

CONTROL DEL SUELO EN CIMENTACIONES Y ESTRUCTURAS ARQUITECTÓNICAS POR TÉCNICAS GEOFÍSICAS

(Sistema Georadar GPR). Modelos Gráficos

Jorge Martín Gutiérrez⁽¹⁾ jmargu@ull.es

Norena Dorta Martín⁽²⁾ nmartin@ull.es

⁽¹⁾ Ingeniero en Geodesia y Cartografía. Ing. Técnico en Topografía.

⁽²⁾ Licenciada en Documentación. Arquitecto técnico.

Dto Expresión Gráfica en Arquitectura e Ingeniería. Universidad de La Laguna.

RESUMEN

En este artículo se describen las técnica GPR (Ground Penetrating Radar). Un sistema basado en la emisión y recepción de ondas electromagnéticas en el suelo (u otro elemento vertical) y capaz de producir una imagen de los elementos que hay bajo el mismo, así como la posibilidad de deducir el tipo de material que tenemos bajo nuestros pies. Se trata de una técnica de aplicación en estudios geofísicos, geológicos, ingenieriles y por supuesto en la construcción y control de edificaciones.

1. INTRODUCCIÓN



Ground Penetrating Radar (GPR) es empleado como una técnica no destructiva en las investigaciones poco profundas del subsuelo, y con muy buenos resultados para la detección de objetos enterrados, y cartografía del subsuelo.

La alta precisión de los estudios con GPR, requieren un conocimiento en el campo de las ondas electromagnéticas. En este trabajo hemos realizado un análisis de los resultados obtenidos por GPR, de una zona que hemos preparado a conciencia. Hemos creado un banco de pruebas, en el que se han enterrado objetos a profundidad conocida y cubiertos por un material también conocido, de esta forma se controla el comportamiento del sistema, analizando la precisión de los resultados que se pueden llegar a obtener.

2. FUNDAMENTO DEL SISTEMA GPR

El "georadar", consiste básicamente en una unidad emisora de ondas electromagnéticas y otra unidad receptora, junto con un sistema de registro digital. A partir de los tiempos de retardo de las ondas reflejadas y de la velocidad de propagación de las ondas en el material por el que se deslizan las antenas, se deduce la profundidad a la que se encuentra el cuerpo reflector y el material que atraviesa.

La prospección con georadar detecta los cambios que sufren las propiedades electromagnéticas de los materiales que atraviesan las ondas, estas propiedades son definidas por una serie de parámetros que juntamente con las características de la onda emitida, determinan la propagación de la energía por el medio.

El objetivo del método de prospección con georadar es el conocimiento de estructuras superficiales y la detección de objetos enterrados, siendo un método de alta resolución y no destructivo.

El georadar genera una imagen del subsuelo con altísima resolución lateral y vertical permitiendo no solamente la identificación de objetos singulares, sino caracterizar el entorno. Este el método, moderno, tiene su éxito en aplicaciones e investigaciones del subsuelo de forma no invasiva, es decir, sin necesidad de realizar excavaciones o algún otro tipo de intervención destructiva. Por esto es un método que no afecta el medio ambiente y es excelente para las fases de planificación y desarrollo de proyectos de ingeniería y edificación. Esta tecnología no necesita establecer contacto físico de ningún tipo (electrodos) con el material a investigar (suelo o estructuras), es rápido y de fácil aplicación en todos los ambientes.

La profundidad de penetración y la resolución observada depende del tipo de antena usada para una adquisición en particular. En aplicaciones de tipo geológico, las antenas usadas son antenas no blindadas o no apantalladas, del ingles un-shielded, que permiten investigar hasta profundidades de 30-60 m. También permite investigar áreas urbanas y de alta resolución (con antenas blindadas o apantalladas, de su nombre en ingles Shielded), estas antenas permiten un mejor control del ruido y de las reflexiones desde el aire y una alta calidad en la imagen radar con un alcance en la profundidad de 5-10 m.

3. EQUIPOS Y MÉTODOS DE ADQUISICIÓN DE DATOS

El equipo que presentamos en este artículo, y con el que hemos realizado nuestros trabajos ha sido el Georadar RAMAC/GPR de la casa Mala Geoscience.

