionar una frecuencia adecuada a través de las ecuaciones (4.7) y (4.9), o de alternativas a las mismas. Nótese que para ello se requieren valores de ϵ y μ , es decir, es necesario contar con la mayor información posible acerca de las propiedades eléctricas y magnéticas del suelo. Si éstas no pudieran ser determinadas a partir de mediciones directas, al menos se debería conocer cualitativamente el tipo de suelo de modo de poder estimar la permitividad y la permeabilidad del mismo, por ejemplo, a partir de valores típicos tabulados.

Como se ha mencionado, las ecuaciones (4.7) y (4.9) indican que se obtienen mejores resoluciones verticales y horizontales para frecuencias mayores. Sin embargo, existe un compromiso entre la mejora de estas resoluciones y la disminución en la profundidad de penetración debida a la absorción, dado que se ha mencionado que ésta aumenta con la frecuencia.

Hemos dicho que la profundidad de penetración varía fuertemente con el tipo de suelo, dependiendo de factores tales como la composición, porosidad y humedad del mismo, además de depender de las características de la señal, tales como la frecuencia, la divergencia geométrica, etc. A pesar de ello, es posible dar algunos valores medios estimativos para la profundidad de penetración. Para una señal con frecuencia central 100 MHz puede considerarse una profundidad de penetración del orden de 10m, para un pulso de 500 MHz se tiene alrededor de 4m, y para un pulso de 1000MHz aproximadamente 1m. Como un ejemplo del gran rango de variabilidad que puede presentar este parámetro como función del tipo del suelo, podemos mencionar que para una antena de 100MHz pueden alcanzarse valores máximos de penetración del orden de los 60m -por ejemplo en granito o piedra caliza- y mínimos del orden del metro -en arcillas saturadas con agua. Para otras frecuencias de trabajo, se obtienen rangos de penetración también extensos. (Reynolds 1997).

4.3.iv Otros factores a tener en cuenta en la elección de la frecuencia y del equipo a utilizar

Hemos señalado que las pequeñas discontinuidades en el suelo producen señales secundarias que se superponen con las señales de interés, desdibujándolas, y perjudicando su posterior identificación. Es por ello que, de ser posible, es conveniente elegir una longitud de onda mayor que los tamaños típicos de las discontinuidades secundarias, de modo que éstas no sean resueltas por la señal emitida, disminuyendo así los efectos negativos de las mismas.

En la determinación de la frecuencia de georadar y del equipo a utilizar también debe tenerse en cuenta el tamaño y peso de las antenas, incluidas las correspondientes cajas. Por ejemplo, una antena de 100 MHz muchas veces debido a su peso y dimensiones -del orden de 1.5m- debe ser transportada sobre un vehículo. Por el contrario, una antena de 1000 MHz puede ser sostenida a mano frente a una pared -sus dimensiones son del orden de los 15cm. En general, el tamaño y el peso de un sistema de georadar disminuyen a medida que aumenta su frecuencia.

Otro factor a cuidar en la selección de la frecuencia se relaciona con la posibilidad de que existan en las proximidades del sitio otras fuentes electromagnéticas que emitan señales con frecuencias dentro del espectro del georadar, lo que podría producir interferencias importantes. En ese caso se debe intentar eliminar la presencia de estas fuentes o modificar la frecuencia principal seleccionada del georadar. Este tipo de problemas puede ocurrir principalmente en sitios próximos a antenas emisoras de televisión, radio FM, u otras radiofrecuencias. La operación de equipos portátiles de radiofrecuencias también puede afectar los datos. Por ello, es conveniente conocer de antemano las bandas de frecuencias en las cuales estas fuentes emiten. El uso de antenas de GPR blindadas -*shielded*- disminuye mucho este tipo de interferencia o la producida por otros componentes electrónicos tales como una computadora. Aunque la mayoría de los equipos de georadar comercializados en la actualidad para aplicaciones arqueológicas cuenta con antenas blindadas, es importante que dicha característica sea corroborada por el investigador al momento de la elección.

4.3.v Selección del tipo de prospección a realizar

Como ya hemos señalado, las prospecciones de GPR con configuraciones monoestática o biestática de cobertura simple y *offset* nulo suelen ser las más apropiadas en la mayoría de las situaciones de interés arqueológico. Sin embargo existen ciertos casos en los cuales es conveniente utilizar una configuración biestática con *offset* variable, tales como cuando el material que compone la matriz del subsuelo presenta una atenuación muy elevada, cuando la relación señal ruido es demasiado alta, o cuando las estructuras detectadas requieren una mejor resolución.

En los casos de atenuación elevada o de relación ruido/señal alta, las señales de interés se presentan como demasiado débiles para ser distinguidas y analizadas con cla-

ridad. Frente a esto, por ejemplo una prospección de cobertura múltiple del tipo punto medio común cuenta con la ventaja de registrar un mayor número de mediciones referidas a cada punto en el subsuelo, a partir de las cuales es posible aplicar el procedimiento de apilamiento -al cual sólo nos referiremos brevemente en este capítulo-, amplificando las magnitudes de las señales de interés en relación con otros tipos de señales secundarias. Asimismo este tipo de metodología suele permitir una determinación más precisa de la velocidad de los pulsos como función de la posición y, por ende, de las posiciones horizontales y verticales de los objetos detectados, aumentando la resolución.

El mayor inconveniente de una prospección de cobertura múltiple es la gran cantidad de tiempo que insume. Una alternativa que busca balancear entre precisión y tiempo dedicado a la prospección consiste en realizar una primera pasada de georadar en configuración monoestática o de cobertura simple en toda la zona, para luego aplicar cobertura múltiple únicamente en aquellos sectores que presenten mayor interés, según haya surgido del análisis preliminar de los datos obtenidos mediante el primer tipo de prospección.

