

## ESTIMACIÓN DE LA DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE LAS PROPIEDADES TEXTURALES DE LOS SUELOS POR TOMOGRAFÍA ELÉCTRICA: PRINCIPIOS Y APLICACIONES

J.C. Tapias<sup>1</sup>, M. Himi<sup>2</sup> y A. Casas<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Departamento de Productos Naturales, Biología Vegetal y Edafología. Facultad de Farmacia. Universidad de Barcelona. Avda. Joan XXIII s/n. 08028-Barcelona; jtapias@ub.edu

<sup>2</sup> Departamento de Geoquímica, Petrología y Prospección Geológica. Facultad de Geología. Universidad de Barcelona. C/. Martí i Franquès s/n. 08028-Barcelona; albert.casas@ub.edu

**RESUMEN.** La caracterización precisa de la geometría y propiedades físicas de los diferentes horizontes que constituyen la zona vadosa se plantea como una necesidad fundamental en muchos estudios agronómicos y sobre todo ambientales. En las últimas décadas, el aumento demográfico ha hecho crecer la presión sobre los recursos naturales, con el consecuente incremento en la demanda de abastecimiento hídrico. El agua subterránea puede considerarse cada vez más un recurso estratégico, y por este motivo es preciso protegerla de los riesgos derivados de las actividades industriales, agrícolas y ganaderas. La protección de las aguas subterráneas frente a las diferentes fuentes de contaminación depende del espesor y características texturales de la zona vadosa que se sitúa entre la superficie del terreno y el nivel freático. Tradicionalmente, la elaboración de mapas de vulnerabilidad a la contaminación de los acuíferos se basa en la cartografía geológica y el análisis de las columnas litológicas de sondeos mecánicos, apoyados cuando es posible por ensayos de permeabilidad. El impacto de las prácticas agrícolas en la calidad de las aguas a menudo significa un notable riesgo de contaminación de los pozos de abastecimiento. Para asegurar la protección del agua subterránea es necesario disponer de mapas de vulnerabilidad que expresen la exposición de los acuíferos frente a las potenciales fuentes de contaminación. Los parámetros que afectan la vulnerabilidad son principalmente la permeabilidad y el espesor de cada capa de la zona no saturada. La textura de la zona vadosa determina el tiempo de tránsito de los contaminantes y la capacidad de depuración. En los sedimentos no consolidados la permeabilidad está estrechamente relacionada con el contenido en arcilla, que puede deducirse indirectamente a partir de la prospección por métodos geofísicos, como la tomografía eléctrica. El principal objetivo de este trabajo es analizar la utilidad de la tomografía eléctrica como técnica de apoyo para estimar de forma rápida y precisa la distribución espacial de las propiedades texturales de los suelos en estudios ambientales.

**ABSTRACT.** The accurate characterization of the geometry and physical properties of the different layer that constitute the vadose zone is a fundamental requirement in many agronomical and environmental studies. Over the past few decades, growing population have increased the pressure on natural resources, raising demands for water supply. Groundwater is becoming more and more a strategic resource and for this reason there is an increasing demand for vulnerability maps which illustrate the exposure of aquifers against pollution. These maps are designed to show areas of greatest potential for groundwater contamination on the basis of local subsurface conditions. Aquifers vulnerability to pollution from the land surface has become an important area of hydrogeological research. To date, most of this research has focused on small sites of special interest using intensive sampling techniques and complex modeling procedures. There is also a need, however, for more extensive evaluations of ground water vulnerability that might help guide land planning and management at regional scales. The impact of agricultural practices on groundwater quality is a particular concern by the fact that shallow wells may become polluted. In order to protect groundwater there is an increasing demand for vulnerability maps which illustrate the exposure of aquifers against pollution. These maps are designed to show areas of greatest potential for groundwater contamination on the basis of local subsurface conditions. Parameters affecting vulnerability are mainly permeability and thickness of each protective layer. The texture of the vadose zone determines the time of travel of the contaminant through it. For unconsolidated sediments, the permeability is strongly related to the clay content, which can be deduced from indirect resistivity methods, like electrical-imaging. The main objective of this paper is to analyze the suitability of the electrical tomography method as a cost-effective tool for accurately mapping the soil media in environmental studies.

