

Utilización de georradar para la localización de nidos de galápagos



Justificante de la subvención con cargo a la línea T3121” (Resolución De 18 de mayo de 2011 CMAAUH)”.



UTILIZACIÓN DE GEORRADAR PARA LA LOCALIZACIÓN DE NIDOS DE GALÁPAGOS EXÓTICOS INVASORES EN EL MEDIO NATURAL DENTRO DEL PROYECTO “ESTRATEGIA Y TÉCNICAS DEMOSTRATIVAS PARA LA ERRADICACIÓN DE GALÁPAGOS INVASORES” (LIFE09 NAT/000529). 1ª FASE, AÑO 2011

PREÁMBULO

Esta 1ª Fase que comprende la planificación de la utilización del georradar para la localización de nidos de galápagos exóticos invasores en el medio natural, conlleva la necesidad de explicar qué es el georradar, dado que los fundamentos e instrumentación de esta técnica van a condicionar cómo diseñar una metodología *ad hoc* y qué resultados se esperan en mediciones que se han de realizar en el medio natural.

Se expondrán sucintamente sus fundamentos teóricos de los que depende, principalmente, del tipo de litologías/material por donde se propague (propiedades electromagnéticas, atenuación) y del tipo de antenas que se utilicen (resolución).

Es una técnica no destructiva al ser la más resolutive reproduce mejor que cualquier otra técnica geofísica los posibles problemas a solventar desde el punto de vista geofísico y de ingeniería. Es por ello que la detección de nidos de galápagos exóticos invasores en medios estratificados naturales sea factible dado que se puede registrar huecos y zonas removidas en el subsuelo como se ha constatado en otros ámbitos de aplicación (arqueología, ingeniería civil).

Esta técnica geofísica es un sistema electromagnético para la detección y localización de elementos y/o formaciones en el subsuelo, construcciones u objetos materiales. Todos los medios citados poseen sus características electromagnéticas propias (constante dieléctrica, permeabilidad magnética y conductividad eléctrica).

Sus fundamentos teóricos son los mismos que los que un radar convencional emplea para detectar un avión, pero el georradar utiliza un ancho de banda más amplio, y las antenas receptora y emisora se dirigen hacia el subsuelo u objeto a estudiar.

El georradar se ha convertido, en poco tiempo, en una herramienta prospectiva multidisciplinar y de gran resolución para profundidades que van desde los primeros centímetros hasta decenas de metros (se alcanzan 50 m de profundidad), aplicándose en muy diversas áreas:



- Ingeniería Civil.
- Geología Recursos Naturales.
- Hidrología.
- Estudios del Medio Ambiente.
- Arqueología.
- Patrimonio Histórico y Artístico.

El georradar es un método de prospección geofísica basado en la emisión de impulsos electromagnéticos de muy corta duración (entre 1 ns y 10 ns) en la banda de frecuencias de UHF-VHF (normalmente entre 100 MHz y 1,6 GHz). La técnica de georradar se basa en el principio de reflexión de ondas electromagnéticas que se propagan en un medio. La propagación de estos pulsos electromagnéticos por un medio se puede definir teóricamente a partir de las ecuaciones de Maxwell para ondas electromagnéticas.

Esquemáticamente, las mediciones se efectúan mediante la generación, por la antena emisora de una onda electromagnética con una frecuencia característica. Ésta se va propagando por el medio, hasta que alcanza una zona u objeto cuyas propiedades eléctricas son diferentes respecto a las circundantes o adyacentes, entonces, parte de la energía electromagnética se refleja hacia la superficie, mientras que el resto de energía continúa propagándose. La onda electromagnética reflejada se recibe a través de la antena receptora y se registra para su posterior tratamiento e interpretación.

El actual modus operandi del georradar puede originar secciones verticales continuas (llamadas registros radar o radargramas) del subsuelo, similares en apariencia e interpretación a una sección sísmica. Las operaciones de campo con georradar son sencillas y la adquisición de datos es muy rápida.

Dependiendo del tipo de problema a resolver, es decir de la auscultación hasta la profundidad deseada (por ejemplo 25 cm, 50 cm, 1 m, 5 m, 10 m, 30 m,...), debe utilizarse una o varias antenas de emisión y recepción. Estas antenas tienen frecuencias de emisión generalmente de 1,6 GHz, 900 MHz, 500 MHz, 400 MHz, 200 MHz y 100 MHz. La frecuencia de emisión de los pulsos (orden de los kHz), la duración de éstos (orden de nanosegundos) y la amplificación de la señal a aplicar depende de cada tipo de problema a tratar y de las características de los materiales y/o terrenos a investigar.

A continuación se expone los fundamentos teóricos, el diseño metodológico de esta técnica para la detección de nidos de galápagos y muestreo en la zona piloto para el ajuste de los datos de georradar.

1.- LA TÉCNICA NO DESTRUCTIVA DEL GEORRADAR

1.1.- Fundamentos teóricos

1.1.1.- Introducción a la técnica de georradar

La técnica de georradar es un método de prospección geofísica no destructivo basado en la emisión y recepción de impulsos electromagnéticos de muy corta duración en la banda de frecuencias de UHF-VHF (entre 8 MHz y 2,5 GHz).

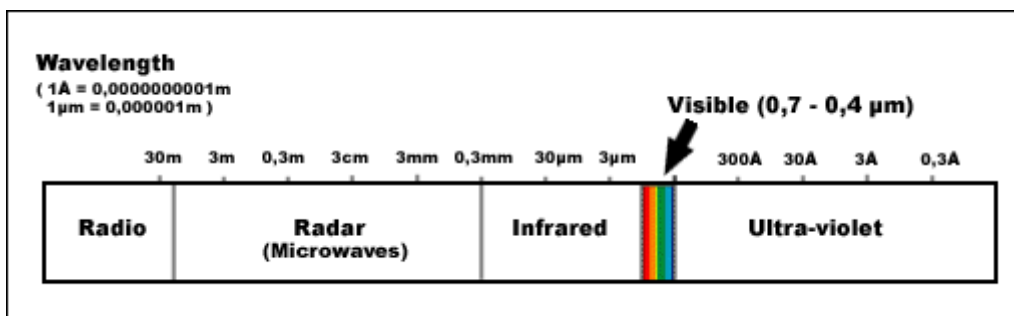


Figura 1. Espectro electromagnético.

El georradar está diseñado para que el medio por el que se propaga la energía sea el subsuelo o cualquier otro medio material. Por lo tanto, la prospección con georradar se basa en la emisión y detección de ondas electromagnéticas que se propagan por un medio heterogéneo.

Cuando con una antena emisora se generan impulsos en una dirección, éstos, en su trayectoria a través del medio, pueden encontrarse con un cambio de substrato o algún tipo de objeto u oquedad. La incidencia de esta energía en las heterogeneidades del medio provoca fenómenos de reflexión, refracción y difracción que pueden ser detectados por una antena receptora. **Lo que se detecta realmente es un cambio en las propiedades eléctricas de los medios atravesados.**

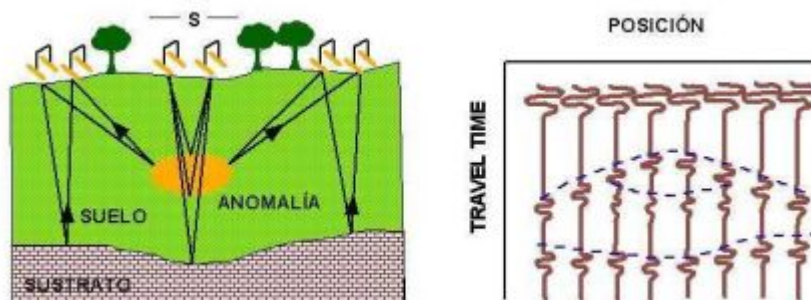


Figura 2. Esquema del funcionamiento del georradar.

El método es similar a la sísmica de reflexión de pequeño ángulo y los fenómenos asociados con la propagación de la energía son básicamente los mismos,



diferenciándose en el rango de frecuencias de las ondas utilizadas. El georradar emplea ondas de frecuencias mucho mayores que las utilizadas en sismica. A diferencia de la prospección sísmica, en la cual son las propiedades mecánicas de los materiales las que rigen la propagación de las ondas, con el georradar las propiedades determinantes serán electromagnéticas:

- **Permitividad dieléctrica.**
- **Conductividad.**
- **Permeabilidad magnética.**

Las reflexiones se producen debido a los contrastes de estas propiedades.

1.1.2.- Propagación de ondas electromagnéticas

Este método de prospección tiene sus bases teóricas en los conceptos de óptica geométrica y en la teoría de campos electromagnéticos, cuyas ecuaciones básicas fueron formuladas por Maxwell en 1867, relacionando los campos eléctrico y magnético con sus fuentes. Estas relaciones se completan con las denominadas ecuaciones de continuidad, que especifican el comportamiento de estos campos en las zonas en las que existen distribuciones superficiales de carga, es decir, donde encontramos discontinuidades en el medio. A partir de estas ecuaciones se puede determinar el comportamiento de una onda de radar durante su propagación por un medio determinado.

Estas ecuaciones, para el campo eléctrico y magnético, se formulan como:

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

donde:

- \vec{D} , la inducción eléctrica (C/m²).
- \vec{J} , la densidad de corriente (A/m²).
- \vec{H} , la intensidad del campo magnético (A/m).
- \vec{B} , la inducción magnética (T).
- ρ_f , la densidad de carga libre (C/m³).
- \vec{M} , la imanación (A/m).
- \vec{E} , la intensidad del campo eléctrico (V/m).