En muchas situaciones no es posible transitar la zona de interés, debido al daño que ello podría producir en las estructuras u objetos enterrados. En esas ocasiones la unidad de GPR puede ser suspendida sobre el suelo, desplazándola y controlándola a distancia. De ser así, es conveniente que la distancia entre la unidad y el piso no supere el equivalente de una longitud de onda -en aire-, a fin de evitar que la cantidad de energía que se transmite hacia el subsuelo disminuya considerablemente. Esta misma consideración puede realizarse en casos en los cuales la fuente y el piso están separados por agua.

4.3.vi Distribución de los sondeos sobre el área en estudio.

Los perfiles normalmente son definidos a través de una grilla de líneas perpendiculares que cubre toda el área a investigar. El espaciado entre líneas suele ser fijo. En ocasiones, en los sectores que cuentan con un mayor interés puede aumentarse la densidad de líneas -por ejemplo, duplicarse- para obtener un mayor detalle del subsuelo. A veces, la existencia de obstáculos en superficie obliga a definir líneas de distintas longitudes u arreglos no ortogonales; en estos últimos casos la interpretación de los datos debe ser llevada a cabo muy cuidadosamente. Siempre que se pueda, es recomendable utilizar una grilla regular ya que muchos programas de procesamiento de datos y visualización sólo aceptan ese tipo de arreglo. Asimismo, la interpretación de los radargramas también suele ser más sencilla en el caso de grilla rectangular, debido a que se facilita la correlación de las señales registradas durante la comparación de los radargramas.

En general los sistemas de georadar están diseñados para la localización de discontinuidades que se extienden perpendicularmente al perfil y no paralelamente al mismo. De ser posible, esto debe ser tenido en cuenta al momento de seleccionar la orientación de la grilla.

El tamaño del espaciado entre líneas suele ser elegido en el orden de la resolución horizontal. Un espaciado menor produciría información redundante, mientras que un espaciado mayor podría resultar en zonas sin muestreo. Respecto de esto último, hay que tener en cuenta que la zona iluminada bajo la unidad de georadar en realidad no es cónica, sino un elipsoide alargado, con su eje mayor extendiéndose en la dirección en la cual se arrastra el equipo, es decir, la dirección del perfil. Por lo tanto, la zona iluminada transversalmente puede ser un poco menor que la indicada en el equipo para la resolución horizontal.

Cualquiera sea el tipo de grilla adoptada, es fundamental llevar a cabo una precisa localización de la misma. Para ello es necesario seleccionar una serie de referencias estables sobre el terreno y utilizar cinta métrica, teodolito o GPS. En los casos con variaciones topográficas es importante realizar la medición de las mismas, de modo de que los radargramas puedan ser corregidos durante la etapa de procesamiento. Asimismo, es aconsejable que todo objeto observable en superficie sea localizado en el mapa del sitio, de modo de facilitar la interpretación posterior de las señales adquiridas. Por este mismo motivo, la información estratigráfica disponible debe ser cuidadosamente registrada.

4.3.vii Selección de los parámetros de la adquisición de datos.

Cada traza está compuesta por cierta cantidad de registros digitales de la amplitud recibida, separados por intervalos de tiempo regulares que delinean la forma de la señal. En principio, un pulso emitido daría lugar a la obtención de una traza. Sin embargo, los sistemas de digitalización estándar contemporáneos no son lo suficientemente rápidos como para registrar el total de los datos necesarios para definir dicha traza. Es por ello que los equipos de GPR suelen superar el inconveniente realizando un registro incremental de datos. En una versión común de esta técnica, para una posición fija sobre el terreno, se emite un primer pulso y se registra la amplitud reflejada a un tiempo inicial. Este dato es digitalizado y almacenado. Luego se emite un segundo pulso, cuya respuesta es muestreada a un tiempo incrementado respecto del anterior y también almacenada. El proceso se repite con otros pulsos emitidos, siempre incrementando el tiempo de muestreo en una cantidad fija, hasta obtener muestras en todo el lapso temporal de interés, el cual se denomina ventana temporal -*time window*-. El número de pulsos emitidos normalmente utilizados para construir una sola traza es de 128, 256, 512, 1024 o 2048. Notar que al utilizar esta técnica, el tiempo completo requerido para obtener una traza es mucho mayor que el tamaño de la ventana temporal. No obstante, la mayoría de los equipos de GPR compensan este inconveniente con altas tasas de emisión, de entre 25000 y 50000 pulsos por segundo, y aún tasas mayores en los equipos más modernos.

Asimismo, los equipos de GPR normalmente realizan varias veces el proceso de adquisición de una misma traza. Luego, el sistema calcula automáticamente una traza resultante promedio -proceso de apilamiento vertical o *vertical stacking*-. La realización de este promedio tiene como objetivo disminuir la magnitud de las señales alea-

torias indeseadas y otras señales fortuitas en relación con las señales primarias. La cantidad de repeticiones r a realizar se establece a través de la unidad de control.

Cuando se selecciona el tamaño de la ventana temporal t hay que tener en cuenta que ésta debe ser compatible con la profundidad máxima p que se desea alcanzar. Para una determinada profundidad máxima p y una velocidad de propagación promedio v -la cual puede ser estimada, por ejemplo, a partir de los datos de la Tabla 4.1- es posible calcular un mínimo para dicho lapso mediante la ecuación (4.1), con sólo reemplazar t_{i-v} por t y despejar este. Luego, como regla práctica, puede establecerse el valor definitivo de t en 1.5 veces el valor despejado de la expresión (4.1). En cuanto al número de repeticiones r , es usual establecer 8 o 16, aunque este valor debe incrementarse en zonas con altos contenidos de ruido aleatorio. Según el equipo, este parámetro puede alcanzar valores tan altos como 512 o 1024.

