



Caracterización geofísica de residuos almacenados en vertederos incontrolados

ENCARNA BUSQUET GIL

Licenciada en Ciencias Geológicas por la Universidad de Barcelona.

ALBERTO CASAS PONSATI

Doctor en Geología y catedrático de Prospección Geofísica de la Universidad de Barcelona.

SUMARIO

Desde hace algunos años la prospección geofísica se está aplicando con notable éxito en estudios medioambientales para la localización y caracterización de vertederos clandestinos. Sus cualidades como métodos de prospección rápidos, no destructivos y económicos los hacen óptimos para este tipo de estudios.

En el siguiente artículo se presentan algunos resultados obtenidos en la zona del Bajo Llobregat. La existencia de vertederos incontrolados situados en antiguas graveras a los lados del río hace peligrar los acuíferos de la zona que abastecen la población.

INTRODUCCIÓN

En los años cincuenta y sesenta, la industrialización en distintas zonas del país se hace evidente. Cada vez es mayor el número de fábricas que se concentran en zonas estratégicas cerca de los ríos y centros urbanos. Pero la generación de residuos acompaña a este desarrollo. Son cantidades poco importantes al principio, que van aumentando más y más. El país, sin infraestructura para poder controlarlos, propicia que las industrias que tienen necesidad de deshacerse de los residuos que generan lo hagan de forma totalmente incontrolada. Cualquier río, valle, barranco o agujero rellenable es válido.

El desarrollo de la industria fue ligado a un crecimiento demográfico muy

Palabras clave: Vertederos incontrolados, prospección geofísica, residuos, contaminación medioambiental.

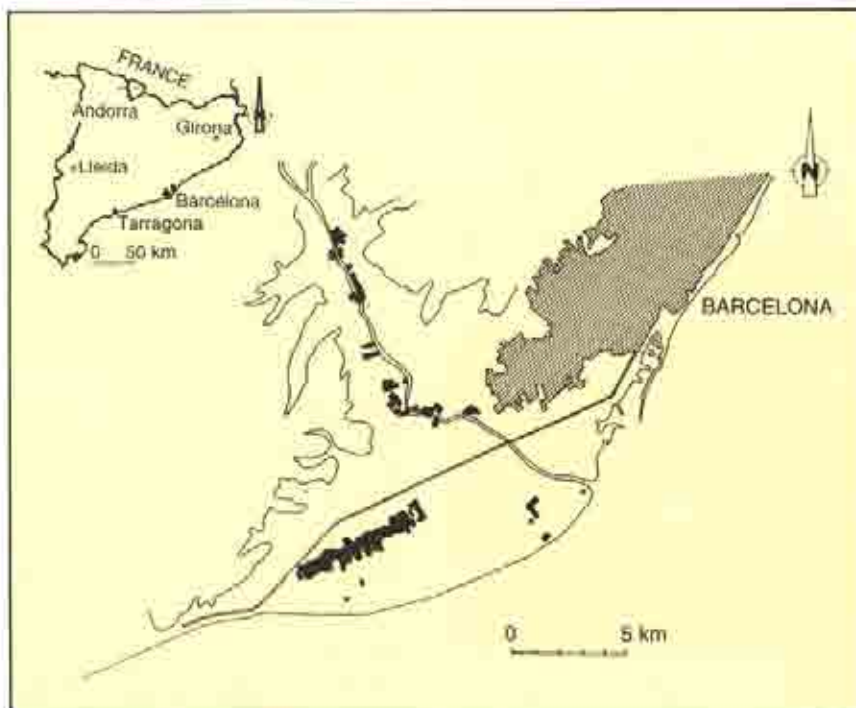


El cartel es suficientemente explicativo del tipo de relleno utilizado para colmatar los hoyos.

importante, y con ello el incremento en la demanda de nuevas viviendas y mejoras en las vías de comunicación. Podríamos citar, como ejemplo, el caso acontecido en la ciudad de Barcelona y su área metropolitana. La in-

dustria de la construcción obtuvo sus materias primas, arenas y gravas explotando intensamente las graveras aluviales de los ríos Llobregat y Besòs. Al terminar la extracción, muchos de los hoyos que quedaron fueron uti-

FIGURA 1. Mapa geográfico de situación donde se encuentra representada, a lo largo del río Llobregat y en el delta, la superficie afectada por las antiguas explotaciones de áridos.



lizados como vertederos incontrolados de todo tipo de residuos urbanos e industriales. El total de superficie afectada hasta 1983 en el delta del Llobregat fue de 4.996.000 m², que representa entre el 15 y 27 por 100 de la superficie total de las distintas áreas que componen la zona (Fig. 1).

La consecuencia de estas actividades es la contaminación de suelos y aguas subterráneas. En el acuífero superior del delta del Llobregat se han detectado niveles altos de amonio y nitratos, característicos de la contaminación producida por residuos urbanos, y plomo, cromo, mercurio y aluminio, propios de residuos industriales (Isamat y cols., 1976; Subirana y Casas, 1985). Es, por tanto, necesario solventar estas situaciones. Para ello es necesario hacer un inventario del número de vertederos existentes, su localización y el grado de peligrosidad que representa. Tardes o temprano sus efectos nocivos saldrán ampliamente a luz y la situación no tendrá remedio entonces a corto ni medio plazo.

VERTEDEROS INCONTROLADOS

Los vertederos incontrolados son lugares donde se arrojan residuos sin tener en cuenta la existencia de condiciones que garanticen su estanqueidad.

Las características de un vertedero dependen, principalmente, de la cantidad y tipo de residuos que contenga, de la forma de acumulación de éstos, de las formaciones y estructuras geológicas que los contienen y del tipo de material que cubre los residuos (si existe). Con toda esta información se le asigna un grado de peligrosidad con el que debe tomarse una de las siguientes soluciones: 1) vaciado y protección; 2) limpieza y protección, y 3) vaciado, limpieza y protección, determinadas por GEMAT (Gabinete de Estudios de Medio Ambiente y Territoriales).

La contaminación se debe al lixiviado que se produce cuando el agua entra en contacto con los residuos. Esto puede ocurrir mediante el lavado del suelo contaminado por la percolación de la precipitación o por una subida del nivel freático que pone al acuífero en contacto directo con el vertedero (Fig. 2). El proceso se facilita cuanto más permeables son los materiales donde se encuentran los residuos. En el delta del Llobregat, los vertederos se extienden a ambos lados del cauce actual del río, que es la zona de mayor vulnerabilidad debido a que los materiales son de origen

fluvial muy permeables y conectados con el acuífero libre de la zona (Fig. 3).

Si llega a producirse contaminación importante en un acuífero, su recuperación puede ser larga y costosa, pudiendo causar graves perjuicios a la población a la que afecta. Sólo para casos muy localizados puede ser tratada mediante extracciones por bombeo o dilución.

