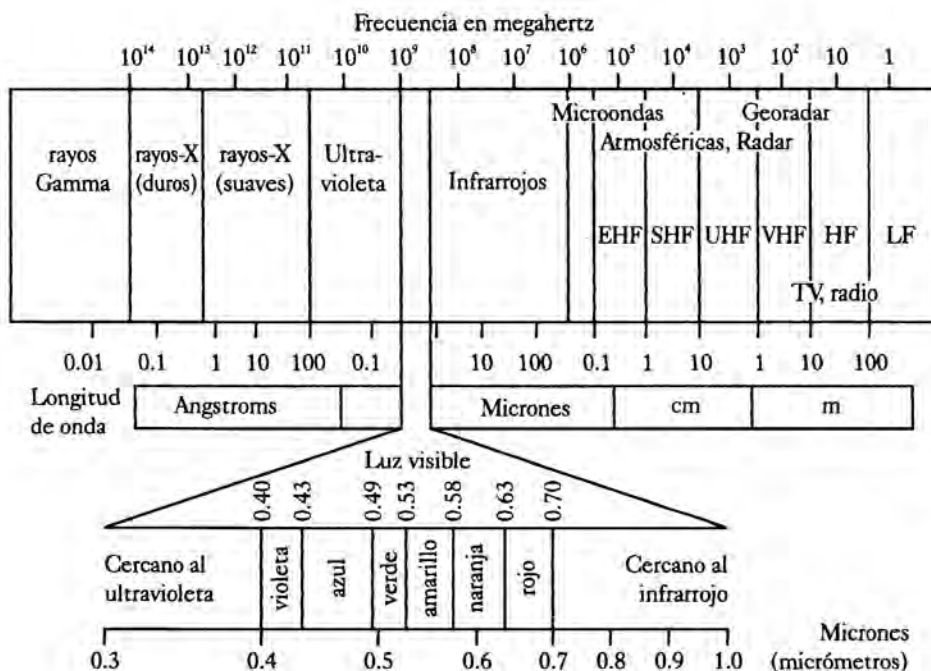


## **El radar de penetración terrestre (georadar): una herramienta para la prospección arqueológica**

Las excavaciones arqueológicas son procesos de trabajos largos e intensivos con inversiones considerables de tiempo y dinero; además, cuando no existe ninguna expresión geomórfica en la superficie que permita inferir la presencia de materiales de origen antrópico en el subsuelo, las excavaciones son precedidas por pozos de exploración, los cuales por lo general exponen remanentes previamente preservados al intemperismo y dan lugar, en ocasiones, al vandalismo del sitio. En la actualidad encontramos tres factores al respecto: 1) el crecimiento demográfico manifestado en la ocupación de nuevos espacios (centros comerciales, áreas de recreación, vivienda, vías de comunicación, presas, etcétera); 2) el aumento de la demanda social por la preservación del patrimonio cultural (leyes de impacto ambiental); y 3) la presión en tiempo para la liberación de predios previa evaluación antes de cualquier cambio en el uso del suelo, han dado lugar a que los arqueólogos limiten sus evaluaciones a análisis de superficie y sondeos.

Lo anterior confirma la necesidad de contar con un método o métodos geofísicos rápidos no destructivos que permitan el reconocimiento del subsuelo y ayuden en la identificación y posicionamiento espacial de materiales o estructuras de interés arqueológico tales como: tumbas, artefactos líticos, pisos habitacionales y remanentes de construcciones.

En efecto, desde finales de los años cincuentas, en Europa los programas de exploración de sitios arqueológicos han aplicado métodos geofísicos de alta resolución con éxito, como sísmica de refracción y reflexión y espectrometría sónica con frecuencias de 20 a 3 000 hz (Wynn, 1986); asimismo se han aplicado métodos magnetométricos en la búsqueda y localización de hogueras, hornos y sitios de campamentos prehistóricos (Gibson, 1986) y resistividad eléctrica para la identificación de objetos enterrados y muros de fundaciones (Atkinson, 1952 y Aitken, 1974).