4.1. Características físicas del equipo

Este modelo de equipo georadar es dedicado principalmente para aplicaciones en ingeniería y está formado por:

1. Unidad Central. CU I
2. Ordenador portátil, con el software informático "Ramac" instalado, que junto con la pantalla del ordenador permite la visualización de los registros durante la adquisición de datos. Incorpora disco duro para el almacenamiento de los registros.
3. Antena. Monoestática* (Montaje foto 1) y Biestática* (Montaje foto 2).
4. Cable de conexión de la antena con la unidad de control. (Fibra óptica)
5. Odómetro. Rueda conectada a la antena (Montaje foto 1). Carrete de Bobina de hilo (Montaje foto 2).
6. Cable puerto paralelo, de conexión entre ordenador portátil y unidad central.

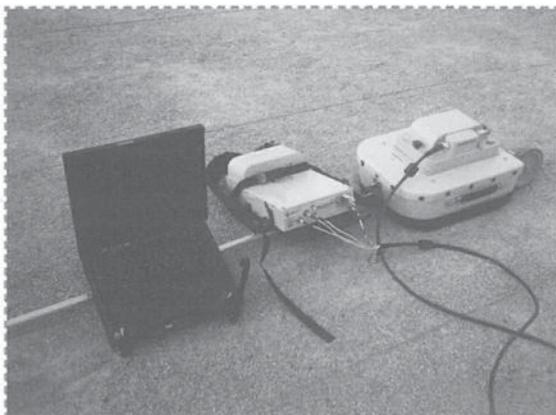


Foto 1. Montaje con antena de 500MHz.

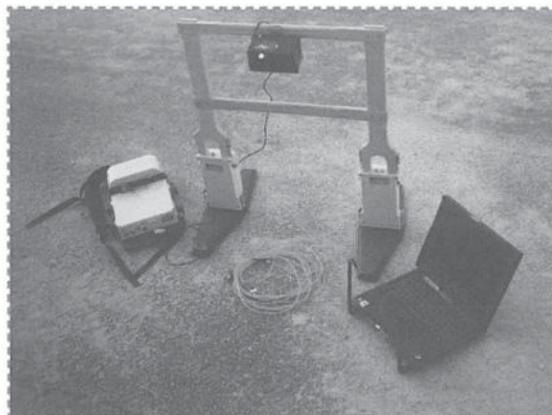


Foto 2. Montaje con antena 200MHz

* **Modo Monoestático:** En este tipo de antena se emite y recibe una onda electromagnética de una frecuencia dada

* **Modo Biestático:** En este tipo de antena, la transmisora es separada de la unidad receptora.

La Unidad Central.

La unidad central es la parte fundamental del sistema RAMAC/GPR. Esta unidad de control opera con el software informático GPR.exe, para controlar los tiempos de envío de señales eléctricas que la antena convierte en ondas electromagnéticas y recibir las señales reflejadas, en forma de registros de radargramas

Antenas.

Las antenas, son si cabe la parte más importante del equipo. Estas actúan como un traductor electromagnético que transforma los impulsos eléctricos que recibe de la unidad central en una serie de pulsos u ondas electromagnéticas de corta duración que se emiten en el medio a estudiar. Otra función de las antenas es captar la energía reflejada y transformada en pulsos eléctricos que envía a la unidad central.

Dos tipos de antenas, apantalladas y no apantalladas, también denominadas blindadas o no blindadas.

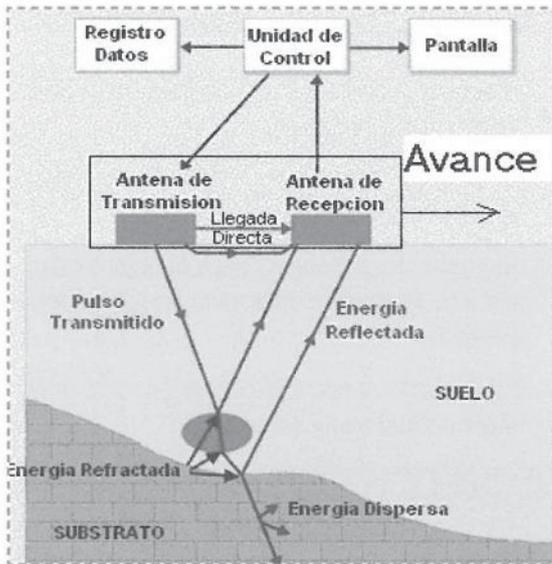


Fig 2. Esquema básico funcionamiento georadar con antena monoestática

4.2. Algunos métodos de Adquisición de los datos

Adquisición de perfiles.