Por otro lado, es necesario establecer la cantidad de muestras por traza m . Para una dada frecuencia central de radar, la teoría predice que debe adquirirse un mínimo de muestras dado por la siguiente expresión:

$$m = 2 t \quad (4.10)$$

donde t es el tamaño elegido para la ventana temporal. Cabe aclarar que el valor de m dado por la ecuación (4.10) da sólo una cota inferior, siendo conveniente elegir al menos tres o cuatro veces el mismo. En general, suelen utilizarse 128, 256 o 512 muestras por traza, y hasta un máximo de 2048. Cuanto mayor es el valor de m , mejor definidas quedan las señales adquiridas. Sin embargo, al aumentar m debe considerarse que simultáneamente se incrementa el tiempo total de muestreo requerido para cada traza y la cantidad de datos a almacenar. Esto puede resultar incompatible con la forma de operación adoptada -acerca de lo cual se hablará en el próximo párrafo- y con la capacidad de la unidad.

Los equipos de GPR normalmente disponen de más de un modo de iniciar el proceso que conduce a la obtención de una traza. En primer lugar el operador puede disparar este proceso manualmente cada vez que el equipo ha sido ubicado sobre una posición de interés. Si bien esta forma de disparo permite la localización precisa de cada traza sobre la superficie en estudio, la prospección resulta más lenta que con las otras formas. Alternativamente, los sucesivos inicios pueden ser realizados en forma automática a distancias regulares, definidas a lo largo de la trayectoria de la unidad. Para ello, las unidades de GPR cuentan con una rueda que apoya sobre el terreno, la cual va midiendo la distancia recorrida. Aunque este tipo de prospección es más rápida que la anterior, el posicionamiento de las trazas resulta menos preciso, inconveniente que suele magnificarse cuando la superficie del suelo presenta obstáculos o cuando la rueda no puede girar correctamente debido a las características del terreno. Un mecanismo alternativo consiste en disparar a intervalos regulares de tiempo. Esta modalidad resulta útil cuando la unidad es desplazada a una velocidad aproximadamente constante. Para ello se puede vincular al equipo con un vehículo, aunque en la mayoría de las aplicaciones arqueológicas esto resulta complicado o directamente imposible.

Es importante notar que cuando se dispara en modo continuo, es decir, a intervalos regulares de distancia o de tiempo, la velocidad de traslado no debe ser demasiado alta, de modo de permitir que el proceso de adquisición de cada traza pueda ser completado antes de que la unidad haya sido desplazada significativamente. Cualquier equipo de GPR actual, que trabaje en el rango de frecuencias normalmente utilizado en las aplicaciones arqueológicas, permite realizar estas mediciones sin inconvenientes cuando se traslada la unidad a paso de hombre.

La mayoría de las unidades de GPR cuenta con un dispositivo que permite marcar trazas a voluntad -colocación de *markers*-. De esta manera el operador puede realizar una correspondencia entre trazas y posiciones seleccionadas sobre el terreno. Cuando se adquiere en modo continuo, la aplicación de marcadores permite posicionar a las trazas con una mayor precisión, lo que simplifica la interpretación de los radargramas resultantes. Asimismo, con la colocación de marcadores se obtienen mejores resultados en los procesos de interpolación de trazas, cuya aplicación puede ser necesaria cuando se utilizan algunos programas de procesamiento y visualización de datos que requieren una distribución regular de trazas.

Se ha mencionado que, como consecuencia de los distintos mecanismos que producen atenuación, las reflexiones registradas más tardíamente en una traza poseen menor intensidad que las primeras. Es por ello que los datos normalmente son amplificados en cada traza en forma creciente a medida que transcurre el tiempo, procurando que las amplitudes de las primeras reflexiones resulten comparables a las de las últimas. La amplificación puede realizarse durante la adquisición, aplicando una ganancia a la señal recibida, o posteriormente, durante el procesamiento de los datos. Cabe aclarar que al amplificar, no sólo se amplifica la señal de interés sino también el ruido de fondo.

En relación con la amplificación durante la adquisición, los equipos de GPR suelen permitir establecer los valores de la misma manual o automáticamente. La utilización de ganancia automática tiende a eliminar las diferencias en la atenuación que pudieran registrarse entre traza y traza debidas a cambios en la composición del suelo, lo que podría implicar una pérdida de información valiosa. Es importante notar que cuando se aplica ganancia, las señales registradas incluyen necesariamente los efectos de la misma, es decir, sus amplitudes han sido modificadas respecto de las originalmente recibidas. En general, la aplicación de ganancia debe ser realizada con extremo cuidado. Esto se hace extensivo a la uso de filtros durante la adquisición, siendo recomendada su utilización recién durante la etapa posterior de procesamiento. No obstante, se podrían aplicar filtros durante la etapa de adquisición si se deseara realizar un monitoreo rápido y no detallado del suelo, con una visualización al instante de los datos adquiridos -esto será posible siempre que el equipo de GPR cuente con una interfaz gráfica. En caso que la amplitud emitida pueda ser ajustada por el usuario, éste debe cuidar no elegir valores demasiado altos de la misma, de modo de disminuir la incidencia de posibles efectos de resonancia. Este tipo de efecto puede ser producido por distintas causas y se visualiza en los radargramas como señales horizontales intensas que los atraviesan -una forma de reverberación o *ringing*.