Las denominadas ecuaciones constitutivas relacionan la intensidad del campo eléctrico y magnético con el desplazamiento eléctrico y la inducción magnética, respectivamente.

Para medios homogéneos e isotrópicos, las ecuaciones constitutivas tienen una expresión sencilla, relacionando estas magnitudes por medio de la permitividad dieléctrica (ϵ)



F/m, la conductividad (σ) Siemens/m y la permeabilidad magnética (μ) H/m del material:

$$\vec{D} = \epsilon \vec{E}$$

$$\vec{H} = \frac{\vec{B}}{\mu}$$

$$\vec{J} = \sigma \vec{E}$$

Con esto, suponiendo la ausencia de cargas eléctricas libres en la región que se está estudiando ($q = 0$), las ecuaciones de Maxwell se expresan de la siguiente forma:

$$\nabla \times \vec{E} = -\mu \frac{\partial \vec{H}}{\partial t}$$

$$\nabla \times \vec{H} = \epsilon \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} + \sigma \vec{E}$$

$$\nabla \cdot \vec{E} = 0$$

$$\nabla \cdot \vec{H} = 0$$

1.1.3.- Parámetros electromagnéticos de un medio

Los parámetros electromagnéticos (conductividad, permitividad dieléctrica y permeabilidad magnética) son los que definen un medio al paso de una onda electromagnética.

1.1.3.1. Conductividad

La conductividad eléctrica es la medida de la capacidad de un material para conducir corriente eléctrica. Es decir, expresa la respuesta de las cargas libres de un medio en presencia de un campo eléctrico externo, siendo el factor de proporcionalidad entre el campo libre aplicado y la densidad de volumen de corriente debido al movimiento de estas cargas libres. Según la ley de Ohm:

$$\vec{J}_f = \sigma \vec{E}$$

Siendo:

- \vec{E} , campo eléctrico externo aplicado.
- \vec{J}_f , densidad volúmica de corriente debido a las cargas libres.
- σ , conductividad del material (S/m).

La conductividad de un medio es la inversa de su resistividad (medida en Ohmios metro, Ωm).

En función de su conductividad, los materiales se clasifican como:

- Conductores, valores de conductividad superiores a 10^5 S / m.



- Aislantes, valores de conductividad inferiores a 10^{-8} S / m .
- Semiconductores, Valores comprendidos entre los dos anteriores.

En muchos medios, es el contenido de agua en los poros del material el factor que determina su conductividad.

En la mayor parte de los medios en los que se realizan estudios, la conductividad es principalmente electrolítica pues, excepto en el caso de la existencia de minerales metálicos o de arcillas, la mayor parte de los materiales habituales pueden ser considerados como aislantes. En estos medios, la conducción eléctrica se debe básicamente a la existencia de fluido (con iones disueltos) en poros y fisuras. Es decir, cuanto mayor la porosidad del medio, mayor será el contenido en agua e iones y, en consecuencia, mayor será su conductividad.

En la siguiente tabla se muestran porcentajes de la porosidad aproximada que presentan ciertas rocas:

Tabla 1. Porosidad de en rocas.

Tipo de rocas	Porosidad en %
Arcillas	20-50
Arenas gruesas	25-60
Arenas finas	30-60
Arenas de playa	80-85
Arenisca	20-35
Caliza	1.5-20
Cienos	80-85
Dolomías	3-20
Gravas	20-40
Lavas	20-80
Margas	4-60
Rocas ígneas	0.3-5
Volcánicas clásticas	5-60

La temperatura afecta a la movilidad de los iones influyendo, de este modo, en la conductividad electrolítica. En general, la conductividad es un parámetro fuertemente variable que no depende sólo de los materiales del medio, ya que puede variar dentro de una misma formación. En la siguiente tabla se muestra la conductividad de algunos materiales abundantes en el subsuelo.

Tabla 2. Conductividad de las rocas.

Rocas sedimentarias	Conductividad (S/m)	
	Rango	Valores frecuentes
Limos	1/100 – 1/20	-----
Arcillas	1/100 – 1/6	1/20 – 1/16
Argilita	1/200 – 1/5	1/100 – 1/80
Pizarras arcillosas	1/500 – 1/50	1/200 – 1/120
Areniscas	1/1000 – 1/30	1/400 – 1/200



Conglomerados	1/1000 – 1/100	-----
Margas	1/1000 – 1/100	1/400 – 1/150
Calizas	1/100000 – 1/100	1/700 – 1/300
Dolomías	1/100000 – 1/100	1/800 – 1/200
Yesos	1/200000 – 1/5000	1/1800 – 1/1500
Anhidrita	1/100000 – 1/1000	1/3000 – 1/1500
Rocas intrusivas y efusivas		
Granito Fanerozoico	1/10000 – 1/3000	-----
Granodiorita	1/10000 – 1/1000	-----
Diorita	1/70000 – 1/5000	-----
Gabro	1/200000 – 1/20000	-----
Peridotita	1/1000000 – 100000	-----
Sienita	1/200000 – 1/2000	-----
Porfirita	1/30000 – 1/10000	-----
Andesita	1/10000 – 1/500	-----
Basalto	1/3000 – 1/1000	-----
Rocas metamórficas		
Cuarcita	1/100000 – 1/1000	-----
Esquisto micáceo	1/100000 – 1/500	-----
Mármol	1/1000000 – 100000	-----
Gneis	1/20000 – 1/2000	-----

Observando la tabla anterior se puede apreciar que el rango de la conductividad para un mismo material es muy amplio.

En general, la conductividad eléctrica se presenta como un valor complejo:

$$\sigma = \sigma' - i \sigma''$$

Donde la parte real determina la amplitud de la corriente en fase con la intensidad del campo eléctrico externo, y la parte imaginaria determina la amplitud de la corriente desfasada respecto al campo eléctrico externo, considerando el retardo en la respuesta de conducción que presenta el material en presencia de un campo eléctrico variable con el tiempo.

1.1.3.2. Permitividad dieléctrica

La permitividad dieléctrica absoluta, ϵ es una constante de proporcionalidad entre la intensidad del campo eléctrico externo aplicado y el vector desplazamiento eléctrico, \vec{D} :

$$\vec{D} = \epsilon \vec{E}$$

La permitividad absoluta, ϵ (F / m en el S.I.) se define como el producto entre una permitividad relativa del material (ϵ_r) y la permitividad dieléctrica del vacío ($\epsilon_0 = 8.854 \times 10^{-12} \text{ F / m}$):

$$\epsilon = \epsilon_0 \epsilon_r$$



La permitividad dieléctrica relativa es una constante adimensional que expresa la capacidad de polarización de un material en presencia de un campo eléctrico. En el vacío tiene valor 1. Para la mayoría de los materiales que podemos encontrar en el subsuelo al realizar una prospección electromagnética, los valores de la permitividad dieléctrica relativa se encontrarán entre 1 (la del aire) y 81, siendo esta última la del agua a 20° C de temperatura.

La constante dieléctrica se representa en forma compleja como una expresión en la que la componente real produce una corriente en fase respecto al campo eléctrico externo, mientras que la componente imaginaria provoca una corriente en desfase respecto dicho campo eléctrico, siendo:

$$\varepsilon = \varepsilon' - i\varepsilon''$$

Dividiendo esta ecuación por ε_0 se obtiene una expresión similar para la permitividad relativa.

Este parámetro y la conductividad están interrelacionados entre sí. La parte real de la permitividad dieléctrica y la imaginaria de la conductividad generan una corriente que varía en fase con el campo eléctrico aplicado, mientras que la parte imaginaria de la primera y la real de la segunda generan una corriente desfasada respecto al campo eléctrico.

La componente imaginaria de la permitividad dieléctrica considera los retardos en la respuesta a la polarización del material sometido a un campo electromagnético, es decir, indica el factor de pérdidas dieléctricas. Por otro lado, también contiene el factor que indica las pérdidas por conducción.

Para altas frecuencias (entre 10 MHz y 1000 MHz), en la mayor parte de los materiales del subsuelo, los fenómenos de desplazamiento (o polarización) dominan sobre los fenómenos de conductividad. De modo que, los medios suelen caracterizarse a partir de su constante dieléctrica. Para frecuencias menores el término de la conductividad estática predomina sobre el otro.

1.1.3.3. Permeabilidad magnética

La permeabilidad magnética es la capacidad que presenta un material para atraer o hacer pasar a través suyo un campo magnético. Este parámetro (μ) relaciona la inducción magnética, \vec{B} , con la intensidad de campo magnético, \vec{H} .

$$\vec{B} = \mu\vec{H}$$

La permeabilidad absoluta μ se puede escribir como el producto entre la permeabilidad magnética del vacío ($\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ H/m) y la permeabilidad relativa del material:

$$\mu = \mu_0\mu_r$$

En la mayor parte de los materiales que nos encontremos en los estudios con georradar (excepto en aquellos que contengan materiales ferromagnéticos) se cumple que la permeabilidad magnética es próxima a 1, no dependiendo de la frecuencia del campo magnético.

1.1.4.- Propagación de una onda electromagnética

La radiación electromagnética es una forma de energía que puede ser únicamente observada por su interacción con la materia. La EMR está hecha de componentes eléctricos y magnéticos y es afectada por las propiedades eléctricas y magnéticas de la materia con la cual entra en contacto.

