

Geofísica ambiental: técnicas no destructivas para el reconocimiento de zonas contaminadas por vertidos

E. BUSQUET, A. CASAS, V. PINTO, L. RIVERO Y J.B. SABADÍA

Departamento de Geoquímica, Petrología y Prospección Geológica.

Facultad de Geología, Universidad de Barcelona

RESUMEN

Los países industrializados afrontan ahora las consecuencias de varias décadas de gestión inadecuada de sus residuos tóxicos y peligrosos. En las últimas décadas el volumen de residuos generados ha aumentado en progresión geométrica provocando un riesgo toxicológico para el hombre a través de su interacción con el medio físico. El vertido incontrolado de todo tipo de residuos ha sido una práctica creciente en muchas localidades. Importantes volúmenes de residuos industriales y de otros tipos (urbanos, agrícolas, etc.) han sido enterrados en vertederos, muchos de los cuales carecen de las barreras geológicas naturales o artificiales, y los fluidos tóxicos que se producen por lixiviación pueden migrar hacia el exterior y contaminar las aguas subterráneas. El problema se agrava cuando una vez colmatado el vertedero se cubre de tierra y se pierde la información relativa a las prácticas de vertido practicadas en el pasado.

Uno de los principales objetivos en cualquier misión de control y saneamiento de vertederos es delimitar la extensión lateral del vertedero y su relación con el medio geológico en que está ubicado. La información derivada de los sondeos de reconocimiento y las catas mecánicas es muy útil, pero excesivamente puntual y su carácter destructivo puede facilitar la extensión del lixiviado existente en el fondo del vertedero. En este sentido, tanto la perforación como la excavación pueden ser peligrosos para los operadores y el medio ambiente, además de caras y laboriosas.

Muchos de estos problemas pueden solucionarse gracias al concurso de los métodos de prospección geofísica que permiten obtener una visión general del vertedero, determinar en que sectores existe migración de contaminantes y seleccionar el emplazamiento óptimo de los sondeos de reconocimiento y de los piezómetros de control.

En definitiva, los principales objetivos que se plantean en la caracterización ambiental de los vertederos comprende los siguientes puntos:

- Determinar la existencia, posición, distribución, profundidad y composición de posibles residuos enterrados.
- Determinar la presencia y extensión de focos potencialmente contaminantes y penachos de lixiviados, tanto en la zona saturada como en la no saturada.
- Caracterizar el régimen hidrogeológico local (y regional), las áreas de recarga y las vías permeables localizadas.

Palabras clave: Vertedero, penacho contaminante, prospección geofísica, impacto ambiental, aguas subterráneas, contaminación.

ABSTRACT

Industrial countries face the consequences of decades of inappropriate handling of hazardous waste. The dumping of all types of hazardous materials has been ongoing in most industrialised countries for hundreds of years. Large quantities of industrial and other waste material have been buried in landfill sites. A relatively large number of these lack reliable man-made or natural geological barriers and toxic fluids are scaping and polluting the groundwater. The problem is greatly aggravated when a soil covering is placed over the waste and there is no information about the dumping practices used in the past.

One of the first tasks in any remedial action is to delineate the physical extent of the sites and its encroachment into the surrounding area. Test borings and limited excavations are very valuable but the information obtained is not continuous and their destructive nature makes it possible that waste could inadvertently be released during the probing phase. In this regard, both borehole drilling and excavation are very dangerous to workers and the environment and expensive and tedious to conduct.

Many of these problems may be alleviated by using a geophysical assisted system approach to determine where the pollutants will go in the subsurface, gain more complete understanding of site conditions and assess the optimal placement of exploration drills and monitoring wells.

At hazardous waste sites, the main objectives must commonly include:

- Determine the presence, location, distribution, depth and composition of possible buried wastes.
- Determine the presence and extent of contaminant and leachate plumes within the unsaturated and saturated zones.
- Characterise and assess the local (and regional) geohydrologic regime for groundwater flow patterns, recharge areas and localised permeable pathways.

Keywords: Landfill, leachate plume, geophysical survey, environmental hazards, groundwater pollution.

INTRODUCCIÓN

Durante muchos años y debido a la inexistencia de una política de gestión de los residuos, han proliferado alrededor de las áreas industriales de nuestro país vertederos clandestinos o tolerados, pero mal acondicionados. Estos vertederos normalmente se emplazaban en zonas deprimidas del terreno, como canteras abandonadas, hondonadas e incluso sencillamente en el fondo de un barranco.

La acumulación de residuos en vertederos incontrolados y mal acondicionados puede producir un impacto negativo muy importante, y a veces incluso irreversible, en la calidad de los suelos y aguas subterráneas. La contaminación se produce normalmente a causa de la incorporación en las aguas subterráneas de un lixiviado que lleva en disolución una serie de sustancias químicas. Esta carga contaminante puede haberse producido tanto a causa de la percolación a través del vertedero del agua de lluvia, como por un ascenso temporal del nivel piezométrico, hasta llegar a ponerse en contacto con el vertedero. Bajo estas circunstancias, es muy importante realizar un reconocimiento tanto de la geometría (extensión lateral y profundidad) del vertedero como del material contenido, para determinar el grado de peligrosidad que su existencia comporta y evaluar un plan para posteriores acciones de saneamiento.

Las características de un vertedero dependen, principalmente del tipo de residuos que contiene, cantidad y forma de acumulación de estos residuos y materiales y estructuras geológicas donde se encuentran ubicados. Todo ello determina el grado de peligrosidad que presenta, por el alcance y tipo de contaminación que pueda ocasionar.