● Fig. 1 Espectro electromagnético mostrando la posición del GPR (10-1000 mhz). Modificado de Jol, 1993:29.

A partir de la década de los sesenta se aplicaron métodos electromagnéticos como el conductivímetro inductivo, el Slingram y el radar de penetración terrestre, éstos han proporcionado datos de la conductividad eléctrica y susceptibilidad magnética del subsuelo (Scollar, 1962; Foster, 1968; Tite y Mullins, 1969 y Bevan, 1991), y han demostrado gran eficiencia en la localización de tumbas antiguas en cementerios e iglesias (Frohlich y Lancaster, 1986, y Bevan, 1991), en la localización de pozos azolvados, fundaciones y estratos culturales (Imai *et al.*, 1987 y Vaughan, 1986) y en las prospecciones de sitios arqueológicos del sudoeste de Estados Unidos (Sternberg y McGill, 1995).

De todos estos métodos, quizás el más innovador en las últimas décadas sea el radar de penetración terrestre (georadar, GPR: Ground Penetrating Radar), diseñado originalmente para apoyar los estudios de ingeniería geológica (Laxat, 1985; Tuck, 1985 y Vaughan, 1986). Este método permite en corto tiempo hacer la prospección de sitios arqueológicos completos y los datos, una vez interpretados, pueden utilizarse para situar con precisión las anomalías producidas por los materiales del subsuelo, lo cual permite precisar con detalle la localización de estructuras y/o ar-

tefactos enterrados. El georadar es una herramienta geofísica no destructiva y ecológica de alta resolución, ampliamente documentada en trabajos recientes (e. g., Owen, 1995).

### El georadar (GPR: Ground Penetrating Radar)

La idea original de utilizar la propagación de las ondas EM de alta frecuencia para investigaciones del subsuelo se debe a las patentes alemanas números 165546 y 169154 (Parasnis, 1997). A principios del presente siglo su perfeccionamiento como sistema se inició en Gran Bretaña y Francia, y aumentó de manera considerable en el medio comercial después de los años setentas como resultado del enorme progreso registrado en la tecnología electrónica y de cómputo. El "radar" es un acrónimo de "radio detection and ranging".

Los fundamentos teóricos acerca del método provienen de las teorías de la propagación de las ondas electromagnéticas, sísmicas y ópticas (Stratton, 1941; Telford *et al.*, 1976; Serway, 1982 y Keary y Brooks, 1991), así como en principios matemáticos (Annan y Davis, 1977; Arcone y Delaney, 1982; Ulriksen, 1982; Davis y

Annan, 1986, 1989; Moorman, 1990 y Sutinen, 1992). En nuestros días existen varios tipos de radares para las investigaciones del subsuelo agrupados con el nombre genérico de Ground Penetrating Radar (GPR) o georadar.

El georadar es un sistema que genera pulsos electromagnéticos de corta duración entre 1 y 10 ns ( $1\text{ ns} = 10^{-9}$  segundos), dentro de la banda de frecuencia de 100 mhz a 1 ghz (UHF-VHF), (fig. 1).

La frecuencia en la emisión de los pulsos a través de una antena emisora no es continua, sino separada por intervalos de tiempo en los que se corta la emisión. Este espacio entre pulsos es utilizado por la antena receptora de banda ancha para registrar las posibles reflexiones o rebotes provenientes del subsuelo con un desfase de tiempo (pulse delay time). El pulso genera un frente de ondas, de las cuales algunas son propagadas y otras reflejadas.

En el subsuelo, la velocidad de propagación de las ondas electromagnéticas corresponde de un cuarto a un medio la velocidad de la luz en el vacío (0.30 m/ns) y pueden penetrar de 10 a 20 m, dependiendo de la conductividad eléctrica y de la capacidad de atenuación de los materiales del subsuelo; por ejemplo, en las arenas de origen eólico la atenuación es de 1 dB/m para frecuencias de 1 ghz, mientras que para suelos arcillosos la atenuación es de 100 dB/m a la misma frecuencia.