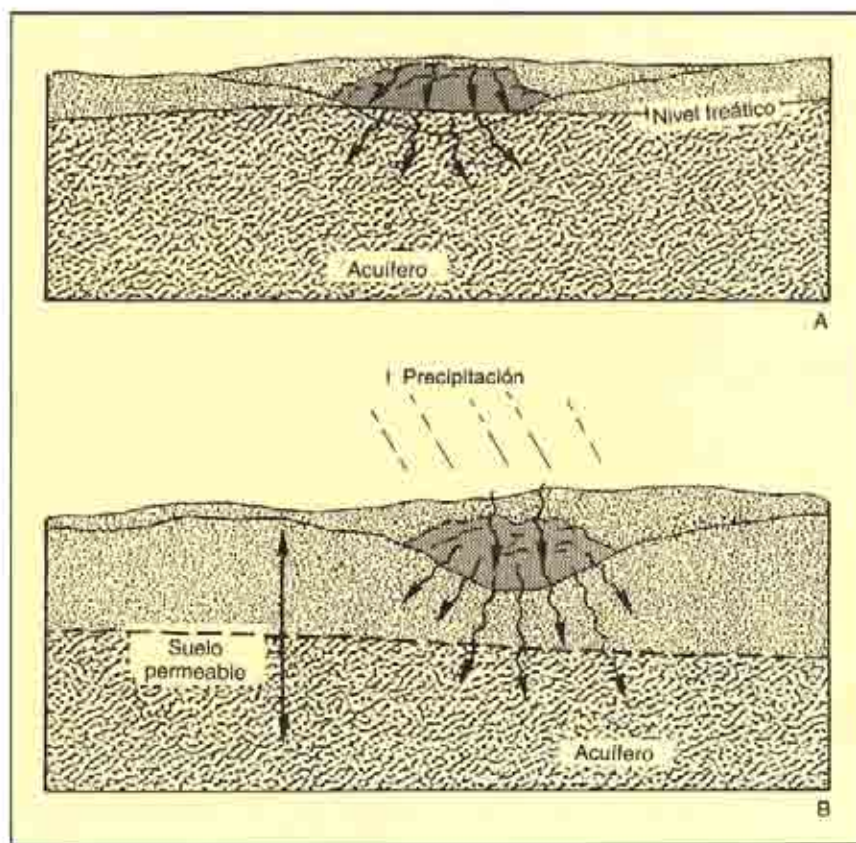
Es necesario, por tanto, una limpieza de todas las zonas que contengan vertederos incontrolados para impedir la contaminación, que en estas condiciones es inevitable. Sin embargo, no es un trabajo sencillo. Antes de iniciar cualquier trabajo en un vertedero es necesario un conocimiento previo de sus características. Un acceso directo puede resultar peligroso debido a:

1. Posibilidad de producir una contaminación ambiental al mezclar y extender residuos.
2. Recipientes enterrados llenos de residuos líquidos tóxicos podrían romperse y verter su contenido directamente en el suelo.
3. Explosiones o incendios en determinados sectores del vertedero debidos a la acumulación de gas procedente de las reacciones químicas de los residuos.
4. Peligro directo de radiaciones e intoxicaciones a la población próxima al lugar donde ocurra.

PROSPECCIÓN GEOFÍSICA

La prospección geofísica ha sido utilizada tradicionalmente para faci-

FIGURA 2. Representación esquemática de dos formas de producirse contaminación en un acuífero: A) Por subida del nivel freático, y B) Percolación del lixiviado producido por el agua de lluvia.



tar la exploración de los recursos naturales del subsuelo, aprovechando los contrastes de las distintas propiedades físicas que presentan las formaciones geológicas. En la última década, sin embargo, se ha producido

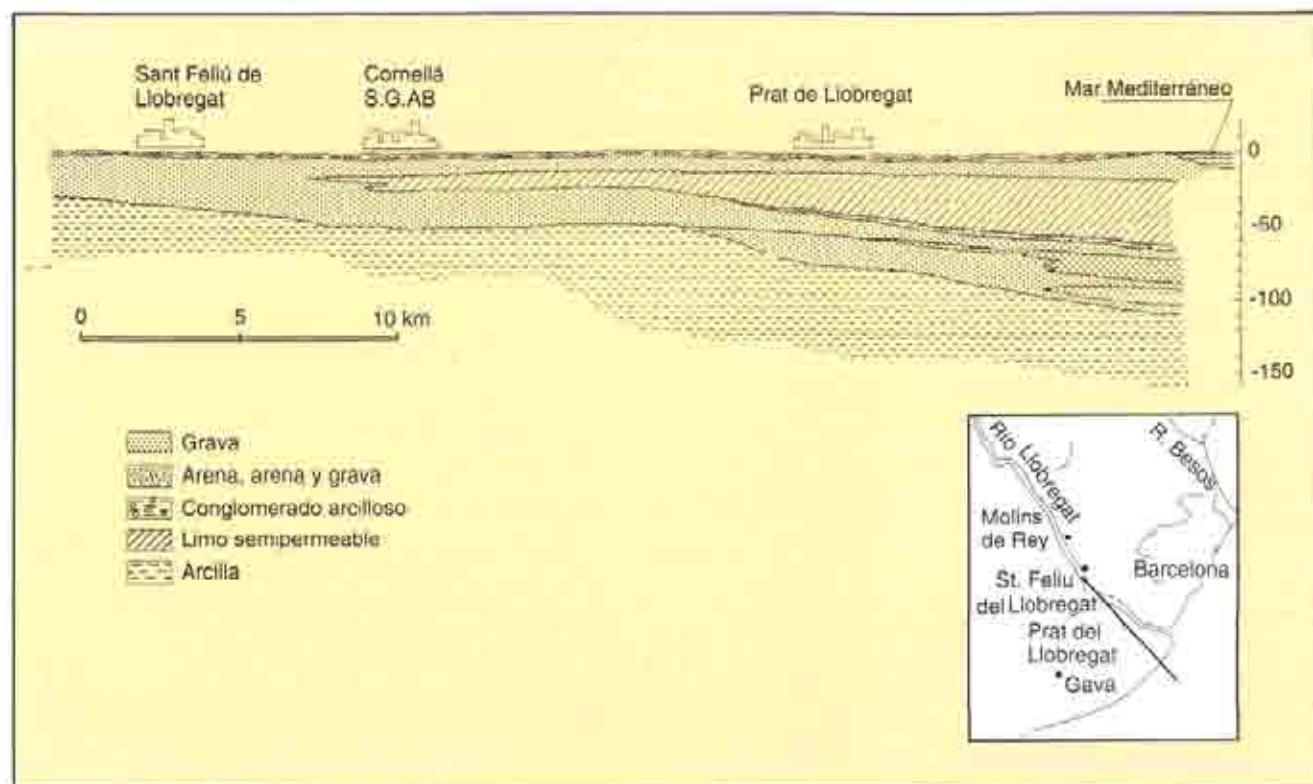
un creciente interés por la aplicación, basados hasta el momento en la obtención de muestras directas a partir de sondeos mecánicos y en los análisis químicos de las aguas subterráneas.

Los vertederos incontrolados son lugares donde se arrojan residuos sin tener en cuenta la existencia de condiciones que garanticen su estanqueidad.