Aprovechando los contrastes de las distintas propiedades físicas de los materiales, la caracterización de un vertedero puede llevarse a cabo mediante la utilización de distintos métodos geofísicos. La ventaja de su aplicación radica en las propiedades de trabajo y obtención de resultados que presenta dicha metodología. Entre éstas, destacan su carácter no destructivo, la obtención de una visión global del área estudiada y una aplicación que resulta más rápida y económica que el resto de las tecnologías disponibles. Esto no quiere decir que la prospección geofísica sea suficiente para determinar la problemática ambiental de un vertedero, pero si necesaria para obtener una primera evaluación y planificar de forma más segura y eficaz las siguientes fases de estudio y saneamiento.

Las principales aplicaciones de la prospección geofísica en estudios ambientales relacionados con la exploración vertederos que se abordan en este trabajo son las siguientes:

- A) Determinación de los límites del vertedero.
- B) Localización de bidones y depósitos de almacenamiento.
- D) Detección de penachos contaminantes.

Determinación de los límites del vertedero

Localizar los límites de un vertedero resulta una tarea imprescindible para conocer el área de actuación y poder evaluar el volumen de residuos que contiene. Esta localización puede a veces realizarse directamente sobre el terreno mediante técnicas de cartografía, o en el caso de que la zona haya sido posteriormente cubierta de tierras puede recurrirse al reconocimiento de fotografías aéreas seriadas, en el caso de que sean disponibles a la escala de trabajo adecuada.

Sin embargo, normalmente es necesario disponer de información más detallada, no sólo en relación a los límites del vertedero, sino también de la profundidad que alcanzan los materiales de relleno, para poder disponer de un modelo tridimensional del vertedero y calcular el volumen de residuos contenidos.

Este reconocimiento puede llevarse a cabo utilizando los métodos clásicos de exploración mecánica como son los sondeos y las catas. Sin embargo, los principales inconvenientes del uso de estas técnicas en vertederos son, por un lado que ofrecen una información puntual y, por otro, que su aplicación en zonas de acumulación de gases y productos tóxicos puede resultar peligrosa.

Debido a que las propiedades físicas de los materiales de relleno de un vertedero son, en general, sensiblemente diferentes de las de las formaciones geológicas en que están ubicados, la delimitación de un vertedero puede teóricamente abordarse utilizando cualquier método geofísico. No obstante, algunos métodos eléctricos y electromagnéticos están mejor adaptados para este cometido.

Los primeros ejemplos de aplicación de la prospección geofísica en el estudio de vertederos utilizaban como método principal los sondeos eléctricos verticales (Cartwright y McComas, 1969). Los SEV's pueden en algunos casos discriminar la existencia o no de áreas afectadas por rellenos, sobre todo en aquellas zonas donde los vertederos están ubicados en antiguas graveras de explotación de áridos. La figura 1 presenta los resultados obtenidos mediante sondeos eléctricos verticales en un sector del valle inferior del Río Llobregat donde se habían efectuado vertidos incontrolados en las depresiones generadas por antiguas graveras (Busquet et al., 1995). El SEV nº 10 muestra claramente una curva que por su morfología corresponde a un corte geoelectrónico de tres capas en el cual la

resistividad de la capa intermedia es mayor que la de las capas que la limitan. Esta capa de alta resistividad, correspondiente a los niveles de arenas y gravas aluviales, desaparece en el SEV nº1 donde los áridos fueron excavados y substituidos por tierras de composición arcillosa y conductividad eléctrica más baja. Finalmente, en el SEV nº 4 se hace patente, no solo la falta de las arenas y gravas de alta resistividad, sino que la resistividad de los materiales de relleno es mucho menor, lo que permite interpretarlos como residuos, probablemente urbanos, que han producido un lixiviado de elevada concentración en la base del vertedero. Mediante este simple criterio han podido determinarse las zonas afectadas y valorar la potencial carga contaminante de los residuos contenidos. Hay que tener en cuenta, sin embargo, que el SEV es un método de prospección cuya finalidad es la detección de límites horizontales y que su interpretación cuantitativa se basa en el supuesto que las capas del modelo son planas y de extensión lateral infinita. Por consiguiente, para la localización precisa de los límites laterales del vertedero habrá que recurrir a otras técnicas de prospección, como por ejemplo, las calicatas eléctricas o los perfiles de geo-radar.