La Figura 3.3 ilustra una onda electromagnética viajando a través del espacio. Los componentes eléctricos y magnéticos están en fase siempre perpendiculares entre sí a la vez que perpendiculares a la dirección del viaje.

La distancia física de la cresta de una onda a la siguientes es denominada longitud de onda y es usualmente designada con la letra griega lambda (λ). El número de longitudes de onda pasando a través de un punto del espacio en un período específico de tiempo, es llamado la frecuencia y es designado con la letras f o r . Dado que cada longitud de onda representa un ciclo completo de la onda, la frecuencia es generalmente expresada como el número de ciclos por segundo o Hertz (Hz). Un Hertz es igual a un ciclo por segundo.

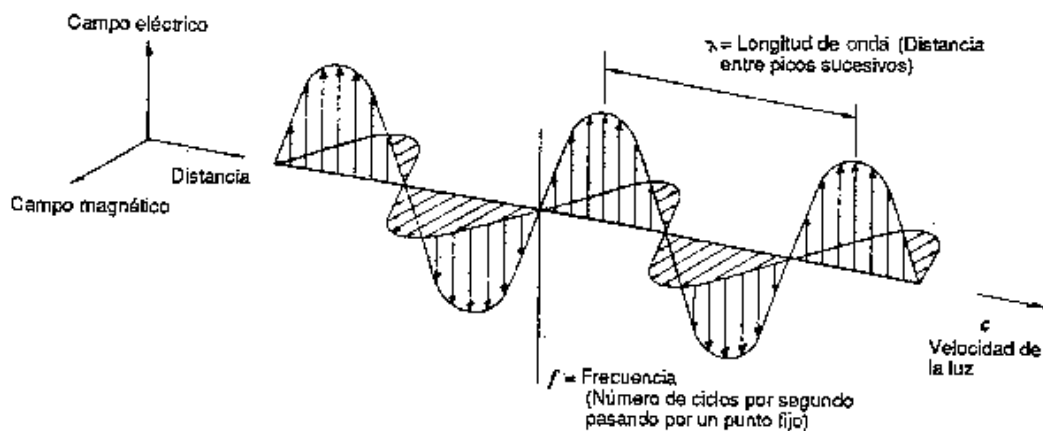


Figura 3. Esquema de una onda EM viajando a través de un medio.

La orientación de la onda (esto es, el plano a lo largo del cual viaja) es referida como la polarización. La EMR producida naturalmente contiene ondas que son polarizadas de forma aleatoria. Se pueden emplear filtros polarizantes para seleccionar aquellas ondas que tienen una orientación particular. Fuentes de EMR construidas por el hombre, tales como los sistemas de radar, producen ondas con una polarización vertical u horizontal con respecto a la superficie. Algunos tipos de materiales pueden ser distinguidos por su tendencia a despolarizar estas ondas.

A partir de las ecuaciones de Maxwell, considerando una onda plana que se propaga en un medio, se pueden calcular las relaciones que definen la propagación de las ondas



electromagnéticas en un material. Considerando el caso de una onda plana que se propaga en la dirección \vec{r} , se obtiene la siguiente ecuación:

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

Podemos observar que un término define la propagación de la onda con el tiempo, mientras que el otro muestra la disminución de la amplitud de la onda con la distancia recorrida. Este último término depende de un factor de decaimiento γ :

$$\begin{aligned}\vec{E}(\vec{r}) &= \vec{E}_0 e^{-\gamma \vec{r}} \\ \vec{H}(\vec{r}) &= \vec{H}_0 e^{-\gamma \vec{r}}\end{aligned}$$

Este término γ es denominado constante de propagación o número de onda complejo, que puede expresarse en función de los parámetros electromagnéticos característicos de cada medio:

$$\gamma = i\omega\sqrt{\varepsilon_0\varepsilon_r\mu_0\mu_r} = i\frac{\omega}{c}\sqrt{\varepsilon_r\mu_r} = i\frac{2\pi}{\lambda_0}\sqrt{\varepsilon_r\mu_r}$$

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

$$\gamma = \alpha + i\beta$$

El factor de atenuación de la onda se determina en la componente real del número de onda complejo, mientras que la constante de fase de la onda lo hace en la componente imaginaria del número de onda complejo.

1.1.4.1.- Velocidad de propagación de una onda electromagnética en un medio material

El segundo parámetro (β) permite determinar la velocidad de la onda en el medio material en el cual se está propagando, pues:

$$\beta = \frac{\omega}{v}$$

Donde v es la velocidad de fase de la onda electromagnética. De forma que, para medios no magnéticos (los más frecuentes en los estudios con georradar), la expresión que emplea para la obtención de la velocidad de propagación de la onda es la siguiente:

$$v = \frac{c}{\text{Re}\sqrt{\varepsilon_r}}$$



Para materiales diferentes, las expresiones de la velocidad, v , y de la constante de propagación γ , adoptan diferentes formas.

En muchos casos, la parte imaginaria de la permitividad dieléctrica es pequeña frente a la parte real. Dicha parte imaginaria depende de la conductividad del medio y del factor de pérdidas dieléctricas relacionado con la relajación en la molécula de agua. Cuando los medios son dieléctricos o poco conductores el término asociado con la conductividad es pequeño. Si además se tiene en cuenta que las frecuencias habituales de trabajo están situadas entre los 10 MHz y los 1000 MHz, se puede considerar que la parte imaginaria es mucho menor que la parte real de la permitividad. En estos casos la ecuación 3.16 puede simplificarse y escribirse como:

$$v = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \epsilon_r \mu_0}} = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r}}$$

1.1.4.2.- Longitud de onda en un medio diferente del vacío

La longitud de onda en un medio dado, λ_m , dependerá de la velocidad de fase y de la frecuencia de la onda emitida.

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

donde λ_0 es la longitud de onda en el vacío.

En medios no magnéticos ($\mu_r = 1$), la expresión se simplifica, quedando:

$$\lambda_m = \frac{\lambda}{\text{Re} \sqrt{\epsilon_r}}$$

La longitud de onda determina la resolución vertical del georradar y dependerá de la frecuencia de emisión de la antena y de la constante dieléctrica efectiva del material.

1.1.4.3.-Parámetros efectivos

Los parámetros que definen el comportamiento electromagnético de los materiales (permitividad dieléctrica y conductividad) tienen, tal y como hemos visto en apartados anteriores, una parte real y una parte compleja.

Tanto la parte real de la conductividad como la parte imaginaria de la constante dieléctrica compleja producen una corriente en desfase respecto al campo eléctrico, mientras que la parte imaginaria de la conductividad y la parte real de la permitividad dieléctrica provocan una corriente en fase respecto al campo eléctrico.

Las corrientes en fase respecto al campo eléctrico producen una conductividad que se denomina efectiva y que es el valor mensurable de este parámetro, mientras que las



corrientes en desfase, junto con el efecto de las cargas libres para altas frecuencias, producen un retardo del campo eléctrico. De esta forma se definen los parámetros efectivos. La conductividad efectiva es la suma de los efectos de la componente real de la conductividad compleja y del efecto de la componente imaginaria de la permitividad dieléctrica, que genera un campo eléctrico en fase con el campo externo:

$$\sigma_{ef} = \sigma' + \omega \varepsilon''$$

La permitividad efectiva está compuesta por la componente real de la permitividad compleja y por el efecto de las cargas libres, siendo importante el retardo del campo eléctrico debido al efecto de las cargas libres en el caso de altas frecuencias.

$$\varepsilon_{ef} = \varepsilon' - \frac{\sigma''}{\omega}$$

Son estos parámetros los que se pueden medir en experiencias de laboratorio y los que se utilizan para calcular la velocidad de propagación de la onda electromagnética por el medio así como la atenuación de la energía que se produce durante esta propagación. En lo sucesivo, aunque no se mencionen explícitamente los parámetros efectivos, se entiende que son los utilizados para definir el comportamiento de las ondas electromagnéticas en los medios.

1.1.5.- Reflexión y refracción

Cuando la energía electromagnética alcanza una discontinuidad en los parámetros electromagnéticos del medio, se producen los fenómenos de reflexión y de refracción. Cuando la interfase es plana, la frecuencia de las ondas reflejadas y refractadas es la misma que la frecuencia de la onda incidente, siendo también el ángulo de reflexión igual al de incidencia.

La ley de Snell relaciona los ángulos de incidencia, reflexión y refracción con las velocidades de propagación de las ondas en los dos medios que están en contacto.

El porcentaje de energía reflejada depende del contraste existente entre los parámetros electromagnéticos de los diferentes materiales del medio. Este porcentaje nos define los coeficientes de transmisión y de reflexión de la energía.

