

ANÁLISIS DE ZONAS FAVORABLES PARA LA RECARGA CON AGUA RESIDUAL REGENERADA MEDIANTE TOMOGRAFÍA ELÉCTRICA

Casas Ponsatí, A.^(1,3), Díaz Acha, Y.^(1,3), Himi, M.^(1,3), Font Cisteró, X.^(1,3), Tapias Pantebre, J.C.^(2,3)

(1) Departamento de Geoquímica, Petrología y Prospección Geológica. Universidad de Barcelona, 08028-Barcelona
e-mail: albert.casas@ub.edu

(2) Laboratorio de Edafología. Facultad de Farmacia. Universidad de Barcelona, 08028-Barcelona

(3) Instituto del Agua. Grupo de Geología Económica y Ambiental e Hidrología. Universidad de Barcelona

RESUMEN

La recarga artificial de acuíferos con agua residual regenerada puede considerarse una eficaz alternativa de gestión de los recursos de agua en situaciones de déficit hídrico, como la que padece de forma prolongada nuestro litoral mediterráneo. Hasta la fecha se han realizado en nuestro país escasos proyectos de recarga mediante infiltración indirecta a partir de balsas desde la superficie del terreno o bien por inyección directa a través de pozos, pero es seguro un aumento de la demanda y la necesidad de mejorar la técnica en el próximo futuro.

Sea cual sea el sistema de recarga aplicado es muy importante caracterizar las variaciones laterales y en profundidad de las propiedades hidrogeológicas tanto de la zona saturada como de la no saturada. Sin embargo, esta caracterización no puede hacerse únicamente a partir de ensayos en sondeos, ya que la información que estos proporcionan es puntual y no siempre fiable su extrapolación a las zonas próximas. Por el contrario, los modernos métodos de prospección geofísica, como la tomografía eléctrica, permiten obtener la distribución de las propiedades eléctricas del subsuelo con una elevada resolución, y posteriormente interpretar los resultados obtenidos en términos de variación de las propiedades hidráulicas del terreno.

Palabras clave: recarga de acuíferos, zona no saturada, hidrogeofísica, resistividad eléctrica, tomografía de resistividad eléctrica

Key words: aquifer recharge, non-saturated zone, hydrogeophysics, electrical resistivity tomography

1. INTRODUCCIÓN

Cada vez es más evidente la necesidad de aprovechar al máximo los recursos hídricos disponibles en las regiones que están afectadas por largos ciclos de sequía, como ocurre en muchas regiones de España, y particularmente en toda la cuenca Mediterránea (Iglesias y Ortega, 2008). Una de las posibles soluciones al problema es la recarga de acuíferos con agua residual tratada. El agua residual de origen urbano, después de ser sometida a tratamientos de depuración en las estaciones de depuración de aguas residuales (EDAR), con la correspondiente reducción de los sólidos en suspensión y la adecuada desinfección mediante tratamiento terciario, constituye un recurso hídrico a tener en cuenta que ha demostrado ampliamente su utilidad para el riego de zonas agrícolas, invernaderos, campos de golf, parques y jardines, así como para otros usos no directamente relacionados con el consumo humano. No obstante, puede también utilizarse para asegurar indirectamente el suministro en estaciones climáticas secas a partir de la recarga de los acuíferos como se viene desarrollando desde hace varios años de forma pionera en California (Crook *et al*, 1990).

En cualquier caso, la recarga de acuíferos mediante balsas de infiltración o por inyección directa en pozos para su posterior extracción y tratamiento como agua de consumo humano o para el establecimiento de barreras hidráulicas contra la intrusión salina en los acuíferos costeros, requiere criterios de calidad rigurosos para el agua regenerada que se desee infiltrar (Asano y Cotruvo, 2004). En España, el Real Decreto 1620/2007 (BOE, 2007), de 7 de diciembre establece el régimen jurídico de la reutilización de las aguas depuradas. Recientemente se han planteado numerosas iniciativas de recarga con agua residual tratada, como la barrera hidráulica para frenar la intrusión salina en el delta del río Llobregat (Cazurra, 2006).