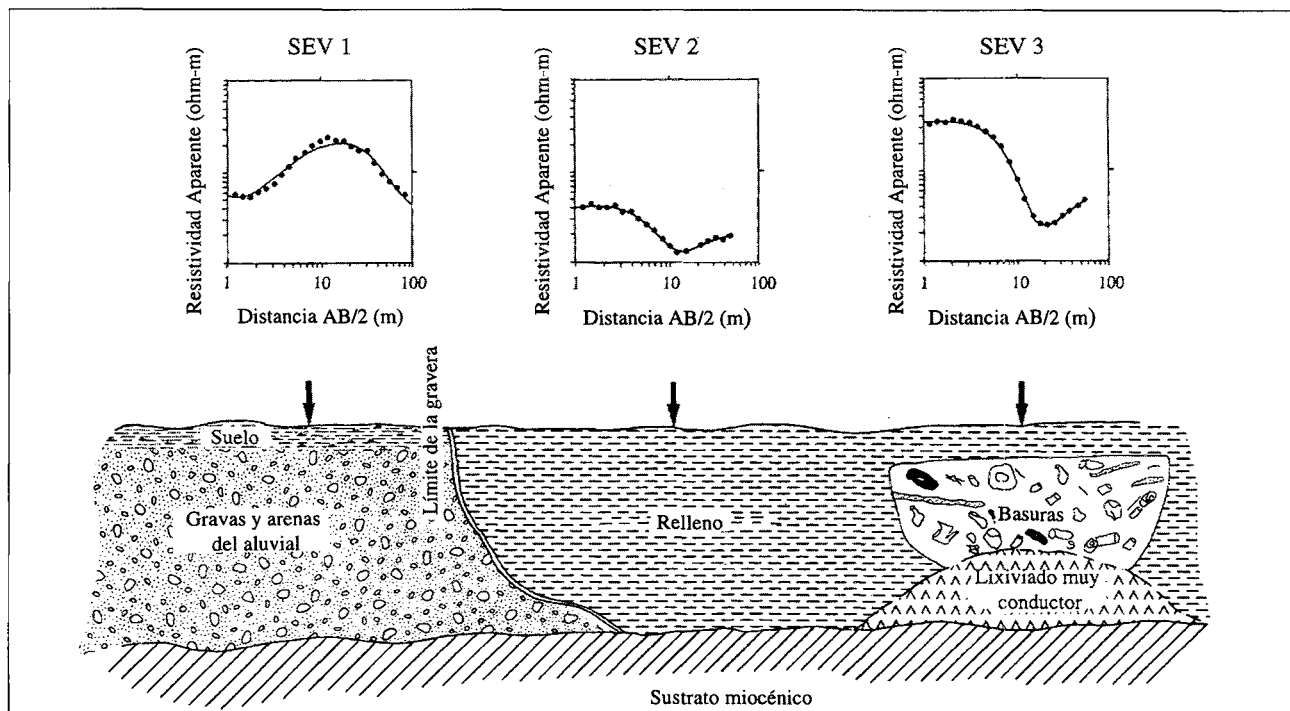


Figura 1.- Corte geoelectrónico esquemático obtenido a partir de sondeos eléctricos verticales realizados en una zona aluvial del Río Llobregat afectada por vertidos. Es de destacar la variación de la respuesta cuando las gravas han sido substituidas por rellenos de tierra y la todavía menor resistividad de las zonas conteniendo residuos que han producido lixiviados.

Figure 1.- Schematic geoelectric cross-section derived from characteristic resistivity soundings at a dumping are. Note the low resistivity values of the filled area which becomes even lower where pollutants are present

Recientemente, el desarrollo de un nuevo método geofísico de prospección denominado radar de subsuelo o geo-radar, ha permitido obtener información con muy alta resolución de las estructuras geológicas y de los objetos enterrados a profundidades limitadas. Su funcionamiento se basa en la transmisión de ondas electromagnéticas de alta frecuencia, que al encontrar cambios en las propiedades dieléctricas del subsuelo, parte de la energía se refleja y provoca una variación en la señal que es registrada. Si el contraste entre los materiales que forman el relleno y los materiales que lo contienen es suficientemente elevado, los límites quedan perfectamente definidos. Varios estudios han mostrado la utilidad del geo-radar en la determinación de los límites de vertederos, sobre todo en combinación con sondeos y calicatas eléctricas (Lanz et al., 1995 y Busquet et al., 1995).

En aquellas situaciones en las que el vertedero está ubicado sobre rocas consolidadas de densidad elevada, la prospección gravimétrica puede proporcionar información sobre los límites del vertedero. Roberts et al. (1990) obtuvieron anomalías residuales de hasta -0.20 mGal en el estudio gravimétrico efectuado sobre un vertedero, y utilizando un contraste de densidad de -0.53 g/cm³ entre los materiales de relleno calcularon por inversión numérica un modelo tridimensional de la geometría del vertedero.

Localización de bidones y depósitos de almacenamiento

Los bidones y depósitos para el almacenamiento de fluidos son habituales principalmente en vertederos incontrolados de residuos industriales. En la mayoría de los casos, los bidones están constituidos por materiales férricos, aunque en ocasiones, su composición y forma puede variar. La existencia de elementos metálicos enterrados susceptibles de polarizarse magnéticamente por el campo magnético terrestre puede determinarse a causa de las anomalías magnéticas que producen localmente en la intensidad del campo magnético terrestre. La forma e intensidad de la anomalía depende del tamaño y profundidad del cuerpo, de la susceptibilidad magnética del material que lo constituye, de las propiedades (intensidad e inclinación) del campo magnético ambiente y también de la proporción entre la magnetización inducida y la remanente en la imantación del cuerpo.

La prospección magnética se lleva cabo midiendo con la ayuda de un magnetómetro, generalmente de protones o de vapor de cesio, los valores de la intensidad del campo magnético terrestre a lo largo de perfiles o en forma de malla, tan extensa como la zona a explorar. En al-

gunas situaciones la detección de cuerpos superficiales puede incrementarse a partir de la determinación del gradiente vertical, ya sea midiendo el valor de la intensidad de campo magnético a dos alturas diferentes en cada punto, o bien utilizando instrumentos denominados gradiómetros que obtienen directamente el gradiente gracias a disponer de dos sensores situados a dos niveles distintos. La unidad más común para medir las anomalías magnéticas es el nanoTesla, también denominado vulgarmente gamma, que es un submúltiplo del Tesla, a su vez equivalente al Weber m-2.

El espaciado entre los sucesivos puntos de medida a aplicar en estudios ambientales depende del tamaño y profundidad del cuerpo que quiera localizarse, aunque normalmente oscila entre 0,5 y 2 metros. La elevada sensibilidad (0,1 a 1 nT), rapidez (10 medidas por minuto) y facilidad de manejo hacen que la prospección magnética sea un método muy eficaz en este cometido.