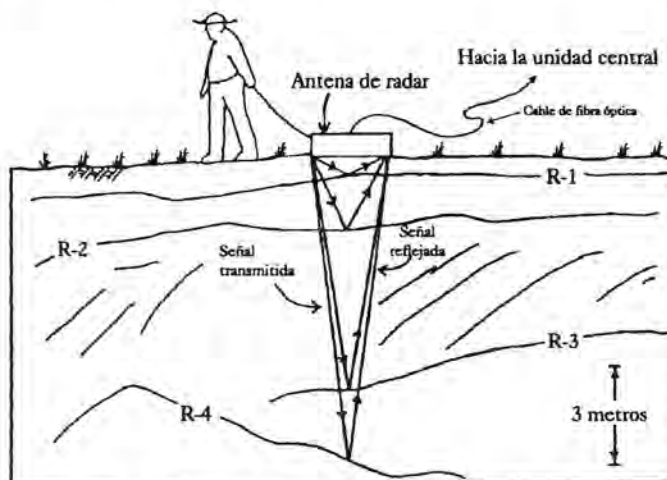
Las reflexiones, difracciones y refracciones en una sección de georadar tal vez se deba a variaciones en el contenido volumétrico de agua, variaciones en densidad de los materiales, cambios de facies sedimentarias, contactos de secuencias, cavidades, etcétera. La energía reflejada se detecta por un receptor, amplificada y almacenada en formato digital; este proceso se

repite muchas veces por segundo y crea una vista en sección del subsuelo, la cual puede visualizarse en una unidad de control (fig. 2).

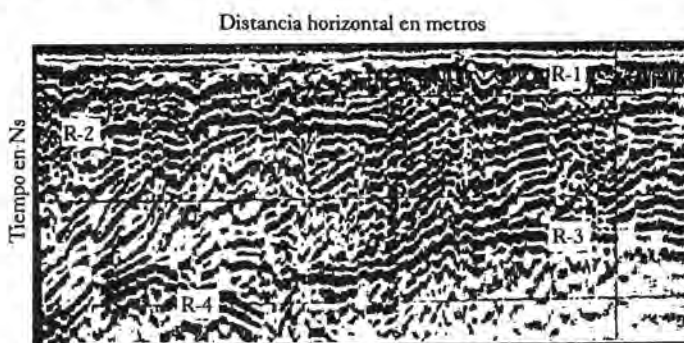
### Principios básicos del georadar

El medio como concepto es considerado homogéneo (isotrópico) y conductor; sin embargo, en la naturaleza existen muchos materiales geológicos que se comportan de manera anisotrópica o como semiconductores y se caracterizan por tres propiedades electromagnéticas principales (Davis y Annan, 1989): conductividad eléctrica ( $\sigma$ ), permitividad eléctrica relativa ( $\epsilon$ ) y, permeabilidad magnética ( $\mu$ ) (tabla 1).

- *Conductividad eléctrica.* La conductividad eléctrica ( $\sigma$ ) de un material es la medida de su



Prospección geofísica con georadar sobre una sección geológica, reflectores R-1.....R-4



Registro gráfico del georadar de la sección de arriba

● Fig. 2 Aplicación del georadar sobre una sección geológica.

<i>Material</i>	<i>Constante dieléctrica (<math>\epsilon</math>)</i>	<i>Conductividad (<math>\sigma</math>; mS/m)</i>	<i>Velocidad (<math>v</math>; m/ns)</i>	<i>Atenuación eléctrica (<math>\alpha</math>; dB/m)</i>
Aire	1	0	0.3	0
Agua destilada	80	0.01	0.033	$2 \times 10^{-3}$
Agua dulce	80	0.5	0.033	0.1
Agua salada	80	$3 \times 10^5$	0.01	$10^3$
Arena seca	3-5	0.01	0.15	0.01
Arena saturada	20-30	0.1-1	0.06	0.03-0.3
Caliza	4-8	0.5-2	0.12	0.4-1
Pizarra	5-15	1-100	0.07	1-100
Arcillas	5-40	2-1000	0.06	1-300
Granito	4-6	0.01-1	0.13	0.01-1
Sal seca	5-6	0.01-1	0.13	0.01-1
Hielo	3-4	0.01	0.16	0.01