Para efectuar un perfil se desplaza la antena (monoestática) o las dos antenas sin variar la separación existente entre ellas (biestáticas) a lo largo de una línea. Al realizar este levantamiento, se le puede acoplar al sistema un GPS de forma que se realiza a la vez el trabajo georeferenciado.



Foto 6 y 7. Toma de perfiles con antena monoestática apantallada. 500MHz. y antena biestática no apantallada. 200MHz

NOTA: Pueden obtenerse registros largos de forma rápida colocando, por ejemplo, las antenas sujetas a un coche que se desplaza a una velocidad constante (los equipos de última generación permiten una exhaustiva adquisición de datos a una velocidad de 80 Km/h).

Punto medio común "Common Mid Point".

Desplazando la emisora y la receptora en direcciones opuestas, respecto a un punto central entre ambas. Las dos antenas deben quedar siempre equidistantes a dicho punto, y al realizarse la adquisición de datos se obtiene un registro que, representado en una gráfica distancia-tiempo, tiene la forma de una hipérbola si únicamente tenemos un reflector bajo las antenas.

A partir de la ecuación de esta hipérbola, es posible obtener los parámetros del medio (velocidad efectiva de propagación y profundidad del reflector). En el caso de tener más de una superficie reflectora bajo las antenas, el resultado en la gráfica distancia-tiempo es una hipérbola por cada una de las superficies reflectoras.

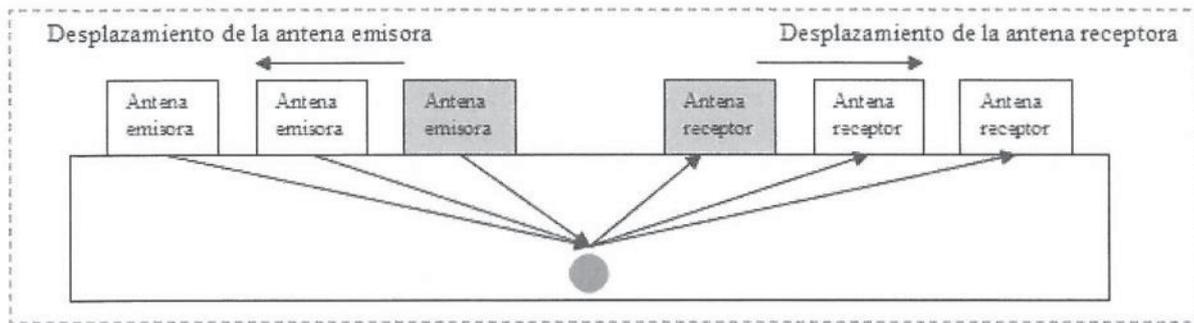


Figura 3. Obtención de datos con CMP.

Transiluminación v tomografía.

Estos métodos de estudio se aplican a muros y medios que tienen dos superficies paralelas en las que se puedan situar las antenas. Suele aplicarse, con antenas de alta frecuencia, a elementos constructivos: muros, columnas, etc.; y con antenas de baja frecuencia a túneles y minas.

Una de las antenas permanece fija sobre una de las superficies mientras que la otra se desplaza a lo largo de la superficie opuesta. La antena receptora capta la onda que se propaga de forma directa por el medio. Las variaciones en la velocidad de propagación dan información de los cambios laterales. Este método permite realizar tomografías con GPR. Las variaciones de velocidad se corresponden con cambios o variaciones suaves de la Permitividad dieléctrica efectiva, que a su vez se relaciona con cambios de material o variaciones en las condiciones de éste (humedad, zonas de fractura, compactación, etc.).

etc. Por esto, antes de interpretar cualquier tipo de datos de georadar es necesario realizar un procesamiento de los datos, con el objeto de mejorar la imagen, aumentar la resolución y la relación señal-ruido. Los ruidos y las interferencias que se registran en el radargrama pueden producirse por:

- 1) Objetos presentes en la superficie del terreno, sobre los cuales la antena tiene que pasar.
- 2) cables aéreos de alta tensión, postes de luz o semáforos, árboles, edificaciones, etc.
- 3) señales electromagnéticas de alta frecuencia, generadas por transmisores externos como antenas microondas, teléfonos móviles, etc.

Algunas de estas fuentes pueden ser eliminadas o minimizadas con ayuda del procesamiento de los datos, pero para poder hacer un buen procesado se tienen que tomar notas en campo sobre la presencia de cualquiera de estos elementos generadores de ruido para luego saber a qué corresponden y posteriormente eliminarlos.