La interpretación de las anomalías magnéticas de un vertedero puede abordarse desde diferentes aspectos que genéricamente podríamos denominar cualitativo, semicuantitativo y cuantitativo. La interpretación cualitativa se limita simplemente a determinar la posición y extensión afectada por la acumulación de bidones enterrados, mientras que la semicuantitativa trata de obtener información a cerca de la profundidad y número de bidones en base a determinadas relaciones empíricas relacionadas con la intensidad y agudeza de la anomalía. Sin embargo, actualmente es muy sencillo plantearse una interpretación cuantitativa más rigurosa a partir de la comparación de las anomalías experimentales con las teóricas generadas por modelos simples. La anomalía magnética originada por uno y varios bidones ha sido estudiada por varios autores, como por ejemplo, Tyagi (1983), Gilkeson (1986), Barrows y Rocchio (1990) y Kennet (1993), determinando que el valor de la intensidad de la anomalía producida por un bidón enterrado a 2 m, es del orden de los 200 nT.

La figura 2 muestra la anomalía magnética detectada sobre un antiguo vertedero ubicado en el aluvial del Rio Besós en el término municipal de La Lagosta (Barcelona) con su característica bipolaridad y una intensidad máxima próxima a los 600 nT. A partir del análisis de dos parámetros básicos, la intensidad y el gradiente horizontal de la anomalía, puede deducirse que la masa férrica responsable corresponde a un total de entre 25 y 30 bidones, situados a una profundidad máxima de 5 metros.

Otro método geofísico adecuado para la detección de objetos metálicos es el radar de subsuelo o geo-radar. La

efectividad y resolución del geo-radar en estudios ambientales para determinar la posición y profundidad de estructuras enterradas ha sido probada en numerosas ocasiones, tanto en la existencia de depósitos de almacenamiento (Heald, 1995), bidones y otros objetos (Hogan, 1988). El geo-radar puede proporcionar información sobre la localización exacta (posición y profundidad) del objeto detectado. Esta técnica, presenta como ventaja,

además de su mayor poder de resolución y la posibilidad de detectar bidones constituidos por materiales distintos del hierro y, por tanto, no magnéticos. Sin embargo, considerando su mayor coste y menor cobertura espacial, ya que proporciona perfiles o cortes verticales, debe aplicarse generalmente como técnica complementaria de la prospección magnética para suministrar información más detallada en las zonas donde sea necesaria.

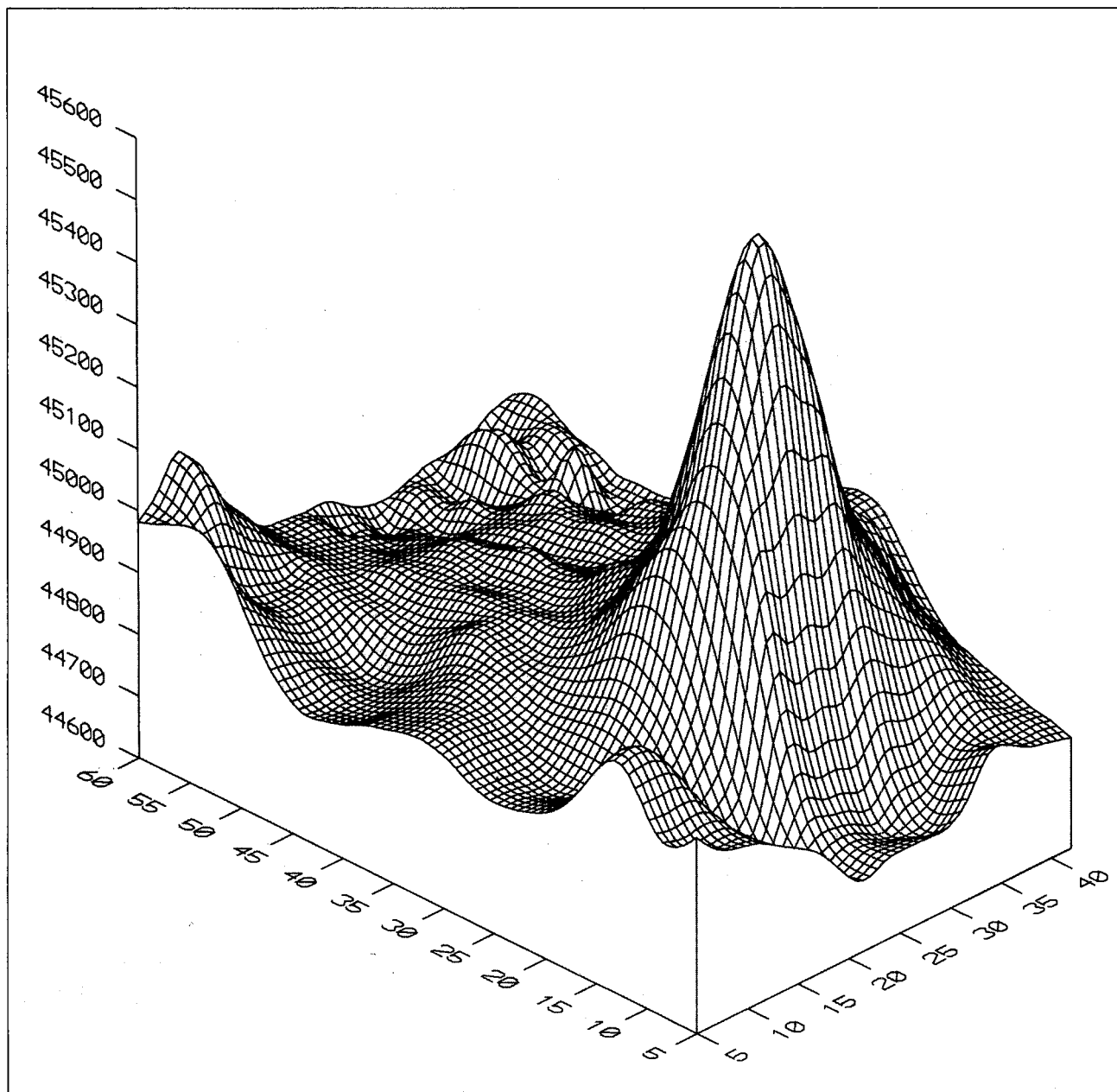


Figura 2.- Anomalia magnética producida por bidones enterrados en un vertedero situado en el aluvial de Rio Besós.