## 1. Introducción

Las propiedades físicas de los suelos están fuertemente influenciadas por su porosidad y grado de saturación, y además, las propiedades eléctricas dependen de salinidad del agua contenida en los poros. Por este motivo se han desarrollado en los últimos años nuevos métodos geofísicos de alta resolución bien adaptados para suministrar información precisa sobre la profundidad, espesor y continuidad lateral del subsuelo, dando lugar a una nueva disciplina conocida con la denominación de “Near Surface Geophysics”. Para este tipo de estudios es especialmente efectiva la técnica geofísica denominada tomografía eléctrica, que puede considerarse como fruto de la evolución de los métodos geoelectrónicos clásicos, como el SEV y la calicata eléctrica. La forma más habitual de realizar este tipo de medidas es colocar la cantidad de electrodos deseada de forma alineada, con una distancia interelectrónica constante. Para activar o desactivar los electrodos de corriente y/o los de potencial de forma automática se utiliza un sistema controlado por un microordenador.

Para identificar el espesor, la extensión lateral y las características de la zona vadosa de diferentes áreas de interés en Catalunya, se han realizado diversas campañas de perfiles geoelectrónicos 2D mediante la técnica denominada tomografía eléctrica. La adquisición se ha llevado a cabo con un dispositivo Wenner-Schlumberger formado por 48 electrodos espaciados una distancia de 2 m. Las pseudosecciones de resistividad aparente se han interpretado mediante un proceso de inversión numérica para obtener el modelo geoelectrónico. Finalmente, los cortes geoelectrónicos así obtenidos se han analizado con el apoyo de la información disponible para establecer las correspondientes correlaciones entre las propiedades físicas y las texturales de los suelos.

## 2. Problemática

La aplicación de dosis excesivas de abonos orgánicos y químicos en los suelos y el vertido de excretas de la ganadería intensiva provocan la acumulación de nitrógeno y otros elementos en los suelos. Luego, a través de las aguas de lluvia y las aportadas por el riego son lavados en forma de compuestos solubles y se incorporan en los acuíferos. El resultado es la contaminación de los acuíferos y en consecuencia del agua subterránea extraída por los pozos. La contaminación de las aguas superficiales y subterráneas por los nitratos de origen agrícola puede representar un riesgo a la salud humana y al medio ambiente.

Como respuesta a este riesgo la UE dictó en 1991 la Directiva sobre Nitratos (91/976/EC) que requería a los estados miembros reducir los nitratos de origen agrícola en la totalidad de su territorio o bien a extremar estas medidas en las áreas vulnerables a la contaminación, denominadas Zonas Vulnerables a los Nitratos o NVZ ‘Nitrate Vulnerable Zones’ (Osborn y Cook, 1997).

En diversos puntos de Cataluña, particularmente en las comarcas de Osona y l’Empordà, el contenido en nitratos

de las aguas subterráneas a menudo sobrepasa la concentración máxima admisible de 50 mg/L, alcanzando a veces valores diez veces superiores al estándar de la Unión Europea para el agua de bebida. Para controlar este proceso es necesaria una correcta planificación de las actividades agrícolas y ganaderas, pero también identificar las zonas vulnerables en donde reforzar las medidas preventivas.

La mayor parte de los contaminantes del agua subterránea viajan a través de la zona no saturada y en consecuencia la protección de las aguas subterráneas contra la contaminación depende del espesor y propiedades de la zona vadosa, es decir los niveles edáficos y geológicos presentes entre la superficie del terreno y el nivel freático. Tradicionalmente, la elaboración de mapas de vulnerabilidad a la contaminación está basada en la caracterización de los suelos, la cartografía geológica y el análisis de las columnas litológicas de los sondeos, apoyados siempre que sea posible por ensayos de permeabilidad (Anderson y Gosk, 1989). Sin embargo, a causa de la elevada variación lateral de las formaciones, la caracterización de los niveles protectores y de las zonas de recarga preferente puede en muchas ocasiones no ser viable a partir únicamente de sondeos y catas mecánicas. En estas situaciones, las técnicas geofísicas de alta resolución pueden ser de gran utilidad aportando información detallada de las variaciones laterales y en profundidad de las unidades geológicas.