La impedancia de un campo electromagnético es el cociente entre el campo eléctrico y el campo magnético, pudiendo definir una impedancia para el campo electromagnético incidente, η_1 , que coincidirá con la del campo magnético reflejado, y otra para el campo electromagnético refractado, η_2 .

$$\eta_1 = \left\{ \frac{\vec{E}_i}{\vec{H}_i} = \sqrt{\frac{\mu_0 \mu_r}{\varepsilon_0 \varepsilon_r}} \right\} = \left\{ \frac{\vec{E}_r}{\vec{H}_r} = \sqrt{\frac{\mu_0 \mu_r}{\varepsilon_0 \varepsilon_r}} \right\}$$

$$\eta_2 = \left\{ \frac{\vec{E}_t}{\vec{H}_t} = \sqrt{\frac{\mu_0 \mu_{r2}}{\varepsilon_0 \varepsilon_{r2}}} \right\}$$

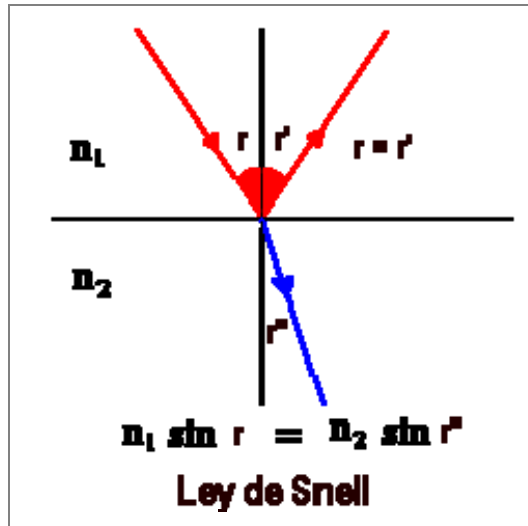


Figura 4. Esquema de la Ley de Snell.

A partir de las expresiones de las impedancias se pueden calcular los coeficientes de transmisión y de reflexión de Fresnel, como el cociente entre el campo incidente y el campo refractado en el primer caso, y el cociente entre el campo incidente y el campo reflejado en el segundo caso. Sean a_i el ángulo de incidencia de la onda sobre la superficie plana y a_t el ángulo de refracción, estos coeficientes adoptan la siguiente expresión:

$$R_{1 \rightarrow 2} = \frac{\vec{E}_r}{\vec{E}_i} = \frac{\eta_2 \cos(a_t) - \eta_1 \cos(a_i)}{\eta_1 \cos(a_i) - \eta_2 \cos(a_t)}$$

$$T_{1 \rightarrow 2} = \frac{\vec{E}_t}{\vec{E}_i} = \frac{2\eta_2 \cos(a_t)}{\eta_1 \cos(a_i) - \eta_2 \cos(a_t)}$$

donde $T_{1 \rightarrow 2}$ es el coeficiente de Fresnel de refracción entre los medios superior (1) e inferior (2), $R_{1 \rightarrow 2}$ es el coeficiente de Fresnel de reflexión en el contacto entre los dos medios, \vec{E}_i el campo incidente, \vec{E}_r el campo reflejado y \vec{E}_t el campo refractado o transmitido.

En los estudios que se realizan con georradar, pueden simplificarse estas expresiones ya que el sistema opera con reflexión de muy pequeño ángulo, es decir, que se trabaja con incidencia normal (en el caso de que la superficie reflectora sea plana). En estas condiciones, los coeficientes de reflexión y de refracción sólo dependen de la relación entre impedancias complejas. Si además se trabaja en medios no magnéticos, una aproximación adecuada para la mayoría de los estudios con georradar, la expresión de los coeficientes queda como:

$$R = \frac{\eta_1 - \eta_2}{\eta_1 + \eta_2} = \frac{\sqrt{\epsilon_{r1}} - \sqrt{\epsilon_{r2}}}{\sqrt{\epsilon_{r1}} + \sqrt{\epsilon_{r2}}}$$

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

- R (coeficiente de reflexión), porcentaje de energía reflejada respecto de la energía incidente.
- T (coeficiente de refracción), porcentaje de energía transmitida al segundo medio respecto de la energía incidente.
- R + T = 1

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

En un estudio con georradar, valores de R elevados implican que se va a observar con más facilidad la onda reflejada en los registros. Pero, a su vez, la penetración del método disminuye y las reflexiones producidas en contrastes posteriores son de menor amplitud, pues el porcentaje de energía refractada es menor.

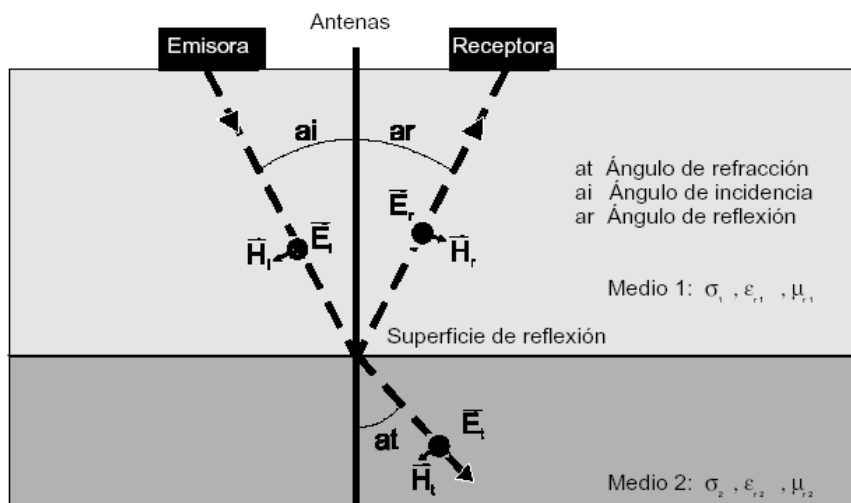


Figura 5. Onda EM polarizada horizontalmente (reflexión y refracción).

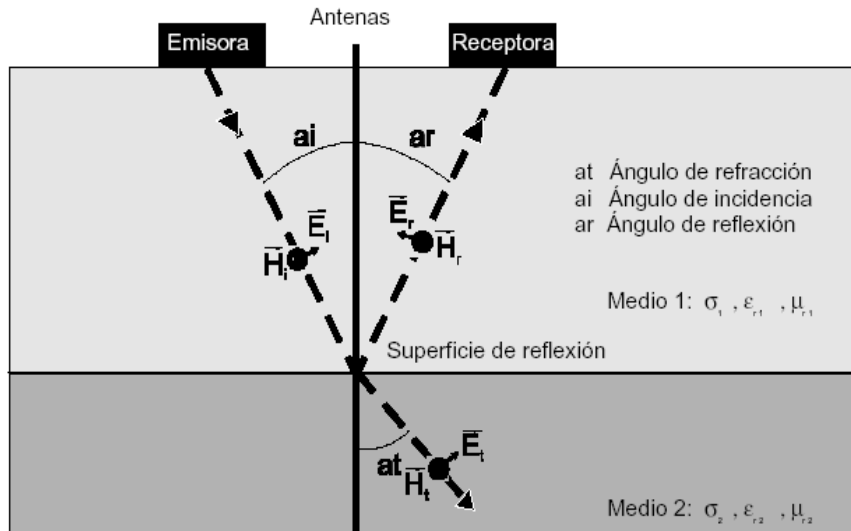


Figura 6. Onda EM polarizada verticalmente (reflexión y refracción).

1.1.6.- Fenómenos asociados a la propagación de las ondas en medios materiales

Los parámetros que influyen en la velocidad de propagación de la onda son: la permitividad dieléctrica relativa del medio, la conductividad, la permeabilidad magnética y la frecuencia de emisión. Los tres primeros son característicos del medio, mientras que el último depende del aparato utilizado.

Durante la propagación de una onda electromagnética por un medio se producen pérdidas de energía debido a diferentes causas. Esta disminución de la amplitud de la onda determina la profundidad máxima teórica que se podrá alcanzar en cada caso. Otros efectos tales como una mala relación señal/ruido, problemas con los equipos o un tratamiento incorrecto harán que este valor sea, en la práctica, todavía menor que el esperado.

La disminución de energía es consecuencia de:

1. Las pérdidas producidas en la reflexión y refracción en cada una de las interfaces electromagnéticas que atraviese la onda.
2. La dispersión geométrica del frente de ondas.
3. La dispersión de la energía en elementos del orden de la longitud de onda.
4. La absorción de energía por parte del medio (transformándola en calor).

En este último caso, la atenuación que se produce depende de las características del medio atravesado y de la frecuencia de la radiación. Los dos factores más importantes son; la dispersión geométrica, que se produce en todos los medios, y la atenuación por absorción de energía, característica de los medios materiales.



La energía que finalmente capta la antena receptora en superficie es menor que la energía emitida en un principio a consecuencia, en parte, de los factores ya mencionados. Sin embargo, en el balance energético hay que considerar otros factores que también contribuyen a esta disminución. Para analizar la energía recibida en función de la energía emitida es necesario considerar las diferentes funciones del aparato emisor y receptor, los fenómenos de acoplamiento de la onda con la superficie del medio, la frecuencia utilizada, el contraste de parámetros electromagnéticos de los medios en contacto y, por último, el tipo de superficie donde se produce la reflexión.

1.1.6.1.- Pérdidas de energía por procesos internos al medio

1.1.6.1.1.- Dispersión geométrica del frente de ondas

La antena del radar radia la mayor parte de la energía en un haz cónico cuyo ángulo mayor (en la dirección de desplazamiento de la antena) es de unos 90°. En este caso, si se considera que el medio por el que se propaga la energía es homogéneo y no absorbente, la reducción de la energía es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia recorrida. Para un medio en el que la permitividad dieléctrica varía espacialmente, la velocidad también irá variando, por lo que la atenuación geométrica deberá calcularse a partir de integrar la atenuación en cada punto para toda la trayectoria de la onda.