Acumulaciones de bidones y otros objetos que posteriormente han quedado enterrados en la zona.

FIGURA 3. Distribución espacial de los acuíferos del bajo Llobregat.



Los métodos directos tienen como principal inconveniente el proporcionar resultados puntuales que pueden inducir a errores. También existe el riesgo de provocar una contaminación directa al acuífero y el peligro de producirse explosiones, fuegos o into-

xicaciones. Por contra, los métodos geofísicos proporcionan una cobertura espacial prácticamente continua, además de ser rápidos, no destructivos y económicos. El resultado es una visión global del área que se estudia.

Desde hace algunos años vienen realizándose estudios geofísicos para evaluar la eficacia de los distintos métodos de prospección geofísica en el estudio del subsuelo, y se está comprobando que su utilización resulta óptima e imprescindible por las características y los resultados que presentan. La prospección geofísica nos ayudará a localizar los vertederos y conocer sus condiciones de forma rápida y no destructiva antes de proceder a su limpieza.

Entre los distintos métodos de prospección geofísica prácticamente todos pueden contribuir significativamente en el estudio de problemas ambientales, aunque los más utilizados son las prospecciones eléctrica, electromagnética y magnética. Ninguno de éstos puede considerarse el mejor a este tipo de aplicación, dada la diversidad y complejidad de los distintos modelos de vertederos. En general, la combinación de varios de ellos, junto con un conocimiento previo de las características geológicas, hidrogeológicas, antrópicas e históricas de la zona, permitirá una interpretación más segura y precisa.

OBJETIVOS DEL ESTUDIO Y METODOLOGÍA SEGUIDA

Los objetivos generales seguidos en el estudio de los vertederos incontrolados son:



Aspecto de la zona anterior en 1993. El hoyo ha quedado totalmente cubierto y sin ningún indicio externo de su existencia.

1. Determinar la presencia, localización, distribución, profundidad y composición de los posibles vertidos enterrados.

2. Determinar la presencia y extensión de los contaminantes y del penacho de lixiviados, tanto en la zona saturada como en la no saturada.

3. Caracterizar y evaluar las condiciones hidrogeológicas locales.

En función de estos objetivos, la metodología más adecuada a seguir en este tipo de estudios es la siguiente:

A) Recopilación histórica de hechos acontecidos en la zona.

B) Revisión de otros datos ya existentes, como estudios hidrogeológicos.

C) Estudio de la fotografía aérea.

D) Reconocimiento in situ de la zona afectada.

E) Establecimiento de los requerimientos de estudio en el campo como:

- Considerar la cantidad de espacio cubierto.

- Establecer la profundidad y resolución requeridas.

- Determinación de las técnicas a emplear.

F) Campaña de prospección geofísica.



Antigua explotación de áridos donde se observa el relleno posterior. Foto tomada en 1985.

G) Revisión e integración de todos los datos obtenidos.

H) Interpretación. El resultado de la investigación geofísica nos da una visión global del lugar.

MÉTODOS GEOFÍSICOS APLICADOS Y RESULTADOS

Prospección magnética

La prospección magnética ha sido utilizada tradicionalmente como método de prospección minera para la detección de minerales y para la cartografía de fallas, rocas intrusivas, etc. En vertederos incontrolados su función consiste en localizar bidones y otros objetos metálicos susceptibles de contener sustancias tóxicas y definir profundidades de fosas rellenas con material férreo.

La prospección magnética se basa en la detección de las anomalías en el campo magnético terrestre. Puede definirse en cada instante por un vector F , que tiene una dirección e intensidad determinadas. En cada región particular, el campo magnético se describe por una intensidad, inclinación (o ángulo respecto a la horizontal) y declinación (o ángulo respecto al norte geográfico). El valor de la intensidad varía desde 60.000 nT, cerca de los polos, hasta 25.000 nT, en el ecuador. En nuestra latitud su valor es próximo a los 44.500 nT. Las anomalías son causadas tanto por distribuciones naturales de mineral de Fe en el subsuelo como por la presencia de objetos férricos enterrados, como bidones, tuberías, tanques de almacenamiento o cualquier otro objeto fabricado con material férreo.

El magnetómetro más adecuado para este tipo de estudios es el de



Magnetómetro de protones.

protones. Mide la intensidad total del campo magnético. La presencia de metales en el suelo hacen variar su valor. La anomalía que se detecta es proporcional a la masa del metal que la crea y a su profundidad (Fig. 4).

En la respuesta del magnetómetro también influyen el valor del magnetismo remanente (o de formación) del cuerpo, su estado de deterioro, la orientación del perfil y la existencia de anomalías magnéticas de origen natural o debidas a la combinación de otros efectos antrópicos, como vallas metálicas, líneas de alta tensión, etc. Todo ello actúa como ruido, ya que enmascara la respuesta propia del objetivo que se persigue y es muy difícil cuantificar y aislar sus efectos sobre la señal (Fig. 5).

Prospección eléctrica y electromagnética

Los métodos de prospección eléctrica y electromagnética miden las variaciones de la conductividad (o resistividad) del subsuelo. Estas variaciones son causadas, generalmente, por cambios en la estructura del suelo (tamaño de grano, porosidad, etc.), contenido en arcilla, conductividad del agua que contiene el suelo y grado de saturación, que en muchos casos dominará el valor de la medida. Está comprobado que el aumento de 25 m/l en la salinidad del agua producirá un incremento en la conductividad total de 1 mS/m.

Prospección eléctrica

Existen dos modalidades principales de aplicación de los métodos eléctricos resistivos o galvánicos: el sondeo eléctrico vertical (S.E.V.) y la calicata eléctrica. El primer método consiste en la medida de las variaciones de la resistividad del terreno bajo la vertical de un punto, mientras que la calicata eléctrica mide las variaciones laterales de la resistividad del terreno a una profundidad de investigación prácticamente constante.

Los sondeos eléctricos verticales determinan, a partir de medidas tomadas en superficie, la variación de la resistividad eléctrica en profundidad. Se calcula a partir de la observación de la diferencia de potencial ΔV entre dos electrodos (M y N) al introducir en el terreno una corriente de intensidad I mediante otro par de electrodos (A y B) (Fig. 6):

$$\rho_n = k \left(\frac{\Delta V_{MN}}{I_{AB}} \right)$$

FIGURA 4. Anomalia magnética teórica producida por un cuerpo bidimensional.