● Tabla 1. Constantes dieléctricas típicas ( $\epsilon$ ), conductividad eléctrica ( $\sigma$ ), velocidad ( $v$ ) y atenuación ( $\alpha$ ) medida en varios materiales geológicos (Jol, 1993).

capacidad de transmitir o conducir una corriente eléctrica. Ésta es directamente proporcional al total de sólidos disueltos, de ahí que entre más iones disueltos se encuentren en solución más alta será la conductividad (Ulriksen, 1982).

- *Permitividad eléctrica* ( $\epsilon$ ). La permitividad eléctrica o constante dieléctrica es la medida de la capacidad de un material para almacenar una carga eléctrica cuando se le aplica un campo eléctrico.
- *Permeabilidad magnética*. La permeabilidad magnética ( $\mu$ ) es la medida de la capacidad o habilidad de magnetización de un sedimento. Si un sedimento contiene pocas partículas magnéticas, la susceptibilidad será baja; en caso contrario, será alta.

Todos estos parámetros están relacionados con la estructura molecular del medio y son generalmente funciones de la frecuencia. A su vez, controlan la velocidad de propagación y la atenuación (absorción y dispersión) de la energía EM en el subsuelo; por lo tanto, la variación de cualquiera de los parámetros antes citados provocará reflexiones o ecos de las ondas de radar. Por ejemplo, los objetos metálicos en el sub-

suelo con un fuerte contraste en la conductividad causarán ecos de baja y alta frecuencia; los materiales plásticos no conductores con diferentes constantes dieléctricas producirán ecos principalmente de alta frecuencia, mientras que los materiales con diferentes permeabilidades generarán ecos de baja frecuencia.

Basado en la detección y caracterización de los diferentes ecos, el GPR permite la identificación y localización de reflectores en el subsuelo (Young y Peters, 1996).

En resumen, el retardo en tiempo del pulso y la potencia de la señal reflejada son funciones de:

- 1) la fuerza de energía transmitida hacia el subsuelo;
- 2) la velocidad electromagnética de propagación a través del mismo;
- 3) el contraste entre las constantes dieléctricas de las diferentes capas de sedimentos, las cuales atenúan el paso de la energía en el subsuelo;
- 4) la proporción de atenuación de la señal;
- 5) la profundidad de los objetivos o reflectores en el subsuelo; y,

6) el carácter electromagnético de la interfase (Davis y Annan, 1989 y Moorman *et al.*, 1988).

Otro factor atenuador de la señal es el tamaño y la estructura del reflector (objeto), e incluso en su orientación y rugosidad; esta última produce fenómenos de difusión (scattering) y difracción.

### Configuración del sistema

El sistema de radar ha sido construido de manera modular para proporcionar una mayor flexibilidad de manipulación y consiste básicamente en una consola de control y un par de antenas, ambas configuradas a una microcomputadora mediante un cable de fibra óptica (fig. 3). Su funcionamiento general es el siguiente:

La unidad de control genera pulsos que son enviados al subsuelo a través de la antena transmisora; la mayoría de los equipos de GPR usan antenas dipolares para la transmisión y recepción de las señales. La antena emisora emite una sucesión de pulsos de 50 a 2 s de una misma forma y duración, usualmente de 1 a 100 ns. La frecuencia alrededor de la cual la energía del pulso se concentra es llamada *centro de frecuencia*. Las antenas pueden ser de tipo monoestático, es decir, que la misma antena sirve como emisora y receptora, tal es el caso del modelo SIR-2 con el que cuenta el INAH; o de tipo biestático, en el cual las dos antenas son independientes y se colocan una al lado de la otra a una distancia predeterminada, como en los modelos de georadar de manufactura canadiense marca PulseEKKO.