## 3. Método de estudio

Los modernos métodos geofísicos eléctricos y electromagnéticos de alta resolución están muy bien adaptados para proporcionar información sobre la geometría (profundidad, espesor y continuidad lateral) y las propiedades físicas de las unidades geológicas que pueden actuar como barrera o, al contrario constituir un camino preferente, a la entrada de contaminantes en las formaciones acuíferas. Además, son rápidos, económicos y no-destructivos, lo que significa que permiten obtener información del subsuelo sin necesidad de realizar perforaciones mecánicas cuyos conductos podrían suponer vías artificiales para la transmisión de los contaminantes hacia los acuíferos.

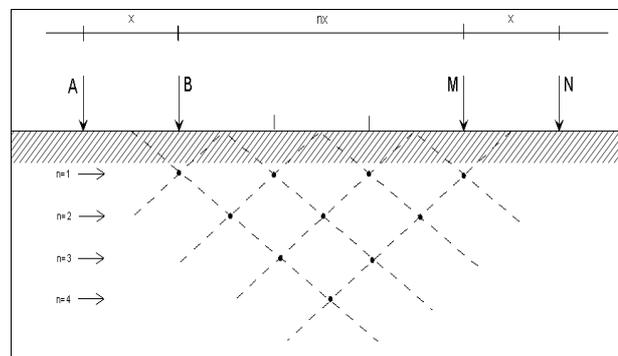


Fig. 1. Esquema de la distribución de los puntos de atribución en la tomografía con el dispositivo dipolo-dipolo.

Es bien sabido que los terrenos arcillosos son relativamente impermeables, y que al contrario los arenosos son relativamente permeables facilitando la infiltración del agua. Los sedimentos detríticos no consolidados pueden fácilmente diferenciarse a partir del elevado contraste de sus respectivas resistividades eléctricas (Tabla 1).

**Tabla 1.** Correspondencia entre resistividad eléctrica y textura de los sedimentos detríticos no consolidados.

| Sedimento       | Porcentaje de arcilla (%) | Resistividad ohm.m |
|-----------------|---------------------------|--------------------|
| Gravas          | 3                         | 500 - 1000         |
| Arena           | 5                         | 50 - 100           |
| Arena limosa    | 10                        | 50 - 100           |
| Limo            | 15                        | 30 - 500           |
| Limo arenoso    | 20                        | 25 - 30            |
| Arcilla arenosa | 30                        | 15 - 25            |
| Arcilla limosa  | 45                        | 10 - 15            |
| Arcilla         | 65                        | 5 - 10             |

La técnica seleccionada para este objetivo ha sido la tomografía eléctrica, también conocida como sondeo eléctrico continuo o CVES (Continuous vertical electrical sounding), que permite visualizar la distribución de la resistividad eléctrica del subsuelo mediante secciones bidimensionales.

La tomografía eléctrica puede considerarse como fruto de la evolución de los métodos geoelectrónicos clásicos, como el SEV y la calicata (Dahlin, 1996). De hecho, el principio físico es el mismo, pero en este caso en lugar de energizar y medir con cuatro electrodos que van cambiando progresivamente sus emplazamientos, se utiliza una serie de electrodos (16, 24, 32, 48 etc.) que permanecen fijos en el terreno y con los cuales es posible obtener un número más elevado de medidas combinadas. La forma más habitual de realizar este tipo de medidas es colocar la cantidad de electrodos deseada de forma alineada, con una distancia interelectrónica constante. De esta manera es posible conectar el generador de corriente y/o el voltímetro a un par de electrodos cualquiera. Para activar o desactivar los electrodos de corriente y/o los de potencial de forma automática se utiliza un sistema controlado por un microordenador (Fig. 1).