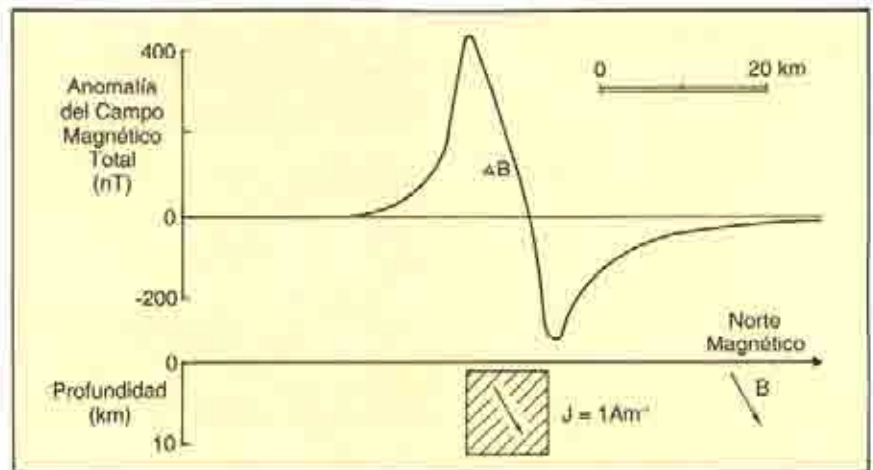


FIGURA 5. Prospección magnética realizada sobre un vertedero incontrolado. Se localizan importantes anomalías en la franja entre 35 y 50 m, lo que indica la existencia de una acumulación de objetos férricos enterrados.

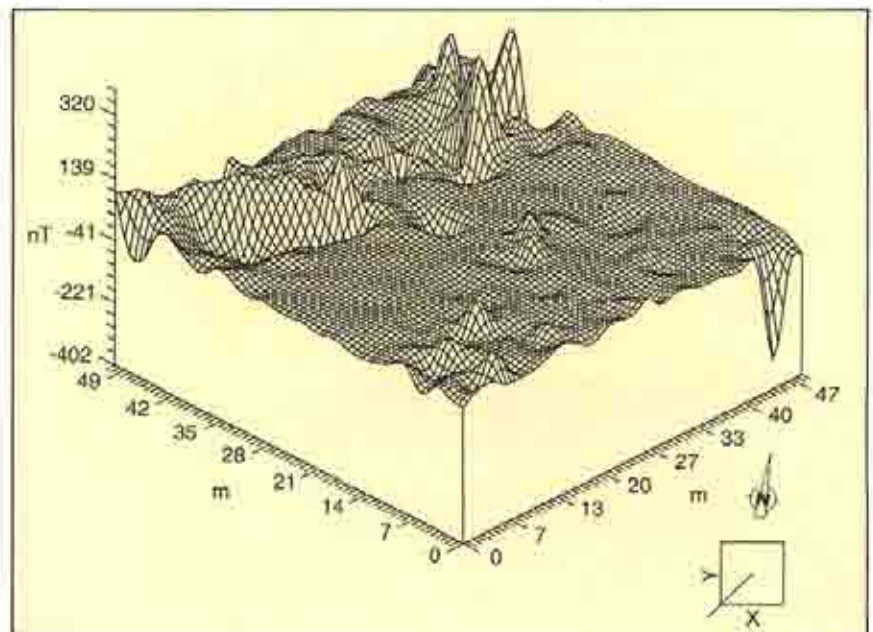
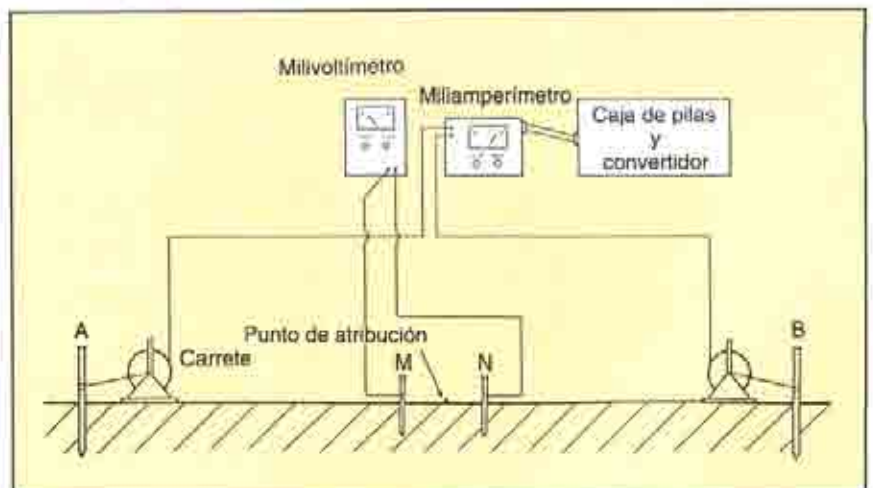


FIGURA 6. Esquema básico de un dispositivo electrodo Schumberger de prospección eléctrica.



donde k es una constante que depende únicamente del dispositivo electrónico.

La profundidad de penetración depende de la separación entre electrodos y de la conductividad del terreno. Si vamos separando, sucesivamente, los electrodos de corriente, la profundidad de penetración aumenta.

Con los valores de resistividad aparente obtenidos con diferentes semidistancias ($AB/2$) entre los electrodos de corriente se construye la curva de campo que, de forma aproximada, ya permite establecer, por su morfología, una valoración cualitativa de la estructura del subsuelo.

Debido a la heterogeneidad y anisotropía del terreno, la interpretación cuantitativa de la curva de resistividades aparentes debe realizarse mediante la comparación con modelos teóricos o por inversión automática.

El inconveniente que presenta este método es que la implantación de electrodos en el suelo lo hace un método lento y utilizable sólo en determinadas condiciones.

La utilización de sondeos con dispositivo Schlumberger nos permitirá definir la profundidad del vertedero y la resistividad de los residuos que contenga. Estos datos, junto con un control geológico de los pozos de agua en la zona, ayudaría a una interpretación cuantitativa final más detallada.

Las calicatas eléctricas trabajan de un modo similar a los sondeos eléctricos, pero en lugar de aumentar la separación entre electrodos se van desplazando todos a lo largo de un perfil. Su función consiste en determinar la variación lateral de la resistividad a una profundidad constante.

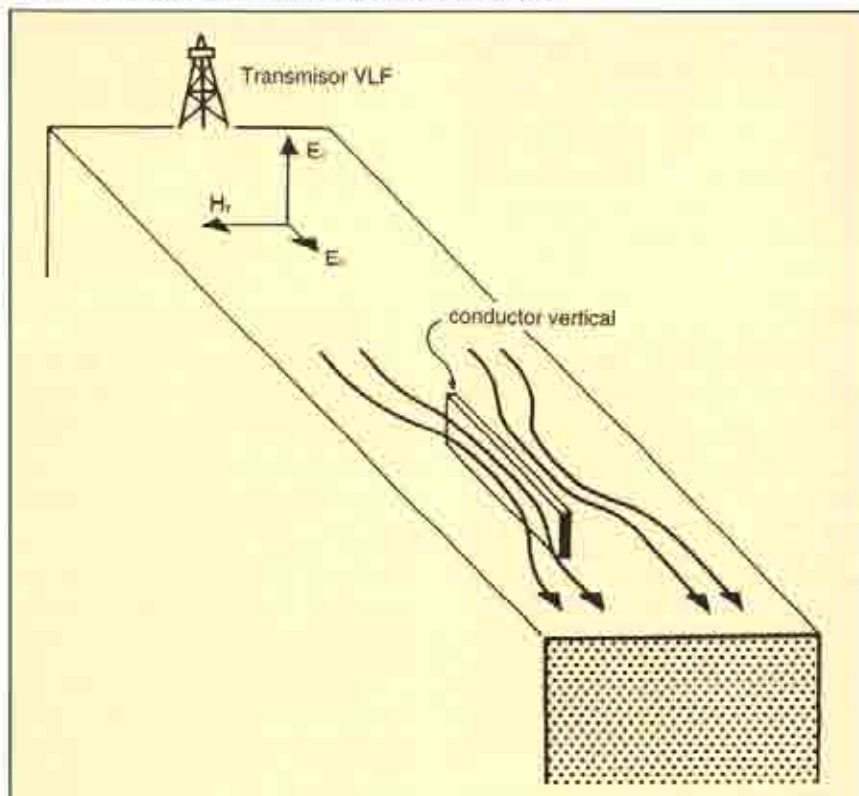
Se utilizan principalmente para la detección de zonas conductoras relacionadas con la dirección del movimiento del penacho contaminante.