El procesamiento de los datos involucra una serie de pasos a seguir: Pre-procesamiento, Ganancia, Filtrado.

Pre-procesamiento

El primer paso a aplicar a unos datos crudos (Radargrama) es el llamado filtro DC-Removal. Se aplica porque gran parte de la energía de la señal de la onda de aire y de la

onda terrestre recibida está saturada, es decir, contiene bajas frecuencias. En esta fase también hay que realizar el Cálculo de la Velocidad de propagación de las ondas en el terreno. El conocimiento de la velocidad permite realizar la transformación de los datos de tiempo a profundidad y definir la profundidad de los objetos investigados.

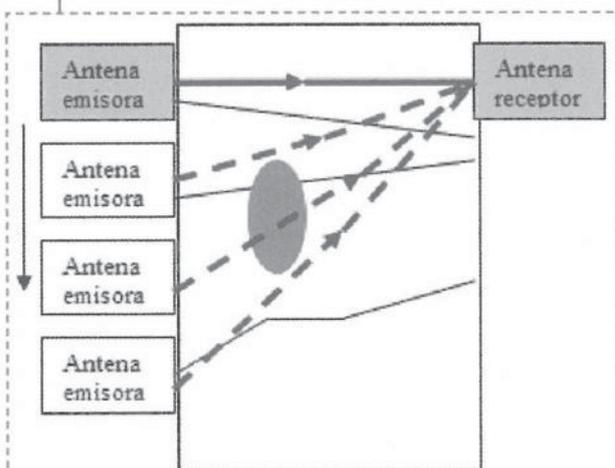
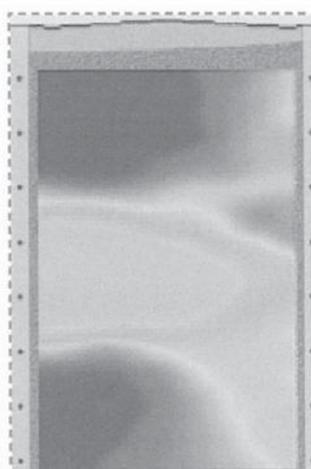


Fig 4. Adquisición de datos. Método transiluminación

4.3. Procesamiento de Datos.

Algunos factores limitan el desempeño del Georadar, como por ejemplo, la atenuación de las ondas irradiadas, ruidos externos, ruidos instrumentales,



Existen muchas técnicas matemáticas para hacer este cálculo, pero la más común es a partir de las hipérbolas de reflexión presentes en el radargrama. La forma de una hipérbola de reflexión va a

estar definida por la velocidad de la onda, así que adaptando hipérbolas sintéticas a los datos, se puede obtener información de la velocidad de propagación de las ondas en el subsuelo.

v , es la velocidad de propagación

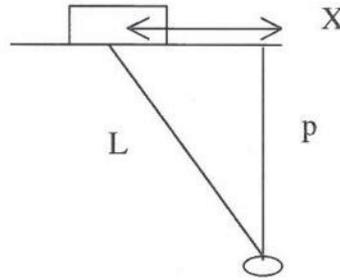
p , la profundidad del objeto reflector

Δt , es el tiempo que tarda la onda desde que sale del emisor, se refleja en el objeto y llega al receptor, es decir el tiempo que tarda en recorrer dos veces la distancia entre antena y objeto enterrado.

incremento

ΔX , la distancia horizontal entre un punto de la hipérbola y su punto máximo, tenemos entonces:

$$l = \sqrt{p^2 + \Delta x^2}$$



Ecuación de la velocidad: $V = \text{espacio} / \text{tiempo}$

$$V = \frac{2l}{\Delta t} \longrightarrow V = \frac{2\sqrt{p^2 + \Delta x^2}}{\Delta t}$$

Simplificando: $V^2 = \frac{4 * (p^2 + \Delta x^2)}{\Delta t^2} \longrightarrow \frac{V^2 * \Delta t^2}{4} = (p^2 + \Delta x^2)$

Despejamos: $\Delta x^2 = \frac{1}{4} V^2 \Delta t^2 - p^2$

Expresión que adopta la forma de ecuación de una recta:

$$\Delta x^2 = a(\Delta t)^2 - p^2 \longrightarrow \begin{aligned} a &= \frac{1}{4} V^2 \\ b &= -p^2 \end{aligned}$$

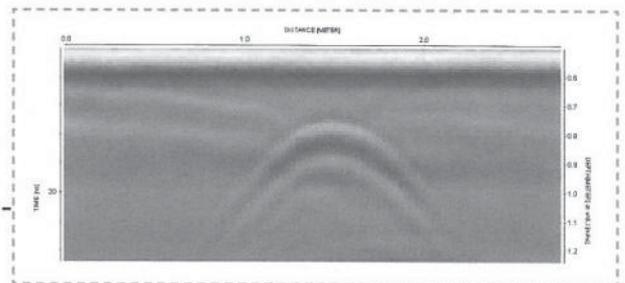
Los parámetros a y b son conocidos por cálculo de la recta de ajuste.