#### 4. Tests con modelos sintéticos

El programa utilizado para la realización del proceso de modelización directa ha sido el RES2DMOD (Loke, 2002a). El objetivo principal de ensayo es determinar la resolución y poder de penetración del método, así como asistir al usuario a la hora de seleccionar el mejor dispositivo para cada situación o área de estudio en particular.

El modelo primer sintético generado para analizar la sensibilidad del método en detectar variaciones laterales, representa una sección 140 metros de longitud y 20 metros de profundidad, constituido por capa superficial de composición arenosa de 35 ohm.m de resistividad, que cubre un nivel de arcilla de 10 ohm.m de resistividad que se

acuña progresivamente hasta desaparecer. El tercer nivel, situado bajo los dos anteriores, representa una unidad acuífera de 250 ohm.m de resistividad. Esta sección simula la situación de una zona no saturada con variaciones laterales que comportan la ausencia de barrera arcillosa impermeable a partir de un cierto límite.

La sección de resistividades aparentes del modelo se muestra en la Fig. 2 (arriba) en la que puede apreciarse claramente, a la izquierda del perfil, la presencia del nivel arcilloso en forma de cuña, aunque la resistividad aparente del cuerpo es mucho mayor, entre 15 y 30 ohm.m, que la del modelo original, que era de 10 ohm.m.

El segundo modelo representa una sección de 140 metros de longitud y 20 metros de profundidad, que simula una estructura estratificada horizontalmente. Los valores de resistividad de cada capa son respectivamente 35 ohm.m, 10 ohm.m y 150 ohm.m. El espesor de la capa superior está fijado en 5 m, mientras que el espesor del nivel conductor intermedio varía entre 1 y 10 metros.

#### 5. Inversión de los datos

El proceso de inversión trata de obtener, a partir de la sección de resistividades aparentes, un modelo de subsuelo que pueda considerarse una solución válida compatible con los datos experimentales, de forma que la respuesta teórica de esta sea razonablemente parecida a las observaciones. El inconveniente principal del problema inverso es que, si bien el problema directo proporciona una única solución válida, a partir del proceso de inversión pueden aparecer múltiples modelos. Por este motivo, a la hora de buscar un modelo que se ajuste a los datos experimentales, es conveniente tratar de establecer restricciones previas, ya sean de carácter geológico, sondeos mecánicos o información derivada de otros métodos geofísicos.

El programa utilizado para la inversión de los datos ha sido el RES2DINV (Loke, 2002b). El programa determina de forma automática un modelo bidimensional de resistividades reales del subsuelo a partir de un conjunto de datos que constituyen una pseudosección de resistividades aparentes. El modelo bidimensional utilizado por el programa consiste en un conjunto de bloques rectangulares, la situación de los cuales se corresponde con la distribución de los puntos de medida en la pseudosección. Para realizar el cálculo de los valores de resistividad se utiliza una subrutina de modelización directa, así como una técnica de optimización no lineal de mínimos cuadrados para la rutina de inversión (Loke y Barker 1996). Durante el proceso de inversión se adopta como criterio de convergencia el valor del error cuadrático medio (RMS) entre los datos experimentales y la respuesta del modelo actualizado en cada iteración. Si el valor del RMS o su disminución relativa se sitúan por debajo de un valor predefinido se dice que la inversión ha convergido y el proceso se considera terminado. En nuestro caso, los valores de un 2% y de 0.01 se han utilizado respectivamente como valores mínimos.

El resultado del proceso de inversión aplicado en la pseudosección del modelo sintético se muestra en la Fig. 2 (abajo). Puede apreciarse que el nivel de arcilla del modelo

final resultante tiene el espesor y la extensión lateral que el modelo inicial.

La inversión clásica de las pseudosecciones de tomografía eléctrica que aplica un cierto suavizado en las variaciones de las resistividades tiene algunas limitaciones en el caso de estructuras de límites bien definidos con cambios bruscos de resistividad (Olayinka y Yaramanci 2000), pero los modelos interpretados muestran un ajuste bastante adecuado si se comparan con los modelos sintéticos iniciales.