2. OBJETIVOS

El suelo puede considerarse como un reactor biológico de gran superficie específica, en el que se desarrollan los microorganismos responsables de la oxidación de los materiales contaminantes disueltos todavía presentes en el agua residual; así como procesos de desinfección, filtración, adsorción, etc. Uno de los principales problemas en la planificación de un sistema de recarga artificial es conocer la estructura y composición de la zona de infiltración, transmisión y almacenamiento del agua de recarga. Por tanto, antes de proceder a la construcción definitiva de un sistema de recarga es preciso realizar una serie de estudios previos que permitan determinar la conductividad hidráulica y la geometría de las formaciones geológicas involucradas, en particular la presencia de arcillas impermeables que impidan o distorsionen el flujo de agua.

La conductividad hidráulica es un parámetro esencial para la gestión de cualquier proyecto de recarga. Su determinación en la zona saturada suele hacerse mediante métodos hidrogeológicos clásicos, como los ensayos de bombeo, aunque estos ensayos no son siempre sencillos de interpretar y proporcionan información promedio de la conductividad hidráulica de un volumen grande de terreno o están afectados por condiciones locales alrededor de perforaciones. Por su parte, la determinación de la conductividad hidráulica de la zona no saturada es más compleja, ya que los ensayos de infiltración realizados desde la superficie del terreno están afectados de forma particular la compactación de la capa superior, mientras que los ensayos con permeámetro en testigos de sondeo son generalmente poco representativos, a parte de su carácter puntual, por la dificultad de obtener muestras no alteradas.

La evaluación de la conductividad hidráulica mediante métodos geofísicos, tanto de la zona saturada como de la no saturada ha sido objeto de interés de muchos autores desde hace muchos años y recientemente este interés se ha acelerado con el desarrollo de una nueva rama que se conoce con el nombre de hidrogeofísica (Slater, 2007).

3. METODOLOGÍA

En un trabajo anterior se comprobó la utilidad de la técnica para determinar las zonas de recarga en los alrededores de la EDAR de Begur (Girona), pero la evaluación se efectuó desde un punto de vista cualitativo a partir de la geometría de las arenas dunares existentes en la zona (Tapias *et al*, 2006). En el presente trabajo se plantea la utilización de la tomografía eléctrica como herramienta preliminar en la selección de zonas favorables para la recarga, tratando de inferir los valores de conductividad hidráulica a partir de las medidas de resistividad eléctrica. A tal fin, se ha realizado una exhaustiva recopilación bibliográfica de los ensayos de campo y laboratorio efectuados en esta materia por otros autores, y también se ha realizado un primer ensayo de correlación cuantitativa.

La tomografía eléctrica consiste en la realización de diferentes medidas de la resistividad aparente variando la posición y distancia entre electrodos de potencial y de los electrodos de corriente. La manera más común para realizar este tipo de ensayos es colocar un cierto número de electrodos alineados, con una distancia entre electrodos constante, de este modo 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 una manera automática, normalmente es usado un sistema controlado por un microordenador.

Aprovechando el hecho que el punto de atribución de la medida depende de la distancia entre los electrodos extremos del dispositivo electródico, a medida que aumenta la distancia entre los dipolos inyectores y los dipolos de potencial, el punto de atribución aparecerá a mayor profundidad. De esta manera, variando la posición de los electrodos de inyección y de los electrodos del potencial, se obtiene directamente información de las variaciones tanto laterales como en profundidad, pero con la particularidad de carecer información en los extremos del perfil, teniendo una forma trapezoidal. Esto sucede debido a que al principio y al final del perfil sólo se puede obtener información de la zona más superficial, pero a medida que se desplaza el dispositivo hacia las zonas centrales se obtiene información de puntos cada vez más profundos.

Dado que los datos medidos corresponden a resistividades dependientes del dispositivo electródico empleado se suelen representar de forma preliminar en forma de pseudosecciones de resistividad aparente que dan solamente una visión aproximada de la distribución de resistividades en el subsuelo. En consecuencia, se requiere de un proceso a inversión de los datos que permita obtener un modelo más exacto de la distribución de resistividades eléctricas del subsuelo.

3. RESULTADOS

El ensayo de correlación se ha efectuado a partir de un perfil de tomografía eléctrica registrado en el Alt Empordà (Girona). El perfil se adquirió con un equipo Syscal Junio de 48 canales y una separación entre los electrodos de medida de dos metros. La longitud total del perfil es de 94 metros y la profundidad de investigación alcanza 18 metros con el dispositivo electródico Wenner-Schlumberger utilizado. En la figura 1 se muestra la sección de resistividades obtenida a partir de la inversión de los valores de resistividad aparente medidos experimentalmente. El ajuste del proceso es excelente, con un error de 1,04% después de 5 iteraciones.