Figure 2.- Magnetic anomaly produced by several drums buried in a disposal site placed over the alluvial plain of the Besós River.

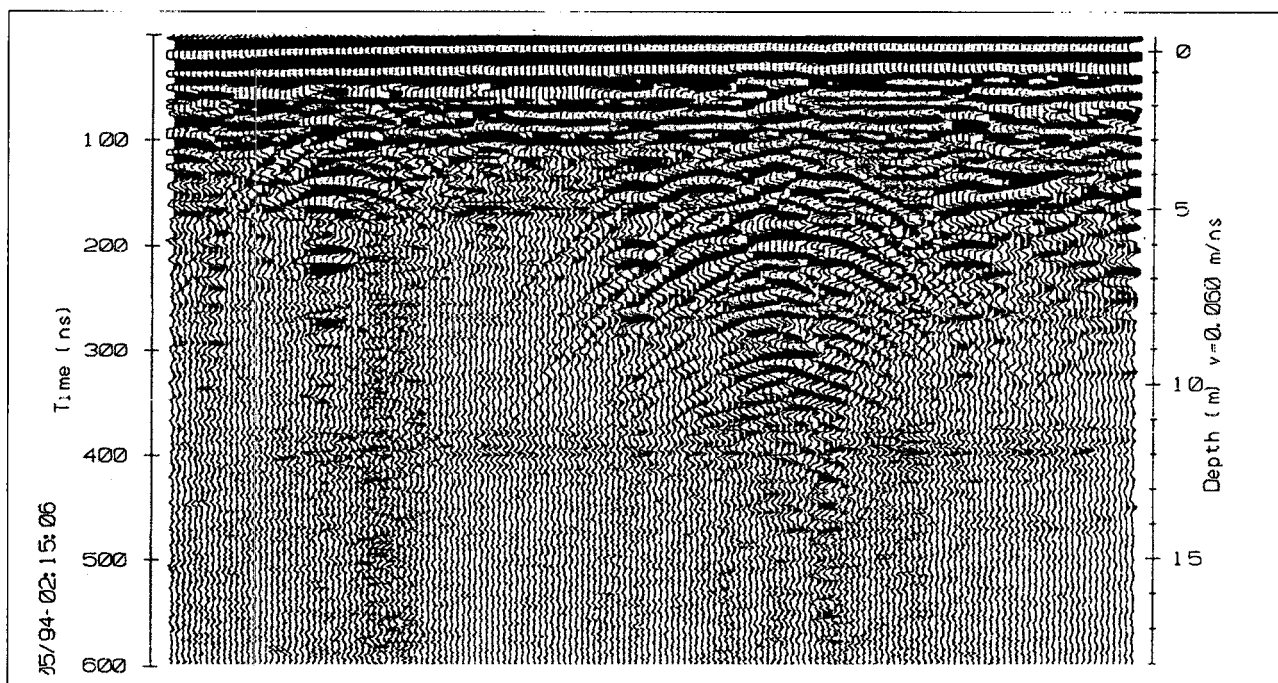


Figura 3.- Radargrama obtenido sobre un antiguo vertedero en el que destacan la presencia de numerosas anomalías en forma de hipérbolas de difracción interpretadas como producidas con bidones enterrados. Este sector se caracteriza además por la presencia de anomalías magnéticas.

Figure 3.- Radar section over a dumping are showing many hyperbolic shaped reflections that are interpreted as buried drums. The area is also characterized by high magnetic anomalies.

La Fig. 3 corresponde a un perfil de radar registrado sobre el antiguo vertedero de Can Miano en Sant Feliu de Llobregat (Barcelona), donde ahora se ha construido un polígono industrial. El perfil muestra claramente la existencia de un conjunto de hipérbolas de difracción cada una de las cuales corresponde al menos a un bidón enterrado. Esta hipótesis está apoyada por la existencia de intensas anomalías magnéticas en esta zona.

La interpretación de los perfiles de radar y la correlación causa - efecto puede reforzarse con la generación de radargramas sintéticos de forma análoga a los sismogramas sintéticos de uso común en sismica de reflexión. En la figura 4 se muestra un radargrama sintético, es decir el radargrama teórico, de un modelo constituido por siete cilindros horizontales que simulan siete bidones metálicos enterrados a distintas profundidades en un material homogéneo. La respuesta teórica presenta la típica forma de una hipérbola de difracción con su ápice situado en el extremo superior del objeto. La oblicuidad de las ramas de las hipérbolas depende de la velocidad de transmisión de la onda de radar a través del medio, lo que permite a su vez determinar la profundidad a la que se encuentra cada uno de los bidones.