Antes de finalizar esta sección es importante remarcar que, aunque la consideración cuidadosa de todos los aspectos mencionados debería conducir a una prospección exitosa, es fundamental realizar una prueba con anterioridad a la adquisición definitiva de los datos, obteniendo algunas trazas y perfiles que permitan constatar el buen funcionamiento del equipo y el cumplimiento de las condiciones supuestas. Estos chequeos deberían repetirse si se estima que las condiciones del suelo cambian durante la prospección -por ejemplo, el grado de humedad-, puesto que en este caso también podrían cambiar la velocidad de propagación y las resoluciones. Es conveniente que el investigador registre toda variación que se produzca, de modo de facilitar la posterior interpretación de los datos adquiridos.

4.4 Procesamiento de datos

En los radargramas que se obtienen a partir de los datos en crudo es muy difícil o directamente imposible identificar las señales correspondientes a los objetos y estratos enterrados. Ello ocurre como consecuencia de, por ejemplo, la existencia de reberberaciones o de un alto ruido de fondo, la atenuación de las señales con la profundidad, la interferencia entre señales, entre otros factores. El procesamiento de los datos tiene entonces como finalidad hacer visibles las respuestas que son de interés, en particular las que corresponden a los objetos arqueológicos. Para ello se aplican distintas técnicas cuyos objetivos principales son, disminuir o eliminar señales indeseables, y corregir las escalas de los radargramas de modo que estos resulten lo más representativos posible de las formas y posiciones de los elementos en el subsuelo.

Para el procesamiento de los datos se cuenta con una variedad de programas comerciales o de circulación libre. Muchas de las rutinas utilizadas en GPR han sido desarrolladas originalmente para el procesamiento de datos sísmicos y luego adaptadas a este ámbito, gracias a las similitudes que existen entre ambos métodos. Los avances que se producen día a día en los programas y en los equipos de computación, hacen que el procesamiento de los datos se torne cada vez más accesible, reduciendo los tiempos de cálculo y esfuerzo, permitiendo así mismo la implementación de técnicas cada vez más precisas y útiles.

En las próximas secciones se describirán las técnicas que comúnmente se utilizan en el procesamiento de los datos de georadar. Es importante destacar que el procesamiento de los datos no puede ser realizado en forma completamente automática, esto es, independiente del investigador. La calidad de los radargramas resultantes no sólo depende de la calidad de los datos de GPR medidos, sino también de la selección de las técnicas de procesamiento que haga el investigador y de la forma en que estos sean apreciados. Esto a su vez depende de la información disponible, ya sea de origen geofísico, arqueológico, estratigráfico o de cualquier otro tipo. El procesamiento de datos implica interpretaciones y ajustes continuos, en un proceso que muchas veces tiene características cíclicas o de realimentación.

4.4.i Posicionamiento

Para utilizar los programas de procesamiento de datos se requiere en muchos casos que las trazas estén ubicadas sobre la superficie del terreno formando una grilla regular, con celda rectangular o eventualmente cuadrada. Sin embargo, es difícil que estas características se cumplan en una prospección real debido a, por ejemplo, la variación en la velocidad de avance cuando se utiliza un modo continuo de adquisición, lo que produce una densidad de trazas no homogénea a lo largo del perfil, a la presencia de topografía u obstáculos que impiden adquirir perfiles rectilíneos, etc.

En el caso que se haya podido adquirir un perfil rectilíneo, el posicionamiento inadecuado de las trazas puede ser corregido realizando una interpolación a lo largo del mismo, de modo de generar trazas en las posiciones requeridas. En el caso de desviaciones perpendiculares a las líneas de la grilla, ellas también pueden ser superadas. Una forma de hacerlo consiste en desplazar aproximadamente las trazas hasta ubicarlas sobre la grilla. Otro modo de corrección surge de proyectar las trazas en direcciones perpendiculares a las líneas previstas. Una vez desplazadas, las trazas pueden ser interpoladas como se mencionará más adelante.

4.4.ii Remoción del fondo

En los radargramas de datos en bruto suelen aparecer bandas horizontales de alta intensidad que ocultan parcial o totalmente las señales de interés, por lo que ellas deben ser removidas. Estas señales de fondo pueden deberse, por ejemplo, a la recepción directa de las señales provenientes del emisor, lo cual ocurre especialmente cuando la unidad de GPR utiliza antenas no blindadas, a la reflexión de las señales emitidas en la interfaz entre el aire y el suelo, a las reflexiones producidas en objetos extraños al subsuelo, tales como el operador, a reverberaciones de origen diverso, etc.

Una técnica sencilla para remover estas bandas horizontales consiste en obtener una traza promedio, calculada a partir de todas las trazas que componen el radargrama, la cual luego es restada a cada una de ellas. Como alternativa para calcular la traza promedio a veces se considera sólo una selección de trazas. Es importante notar que la remoción del fondo a partir de la resta de una traza promedio tiende a eliminar no sólo las señales horizontales indeseadas sino también las reflexiones que pudieran producirse en estratos horizontales o casi-horizontales, lo que podría constituir una pérdida de información relevante. Es en parte por ello que el método a veces sólo se aplica en un área o ventana del radargrama.

4.4.iii Filtrado

El término filtrado se refiere a una variedad amplia de técnicas cuyo objetivo es modificar selectivamente la amplitud o la frecuencia de las señales recibidas. Por ejemplo, la remoción del fondo, descrita en el ítem anterior, puede considerarse como una forma de filtrado.