Para el objetivo de definir la vulnerabilidad a la contaminación el parámetro de interés es la conductancia eléctrica longitudinal del conjunto de capas situadas sobre el nivel freático, que se expresa como la suma de los cocientes entre el espesor y la resistividad de cada capa ( $S = E_i / \rho_i$ ). Este valor es máximo cuando el espesor de los niveles de baja resistividad (elevado contenido en arcilla) sobre el acuífero es mayor, proporcionando una mayor protección a la contaminación. A pesar que los bordes de los niveles del modelo resultante aparecen algo distorsionados y que también los valores de resistividad son algo inferiores a los originales, la conductancia eléctrica longitudinal muestra una buena correspondencia entre el modelo teórico y el obtenido por inversión.

## 6. Ejemplos de aplicación

Se ha aplicado la metodología propuesta para analizar la zona no saturada de tres zonas en Catalunya con problemática y contexto geológico bien diferenciado.

### 6.1. Zona de l'Alt Empordà

Para comprobar la efectividad de la metodología propuesta se ha llevado a cabo un estudio piloto en la comarca de l'Alt Empordà (Provincia de Girona), que es una de las más afectadas por el proceso de contaminación difusa por nitratos.

El acuífero superficial y peor protegido a la contaminación, funciona prácticamente como un acuífero libre de gran extensión, cubierto parcialmente por niveles de limos y arcillas, que actúan de capa protectora. Sus características litológicas e hidrogeológicas varían lateralmente, aunque predominan las arenas de grano fino y también las gravas. Su espesor oscila entre 12 y 22 metros desde el interior hacia la costa. La permeabilidad estimada oscila entre 200 y 500 m/día. El nivel piezométrico es en general muy poco profundo, e incluso aflora por encima de la superficie del terreno dando lugar a humedales, que constituyen el parque natural de los Aiguamolls.

Para identificar el espesor, extensión lateral y características de las formaciones suprayacentes al acuífero superior en una zona próxima a la localidad de San Pere Pescador, se ha realizado una campaña de perfiles geoelectrónicos 2D. La adquisición se ha llevado a cabo con un dispositivo Wenner-Schlumberger formado por 48 electrodos espaciados una distancia de 2 m.

Los cortes geoelectrónicos obtenidos a partir de la inversión de las pseudosecciones han permitido discriminar de forma

muy efectiva los diferentes grados de vulnerabilidad del acuífero superior. Por ejemplo, el carácter discontinuo de la capa arcillosa de baja resistividad eléctrica se pone particularmente en evidencia en el perfil de la Fig. 4. En el corte geoelectrónico se muestra como el nivel conductor, perfectamente visible en la parte más superficial, con unos 3 metros de espesor máximo, se acuña localmente hasta desaparecer, dando lugar a zonas más vulnerables.

### 6.2. Zona del borde septentrional de Reus-Valls

El área de estudio se encuentra geológicamente situada en el borde septentrional del contacto entre la depresión de Reus-Valls (sedimentos detríticos terciarios) y el Macizo del Priorat (afloramientos mesozoicos, paleozoicos y de rocas plutónicas) en la Provincia de Tarragona.

El perfil de tomografía eléctrica, realizado en las proximidades de la localidad de Vilanova d'Escornalbou sobre las granodioritas alteradas del putón de Alforja muestra claramente el espesor de las arenas de la zona de alteración (denominada localmente "sauló") sobre el sustrato granítico resistivo. La complejidad de la estructura con la presencia de bolos de gran tamaño queda muy bien representada en la Fig. 5.

### 6.3. Zona del valle del río Llobregat

La tercera zona de aplicación está situada en el aluvial del valle bajo del río Llobregat a la altura de la localidad de Sant Andreu de la Barca (provincia de Barcelona). El sustrato del acuífero lo constituye la formación de arcillas rojas del Burdigaliense.

Los perfiles de tomografía eléctrica muestran la existencia de niveles alta resistividad, que corresponden a las gravas no saturadas, en la parte superior de la sección, interpretados como gravas no saturadas (Fig. 6). La ausencia de niveles arcillosos en la superficie condiciona la elevada vulnerabilidad a la contaminación del acuífero aluvial en esta zona.