El pulso de radar es transmitido y en su recorrido al encontrarse interfases con variaciones en la impedancia electromagnética y/o discontinuidades eléctricas, parte de la emisión es reflejada y registrada por medio de una antena receptora de banda ultra-amplia, capaz de detectar y registrar todas las ondas cuyas amplitudes de banda se encuentren dentro del espectro del sistema de transmisión, tanto las deseables como las provenientes de frecuen-

cias indeseables como son las ondas de radio y de televisión, sin llegar a la saturación.

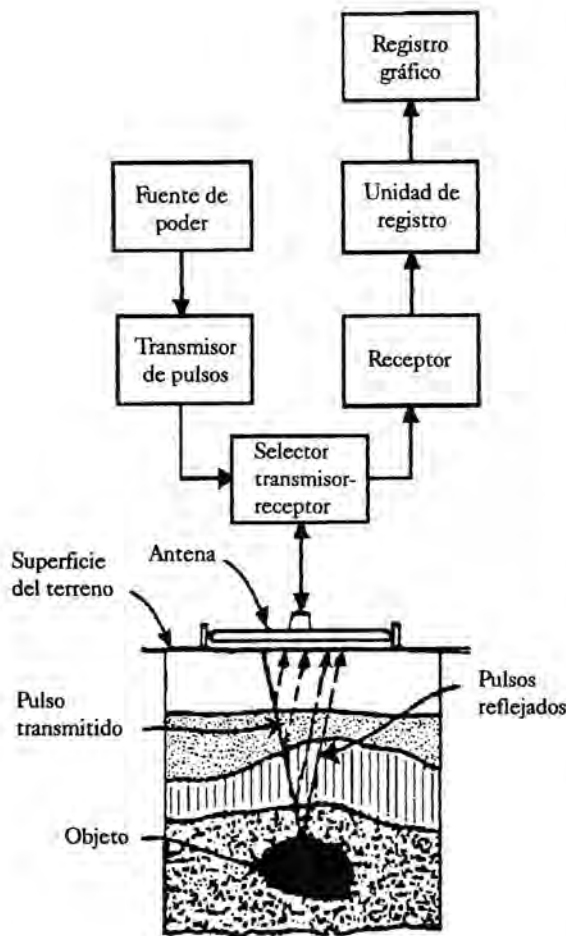
La velocidad de propagación de las ondas electromagnéticas varía en relación inversa con los valores de la permitividad eléctrica de los materiales en el subsuelo: a mayor velocidad menor permitividad y a menor velocidad mayor permitividad, mientras que la atenuación de las ondas varía en relación directa con la conductividad eléctrica: a mayor conductividad mayor atenuación y viceversa. Conociendo la velocidad y el tiempo que tarda el pulso en viajar en el subsuelo hasta encontrar el reflector y regresar para ser registrado por la antena receptora (two-way time), se puede determinar la posición y profundidad del reflector.

Durante el intervalo entre dos pulsos sucesivos, la antena receptora mide el campo eléctrico de los pulsos reflejados como una señal analógica, la cual es amplificada y transformada de manera digital y almacenada en una unidad de masa. La amplitud de tiempo durante el cual estas reflexiones son registradas entre los dos pulsos es llamado "time window" y el intervalo durante el cual las señales son leídas (muestreadas) se denomina "sampling interval".

Los patrones de propagación de las ondas se deducen mediante la distribución de la velocidad del trazo de los rayos "ray tracing" usando la ley de Snell, y los coeficientes de reflexión y transmisión pueden calcularse a partir de los contrastes de las impedancias eléctricas.

Los valores de la intensidad registrados de manera digital son convertidos en señales analógicas de voltaje y graficados en dos ejes: en el eje horizontal, las intensidades de las señales y en el vertical, el tiempo (two-way time), el resultado es un perfil con unidades en metros y en nanosegundos (two-way travel  $1\text{ ns} = 10^{-9}\text{ s}$ ), respectivamente.