Prospección electromagnética

Los métodos electromagnéticos miden la conductividad eléctrica del subsuelo. Se rige por las ecuaciones de Maxwell, que describen los fenómenos electromagnéticos macroscópicos. Con estas ecuaciones el campo electromagnético queda perfectamente definido con los cuatro vectores que representan los campos eléctrico (E) y magnético (M), y las inducciones eléctrica (D) y magnética (B) (Fig. 7).

La estructura de los campos eléctrico y magnético puede simplificarse. La onda resultante viene caracterizada por tres vectores rectangulares:

FIGURA 7. Componentes del campo electromagnético.



$$E = E_0 \cos \omega t$$

$$H = H_0 \cos \omega t$$

$$v = (\epsilon \mu)^{-1/2}$$

$$\frac{E_0}{H_0} = \left(\frac{\mu}{\epsilon} \right)^{1/2}$$

ω = Pulsación.

E_0, H_0 = Amplitudes.

μ = Permeabilidad magnética del medio.

ϵ = Constante dieléctrica del medio.

v = Velocidad de propagación de la onda.

Cuando un campo electromagnético producido por una bobina recorrida por corriente alterna se propaga a través del subsuelo, induce otras corrientes eléctricas en todo cuerpo conductor que encuentra en su camino. Estas corrientes secundarias fluyen en dirección tal que su campo electromagnético se opone al campo inductor o primario. Cuando el campo secundario se extiende en el espacio, el campo total (suma de primario y secundario) difiere en cualquier punto del campo primario.

La intensidad de las corrientes inducidas depende, entre otros factores, de la resistividad eléctrica del cuerpo conductor y de la frecuencia del campo primario. Generalmente, las corrientes son tanto más intensas cuanto mayores sean la resistividad y la frecuencia.

La profundidad (d) a la que se llega depende de la frecuencia del emisor y de la conductividad del terreno. Su valor es función de:

$$d \approx 500 \left(\frac{\rho_a}{f} \right)^{1/2}$$

donde:

ρ_a = Resistividad aparente del medio en ohm/m.

f = Frecuencia del emisor en Hz.

A partir de esta expresión se deduce que la onda penetra más en terrenos resistivos que en conductores y en frecuencias altas que en bajas.

Son aplicables tanto a la evaluación de las condiciones geohidrológicas naturales como para cartografiar penachos contaminantes. Adicionalmente pueden ser localizados los límites de la zona excavada, residuos y bidones enterrados e incluso localizar líneas metálicas del servicio público.

Muchos contaminantes producen un incremento en la concentración de iones libres que aumentan la conductividad. Su valor absoluto, sin embargo, es menos importante que su variación lateral y en profundidad. Así puede detectarse el contorno de una excavación y la migración de los contaminantes.

Una desventaja importante es que son métodos susceptibles a ruidos

externos producidos por líneas de alta tensión.

Los métodos electromagnéticos pueden calificarse según la menor o mayor distancia del campo primario respecto del punto de medida. Entre los primeros, el más utilizado en estudios ambientales es el calicateo electromagnético, y entre los segundos, el VLF (Very Low Frequency).

VLF

El método EM-VLF utiliza las ondas electromagnéticas emitidas por estaciones de radio lejanas, pero de gran potencia, diseñadas para facilitar la comunicación con los submarinos. Estas ondas tienen una frecuencia muy baja, que oscila entre 15 y 30 KHz, y una longitud de onda entre 12 y 20 km. En el ámbito de la prospección geofísica dichas condiciones dan una profundidad de investigación débil, que no llega a superar los 100 m. Esto se debe a que la profundidad está en función de la frecuencia de la emisora y de la resistencia de los materiales por los que viaja.

Los receptores de VLF tienden a medir componentes individuales del campo total, descompuestas en sus partes real (en fase) e imaginaria (o cuadratura) (Fig. 8).

La resistividad aparente en el méto-

do VLF-R se da a partir de la relación de las amplitudes del campo eléctrico E y magnético H:

$$\sigma_s = \alpha(f) \left(\frac{E_s}{H_s} \right)$$

donde:

$$\alpha(f) = \frac{1}{2} \pi f$$

f = Frecuencia de la emisora.

Sobre el terreno se toman datos en puntos determinados o estaciones, ordenadas generalmente en perfiles de medidas. La separación entre estaciones ha de ser del mismo orden de magnitud que el tamaño y profundidad del objetivo. El espacio entre perfiles no es conveniente que sea superior a cinco veces el espacio entre estaciones para poder relacionarlos entre sí y favorecer la elaboración de mapas de isovalores.

Normalmente se trabaja con dos emisoras de radio situadas en direcciones perpendiculares. Esta orientación es muy importante, ya que la prospección con VLF es direccional, lo que significa que la respuesta depende de la orientación de las emisoras respecto al perfil de medida y, sobre todo, al cuerpo buscado. Así, una misma estructura geológica puede

dar diversos modelos geofísicos en función de su orientación respecto a la estación emisora de radio (Fig. 9). Si la orientación de la estructura conductora no se conoce, el perfil debe implantarse paralelo a la dirección de una de las emisoras (y, por tanto, perpendicular a la otra), de manera que la información sea, a la vez, fiable y complementaria.

Calicateo electromagnético

Es posible obtener de la conductividad eléctrica del terreno mediante métodos electromagnéticos de inducción a partir de dos bobinas conectadas entre sí: una, actuando como transmisor, y la otra, como receptor. El campo electromagnético secundario es una función compleja de la separación entre bobinas, la frecuencia y la conductividad del terreno. Bajo ciertas condiciones, definidas técnicamente como «operación a valores bajos del número de inducción», el campo magnético secundario es una función simple de estas variables y la conductividad aparente del terreno puede obtenerse a partir de la siguiente expresión:

$$\sigma_s = \frac{4}{\omega \mu_0 s^2} \left(\frac{H_s}{H_p} \right)$$

donde:

H_s = Campo magnético secundario.

H_p = Campo magnético primario.

$\omega = 2\pi f$.

f = Frecuencia.