1.1.6.1.2.- Absorción

La absorción se produce cuando durante la propagación de la onda parte de la energía electromagnética se convierte en calor. Esto es consecuencia de la polarización por orientación de las moléculas de agua; fenómeno que se produce en la banda de frecuencias en la que opera el georradar. Dicho fenómeno consiste en la orientación de la molécula de forma que su carga positiva se desplaza respecto a la negativa en la dirección del campo eléctrico aplicado. En general, los materiales del subsuelo tienen muy poca capacidad de polarización orientacional dado que no tienen la suficiente libertad para poderse orientar según el campo eléctrico, lo que sí ocurre con el agua. De esta forma, la existencia de agua en los poros de un medio determinado aumenta la capacidad de polarización del medio, con lo que, según lo dicho, las pérdidas de energía por esta causa serán mayores que en el caso de un medio seco.

1.1.6.1.3.- Dispersión de la energía (“scattering”)

Este fenómeno se produce cuando la energía electromagnética incide en objetos cuyas dimensiones son del orden de su longitud de onda o inferiores. En estos casos se produce una distribución aleatoria de la energía incidente. El resultado es una disminución de la amplitud de la onda y la generación de un ruido aleatorio de fondo en el radargrama. Este efecto es más evidente cuando en el estudio se utilizan antenas de más alta frecuencia, ya que en estos casos la longitud es de orden centimétrico.

Los efectos de difracción también se engloban dentro de este grupo. Se producen cuando la onda incide con un elemento único de tamaño relativamente grande, de forma que las condiciones del medio varían bruscamente de un punto a otro (es el caso de esquinas y bordes de láminas o de capas reflectoras, entre otros).



Otro factor que se incluye en este apartado es la denominada dispersión cromática. En los medios transparentes a una radiación, la constante dieléctrica depende de la frecuencia de la onda.

1.1.6.2.- Atenuación y profundidad peculiar de penetración

La atenuación como resultado de la absorción de energía por parte del medio es consecuencia de las características electromagnéticas del material por el que se propaga la onda y es la causa fundamental de las pérdidas de energía en el caso de medios materiales.

Si E_0 es la intensidad del campo eléctrico radiado y E_x es la intensidad del campo eléctrico a una cierta distancia x de la fuente de radiación, sin considerar otras pérdidas que las debidas a la absorción, la intensidad de campo eléctrico E_x se puede calcular como el valor inicial E_0 dividido por un factor de atenuación. Este factor de atenuación se obtiene realizando el cociente de las dos intensidades:

$$\frac{E_x}{E_0} = e^{-\alpha x}$$

donde α es el factor de atenuación, el cual depende de la permitividad dieléctrica del medio (ϵ), de su conductividad (σ), de la permeabilidad magnética (μ) y de la pulsación de la onda emitida (ω).

A partir del coeficiente de atenuación se define la profundidad de penetración peculiar o nominal, d ("skin depth"), como la inversa de dicho coeficiente:

$$d = \frac{1}{\alpha}$$

Esta profundidad d es aquella a la que la señal ha disminuido en amplitud un factor $1/e$ del valor inicial de la señal, lo que corresponde a un 37 % de su valor inicial.

Los materiales cuyas pérdidas son pequeñas, es decir, en los que el factor de pérdidas es mucho menor que 1 son los denominados materiales dieléctricos o casi dieléctricos.

1.1.7.- Rango del radar

La profundidad peculiar de penetración descrita en el apartado anterior no es igual al rango o penetración de las ondas de radar, sino que se trata de la distancia a la que la energía inicial ha disminuido en un factor $1/e$ teniendo en cuenta únicamente la absorción del medio. Además, para obtener d sólo se consideran los factores relacionados con el medio por el que se propaga la onda y que afectan a la atenuación, existiendo otros factores que también producen una disminución de la energía. Pero, además de estos factores relacionados con el medio y con la propagación de la onda, hay que tener en cuenta otros como son los instrumentales y los relacionados con la



superficie reflectora. Atendiendo a todo esto, el rango del radar se define como la máxima penetración que éste puede alcanzar.

De forma general puede decirse que las pérdidas que presenta una radiación electromagnética durante su propagación, a una distancia dada del emisor, son:

- Pérdidas producidas en la antena.
- Pérdidas durante la transmisión de la energía entre el aire y el medio.
- Pérdidas ocasionadas por la dispersión geométrica del frente de ondas.
- Atenuación en el interior del medio debido a las propiedades electromagnéticas del material.
- Atenuación por dispersión y difracción en pequeños elementos e heterogeneidades del medio.
- Atenuación por reflexión de parte de la energía en discontinuidades de tamaño grande.

1.1.8.- Resolución vertical y horizontal

La resolución de un equipo se define como su capacidad para discriminar elementos independientes en el subsuelo, ya sea en espesor (resolución vertical), o bien en tamaño horizontal (resolución horizontal). Conocer la resolución del aparato en un medio dado permite saber cuál es la distancia mínima que debe existir entre dos reflectores para que éstos se registren como eventos separados.

1.1.8.1.- Resolución vertical

Se define como la capacidad de una antena para distinguir dos señales cercanas en el tiempo. Este parámetro depende de la frecuencia de emisión y de la duración del pulso. Cuando la duración del pulso, Δt , disminuye, el ancho de banda, Δf , aumenta.

Los sistemas de georradar están diseñados para conseguir anchos de banda que tengan una frecuencia próxima a la central. Cumpliéndose esto, la duración del pulso y el ancho de banda son inversamente proporcionales.

$$\Delta t = \frac{1}{\Delta f}$$

Δt , duración del pulso.

Δf , ancho de banda.

Así pues, apoyándonos en la siguiente figura, se define la resolución vertical como el espesor mínimo de la capa intermedia que es capaz de distinguir la antena (considerando el conjunto de las tres capas ilustrado en la Figura 7).

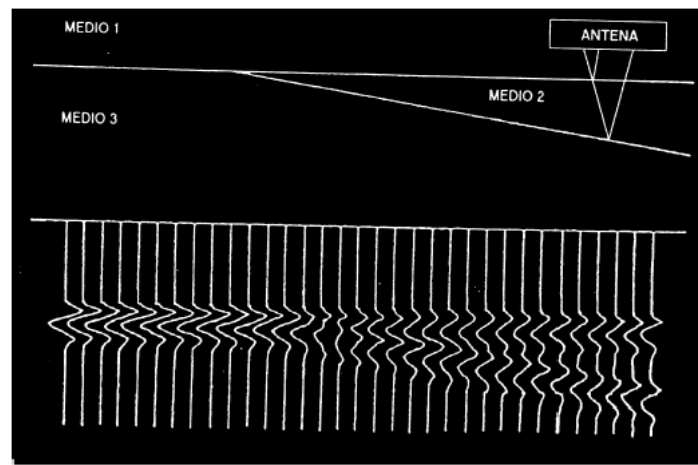


Figura 7. En la parte superior se representa el esquema de los tres medios y en la inferior el registro correspondiente.

La distancia entre los dos reflectores no es constante. A partir de cierta distancia se puede distinguir el uno del otro.

Para que el georradar pueda distinguir completamente la capa intermedia se debe cumplir que; la señal que ha incidido en la superficie que separa los medios 2 y 3, previamente, se haya reflejado en su totalidad en la separación de los medios 1 y 2. Con esto, la resolución vertical se puede expresar como:

$$r_v = \frac{v \cdot \Delta t}{2}$$

donde:

- v , velocidad de propagación de la onda en el medio.
- Δt , dos veces el periodo de la señal.

Cuando la distancia vertical (temporal) entre dos eventos es igual o mayor que el valor obtenido para r_v , entonces se detectan como reflectores separados, puesto que no se produce solape entre la energía procedente de las dos reflexiones.

En ciertas circunstancias es posible distinguir señales superpuestas, lo cual sucede cuando la intensidad de la segunda reflexión es mucho mayor que la primera. Por ejemplo, en el caso de que el tercer medio fuese un material metálico.

De la ecuación 3.28 se deduce que la resolución será tanto mejor cuanto menor sea la duración del pulso, siendo ésta inversamente proporcional a la frecuencia, tal y como se apuntó anteriormente. Así pues, la resolución aumentará con el aumento de la frecuencia pero, de este modo, también aumentará la atenuación. De modo que, para resultados óptimos, habrá que conseguir un equilibrio entre la profundidad de penetración y la resolución.



1.1.8.2.- Resolución horizontal

La resolución horizontal se define como la capacidad de una antena para detectar y resolver un reflector y su geometría. Depende de la velocidad de desplazamiento de la antena, del número de pulsos emitidos por segundo, de la geometría del haz y de la profundidad del reflector.

Un criterio para calcular la resolución horizontal es considerar que un elemento de dimensiones finitas queda totalmente definido cuando el número de trazas que lo alcanzan es suficiente. Para determinar el número de trazas, n_t , se propone la siguiente expresión:

$$n_t = (tr / s) \cdot \frac{2z}{v_a}$$

donde:

- n_t , número de trazas que alcanzan al reflector.
- v_a , velocidad de desplazamiento de la antena.
- z , distancia entre la antena y el reflector.
- (tr / s) , número de trazas por segundo que se registran.

El mínimo valor de n_t que permite identificar el objeto en el radargrama es la resolución horizontal. Muchos autores defienden que un elemento es resoluble cuando sobre él inciden más de 20 trazas.