El filtrado de frecuencias temporales específicas es habitual en el procesamiento de datos de georadar. Esta técnica consiste en obtener los espectros de frecuencias que componen las señales de cada traza para luego seleccionar una porción de los mismos, eliminando el resto de las componentes. En general es posible definir filtros pasa-altos, los cuales mantienen intactas las componentes con frecuencias mayores que una determinada, pasa-bajos, definidos similarmente pero en relación con las componentes de frecuencias más bajas, y pasa-bandas, los cuales sólo permiten el conjunto de componentes cuyas frecuencias quedan comprendidas entre un mínimo y un máximo determinados.

Como ocurre con todas las técnicas de filtrado, la eliminación de partes componentes de la señal puede implicar pérdida de información importante. Por ello, siempre es conveniente aplicarlas con sumo cuidado. Como una regla simplificada, puede utilizarse un filtro de frecuencias temporales pasabanda cuyo rango de frecuencias permitidas coincida con el rango del georadar -respecto de éste, ver Ancho de Banda más arriba. De esta manera sólo se eliminará el ruido distribuido fuera de la banda útil de este último.

El filtrado también puede ser realizado en relación con las frecuencias espaciales que componen un radargrama. Un filtrado pasa-altos tenderá a eliminar líneas horizontales o casi-horizontales en los radargramas, y en general todas aquellas fluctuaciones horizontales de la amplitud que posean frecuencias espaciales menores a una determinado corte. Este tipo de filtrado no debe ser utilizado cuando los elementos de interés son estratos, pisos, y otros objetos que consistan en superficies horizontales extensas. Similarmente, un filtro pasa-bajos eliminará las fluctuaciones horizontales con frecuencias mayores a cierta frecuencia límite. En este caso debe cuidarse que dicho límite sea superior a $1/x_{obj}$, donde x_{obj} es el mínimo tamaño de los objetos de interés.

El filtrado f-k, originado en el ámbito de la sísmica, a veces es utilizado en las aplicaciones de georadar. El mismo opera sobre el espectro bidimensional de frecuencias temporales y espaciales que compone un dado radargrama, del cual se remueven ciertas componentes o partes. Notar que la mecánica de este tipo de filtrado es muy similar a la descrita en los párrafos anteriores. El filtrado f-k es comúnmente utilizado para eliminar las reflexiones que presentan ángulos grandes en los radargramas, y a veces también las hipérbolas de difracción, de modo de resaltar las reflexiones horizontales.

4.4.iv Amplificación de los datos.

La amplificación de los datos se utiliza principalmente para mejorar la visibilidad de los reflectores más profundos que no pueden ser observados en los radargramas debido a la atenuación de las señales con la profundidad. Este proceso es muy habitual y consiste en modificar las amplitudes de los datos incluidos en cada traza, de modo que las intensidades promedio, definidas en intervalos sucesivos de tiempo, resulten similares entre sí. Las extensiones temporales de estos intervalos suelen ser de-

finidas, según el caso, desde un mínimo de aproximadamente unos pocos períodos de la señal, hasta un valor máximo del orden del tamaño de la ventana temporal -para una definición de esta última, ver *Selección de los parámetros de la adquisición de datos* más arriba. Como una variante, a veces se utiliza una función de amplificación predefinida, normalmente creciente con el tiempo, definida en toda la ventana temporal.

4.4.v Deconvolución

La técnica de deconvolución se utiliza rutinariamente en sismica para mejorar la resolución vertical y hacer visibles algunas reflexiones difíciles de visualizar. El mayor problema de la utilización de esta técnica en las aplicaciones de georadar reside en que algunos de los requisitos para su aplicación usualmente no se cumplen. La aplicación de la misma muchas veces conduce a resultados irreales, difíciles de identificar como tal. Una técnica de deconvolución es el *spectral whitening*, la cual consiste en ajustar las amplitudes de todas las componentes de frecuencia dentro de un cierto intervalo a un mismo nivel.

4.4.vi Migración

Las señales correspondientes a los objetos enterrados aparecen en los radargramas con formas muy distintas de las reales. Por ejemplo, en la Figura 4.7. II vimos que un objeto de sección aproximadamente circular presenta una señal con forma hiperbólica. Asimismo, a partir de la Figura 4.7.III se observó que un desnivel abrupto en una superficie enterrada tiene asociada una respuesta con formato diferente del original. Dado que todo suelo está compuesto por un sinnúmero de objetos, similares o distintos de los de la Figuras 4.7, los radargramas resultantes presentan una gran complejidad de señales superpuestas, difícilmente asimilables a los elementos reales que las originan.

La migración es un proceso que toma las señales adquiridas y las procesa procurando que las señales que resultan representen las verdaderas formas y posiciones de los elementos en el subsuelo. De esta manera, se intenta producir una imagen más realista de los elementos en la subsuperficie. Por un lado, realiza el traslado de la energía que está dispersa a lo largo de los brazos de cada hipérbola de difracción hasta acumularla en su cúspide. Este subproceso se denomina enfoque. Por otro lado, desplaza cada cúspide hasta su posición correcta en el espacio, corrección que resulta relevante cuando existen reflectores con pendientes pronunciadas y variaciones significativas en la velocidad de propagación con la posición. Este subproceso se llama posicionamiento. En general, ambos subprocesos son realizados en la actualidad mediante *software*.

El cálculo de una velocidad de propagación promedio en el subsuelo, o velocidad de migración, es inherente al proceso de migración. En relación con la misma, se definen dos tipos de migración. La denominada migración en tiempo -time migration- supone que esta velocidad varía solamente en la dirección vertical o, como un caso particular, que no varía. La migración en profundidad -*depth migration*- además

permite la variación horizontal de la misma. A pesar de sus nombres, los resultados de ambas formas de migración suelen ser presentados tanto como funciones del tiempo, como de la profundidad.