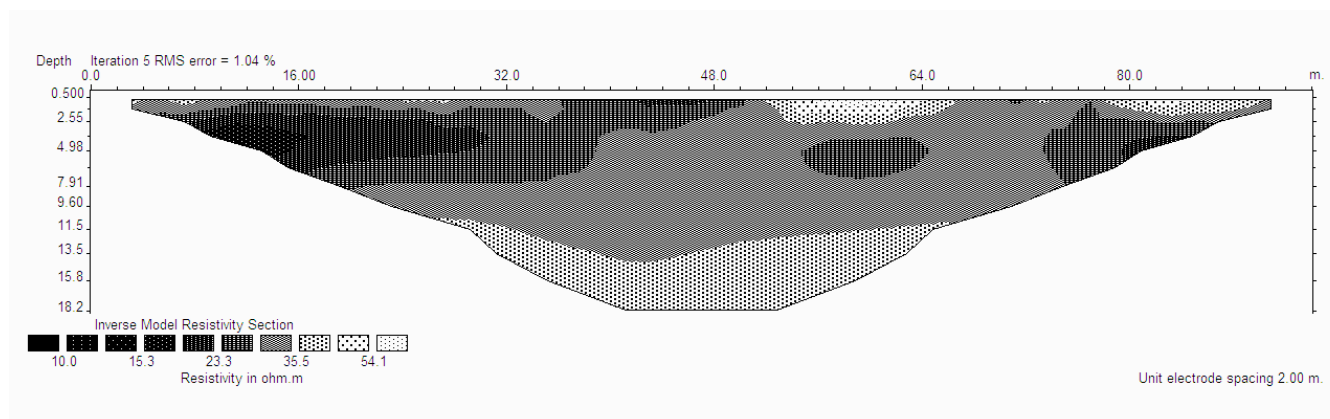


Figura 1. Sección de resistividad eléctrica obtenido por inversión del registro de tomografía eléctrica, donde destaca la distribución de los diferentes constituyentes de la zona no saturada por sus propiedades físicas. Los valores de resistividad eléctrica varían entre 5 y 60 ohm·m

El programa utilizado para la inversión de los datos y convertir las pseudosecciones de resistividad aparente en secciones de profundidad y resistividad reales ha sido el RES2DINV (Loke, 2002). 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. 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.

4. DISCUSIÓN

La conversión de los valores de resistividad eléctrica a sus equivalentes de conductividad hidráulica se ha llevado a cabo a partir del análisis de 25 muestras obtenidas a intervalos de 0,5 metros procedentes de un sondeo mecánico situado a la altura del electrodo 32 del perfil de tomografía eléctrica de la figura 1. Para cada una de las muestras de suelo se determinó su contenido en arcilla y se estimó el correspondiente valor de resistividad eléctrica a dicha profundidad. Como era previsible, la correlación entre los valores de resistividad eléctrica y de contenido en arcilla muestra una tendencia opuesta, de forma que los tramos más arcillosos presentan los valores más bajos de resistividad eléctrica, mientras que contrariamente a menor contenido en arcilla mayor es la resistividad eléctrica (Figura 2A). El coeficiente de correlación de la recta de ajuste es de 0,53 que puede considerarse bastante satisfactorio teniendo en cuenta la distinta representatividad y área de influencia de las respectivas medidas.

A partir de su contenido en arcilla diversos autores han formulado diferentes relaciones para estimar la conductividad hidráulica de suelos y sedimentos no consolidados. En nuestro caso hemos tomado la relación propuesta por Scheffer y Schachtschabel (1984) que se muestra en la figura 2B y que supone un coeficiente de correlación entre ambas variables de 0,41.