μ_0 = Permeabilidad del espacio libre.

σ_s = Conductividad del suelo.

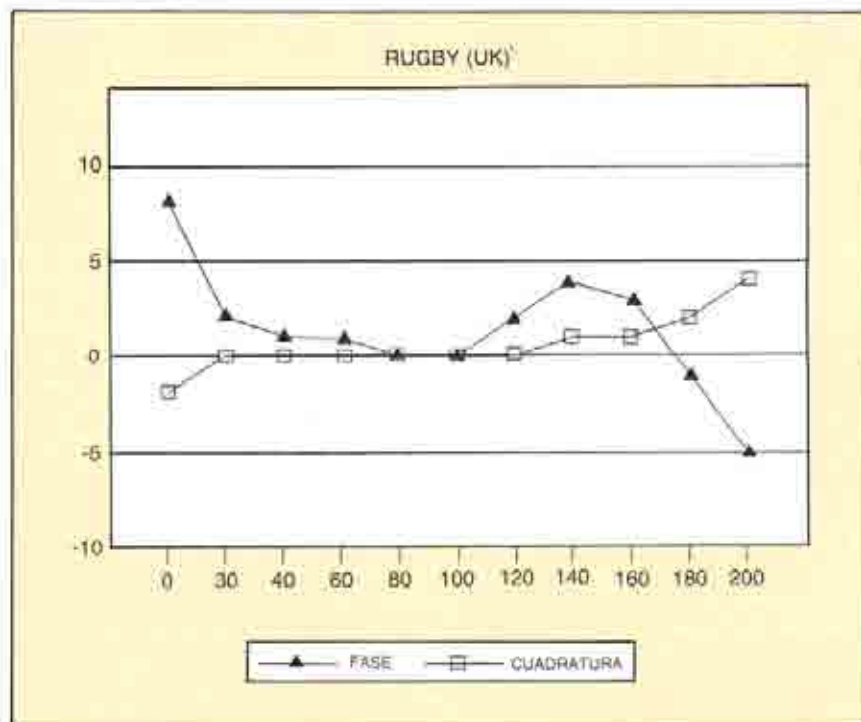
s = Espacio entre electrodos.

En determinados equipos (Geonics EM-34), el espaciado entre bobinas son medidas constantes de 10, 20 y 40 m. La profundidad a la que llegan depende de la distancia. Este método puede trabajar como dipolos horizontal y vertical.

Espacio entre bobinas (m)	Profundidad (m)	
	Dipolo H	Dipolo V
10	7.5	15
20	15	30
40	30	60

Su ventaja respecto al VLF es que queda mejor determinada la profundidad de investigación, por lo que el objetivo se localiza con mayor exactitud.

FIGURA 8. Perfiles de la fase y la cuadratura del campo eléctrico obtenidos a partir de la estación de radio de Rugby, emitiendo a 16KHz. Se observa un paso positivo a cero en la estación 170, que señala la existencia de un cuerpo anómalo.



Geo-radar

El geo-radar es un método geofísico de alta resolución bien adaptado a la investigación a poca profundidad de las características geológicas, hidrogeológicas y geotécnicas del terreno. Sus resultados se presentan en secciones longitudinales continuas, lo que permite una interpretación semicuantitativa rápida en los análisis de campo.

Todo equipo de geo-radar consta de cuatro elementos principales: transmisor, receptor, unidad de con-

trol y sistema de registro. El transmisor irradia pulsos cortos de energía electromagnética de radio-frecuencia a través de una antena transmisora que penetran en el subsuelo. Cuando la onda encuentra heterogeneidades en las propiedades eléctricas de los materiales por los que atraviesa, parte de la energía se refleja, provocando una variación en la señal, y parte continúa transmitiéndose a profundidades mayores. Estas inhomogeneidades van asociadas a interfaces estrato/estrato, suelo/roca, zona saturada/no saturada, cambio de cementación, contenidos en agua, arcillas,

discontinuidades, fracturas, intrusiones, penachos contaminantes y objetos enterrados, como bidones, tuberías, etc.

La señal reflejada es detectada por el receptor, y en la unidad de control se amplifica, se transforma al espectro de audio-frecuencia, se procesa y finalmente se imprime. El resultado es un perfil vertical continuo (Fig. 10). Su presentación puede ser mejorada mediante la aplicación de filtros y amplificadores de la señal.

A altas frecuencias, la resolución del geo-radar es de pocos centímetros, y su penetración, escasa. Esto

FIGURA 9. Diferencias en las respuestas obtenidas en función de dos emisoras de radio utilizadas: Cutler (U.S.A.), que emite en dirección W-E, con una frecuencia de 24kHz, y Rugby (GB), que emite N-S, con una frecuencia de 16 kHz. Mayor frecuencia implica mayor poder de penetración.