La resolución se ve afectada por el tratamiento realizado sobre la señal. Por ejemplo, si se realiza una suma de trazas ("*stacking*"). Cuando se aplica este tratamiento para mejorar la relación señal / ruido, la resolución horizontal empeora.

1.2.- Instrumentación y adquisición de datos

1.2.1.- Componentes del georradar

El georradar funciona de la misma forma que cualquier otro sistema de radar, es decir, consiste en una antena emisora, una antena receptora (puede ser la misma antena emisora), un sistema de control de la radiación y una unidad de almacenamiento de registros.

1.2.1.1. Unidad central

La unidad central de un georradar es donde se realiza la coordinación y control de las antenas, de los accesorios que se puedan añadir al equipo básico y de la señal emitida. También coordina el almacenamiento de la señal en algún tipo de soporte 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.

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. En los casos de radares más sencillos sólo 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 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.

1.2.1.2. Antenas

Hablar en sentido estricto de antenas nos llevaría varios capítulos, desviándonos de la programación temporal propuesta en el máster. No obstante, no debemos dejar de mencionar las características más significativas de las antenas con las que opera el georradar, así como incluir una somera clasificación de las mismas.

Las antenas son una parte fundamental del equipo básico, pues 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.

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 dicha frecuencia se le denomina frecuencia central de la antena, determinándose su resolución mediante la duración de la señal radiada.

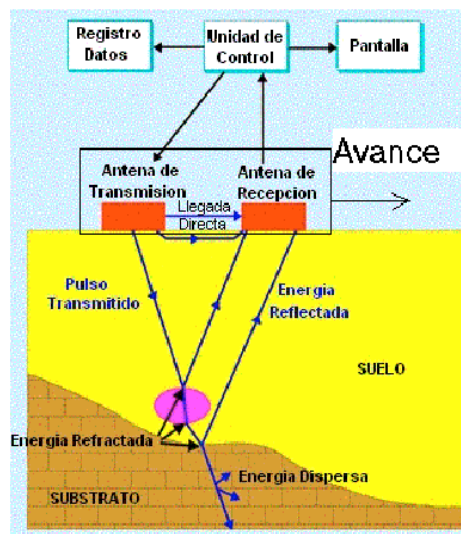


Figura 8. Esquema de funcionamiento del georradar.



2.- DISEÑO DE ENSAYOS DE EMPLEO DE LA TECNOLOGÍA DE GEORRADAR PARA LA DETECCIÓN DE NIDOS DE GALÁPAGOS EN MEDIOS NATURALES: 1ª FASE

2.1.- Muestreo de zona piloto para el ajuste de georradar para la detección de nidos de galápagos

La zona de muestreo donde se ha realizado esta 1ª Fase ha sido indicada por los técnicos de la *Generalitat* donde se ha verificado las puestas de la tortuga de Florida, *Trachemys scripta elegans*, comprende una serie de campos de naranjos contiguos entre sí y adyacentes a las lagunas de Almenara por su flanco occidental y distantes aproximadamente 2 km del mar. La superficie aproximada es de 2.57 Ha; la longitud entre los extremos de las parcelas es de 425 m y la anchura media de 71 m.

En esta 1ª Fase se ha empleado el georradar SIR3000 de la firma GSSI para la adquisición de datos, perteneciente a la Universidad Politécnica de Valencia. Esta instrumentación es fácilmente transportable y se puede llevar con relativa comodidad a las zonas objeto de estudio. Cuenta con una amplia gama de antenas desde los 100 MHz hasta los 1,6 GHz.

Teniendo en cuenta los fundamentos teóricos descritos en el anterior apartado se dispuso en un principio de tres antenas con frecuencias centrales de 400 MHz, 900 MHz y 1,6 GHz.

Con la información aportada por los técnicos de la *Generalitat* sobre la geometría, dimensiones y la profundidad de los nidos (dimensiones inferiores a 30 cm), y la geología de la capa más superficial en el (arcillas) de los campos adyacentes a las lagunas de Almenara se optó por:

- Empleo de antenas de 900 MHz y 1,6 GHz por su resolución vertical.
- Realización de perfiles para la toma de datos:
 - Longitudinales y transversales.
 - En malla con una separación máxima de 25 cm entre los perfiles.
- Control de las distancias en los perfiles con marcas fiduciaras de distancias conocidas.

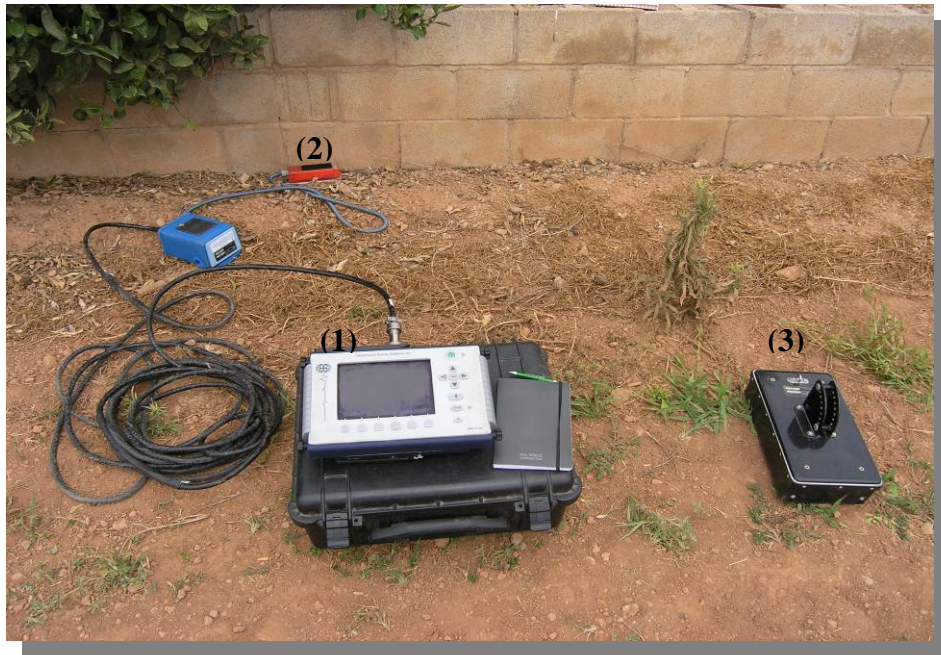


Figura 9. Equipo de georadar utilizado en esta 1ª Fase: (1) SIR3000; (2) antena 1,6 GHz; (3) antena 900 MHz.

Con esta finalidad se procedió a la elección de una zona piloto enmarcada en el área de estudio de los Estanys de Almenara, tal y como se muestra en la **Figura 10**.



Figura 10. Zona piloto estudiada con georadar de acuerdo con el esquema de situación de los perfiles y mallas de perfiles. Así como se indica la área de ajuste del georadar para este estudio.

Para el ajuste de los parámetros de registro de georradar se seleccionaron diversos campos donde se conocían la ubicación de nidos de galápagos y sus dimensiones previamente habían sido determinadas (largo, ancho y profundidad). Se midió con las antenas de 900 MHz y 1,6 GHz. Para ello se diseñó una malla de perfiles de longitud 1,5 m y una separación entre ellos de 10 cm (**Figura 11**).