Los registros se presentan como series de espacio tiempo y generan una imagen bidimensional de la histotia de las reflexiones bajo la



● Fig. 3. Esquema del sistema de georadar, sus componentes principales y las operaciones básicas

línea de desplazamiento de la antena (fig. 2). La amplitud de los pulsos varía de acuerdo al tamaño de los materiales reflectores que se encuentren en el subsuelo: pulsos cortos de 2 ns de duración (ns: nanosegundos,  $1 \text{ ns} = 10^{-9} \text{ s}$ ) para la detección de reflectores pequeños y pulsos largos de 10 ns para la detección de reflectores de grandes. El rango de penetración depende de la frecuencia de la señal emitida (de 10 mhz a 1 ghz), así como de las características del terreno; en circunstancias favorables y con las antenas adecuadas, se pueden alcanzar penetraciones desde unos cuantos centímetros hasta más de 100 m de profundidad.

Los datos pueden visualizarse en la pantalla de la microcomputadora con un *software* adecuado o

graficados en papel por medio de una impresora. Los valores pueden graficarse como arreglos ondulados (wiggles) en donde las áreas positivas se presentan por un tono particular de color o, como campos de colores diferentes correspondientes a cada uno de los valores promedios de las intensidades positivas.

### Resolución y procesamiento de las señales electromagnéticas

Los pulsos de radar en el subsuelo y bajo condiciones ideales se comportan cinemáticamente de manera similar a las ondas acústicas (sísmicas), la única diferencia son las escalas de prospección y la capacidad resolutive. En la primera, los pulsos de radar son alrededor de tres veces inferiores a las ondas acústicas; y en la segunda, la resolución de las ondas electromagnéticas es superior a la de las sísmicas.

Por lo tanto, el procesamiento e interpretación de los datos electromagnéticos es similar a los sísmicos, muchos de éstos se han procesado con los estándares de procesamiento acústico (Fisher *et al.*, 1992) produciendo gráficas análogas entre las propagaciones de las ondas acústicas y electromagnéticas (Lee *et al.*, 1987). Además, los algoritmos del tipo "ray-tracing" similares a los utilizados en sísmica han sido propuestos para el procesamiento de datos electromagnéticos de tomografías de tipo "cross-borehole", efectuadas con georadar (Goodman, 1994).

Algunas de las variadas técnicas de procesamiento sísmico han sido modificadas para el georadar, como: 1) corrección de distorsiones, ya sea de origen electrónico o provocadas por las variaciones de las propiedades eléctricas del subsuelo; 2) filtrado de señales para aumentar y enfatizar señales débiles; y 3) transformación de perfiles para incrementar la apariencia visual de los datos.

Todos estos procesos pueden aplicarse por medio de una paquetería informática, que para el georadar del INAH (SIR-2), corresponde a los

programas escritos en lenguaje C reunidos en el RADAR3 *software* para ambiente DOS.

### Aplicaciones

El georadar —como localizador de materiales y objetos enterrados— presenta varias ventajas en arqueología: 1) usando su capacidad inherente de determinación de rango combinado con su disposición sintética de procesamiento, puede localizar objetos incluyendo la profundidad aproximada de los mismos; 2) puede detectar tanto objetos metálicos como no metálicos; y 3) puede discriminar entre señales de ruido (*scattering*) y reflexiones producidas por objetos enterrados. En resumen, el georadar proporciona datos que permiten la identificación de objetos en el subsuelo de manera rápida y eficaz, lo que permite reducir los costos de excavación en las prospecciones arqueológicas.

Además de las aplicaciones en arqueología, el GPR ha sido utilizado en varios países para la determinación de espesores de horizontes pedológicos en perfiles de suelos; en la localización de niveles freáticos; en la detección de cavidades y fallas estructurales; en el mapeo de plumas contaminantes de hidrocarburos; en la determinación de los espesores de núcleos de presas y puentes; en el control de calidad de carpetas asfálticas de carreteras y en la investigación de sitios para utilizarse como rellenos sanitarios.