Detección de penachos contaminantes

Los materiales geológicos que constituyen el subsuelo se caracterizan por presentar unos valores de resistividad eléctrica que son función de la composición litológica de las partículas minerales, de la porosidad, del contenido en agua y de la concentración en sales disueltas del agua. Los minerales petrográficos que constituyen las rocas son dieléctricos, es decir tienen unos valores de la resistividad eléctrica muy elevados. En estas condiciones la resistividad eléctrica aparente de la roca se relaciona directamente con la resistividad eléctrica del fluido contenido en sus poros a través de la ecuación Archie mediante el denominado factor de formación, de la siguiente forma:

$$\rho_a = F \rho_w$$

donde,

- ρ_a es la resistividad aparente global del terreno
- ρ_w es la resistividad aparente del fluido contenido en los poros
- F es el factor de formación

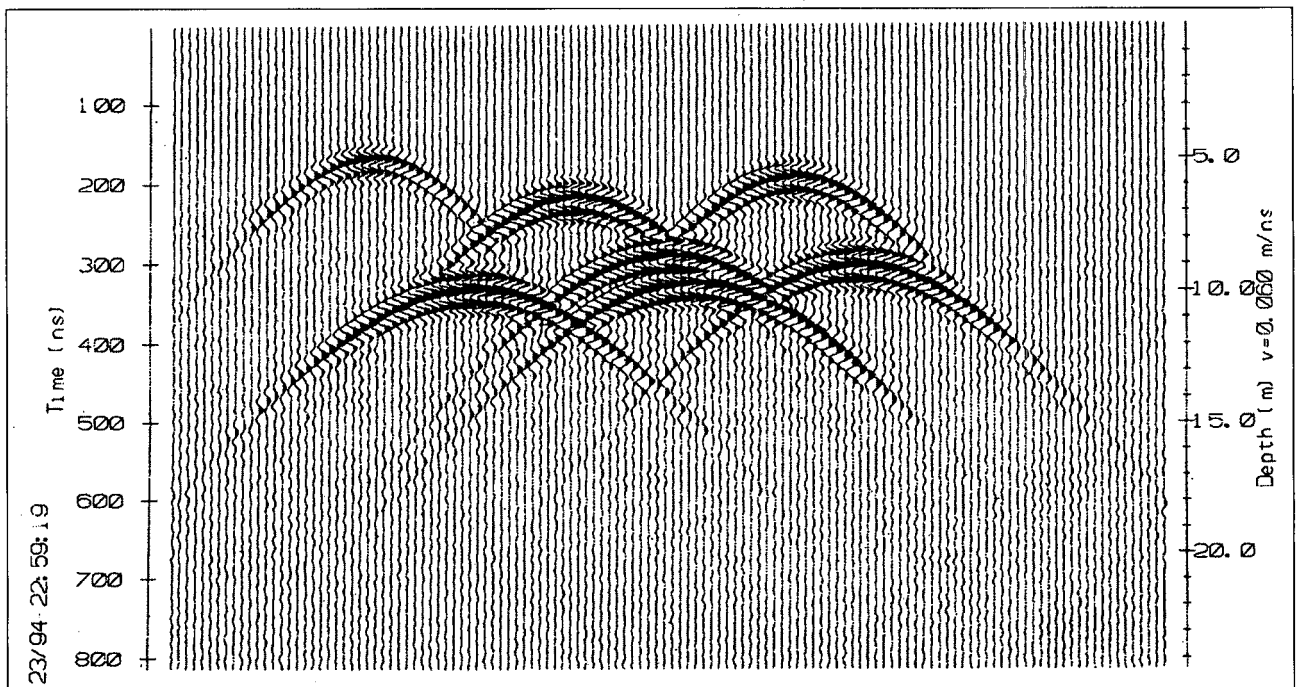


Figura 4.- Radargrama sintético generado a partir de un modelo que pretende simular la respuesta de siete bidones enterrados en un vertedero de residuos tóxicos. La posición y profundidad de cada bidón queda perfectamente localizada por el vértice superior de las hipérbolas.

Figure 4.- Synthetic radargram generated from a model that simulates seven drums buried in an hazardous waste disposal site. The position and depth of the dumps is well identified by the upper apex of each hyperbola.

El factor de formación de una roca depende a su vez de

$$F = a \phi^{-m} s^{-2}$$

donde,

ϕ es la porosidad

s es el grado de saturación de los poros

a y m son constantes empíricas que dependen de la textura de la roca

Considerando que la contaminación inorgánica produce un incremento en los iones disueltos en el agua que disminuyen el valor de la resistividad del conjunto, la existencia de un penacho contaminante es fácilmente detectable, ya que un aumento de 25 miligramos por litro en la concentración total de sólidos disueltos en el agua subterránea da lugar aproximadamente a un aumento de la conductividad eléctrica aparente de 1 miliSiemen/metro.

Los métodos electromagnéticos inductivos son muy eficaces para la cartografiar las variaciones laterales de la resistividad eléctrica del subsuelo a profundidad

prácticamente constante. Esta información podría igualmente obtenerse mediante calicatas eléctricas, a causa de su mayor rapidez y eficacia es recomendable, siempre que las condiciones del entorno lo permitan, la aplicación de los métodos electromagnéticos. Entre estos últimos destacan la modalidad VLF (Very Low Frequency) y los dispositivos de bobinas móviles tipo Slingram. El método VLF destaca por su sencillez y por el hecho de que sólo se requiere un operador de campo, en cambio presenta como principales desventajas que la profundidad de investigación depende de la resistividad del medio, y no puede modificarse, y tampoco se controla las características de la fuente del campo electromagnético primario, ya que proviene de emisoras de radio que emiten con otras finalidades diferentes que la exploración del subsuelo.

La medida de la conductividad eléctrica del terreno mediante dispositivos electromagnéticos de bobinas móviles, es quizás unas de las técnicas geofísicas más versátiles y mejor adaptadas a las necesidades de los estudios de zonas contaminadas (Greenhouse y Slaine, 1983).