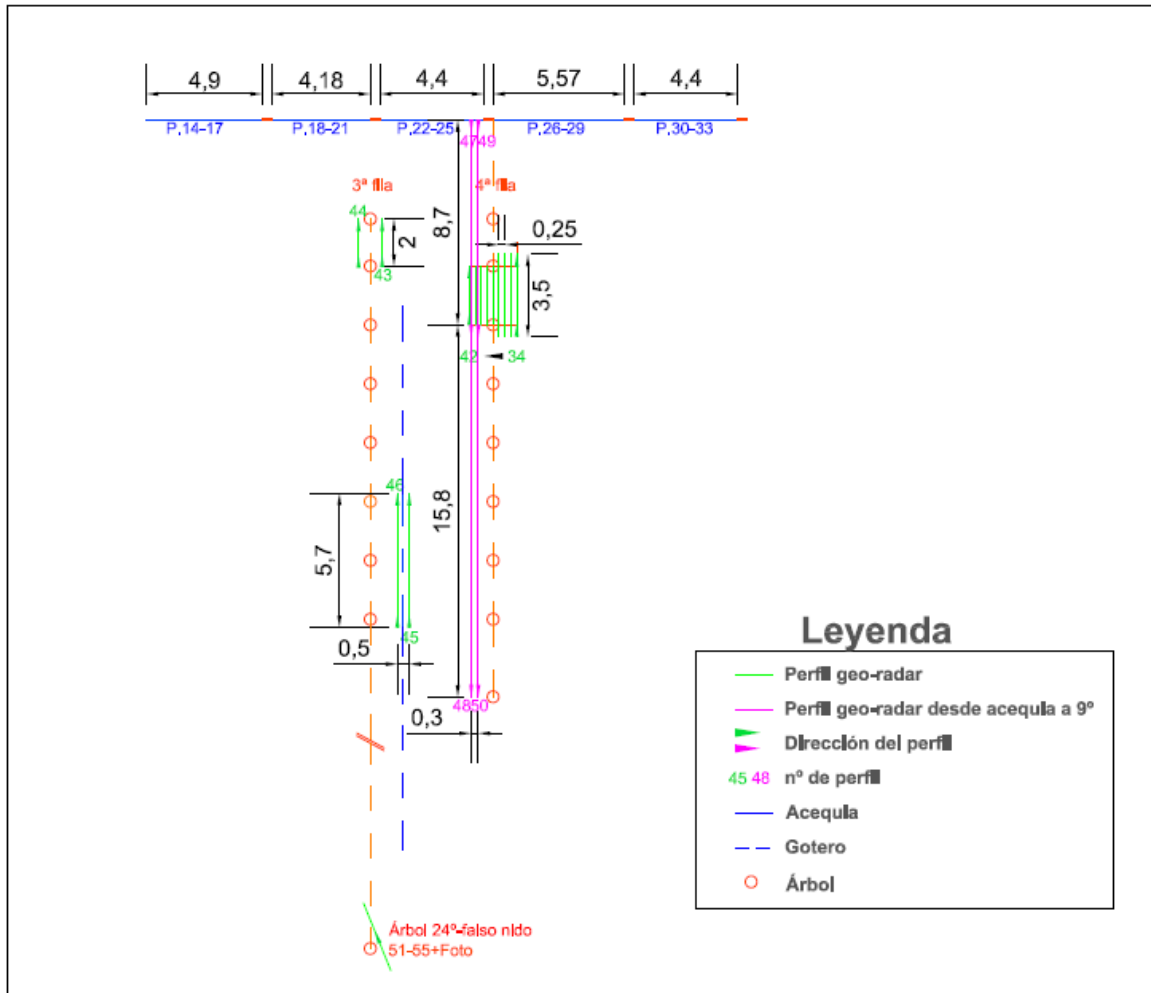


Figura 11. Esquema de situación en la zona piloto de los perfiles y mallas de perfiles en el campo de naranjos estudiado con georradar (paralelos a la acequia de riego y a lo largo de la 3ª y la 4ª filas de naranjos).

Una vez procesados los datos y obtenidas sus propiedades electromagnéticas, se proyectó un estudio piloto más amplio donde se emplearon ambas antenas en la realización de perfiles y mallas de perfiles, en total **55 perfiles**, tal y como se observa en la **Figura 11**.



Figura 12. Fotografía donde se muestra la medición realizada en la 4ª fila de naranjos con la antena de 900 MHz.

Estos perfiles se han reobservado en diferentes días para su comparación entre sí. Obteniéndose con ambas antenas resultados positivos en la detección de nidos, como se observa en los siguientes radargramas (**Figuras 13 y 14**).

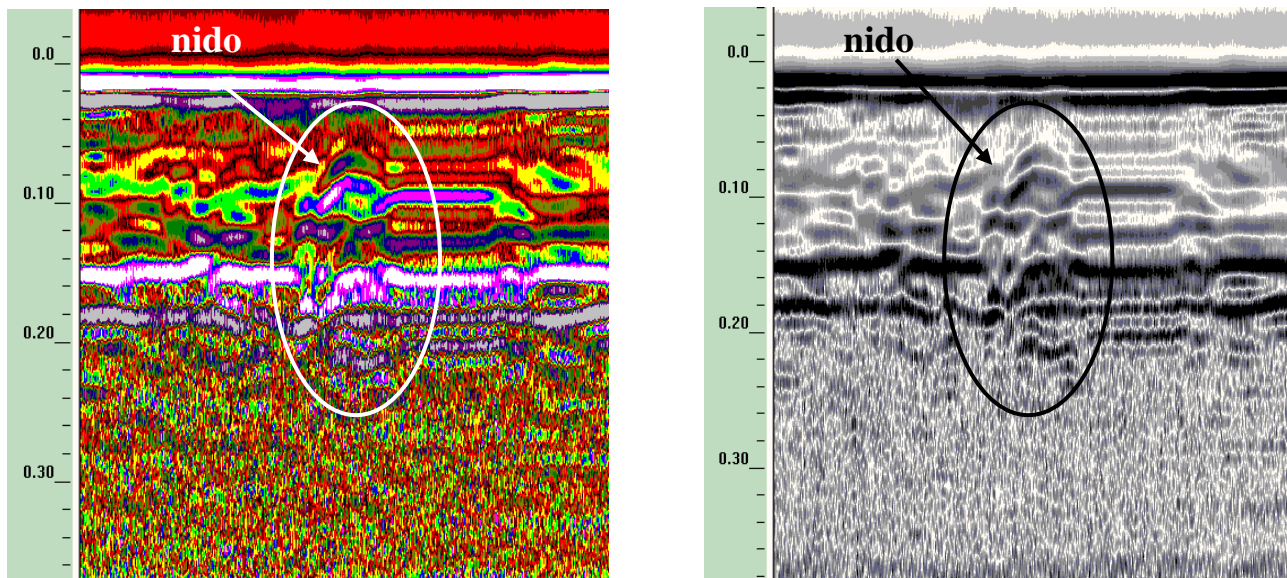


Figura 13. Radargramas en gama de color y de grises del Perfil 1 para el ajuste de parámetros realizado en un nido conocido **transversalmente** al eje mayor del nido.

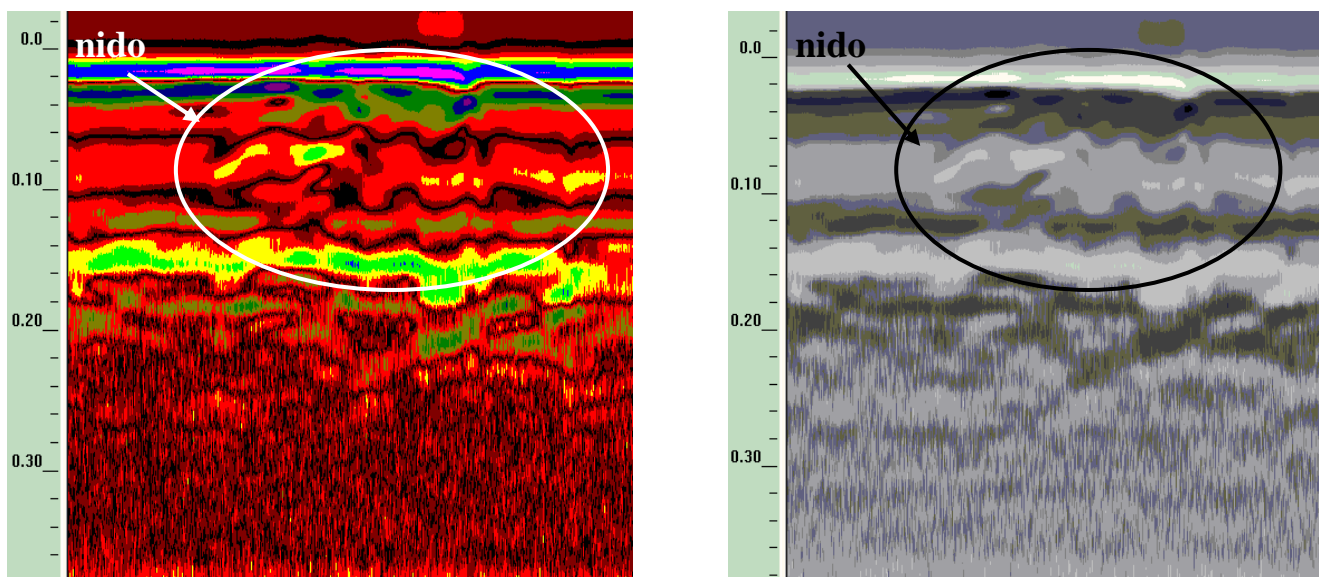


Figura 14. Radargramas en gama de color y de grises del Perfil 2 para el ajuste de parámetros realizado en un nido conocido **longitudinalmente** al eje mayor del nido.

Como primeros resultados cabe destacar los siguientes radargramas tipo en la zona piloto:

A.- Detección de nido.

B.- No presencia de nidos.

C.- Registro de “falso nido”.

A.- Detección de nido

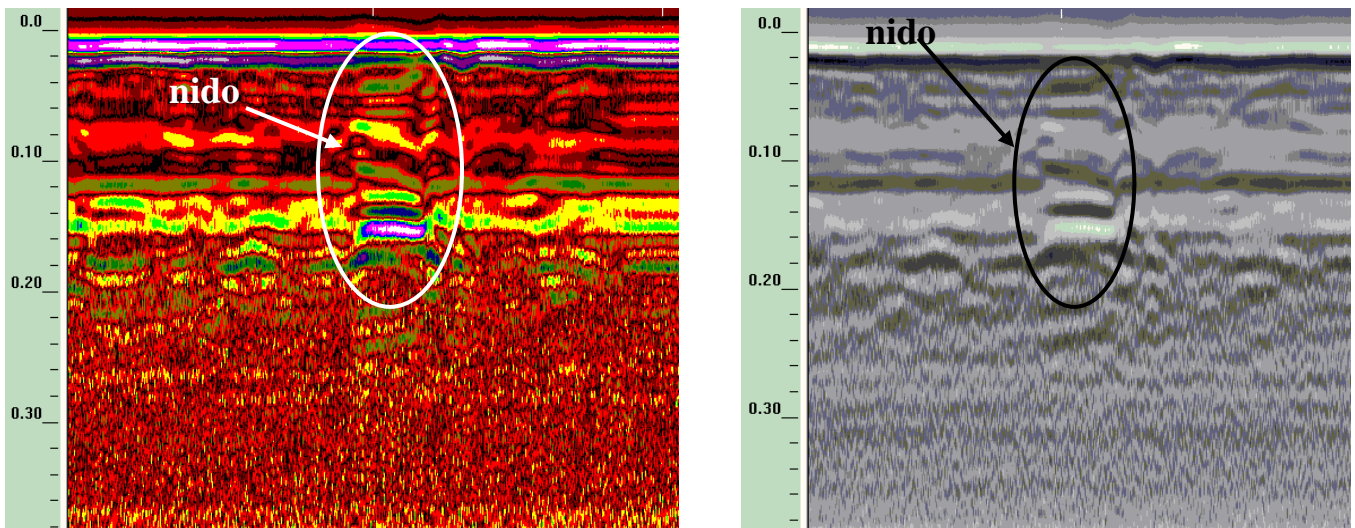


Figura 15. Radargramas en gama de color y de grises del Perfil 37 (4ª fila de naranjos) donde se ha detectado un nido de galápagos (confirmado posteriormente mediante excavación).