### Limitaciones

El radar penetración o georadar presenta limitaciones de sondeo en lugares donde la conductividad del suelo es muy alta; tal es el caso de horizontes y/o capas de material arcilloso, limoso o de suelos saturados; todos éstos opacan las señales de radar.

La aplicación también es limitada en sitios cercanos a fuentes de interferencia como son radiotransmisores, metales (cuando éstos no son los objetos buscados), líneas de transmisión de energía eléctrica (cables de luz), cercas de alambre y paso de automóviles.

### Conclusiones

1. El sistema de georadar con antenas monoestáticas de 900 y 300 mhz —con el que cuenta la Subdirección de Laboratorios y Apoyo Académico del INAH— es un método prospección geofísica que puede utilizarse en las tareas de prospección arqueológica, paleontológica, antropológica y de restauración de monumentos coloniales. Este equipo puede, en tiempos relativamente cortos, producir información de gran importancia, la cual se traduce en una reducción significativa de costos y de tiempo en los trabajos de prospección.

2. El método electromagnético de georadar es una técnica eficiente para detectar variaciones en el subsuelo, aun de volúmenes limitados o de débil contraste, con excepción de suelos arcillosos donde la absorción de las ondas es muy alta.

3. El georadar no distingue formas de objetos, volumen, tipo de material del que están hechos ni la profundidad absoluta a la que se encuentran, sino únicamente zonas “anómalas”.

4. Para su mejor rendimiento y calibración, las aplicaciones de georadar en arqueología requieren de la comprobación en el subsuelo por medio de excavaciones ex profeso de las anomalías reportadas.

### Agradecimientos

Se agradece al ingeniero Joaquín García-Bárceña, presidente del Consejo de Arqueología, el haberme permitido participar en el curso teórico-práctico acerca de la utilización del georadar SIR-SYSTEM 2 en el verano de 1995, así como su confianza y generosidad demostrada a lo largo de varios años y su participación en la revisión del presente artículo. Asimismo, se agradece al doctor Nobuhito Nagai de la compañía OYO Corporation, Tokio, Japan, por sus aportaciones tanto teóricas como prácticas de los diferentes métodos geofísicos aplicados a la prospección arqueológica.