El campo EM secundario en un equipo constituido por dos bobinas móviles (emisora y receptora) es gene-

ralmente una función compleja del espaciado entre bobinas s , la frecuencia y la conductividad del terreno s . Sin embargo, cuando el número de inducción, producto entre s y la profundidad de skin (profundidad a la que la amplitud de la onda electromagnética ha disminuido un tercio) es muy inferior a 1, la conductividad aparente puede obtenerse directamente a partir de la siguiente expresión:

$$\sigma_a = \frac{4}{\pi f \mu_0 s^2} \frac{(H_s)}{(H_p)}$$

donde,

σ_a es la conductividad aparente del terreno

μ_0 es la permeabilidad magnética del vacío

f es la frecuencia del emisor

s es la distancia entre bobinas

H_s es la amplitud del campo EM primario

H_p es la amplitud del campo EM secundario

La profundidad de investigación depende entonces únicamente de s y es independiente de la conductividad del terreno.

La Fig. 5 muestra como ejemplo un penacho contaminante detectado en el margen derecho de la llanura aluvial de Río Llobregat (término de Pallejà, Barcelona) en el lugar donde había existido un vertedero incontrolado en una antigua gravera. Actualmente, una vez colmatada la excavación y cubierta de tierra no muestra ningún indicio superficial de la potencial carga contaminante que encierra. La medida de la conductividad aparente del terreno utilizando un conductímetro electromagnético Geonics EM34-3XL en perfiles paralelos y con diferentes profundidades de investigación en función de la orientación y separación entre las bobinas, permite obtener prácticamente un modelo tridimensional. A pesar de que el instrumento proporciona las lecturas directamente en conductividades expresadas en miliSiemens/metro,

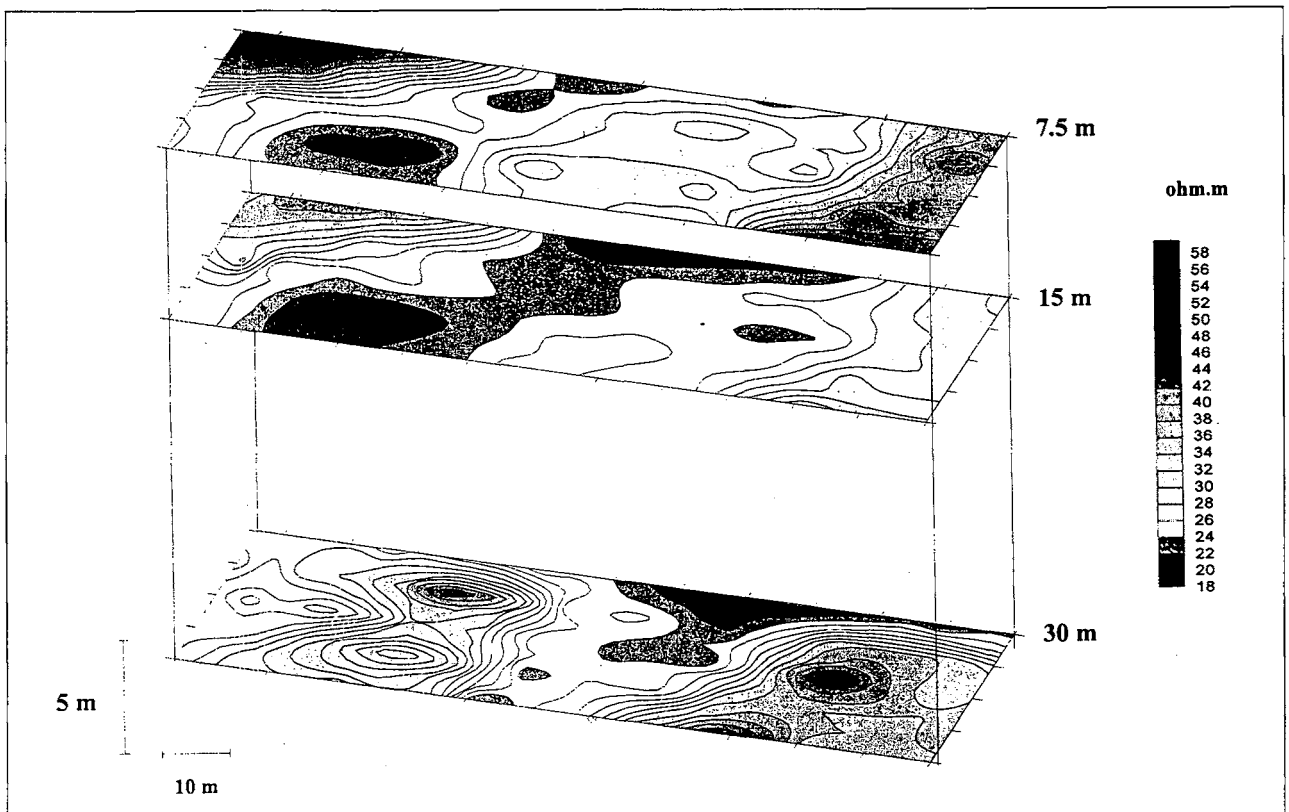


Figura 5.- Distribución tridimensional de la resistividad eléctrica del subsuelo en un sector del aluvial del Río Llobregat donde se habían efectuado vertidos incontrolados en una antigua gravera. La localización de un penacho de contaminación y su movimiento tanto en la zona saturada como en la no saturada quedan perfectamente definidos por los mínimos de resistividad.

Figura 5.- 3-D view of resistivity values over an old dump site at the alluvial plain of the Llobregat River. The origin and migration of the leachate plume is well recognized both in the non-saturated and saturated zones by their lower resistivity values.

para una mejor comprensión se han convertido a resistividades en ohmios.metro que son más habitualmente utilizadas. Las variaciones de la resistividad eléctrica aparente del terreno muestran la existencia de isolíneas concéntricas que se cierran en torno a un mínimo de resistividad inferior a 18 W m, que se interpretan que están producidas por un aumento de la concentración del agua por efecto de la lixiviación de un foco contaminante contenido en el antiguo vertedero. Entre 7,5 y 15 metros de profundidad el penacho contaminante presenta una disposición en forma de cilindro vertical que implica que la migración se produce preferentemente por acción de la gravedad en la zona no saturada. Por debajo de este nivel, una vez alcanzado el nivel piezométrico, la migración y dispersión hidrodinámica del lixiviado sigue la dirección del flujo del agua subterránea.