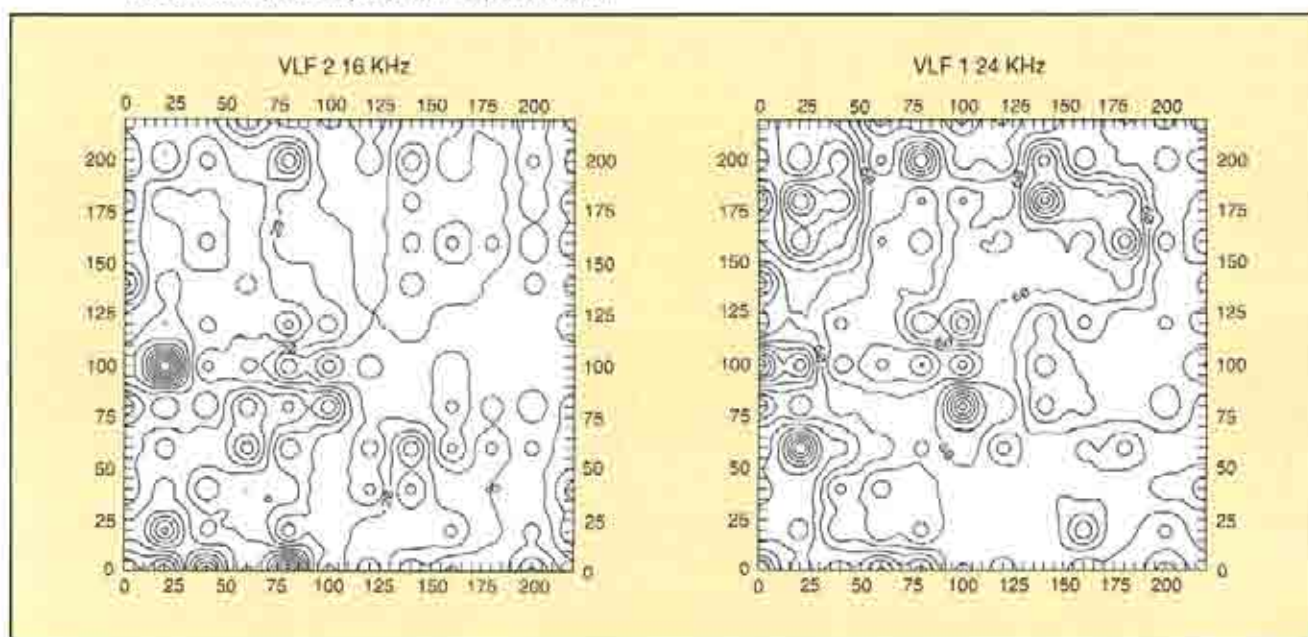
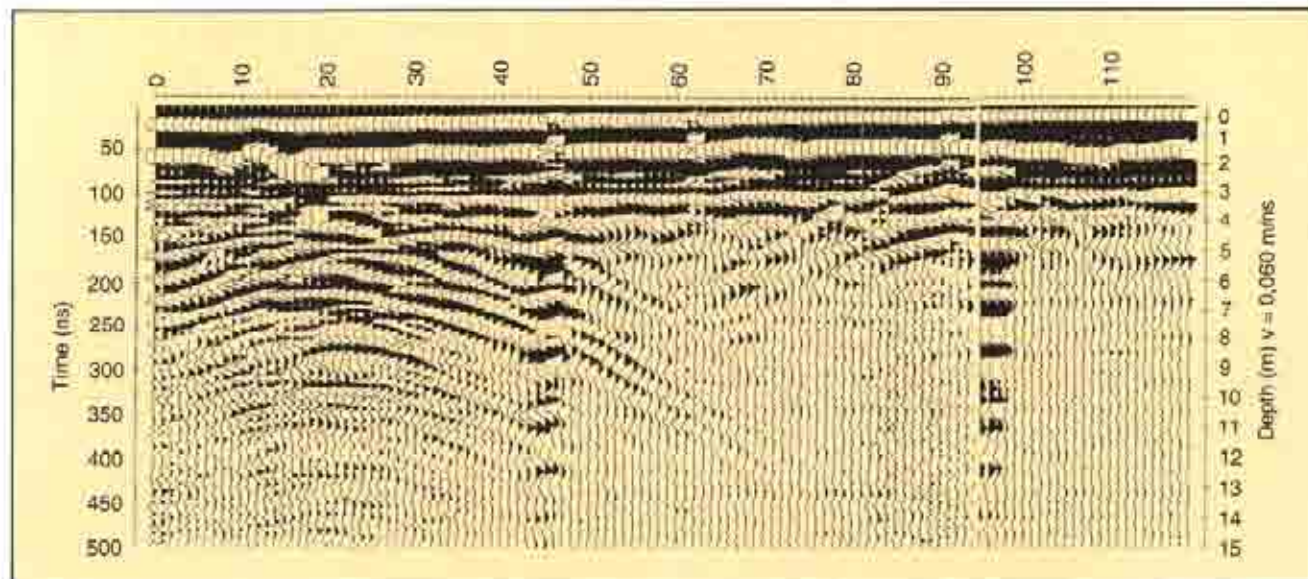


FIGURA 10. Perfil de radar de subsuelo donde se observan hipérbolas de difracción debidas a la existencia de objetos enterrados.



es debido a las pérdidas de señal que se producen en estas condiciones. Las antenas de bajas frecuencias, en cambio, son capaces de alcanzar grandes profundidades y operar en condiciones no muy buenas del suelo, pero su resolución pasa a ser menor, definiendo características de orden métrico. Las frecuencias más comúnmente utilizadas se encuentran entre 200 y 25 MHz, y las profundidades relativas a las que se llega se encuentran entre 3 y 35 m.

La profundidad de penetración depende también de la atenuación de la señal producida por pérdidas eléctricas y dispersión, que, a su vez, depende de las condiciones del lugar. Los factores que controlan la atenuación son la conductividad eléctrica y la frecuencia con la que se trabaja. Una conductividad alta implica una atenuación importante de la señal y limita la profundidad de alcance (Fig. 11). Generalmente se consigue mayor penetración en zonas rocosas y en áreas secas con elevado porcentaje en arena. Los resultados son pobres, en cambio, en zonas húmedas, arcillosas y, en general, en suelos conductores.

El tiempo que tarda el pulso electromagnético desde que sale del transmisor hasta que es captado por el receptor es proporcional a la profundidad del objeto en cuestión. Este tiempo, denominado tiempo doble,

depende de la media de las propiedades dieléctricas por las que viaja la onda. Su valor está en función de:

$$V_m = \frac{c}{\sqrt{\epsilon}} \quad D = \frac{cT}{2\sqrt{\epsilon}} = \frac{V_m T}{2}$$

donde:

V_m = Velocidad del pulso a través del material.

c = Velocidad de la luz.

ϵ = Constante dieléctrica relativa.

T = Tiempo doble en ns.

D = Profundidad.

Los requerimientos del proyecto y las condiciones del lugar serán las que dictarán qué antena debe usarse. El factor más importante es la profundidad a la que se quiere llegar.

La aplicación del geo-radar al estudio de los vertederos incontrolados incluye:

- Evaluación de las condiciones geológicas y naturales del suelo.
- Determinación de las dimensiones de la fosa.
- Localización y descripción de los residuos enterrados.
- Localización y descripción del penacho contaminante.

La interpretación de un perfil se sigue mediante:

- Falta de continuidad de los horizontes reflectados.

- Áreas de alta atenuación de la señal que marcan la existencia de un aumento de conductividad.

- Presencia de una amplitud parabólica alta o formas irregulares de los reflectores que denotan la existencia de objetos enterrados, como un bidón, una masa de roca, etc.

CONCLUSIONES

Los métodos geofísicos proporcionan una forma rápida de reconocimiento del subsuelo. Esta particularidad, junto a su característica de ser métodos no destructivos, los hace indispensables para la caracterización de vertederos incontrolados previa al saneamiento de la zona. Los actuales métodos geofísicos, mejorados en cuanto a comodidad de trabajo y tratamiento informatizado de los datos, pueden detectar los penachos contaminantes y la dirección del flujo tanto en zonas saturadas como no saturadas; otros obtienen una información detallada sobre las condiciones y características del subsuelo. Con la utilización de un único método se obtienen unos resultados aproximativos por las limitaciones que en sí representa. Sin embargo, la combinación de varios abarca todo el campo de estudio necesario para dicha caracterización. El resultado final será una visión global del área afectada.

FIGURA 11. Perfil de radar de subsuelo tomado sobre el límite de un vertedero. En el punto 175 se observa una pérdida de reflectores que indican la existencia de materiales conductivos. Se sabe que en este punto se encuentra el límite de la zona de relleno.