## 7. Discusión

Con la finalidad de facilitar la planificación territorial y prevenir la contaminación se han propuesto diferentes índices de vulnerabilidad. Sin embargo, pocas veces determinan el potencial de contaminación de los acuíferos a escala detallada, sino más bien a nivel regional.

A partir de la información deducida por los perfiles geoelectrónicos puede plantearse la elaboración de un índice numérico de protección que cuantifique la vulnerabilidad. Tradicionalmente, la protección de un nivel dado se expresa en forma del espesor multiplicado por su capacidad de intercambio catiónico (CIC), que está muy relacionado con el contenido en arcilla. Como el contenido en arcilla influye inversamente en la resistividad eléctrica de las formaciones geológicas puede considerarse un índice de protección geofísico (IPG) a partir de la expresión:

$$IPG = \sum_{i=1}^n \frac{1}{\rho_i} \cdot E_i$$

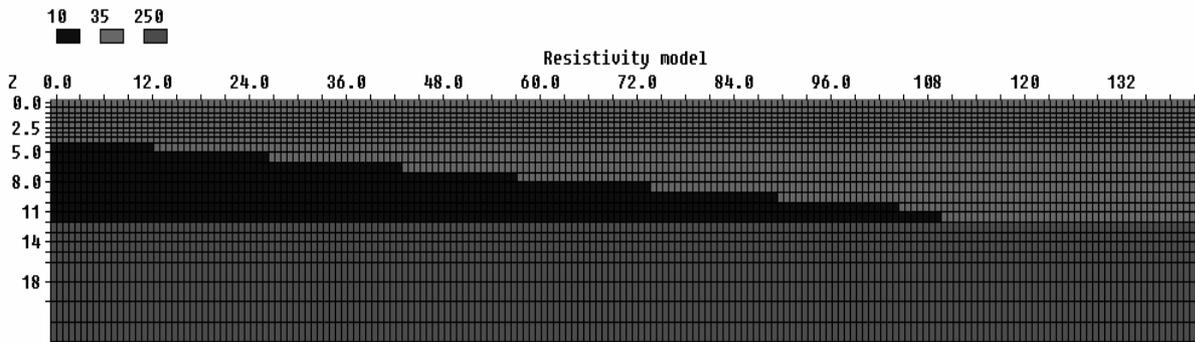
donde  $\rho_i$  y  $E_i$  son la resistividad eléctrica y el espesor de cada capa.

**8. Conclusiones**

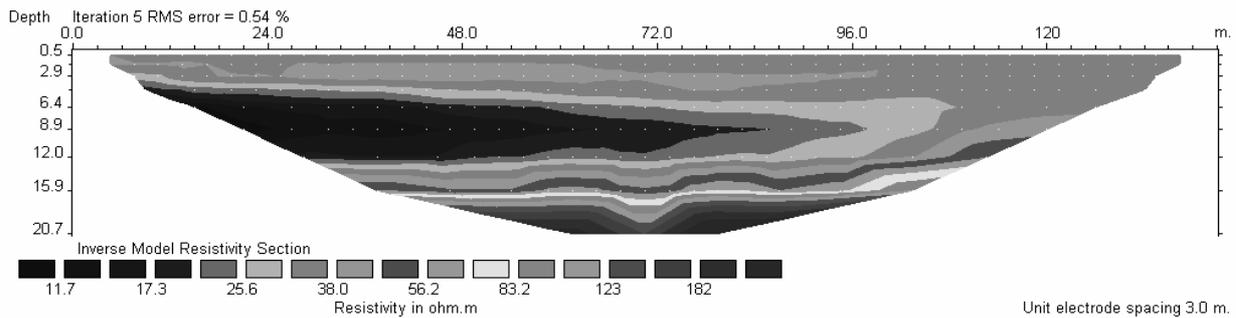
La zona no saturada situada sobre el nivel freático juega un papel crucial en la protección de las aguas subterráneas de la infiltración de los contaminantes. Esta protección depende principalmente de la estructura y textura de los niveles situados sobre los acuíferos. A partir de la información geofísica derivada de una de perfiles de tomografía eléctrica puede establecerse un índice numérico mucho más preciso y fiable que el deducido únicamente a partir de unos pocos sondeos mecánicos.