Se ha mencionado en secciones anteriores que la velocidad de propagación depende del tipo de sustancias que componen el subsuelo y de sus proporciones. En particular, el grado de humedad suele ser un factor muy importante. Por ejemplo, en suelos arenosos y secos la velocidad de propagación puede ser tan alta como 0.19 m/ns ($1\text{ns}=0.000000001\text{s}$) mientras que para mayores grados de humedad dicha velocidad puede ser inferior a 0.06 m/ns. Análogamente, en suelos arcillosos estos valores podrían ser 0.19 m/ns y 0.07 m/ns, respectivamente. Dadas estas características, un sitio arqueológico puede presentar grandes variaciones en la velocidad, tanto en la dirección horizontal como en profundidad. Por ello los procesos de migración suelen ser más bien complejos.

En una variante sencilla de la migración en tiempo se propone una velocidad de migración inicial -estimada, por ejemplo, a partir de observaciones cualitativas del suelo y de una tabla de velocidades- con la cual se realiza el subproceso de enfoque. Luego se propone una velocidad ligeramente distinta y se vuelve a enfocar. El proceso se repite hasta probar con todo el rango de las velocidades posibles para el tipo de suelo particular. La velocidad de migración más apropiada será la que haya producido el mejor enfoque. Cabe notar que en esta variante de migración no se realiza el subproceso de posicionamiento de las señales.

El proceso de migración descrito también puede ser aplicado incluyendo las variaciones de la velocidad con la profundidad. Asimismo, la adquisición de datos con arreglos emisor y receptor en cobertura múltiple permite utilizar una variedad de métodos de migración, desarrollados originariamente en el ámbito de la sismica, que consideran las fluctuaciones horizontales de la misma -migración en profundidad. En general estos últimos métodos permiten calcular la velocidad con una buena precisión, aunque la aplicación de los mismos puede resultar algo compleja.

Una migración satisfactoria suele implicar procesos computacionales no sencillos, los cuales demandan bastante tiempo. Su aplicación en el ámbito de GPR no es por el momento completamente habitual debido a que la capacidad de la misma para producir imágenes realistas del subsuelo es aún limitada.

4.4.vii Métodos para la estimación de la velocidad.

Además del método de migración descrito en el ítem anterior, otros procedimientos permiten estimar la velocidad de propagación en el subsuelo, la cual es necesaria para el cálculo de las profundidades de los elementos de interés. La principal ventaja de la aplicación de estos procedimientos, en relación con el de migración, reside en que la obtención de la velocidad resulta más sencilla y rápida.

Como un procedimiento básico para obtener una velocidad de propagación promedio es posible estimar cualitativamente la composición predominante del sue-

lo, incluyendo el grado de humedad del mismo, y con estos datos acudir a tablas con valores de la velocidad medidos en condiciones de laboratorio o de campo -por ejemplo, los datos de la Tabla 4.1. Este tipo de estimación es útil para un cálculo preliminar de las velocidades, aunque los valores obtenidos pueden resultar poco exactos.

Una medida más adecuada de la velocidad se obtiene a partir de la realización de pozos en algunas de las posiciones en las cuales se han detectado reflectores importantes. A partir de la medición de las profundidades de éstos y de la obtención de los respectivos tiempos de ida y vuelta se calculan las velocidades de propagación promedio correspondientes a las porciones del suelo sobre cada reflector. En los casos de estratos superpuestos es posible deducir cómo varía la velocidad como función de la profundidad. Aunque con este método generalmente se logran buenas precisiones, el mismo insume más tiempo que el descrito en el párrafo anterior. Además, puede resultar inaplicable debido a las limitaciones que existen en muchos sitios arqueológicos para realizar tales tipos de perforaciones.

Como una variante del método descrito, a veces es posible introducir algunos elementos planos o lineales en el subsuelo, ubicándolos a profundidades establecidas y sin modificar significativamente sus condiciones. Para ello, es necesario que exista un corte en el terreno, natural o artificial, a través del cual puedan introducirse dichos objetos, siempre en una dirección paralela a la superficie. Es conveniente que los elementos a insertar tengan una composición metálica, de modo que las señales de reflexión que en ellos se produzcan resulten lo más intensas posibles. A su vez debería tenerse en cuenta que los mismos sean suficientemente agudos como para penetrar en el suelo con facilidad y sin modificar las condiciones de este último -por ejemplo, podría utilizarse un caño.

Una forma alternativa de estimar la velocidad surge del análisis de las asíntotas de las señales de difracción que se observan en los radargramas. El cálculo de los valores de la velocidad mediante este método puede ser asistido por software o directamente realizado en forma manual a partir de dichos radargramas, teniendo en cuenta que en la zona asíntótica de la señal vale $v \cong 1/(2pe)$, donde pe es la pendiente de la asíntota, cuyas unidades son de tiempo sobre longitud.

Las metodologías para el cálculo de las velocidades descritas hasta el momento se aplican a conjuntos de datos adquiridos mediante arreglos de antenas monoestáticos o de cobertura simple. Cuando se dispone de datos en cobertura múltiple es posible aplicar otras variantes, tales como las ligadas con prospecciones de punto medio común -definido anteriormente en el apartado *Bases del Método*-, las cuales no serán descritas en este capítulo. Asimismo los sondeos adquiridos con disposiciones de antenas de tipo *borehole* -ver *Bases del Método*- permiten estimaciones directas de la velocidad, aunque a veces éstas resultan poco precisas.

Por último, los ensayos electromagnéticos de laboratorio realizados sobre muestras extraídas del lugar en estudio son poco habituales en las aplicaciones arqueológicas de georadar debido principalmente a que resulta muy dificultoso el traslado de dichas muestras en las condiciones originales de humedad y compactación.