La velocidad y la profundidad de los objetos se puede calcular a partir de la siguientes expresiones:

$$\begin{aligned} a &= \frac{1}{4} V^2 \\ b &= -p^2 \end{aligned} \longrightarrow \begin{aligned} V &= 2\sqrt{a} \\ p &= \sqrt{-b} \end{aligned}$$

Cálculo de velocidad y profundidad

Fig 10. Marcas (distancia/tiempo) para obtener un ajuste lineal a la semi-hipérbola



Tiempo ns	x
3,746	0
4,163	0,10044
4,995	0,20089
6,244	0,47712
7,493	0,64035
9,575	0,87892
11,24	1,09237

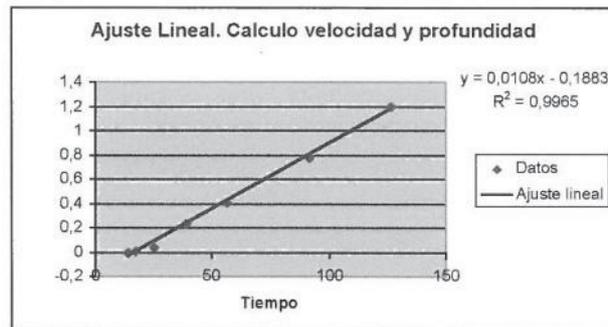
t^2	x^2
14,032516	0
17,330569	0,01008819
24,950025	0,04035679
38,987536	0,22764349
56,145049	0,41004812
91,680625	0,77250037
126,3376	1,19327222

a = 0.0108
b = -0.1883

$$V = 2\sqrt{a}$$

$$p = \sqrt{-b}$$

V = 0.20 m/ns
P = 0.43 m



La velocidad de la onda en este material es de 20 m/ns y la profundidad a que se encuentra el objeto es de 43 cm. (El material es Arenisca, pues es la velocidad a que se propagan las ondas por ese material)

Ganancia

A medida que la señal de radar penetra en el suelo, se produce una atenuación de la misma. Esta puede ser corregida aplicando ajustes de ganancia a cada una de las trazas. Existen muchos modelos para calcular este tipo de ajuste, entre estos la Ganancia Lineal y Exponencial AGC, direccional (X,Y). Todas ellas tienen el mismo objetivo pero diferentes aplicaciones, dependiendo del caso de estudio.

Filtraje

La aplicación de Filtros a la información intenta eliminar o reducir aquellas señales que no corresponden a eventos relacionados con la geología y que son considerados ruido. Este proceso es extremadamente importante y no puede ser completamente automatizado, siendo muy importante la experiencia del interprete para optimizar y resaltar la información contenida en los datos.

1. Tubo metálico.
2. Muro piedras
3. Bobina cable eléctrico.
4. Tubo de PVC 110 mm
5. Bidón metálico
6. Separación de capa material 1 y material 2.

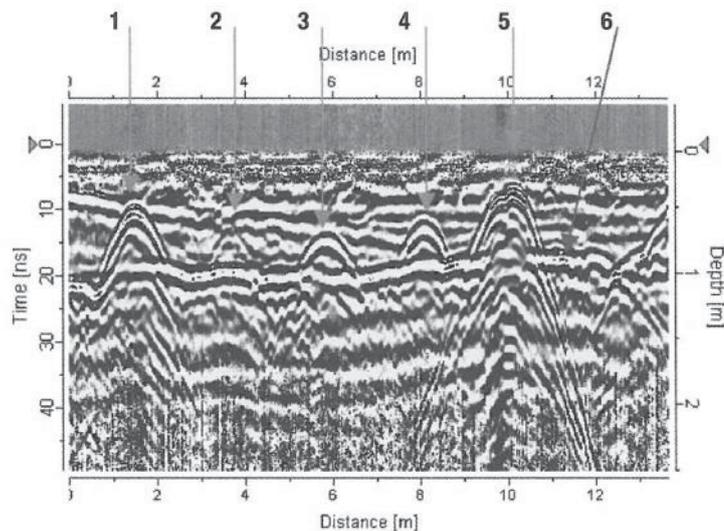


Fig 11. Radargrama, con filtros aplicados (DC removal, subtrac Mean Trace, AutomaticGainControl)