**Referencias**

Anderson L.J. y Gosk E. 1989 Applicability of vulnerability maps. *Environ Geol. Water Sci.*, 13: 39-43 pp.  
 Dahlin T. 1996. 2D resistivity surveying for environmental and engineering applications. *First Break*, 14: 275-284 pp.  
 Loke, M.H. 2002a. RES2DMOD ver. 3.01: Rapid 2-D resistivity forward modelling using the finite difference and finite-element methods.  
 Loke, M.H. 2002b. RES2DINV ver. 3.50. Rapid 2-D resistivity and IP inversion using the least square method.  
 Loke M.H. y Barker R.D. 1996 Rapid least-squares inversion of apparent resistivity pseudosections by a quasi-Newton method. *Geophysical Prospecting*, 44: 131-152 pp.  
 Olayinka, A.I. y Yaramanci, U. 2000 Use of block inversion in the 2-D interpretation of apparent resistivity data and its comparison with smooth inversion. *Journal of Applied Geophysics* 45, 63-81 pp.  
 Osborn S. y Cook H.F. 1997. Nitrate vulnerable zones and nitrate sensitive areas: a policy and technical analysis of groundwater source protection in England and Wales. *Journal of Environmental Planning and Management*, 40: 217-233 pp.



**Fig. 2.** Modelo sintético simulando un acuífero situado a 12 metros de profundidad, cubierto por una zona no saturada constituida por un nivel de arcillas que se acuña bajo otro nivel superior arenoso.



**Fig. 3.** Pseudosección de resistividades aparentes calculada para el modelo de la Fig. 1 (arriba), modelo de resistividades verdaderas obtenido después del proceso de inversión (abajo) y respuesta teórica de dicho modelo (centro). Obsérvese la similitud entre la sección resultado de la inversión y el modelo original.

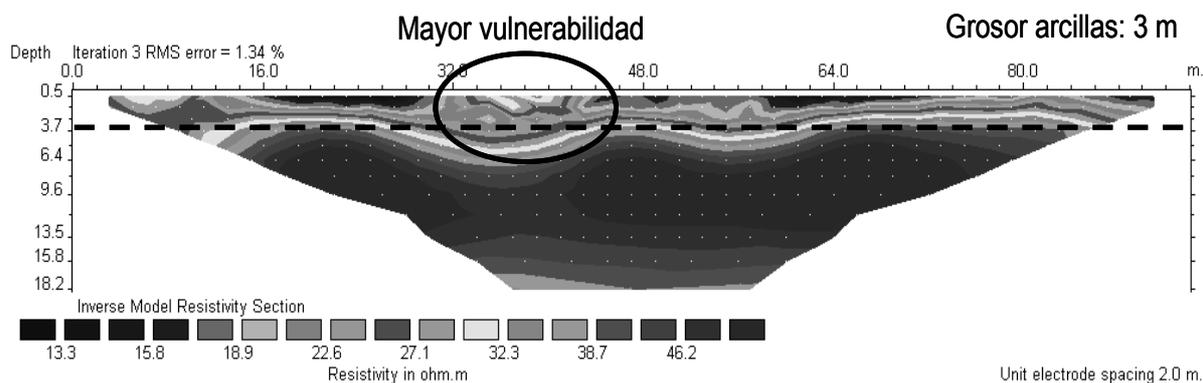


Fig. 4. Pseudosección de resistividades aparentes obtenida después de la inversión en la depresión del Empordà. El escaso espesor de la capa de arcillas aflorante y su carácter discontinuo confieren una elevada vulnerabilidad al acuífero aluvial subyacente.