4.4.viii Topografía

Cuando existe una topografía apreciable en el piso es conveniente corregir las trazas de modo de que todas queden referidas a una misma profundidad de referencia. Para ello, la técnica de corrimiento estático *-static shift-* desplaza a cada una de las trazas en el tiempo utilizando una velocidad de propagación constante o, alternatively, una velocidad que varía solamente con la profundidad. Este método, con origen en la sismica, supone que la energía se transmite verticalmente dentro del suelo, lo que muchas veces no se cumple en la realidad. Esto último ocurre, por ejemplo, cuando existen reflectores no horizontales o, justamente, cuando la inclinación topográfica es alta. Asimismo, el método supone que la velocidad de propagación no cambia significativamente en la dirección horizontal, lo que puede no cumplirse en muchos casos de interés arqueológico. A pesar de todo esto, la aplicación del método suele producir resultados satisfactorios aún en los casos en los cuales no se cumplen estrictamente sus condiciones.

La necesidad de corregir por topografía se incrementa cuando se utilizan antenas con frecuencias mayores, es decir con longitudes de onda más cortas. En el caso de las antenas de GPR con frecuencias del orden del GHz, aún las más pequeñas irregularidades del terreno pueden modificar significativamente las señales provenientes del subsuelo.

4.5 Visualización e interpretación de los datos

La visualización e interpretación de los datos muchas veces forman parte de un proceso cíclico. Esto se debe a que la elección de la forma de visualización y los valores de sus parámetros suelen depender de la interpretación realizada anteriormente; a su vez, una vez obtenido un gráfico, el mismo es utilizado para reinterpretar los datos. Por otro lado, en este proceso cíclico, es posible que sea necesario intercalar alguna de las rutinas descriptas en la sección previa -ver *Procesamiento de Datos* más arriba.

4.5.i Formas de visualización de los datos

En las secciones anteriores se ha visto que una forma de visualizar las señales registradas consiste en realizar gráficos de trazas. También se ha descrito cómo un conjunto de trazas conforma un radargrama. Esta forma de graficación facilita la identificación de las señales primarias, las cuales se extienden a través de las sucesivas trazas, presentado distintas formas características -ver *Señales de reflexión originadas...* más arriba.

Una alternativa de graficación surge de realizar cortes a tiempos constantes en la grilla de datos; en cada corte se incluyen los datos adquiridos a un mismo tiempo. Este tipo de gráficos a veces facilita la interpretación de las reflexiones originadas en estructuras extensas enterradas. Cabe aclarar que, como consecuencia de que la velocidad de propagación puede variar con la posición lateralmente y/o con la profundi-

dad-, un corte realizado a tiempo constante no implica una profundidad constante. Por el contrario, si la variable temporal fue migrada a profundidad, el corte sí puede ser realizado a una profundidad constante.

Las señales de GPR alternan lóbulos positivos y negativos en tiempos extremadamente cortos, del orden del período temporal T de la misma, el cual está dado por la ecuación (4.2). Estas características resultan perjudiciales para una buena graficación de los cortes en tiempo constante. Una manera de superar el inconveniente consiste en reemplazar las trazas por representaciones suavizadas de las mismas. Este suavizado puede obtenerse, por ejemplo, a partir del siguiente promedio:

$$A(x, y, t_k) = \sqrt{\frac{\sum_{i=K}^{K+n} a(x, y, t_i)^2}{n}} \quad (4.11)$$

donde $a(x, y, t)$ es la amplitud registrada en el tiempo número i , y n es la cantidad de datos promediados. $A(x, y, t_i)$ es la amplitud suavizada, la cual siempre es positiva como consecuencia de haber elevado al cuadrado las amplitudes originales.

Los cortes en tiempo o en profundidad poseen normalmente muestreos con densidades muy distintas en la dirección paralela y perpendicular a los perfiles, siendo usualmente la primera mucho mayor que la segunda. Es por ello que se requiere de una importante interpolación en esta última dirección. Consecuentemente, los resultados que se obtienen pueden adquirir distintas apariencias dependiendo de la forma en que haya sido realizada dicha interpolación. Normalmente, cada grupo de investigación desarrolla sus propios algoritmos de interpolación para cada situación particular.

Hasta el momento se han descripto distintas variantes de gráfico bidimensional. La confección de gráficos tridimensionales tiene como objetivo la visualización conjunta de todos los datos obtenidos en una dada zona en estudio. Debido a la gran cantidad de datos involucrados, en estos casos se requiere la utilización de computadoras y tarjetas gráficas razonablemente veloces. Normalmente, el *software* que se utiliza para los gráficos tridimensionales a su vez permite realizar cortes de los mismos en los planos que se desee. Por otro lado, cuando se realizan gráficos bi o tridimensionales pueden utilizarse escalas de colores o en tonos de grises (el ojo humano es en general más sensitivo a éstas últimas que a las primeras).

Como un ejemplo de método para obtener gráficos tridimensionales se puede mencionar el *alpha blending*, en el cual los valores de la grilla menores que un cierto umbral se los considera transparentes, mientras que los que superan el umbral se les da un color. La asignación también puede ser realizada a la inversa, o en un intervalo de valores. Ensayando las distintas variantes posibles, uno espera mejorar la visualización de las estructuras tridimensionales enterradas. Cabe mencionar que una selección adecuada del umbral requiere una interpretación previa de los datos, lo que implica un proceso recursivo de graficación e interpretación. Este tipo de proceso también suele ocurrir cuando se utilizan otras formas de visualización. La información prove-

niente de otros métodos geofísicos o arqueológicos también puede ser útil para la selección de los parámetros de la graficación.