5. APLICACIONES

El GPR es aplicado en la ingeniería civil (estructural-vial), en estudios del medio ambiente, así como aplicaciones geológicas, exploración minera, geotecnia, estructuras de edificación y arqueología entre otras. En particular, algunas de las aplicaciones son:

- Detección de elementos metálicos y no-metálicos (tuberías, cables, etc.).
- Identificación de cavidades y estructuras enterradas (Huecos o cuevas, objetos militares, túneles, etc.).
- Inspección de suelos industriales y urbanos. Para posterior obras de cimentación y realizar excavaciones controladas.
- Inspección de construcciones (puentes, muros, etc).
- Inspección del pavimento de autopistas, pistas de aeropuertos y ferroviarias.
- Clasificación del substrato (estratificación, profundidad substrato, etc.) y condiciones de facturación del subsuelo
- Determinación de espesores en zonas de relleno o aluvional
- Mapeo de aguas subterráneas (acuíferos, etc.)
- Medio Ambiente (mapeo y delineación de terrenos y fluidos contaminados)
- Inspección de sitios arqueológicos y estudios forenses/seguridad policiales

6. CONCLUSIONES

El georadar representa una excelente herramienta para investigaciones no invasivas y no destructivas. Algunos factores, relacionados al entorno geológico y estructural a investigar no son controlados por el usuario y limitan fuertemente el uso del georadar. Otros factores, instrumentales y la modalidad de adquisición de datos pueden ser controlados.

Con relación al ambiente del entorno de trabajo, el georadar tiene sus mejores aplicaciones en ambientes secos con limitada presencia de agua y arcillas.

Las características óptimas de una unidad georadar son:

- Tener una alta resolución por medio de una alta capacidad de escaneo por segundo (>500 muestras / segundo) y antenas de alta sensibilidad.
- Tener una amplia gama de antenas para garantizar el uso del sensor apropiado en la condición apropiada.
- Usar un georadar multicanal para:

- reducir el tiempo de adquisición con mayor cobertura espacial.
- aumentar la capacidad de resolución de objetos enterrados usando contemporáneamente antenas de diferentes frecuencias y arreglos diferentes que garantizan por un lado explorar a diferentes profundidades, y por otro optimizar la caracterización del subsuelo.
- Usar una unidad que permita el procesamiento y el uso de software especializado por el mejoramiento de la señal e interpretación espacial y geo-referenciada de los datos (GPS).

En relación con la adquisición y procesamiento:

- Se necesita definir el objetivo de estudio en función del ambiente donde se necesita investigar (urbano, sub urbano y campo), esto para la decisión sobre el tipo de instrumentación a usar y el diseño de los parámetros de adquisición (orientación de la líneas y su espaciamiento).
- Usar personal especializado en las diferentes fases del proyecto (diseño, ejecución y procesamiento de los datos). El georadar es conceptualmente como una sísmica a reflexión, una Laparoscopia o Ultrasonido medico, a pesar de su aparente facilidad de uso, el éxito de un estudio es condicionado a la comprensión de todos los factores involucrados en la investigación y no puede ser simplificado al solo marcar una anomalía en el piso por parte de personal no cualificado.
- El producto de la investigación georadar tiene que ser un documento gráfico del estudio ejecutado y una cartografía sintética de los resultados.

7. REFERENCIAS

- Paniagua, J, del Río, M and Rufo, M. "Test site for the analysis of subsoil GPR signal propagation". X international conference on Ground penetrating Radar. June 2004. Delf. The Netherlands.
- Davis, J. L., and Annan, A. P., 1986. "High resolution sounding using ground probing radar". Geoscience Canada, Vol. 13(3), p. 205-208.
- Davis, J. L., and Annan, A. P., 1989. "Ground penetrating radar for high resolution mapping of soil and rock stratigraphy". Geophysical prospecting, Vol. 37, p. 531-551.
- Mellett, J. S. (1995). "Ground penetrating radar applications in engineering, environmental management, and geology." J. of Applied Geophysics, 33(1-3), 157-166.