B.- No presencia de nidos.

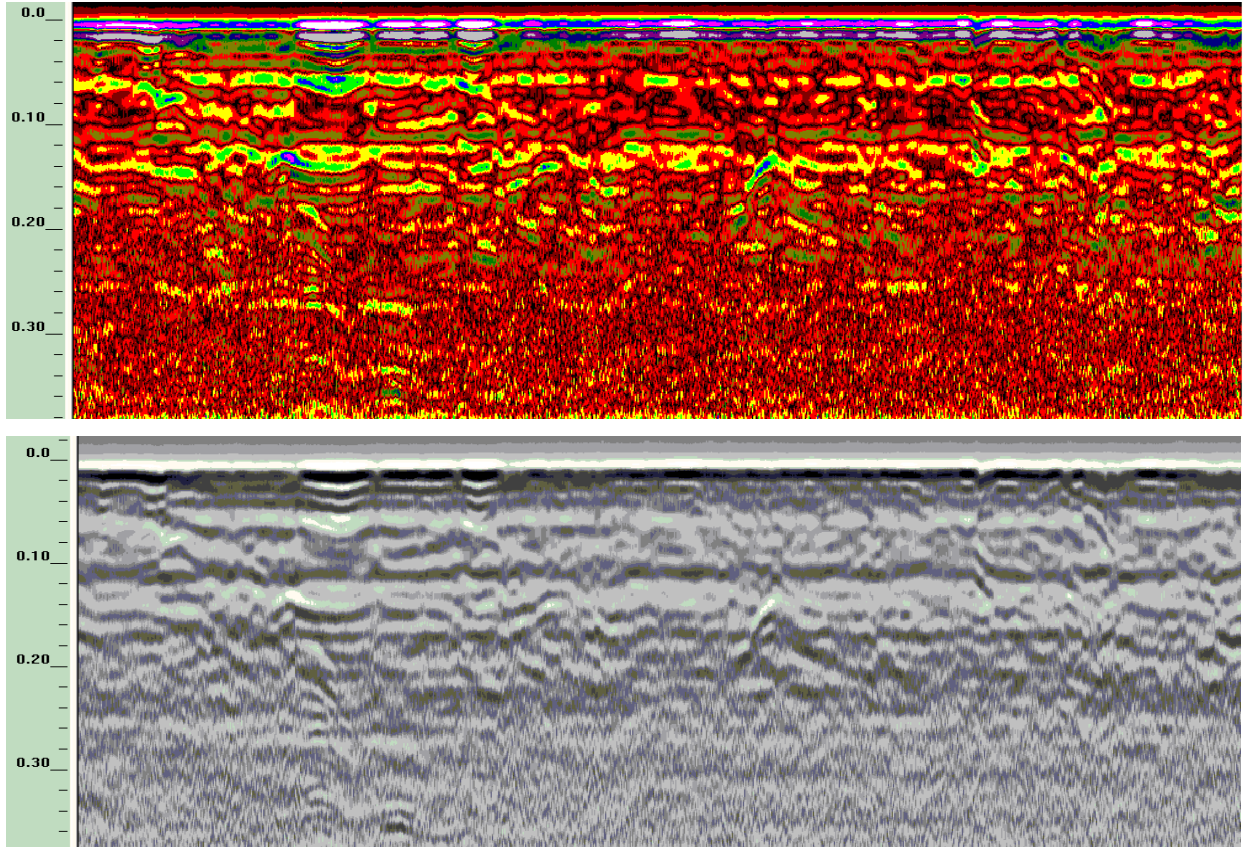


Figura 16. Radargramas en gama de color y de grises del Perfil 14 (paralelo a la acequia) donde **no se ha detectado un nido de galápagos.**

C.- Registro de falso nido.

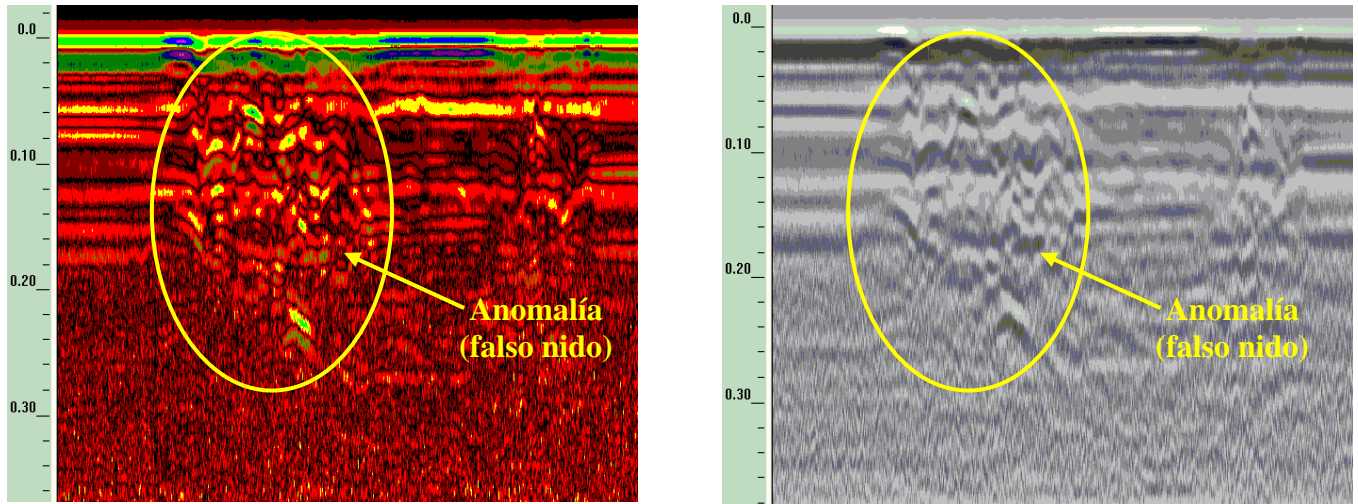


Figura 17. Radargramas en gama de color y de grises del Perfil 50 (3ª fila de naranjos) donde se ha detectado un “falso nido” (tras una excavación se comprobó que eran las propias raíces del naranjo próximo al perfil las que provocan la anomalía en el radargrama).

Con esta prueba piloto y la cartografía proporcionada por la *Generalitat* se procedió a la elección de la zona de muestreo en esta 1ª Fase para ajustar y diseñar la metodología apropiada de esta técnica en la detección y localización de nidos en el área de muestreo (**Figura 18**).



Figura 18. Zona de muestreo estudiada en la Fase 1ª con georradar en los Estany de Almenara.

En esta zona ya se detectaron y localizaron nidos de galápagos invasores mediante la utilización de antenas de 1,6 GHz y 900 MHz.



Figura 19. Fotografía donde se observa un nido de galápago invasor detectado con georradar en los Estanys de Almenara.



3.- RESULTADOS Y CONCLUSIONES

Los **resultados** y **conclusiones** que se desprenden de esta 1ª Fase del proyecto son:

- a) La técnica de georradar es efectiva, rápida y portátil en condiciones de campo para la detección de nidos de galápagos.
- b) Las antenas para la detección de nidos de galápagos teniendo en cuenta las dimensiones en superficie (< 30 cm) y profundidades (<25 cm) que presentan los nidos y el tipo de litologías presentes son las antenas de 900 MHz y 1,6 GHz, ya que cuentan con la resolución vertical necesaria y alcanzan profundidades mínimas de 40 cm.
- c) La metodología de campo idónea consiste en la realización de perfiles paralelos y/o azimutales con una separación máxima entre sí de 25 cm por las reducidas dimensiones de los nidos. De esta manera se tendría la máxima probabilidad de detección de nidos.
- d) En los radargramas los nidos se registran con mayor claridad cuando se realizan perfiles transversales al eje mayor de los nidos (véanse Figuras 13 y 14).
- e) El georradar detecta anomalías que pueden ser originadas de forma natural o antrópicas. Dentro de las naturales se incluyen litologías, raíces de árboles, excavaciones de animales y nidos de galápagos. Diferenciarlas es prácticamente imposible, como se observa en la Figura 17, las raíces del naranjo tiene un registro de anomalía similar al de un nido de galápagos (Figura 14).
- f) Todo ello hace recomendable diseñar un procedimiento de campo con georradar que contemple una mayor densificación de perfiles y un marcaje de distancias automático en los radargramas, con la finalidad de detectar el máximo número posible de nidos.

En Valencia, a 19 de septiembre de 2011

Fdo.: Francisco García García
Catedrático de Geofísica
Ingeniero de Minas