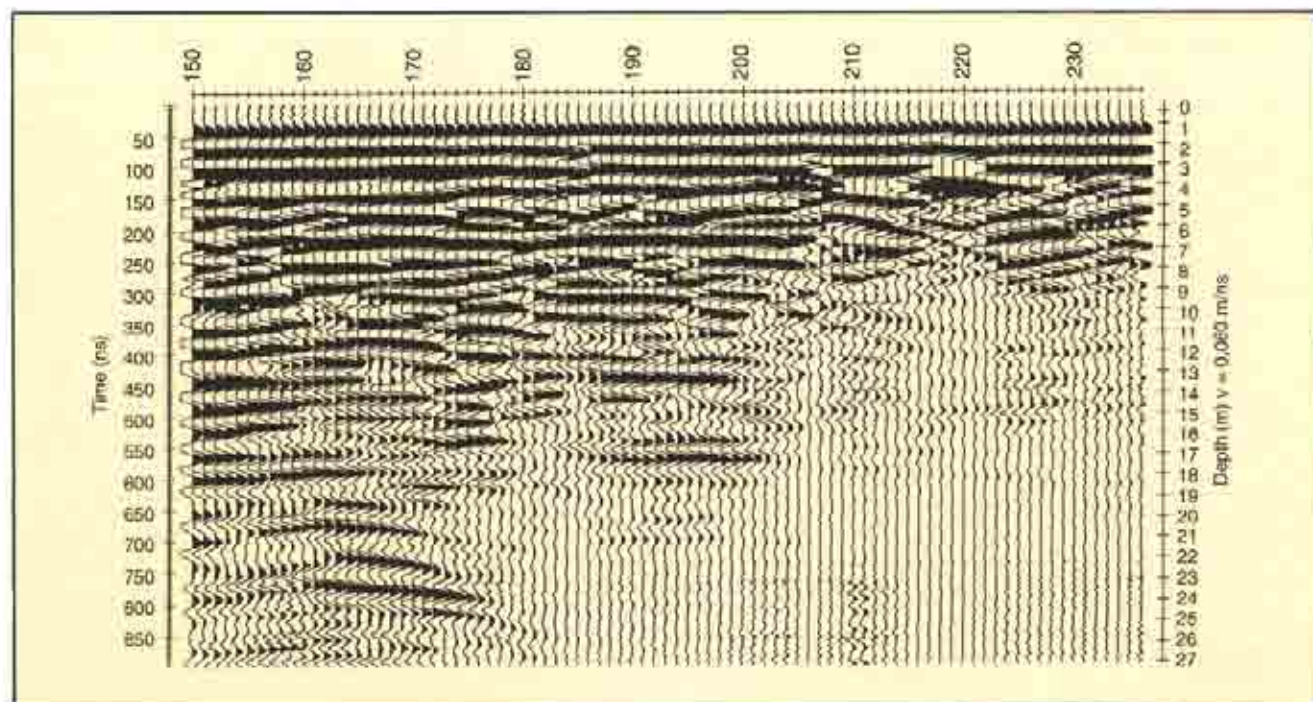


TABLA 1. Aplicaciones principales de cada método.

	Geo-Radar	EM	RE	MAG
Cartografiar características hidrogeológicas (nivel freático, potencia del acuífero...).	1. Método más efectivo.	2. Método alternativo.	1. Método más efectivo.	No se utiliza.
Cartografiar lixiviados conductivos y penachos contaminantes.	2. Método alternativo.	1. Puede controlar el movimiento del penacho mediante medidas hechas en diferentes tiempos.	2. Establece una aproximación de la cantidad de contaminante.	No se utiliza.
Localización y determinación de los límites y la profundidad de un vertedero.	1. Método más efectivo.	1. Método más efectivo.	2. Método alternativo.	Sólo si el relleno es de materiales metálicos.
Localización y semicuantificación de objetos metálicos enterrados.	Puede determinar cualquier tipo de objeto.	2. Método alternativo.	No se utiliza.	1. Método más efectivo.

TABLA 2. Características principales de cada método.

	Geo-Radar	EM	RE	MAG
Profundidad de alcance (m).	3-30. A mayor profundidad menor resolución.	1-60. Sólo hasta 15 m para datos continuos.	Hasta 200 m, si existe posibilidad de gran abertura de alas.	Depende de la masa enterrada. Un bidón hasta 6 m.
Susceptibilidad al ruido.	Líneas de alta tensión y objetos metálicos muy cercanos.	Líneas de alta tensión y objetos metálicos muy cercanos.	Mal contacto de electrodos con el suelo. Capas muy poco definidas.	Cualquier objeto metálico (verjas, coches, farolas..) y líneas de alta tensión.
Característica más destacada.	Método de mayor resolución.	Profundidades de alcance mayores con menor cobertura entre antena y transmisor.	Determinación de la resistividad en profundidad y lateralmente.	Detección de objetos metálicos.

En las tablas 1 y 2 se resumen las aplicaciones y características principales de cada uno de los métodos que se utilizan.

BIBLIOGRAFÍA

BARROWS, L., y ROCCHIO, J. E. (1990): «Magnetic Surveying for Buried Metallic Objects», *Journal of Geological Education*, v. 41, p. 129.

BENSON, A. K. (1992): «Integrating seismic, resistivity and ground penetrating radar data to delineate the water table and groundwater contamination», *Water-Rock Interaction*, pp.361-365.

GILKESON, R. H.; HEIGOLD, P. C., y LAYMON, D. E. (1986): «Practical Application of Theoretical Models to Magnetometer Surveys on Hazardous Waste Disposal Sites - A Case History», *Ground Water Monitoring Review*, winter, pp. 54-61.

GREENHOUSE, J. P., y MONIER-WILLIAMS, M. E. (1985): «Geophysical Monitoring of Ground Water Contamination Around Waste Disposal Sites», *Ground Water Monitoring Review*, fall, pp. 63-69.

GREENHOUSE, J. P.; MONIER-WILLIAMS, M.

La prospección electromagnética es aplicable tanto a la evaluación de las condiciones geohidrológicas naturales como para cartografiar penachos contaminantes.

E.; ELLERT, N., y SLAINE, D. D. (1987): «Geophysical Methods in Groundwater contamination Studies», *Exploration'87 Proceedings. Applications of Geophysics and Geochemistry*, pp. 666-677.

ISAMAT, F.; MIRALLES, J.; CANTO, J., y SALA, L. (1976): «Contaminación del acuífero del río Llobregat, a la altura de Sant Feliú, por vertido de residuos industriales en hoyos producidos por extracciones de áridos», *IV Asamblea Nacional de Geodesia y Geofísica*, 3: pp. 1.937-1.954.

LORD, A. E. Jr., y KOERNER, R. M. (1988): «Nondestructive Testing (NDT) Techniques to Detect Contained Subsurface Hazardous Waste», *Journal of Hazardous Materials*, 19: pp. 119-123.

ROGERS, R. B., y KEAN, W. F. (1980): «Monitoring Ground-Water Contamination at a Fly Ash Disposal Site Using Surface Electrical Resistivity Methods», *Ground Water*, 18(5): pp. 472-476.

SUBIRANA, J. M., y CASAS, A. (1985): «Etude préliminaire sur la pollution d'un aquifère alluvial près de Barcelona (Espagne)», *Hydrogéologie*, 1: pp. 81-91.

TYAGI, S.; LORD, A. E. Jr., y KOERNER, R. M. (1983): «Use of a proton precession magnetometer to detect buried drums in sandy soil», *Journal of Hazardous Materials*, 8: pp. 11-23.