## bibliografía

- Annan, A. P. y J. L. Davis  
1977. "Impulse radar applied to ice thickness measurements and fresh water", en *Geological Survey of Canada, Report of Activities, Paper 77-1B*, pp. 63-64.
- Arcone, S. A. y A. J. Delaney  
1982. "Measurement of ground dielectric properties using wide-angle reflection and refraction", en *U. S. Cold Regions Research and Engineering Laboratory (CRREL), New Hampshire, Report 82-6* Hannover, p. 15.
- Bevan, B. W.  
1991. "The search for graves", en *Geophysics* 56, pp. 1310-1319.
- Davis, J. L. y A. P. Annan  
1986. "High resolution sounding using ground probing radar", en *Geoscience Canada* 13 (3), pp. 205-208.
- 1989. "Ground penetrating radar for high resolution mapping of soils and rocks stratigraphy", en *Geophysical Prospecting* 37, pp. 531-551.
- Fisher, E., G. A. McMechan y A. P. Annan  
1992. "Acquisition and processing of wide-aperture ground-penetrating radar data", en *Geophysics* 57, pp. 495-504.
- Foster, E. L.  
1968. "Further developments of pulsed induction metal detector", en *Prospecting Archaeology* 3, pp. 95-99.
- Frohlich, B. y W. J. Lancaster  
1986. "Electromagnetic surveying in current Middle Eastern archaeology: application and evaluation", en *Geophysics* 51, pp. 1414-1425.
- Gibson, T. H.  
1986. "Magnetic prospection on prehistoric sites in western Canada", en *Geophysics* 51, pp. 553-560.
- Goodman, D.  
1994. "Ground-penetrating radar simulation in engineering and archaeology", en *Geophysics* 59, pp. 224-232.
- Imai, T., T. Sakayama y T. Kanemori  
1987. "Use of ground-probing radar and resistivity survey for archaeological investigation", en *Geophysics* 2, pp. 137-150.
- Jol, H. M.  
1993. *Ground Penetrating Radar (GPR): A new Geophysical Methodology used to Investigate the Internal Structure of Sedimentary Deposits (Field Experiments on Lacustrine Deltas)*, tesis de doctorado, University of Calgary.
- Keary, P. y M. Brooks  
1991. *An Introduction to Geophysical Exploration*, Boston, Massachusetts, Blackwell Scientific Publication, 2a. ed.
- Laxal, R.  
1985. "Discovery in Labrador-a 16th Century Basque whaling port and its sunken fleet", en *National Geographic* 168, pp. 40-49.
- Lee, S., G. A. McMechan y C. L. V. Aiken  
1987. "Phase field imaging: the electromagnetic equivalent of seismic migration", en *Geophysics* 52, pp. 687-693.
- Moorman, B. J.  
1990. *Assesing the Ability of Ground Penetrating Radar to Delineate Subsurface Fluvial Lithofacies*, tesis de maestría, University of Calgary.
- Moorman, B. J., A. S. Judge y P. T. LaFleche  
1988. "The use of ground penetrating radar in permafrost regions", en *Second National Student Conference on Northern Studies. Abstracts of Papers*, november 23-24, Ottawa, Ontario, pp. 101-102.
- Owen, T. E. (ed.)  
1995. "Special issue on Ground Penetrating Radar", en *Journal of Applied Geophysics* 33, pp. 1-255.



- Parasnis, D. S.  
1997. *Principles of Applied Geophysics*, Chapman and Hall, 5a. ed.
- Scollar, I.  
1962. "Electromagnetic prospecting methods in archaeology", en *Archaeometrics* 5, pp. 146-153.
- Serway, R. A.  
1982. *Physics for Scientists and Engineers*, Toronto, Ontario, Saunders College Publishing.
- Sterberg, B. K. y J. W. McGill  
1995. "Archaeology studies in southern Arizona using ground penetrating radar", en *Journal of Applied Geophysics* 33, pp. 209-225.
- Stratton, J. A.  
1941. *Electromagnetic Theory*, Nueva York, McGraw-Hill Book Company.
- Sutinen, R.  
1992. "Glacial deposits, their electrical properties and surveying by image interpretation and ground penetrating radar", en *Geological Survey of Finland, Bulletin* 359, Finland, Espoo.
- Telford, W. M., L. P. Geldart, R. E. Sheriff y D. A. Keys  
1976. *Applied Geophysics*, Nueva York, Cambridge University Press.
- Tite, M. S. y C. Mullins  
1969. "Electromagnetic prospecting-A preliminary investigation", en *Prospecting Archaeology* 4, pp. 95-102.
- Tuck, J. A.  
1985. "Unearthing Red Bay's whaling history", en *National Geographic* 168, pp. 50-57.
- Ulriksen, C. P. F.  
1982. *Application of Impulse Radar to Civil Engineering*, tesis de doctorado en Filosofía, Lund Sweden, Lund University of Technology.
- Vaughan, C. J.  
1986. "Ground-penetrating radar survey used in archaeological investigation", en *Geophysics* 51, pp. 595-604.
- Wynn, J. C. (ed.)  
1986. "Geophysics in Archaeology", en *Geophysics* 51, pp. 533-629.
- Young, J. D. y Jr. L. Peters  
(1996). "A brief history of GPR fundamentals and applications", en *6th International Conference on Ground Penetrating Radar (GPR '96), Preceeding*, Sendai Japan, Tohoku University Faculty of Engineering Sendai, Japan, pp. 5-13.