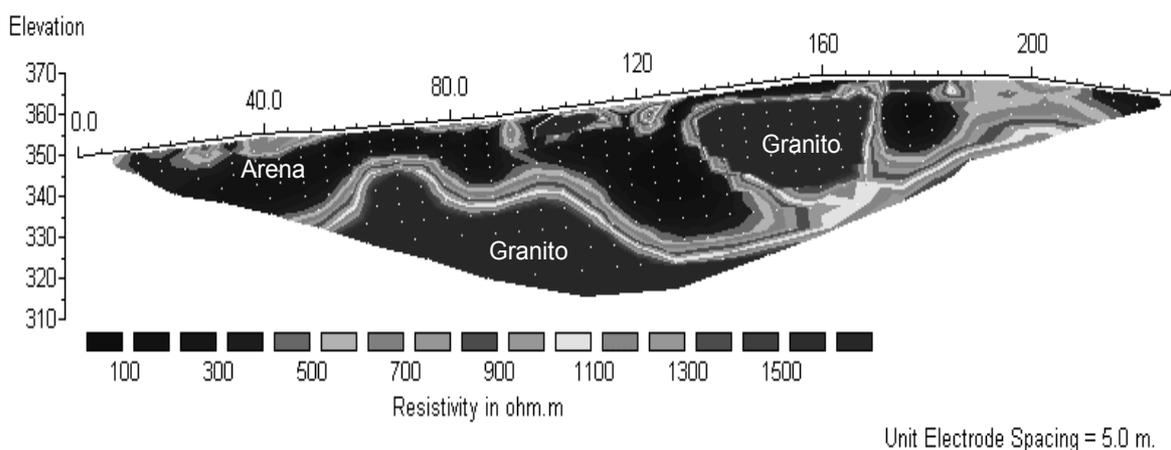


Fig. 5. Pseudosección de resistividades aparentes obtenida sobre los niveles de alteración de la granodiorita del plutón de Alforja. En el perfil se refleja claramente la irregularidad del relieve del basamento, con la presencia de bolos de elevada resistividad.

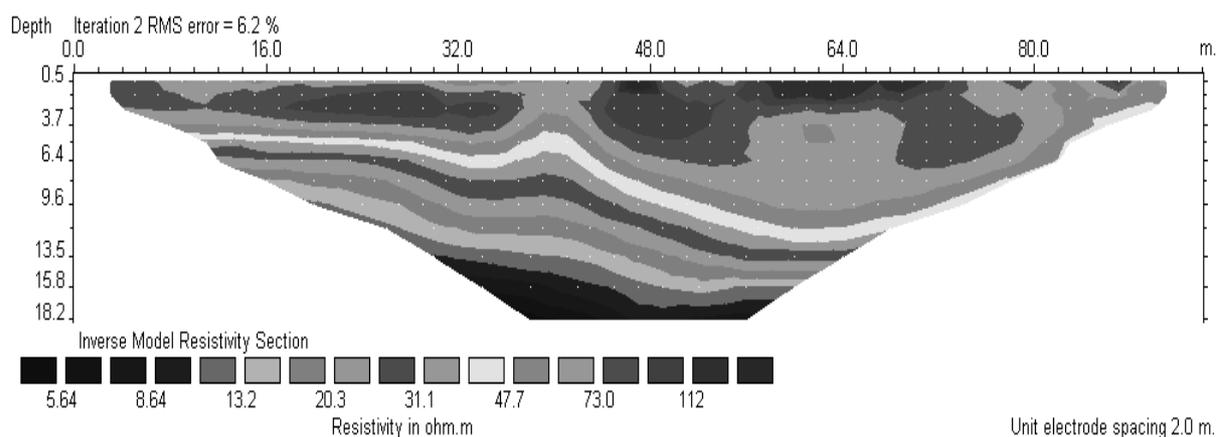


Fig. 6. Pseudosección de resistividades aparentes obtenida sobre la terraza aluvial del valle bajo del río Llobregat. La ausencia de niveles conductores en la zona no saturada implica el elevado riesgo de contaminación por vertidos contaminantes en este contexto. En cambio, la geometría del sustrato impermeable constituido por las arcillas rojas de Burdigaliense destaca claramente en la parte inferior de la sección.