Si el penacho contaminante está formado por compuestos orgánicos, la resistividad aparente del terreno en vez de disminuir aumentará ligeramente, pero puede pasar inadvertido a la exploración eléctrica si las concentraciones no son elevadas. En estos casos su detección puede llevarse a cabo utilizando el método geo-radar que, en algunas ocasiones, puede combinarse con medidas de la polarización inducida (Olhoeff, 1986) o con sondeos eléctricos verticales para ampliar la información y realizar una interpretación más precisa (Benson, 1992).

CONCLUSIONES

El estudio de caracterización de un vertedero puede llevarse a cabo utilizando diversas técnicas, entre las que hay que considerar principalmente métodos de exploración directa, como son los sondeos y las cata mecánicas. Sin embargo, como los resultados que proporcionan dan generalmente información puntual y de elevado coste, se ha creado la necesidad de buscar nuevos sistemas de reconocimiento. Los métodos geofísicos, por las características que presentan, se adaptan muy bien para aportar una visión general preliminar y complementar las información obtenida por las otras técnicas de estudio. Se trata de métodos no destructivos, rápidos y más económicos comparados con los anteriores. Las propiedades de cada método y las condiciones del entorno determinan su utilidad. Así, se ha podido observar que el geo-radar presenta varias aplicaciones como son la detección de objetos enterrados y la determinación de los límites del vertedero de forma precisa. Por otro lado, mediante la prospección magnética pueden determinarse aquellos cuerpos construidos con materiales férricos, particularidad importante puesto que algunos bidones (contenedo-

res de residuos líquidos industriales) lo son. Finalmente, a partir de la cartografía de las variaciones laterales de la resistividad del subsuelo mediante técnicas electromagnéticas pueden identificarse penachos contaminantes, si existe suficiente contraste de resistividades entre el lixiviado y los materiales del entorno.

La caracterización de los materiales contenidos en un vertedero y el reconocimiento de su geometría son imprescindibles para su gestión posterior y la planificación de las actuaciones a llevar a cabo para su saneamiento. Los resultados disponibles permiten evaluar el tipo y coste de las actuaciones que deben llevarse a cabo para el saneamiento del área afectada.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se ha realizado en el marco del proyecto de investigación "Caracterización de la contaminación de acuíferos por vertidos industriales: Detección, evaluación del impacto y estrategias de saneamiento", referencia AMB93-1214 financiado por el Plan Nacional de Investigación Científica y Desarrollo Tecnológico de la CICYT.

REFERENCIAS

- BARROWS, L. y ROCCHIO, J.E. (1990). Magnetic Surveying for Buried Metallic Objects. *Journal of Geological Education*, vol. 41, p.129.
- BENSON, A.K. (1992). *Integrating ground penetrating radar and electrical resistivity data to delineate groundwater contamination*. Geological Survey of Finland, Special Paper 16. 197-203 pp.
- BUSQUET, E., CASAS, A., PINTO, V. y RIVERO L. (1995). Integrated Geophysical Methods for sensing buried wastes in abandoned gravel pits near Barcelona (Spain). *Proceedings of the 1st Meeting of Environmental and Engineering Geophysics*, Torino.
- CARTWRIGHT, K. Y McCOMAS, M.R. (1968) Geophysical surveys in the vicinity of sanitary landfills in Northeastern Oregon. *Ground Water*, 6(5): 23-30.
- GILKESON, R.H. y LAYMON, D.E. (1986). Magnetic Anomaly of a Single Steel Drum - Field Profiles and Theoretical Models. From EOS, Transactions, *American Geophysical Union*. Vol. 67, p. 266.
- GREENHOUSE, J.P. y SLAINE, D.D., (1983). The use of reconnaissance electromagnetic methods to map contaminant migration. *Ground Water Monitoring Review*. Vol. 3, Nº 2, 47-49 pp.
- HEALD, S.R. (1995). Detect Buried Storage Tanks in Real Time. Digital technology updates underground scanning systems. *International Ground Water Technology*. July. 9-12 pp.
- HOGAN, G. (1988). *Migration of ground penetrating radar data: a technique for locating subsurface targets*. Proceedings of the Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems. Golden, Colorado. 810-822 pp.
- LANZ, E., JEMMI, L., MÜLLER, R., GREEN, A., PUGIN, A. y HUGENBERGER, P. (1994). *Integrated studies of Swiss waste disposal sites: results from georadar and other geophysical surveys*. Proceedings of the Fifth International Conference on Ground penetrating radar. Ontario (Canada), 3: 1261-1274.
- ROBERTS, R.L., HINZE, W.J. y LEAP, D.I. (1990) Application of Gravity Method to Investigation of a Landfill in the Glaciated Midconti-

ment, USA. In S.H. Ward (ed): *Geotechnical and Environmental Geophysics*. Vol. 2, SEG, Tulsa

TYAGI, S, LORD, AE. Jr. Y KOERNER, R.M. (1983). Use of a proton precession magnetometer to detect buried drums in sandy soil. *Journal of Hazardous Materials*, vol. 8, 11-23 pp.

OLHOEFF, G.R. (1986) *Direct detection of hydrocarbon and organic chemicals with ground penetratin radar and complex resistivity*. Proceedings of the Conference on Petroleum Hydrocarbons and Organic Chemicals in Ground Water Prevention, Detection and Restoration, 284-305.