4.5.ii Interpretación

Dos de los principales procesos de interpretación son la identificación y la clasificación de las señales primarias en los radargramas de datos procesados. La identificación es realizada mediante la comparación de las señales procesadas y los referentes establecidos experimentalmente o generados mediante simulación con programas de computación. La clasificación suele realizarse como función de las formas de las señales -por ejemplo, difractores puntuales, formaciones abovedadas, etc.- y sus intensidades aproximadas -por ejemplo, las de más altas intensidades, y las de más bajas intensidades. Luego, entre estas señales se distingue aquéllas que potencialmente correspondan a los objetos de interés, rotulándolas como señales anómalas o, resumidamente, anomalías.

La localización de las anomalías sobre un plano del sitio se realiza en paralelo con la identificación y clasificación. La confección de este tipo de mapas tiene como objetivos principales establecer posibles vínculos entre señales próximas, por un lado, y facilitar la asociación entre las señales principales de georadar y la información proveniente de las observaciones realizadas en superficie u obtenida a partir de otros métodos geofísicos o arqueológicos, por el otro.

Respecto del análisis del vínculo entre señales próximas, cuando en una misma posición del plano se localizan señales en ambas direcciones de prospección es habitual que se interprete que allí existe un elemento enterrado con una mayor probabilidad que si se hubiese localizado una sola señal, en sólo alguna de las direcciones. Sin embargo, es necesario aclarar que un objeto muy asimétrico, tal como un caño, fácilmente puede no ser detectado en una de las direcciones de prospección. El vínculo entre señales próximas suele ser corroborado a través de la comparación directa de los radargramas correspondientes, lo cual permite un análisis con mayores grados de detalle y precisión.

Por otro lado, la evaluación conjunta de la información obtenida a partir del método de georadar y de otros métodos geofísicos complementarios, normalmente lleva a mapas más exactos de la superficie, en comparación con los mapas que se obtienen a partir de cada método por separado. A su vez, los datos de tipo arqueológico y estratigráfico en general suelen ser muy importantes para la interpretación.

La realización de radargramas simulados por programas de computación, denominados radargramas sintéticos, resulta entre otras cosas útil para ayudar en la identificación de las señales de reflexión características en los radargramas, y como comprobación de los modelos de subsuelo propuestos, esto es, de los planos del subsuelo que resultan de la interpretación. Respecto de esto último, es importante aclarar que la interpretación de los datos de GPR, y en general los de todos los métodos geofísicos, conduce a un conjunto de modelos posibles para el subsuelo y no a un modelo único.

Para poder generar radargramas sintéticos que sirvan como referentes durante el reconocimiento de las señales de interés, es necesario disponer de información cuantitativa sobre los elementos que se buscan y sobre el entorno de los mismos. Una vez generadas las respuestas electromagnéticas por computadora, las mismas son comparadas con las señales detectadas, determinándose cuáles de éstas podrían corresponder a los objetos buscados. En general esta comparación permite descartar una gran cantidad de posibles anomalías, simplificando notablemente la interpretación. Por otro lado, como una variante de esta forma de aplicación de los radargramas sintéticos, éstos pueden ser utilizados antes de realizar las mediciones para determinar si la prospección que ha sido diseñada efectivamente es capaz de detectar los objetos que se buscan.

En otra forma de aplicación de los radargramas sintéticos, las simulaciones numéricas son utilizadas para evaluar la plausibilidad de los distintos modelos surgidos de la interpretación. Para ello, a partir de cada una de estos modelos se confecciona un radargrama sintético, determinándose cuál de los radargramas generados ajusta mejor al experimental y en qué aspectos lo hace. Una vez analizadas las coincidencias y diferencias, es posible reconsiderar los modelos, realizando de esta manera un proceso de reajuste.

4,6 Aplicaciones y conclusiones

En la literatura existen diversos casos de estudios arqueológicos en los cuales se ha aplicado el método georadar. Por ejemplo, en México se ha investigado la continuación de un túnel descubierto bajo una de las entradas principales de la Pirámide del Sol en Teotihuacán (Chávez *et al.* 2001), la existencia de antiguos cimientos dentro de uno de los vestíbulos de la Basílica de Nuestra Señora de la Salud (Chávez *et al.* 2005a), y el posible vínculo entre un conjunto de rocas y los simientos de un asentamiento prehispánico (Chávez *et al.* 2005b), entre otros. En el resto de América también pueden mencionarse el sondeo de una plaza del sitio maya de Ma'ax Na, Belice (Aitken *et al.* 2004), el estudio de pozos de fogones y cimientos de edificios en el sitio Hasutin, a la vera del río Snake, Idaho, EE.UU. (Whiting *et al.* 2004) y la investigación realizada en Serrano y Morro Grande, Río de Janeiro, Brasil (Da Silva Cezar *et al.* 2001), la cual ha permitido localizar distintos tipos de objetos cerámicos. En Argentina, se pueden mencionar los estudios realizados en el fuerte de Floridablanca, Pcia. de Santa Cruz (Lascano *et al.* 2003) y en Palo Blanco, Pcia. de Catamarca (Martino *et al.* 2005).

Para finalizar el capítulo y a modo de conclusión puede decirse que el método de georadar permite detectar y localizar objetos enterrados con muy buena precisión y en tiempos relativamente cortos, lo que a su vez puede ser realizado a un costo razonable y bajo condiciones que preservan los bienes arqueológicos. El GPR constituye una poderosa herramienta para la investigación arqueológica, que se potencia cuando es aplicada en conjunción con otros métodos geofísicos de prospección.