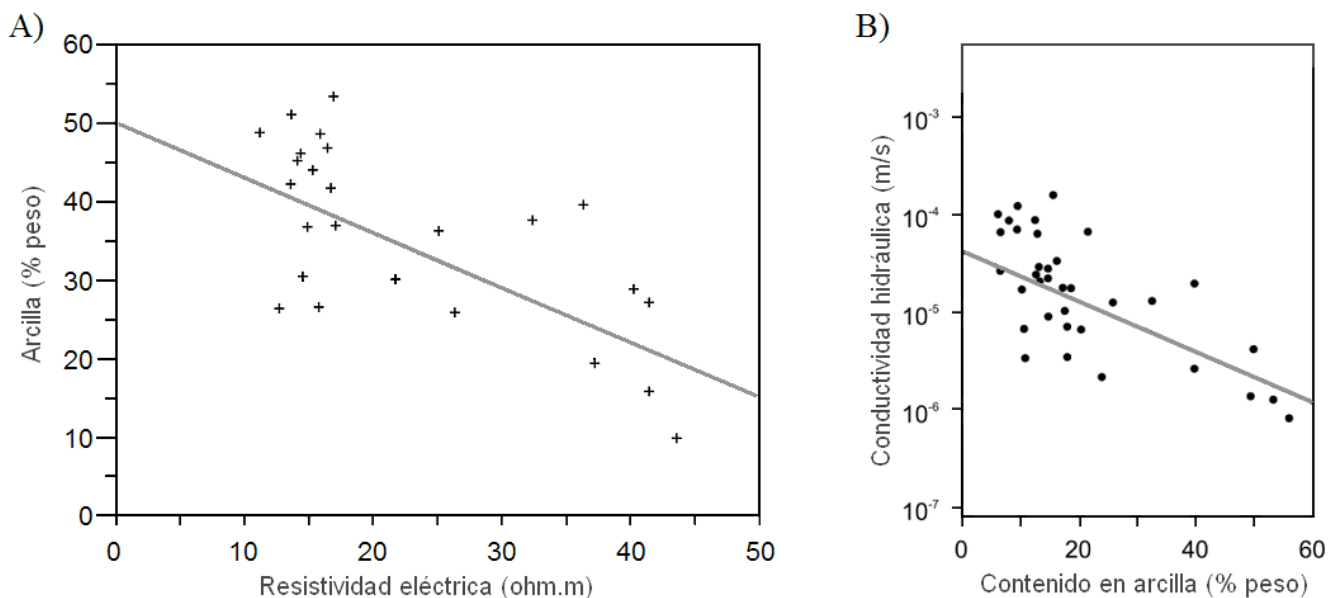


Figura 2A) Correlación entre los valores de resistividad eléctrica y el contenido en arcilla. 2B) Correlación entre el contenido en arcilla y la conductividad hidráulica según Scheffer y Schachtschabel (1984).

A partir de los resultados de la tomografía eléctrica y tomando en consideración las relaciones de las figuras 2A y 2B puede inferirse que la conductividad hidráulica de las formaciones que constituyen el subsuelo tiene un rango de variación entre 10^{-4} y 10^{-6} m/s. Además, se puede identificar perfectamente la presencia de un nivel menos permeable al inicio del perfil, mientras que la zona central es la más permeable.

Es bien conocido que la resistividad eléctrica depende no solamente del contenido en arcilla, sino también del contenido de humedad y de la salinidad del agua. Son necesarios por tanto más ensayos utilizando de forma combinada otros métodos geofísicos, en particular la polarización inducida, para evaluar de forma más precisa la conductividad hidráulica como han propuesto Hördt *et al* (2007).

5. CONCLUSIONES

La tomografía eléctrica es una excelente técnica para caracterizar la distribución de las propiedades eléctricas del subsuelo y puede aplicarse con un buen grado de aproximación para determinar la distribución de la conductividad hidráulica del subsuelo en los proyectos de recarga de acuíferos. De este modo se pueden seleccionar con mayor seguridad las zonas más favorables donde efectuar la infiltración en el terreno. También puede utilizarse para complementar la información proporcionada por los ensayos hidrogeológicos clásicos, necesaria para predecir la capacidad de infiltración del terreno y la dinámica del flujo de recarga en el sistema.

Agradecimientos: Agradecimientos: El presente estudio se ha realizado en el marco de los proyectos “Tratamiento y Reutilización de aguas residuales para una gestión sostenible (TRAGUA)” del programa CONSOLIDER y del proyecto “Aplicación de la tomografía eléctrica para delimitar la vulnerabilidad a la contaminación de los acuíferos y mejorar la preservación de la calidad de las aguas subterráneas en zonas sensibles” (CGL2006-09957) ambos financiados por el Ministerio de Ciencia e Innovación.

REFERENCIAS

- Asano, T. y Cotruvo, J. (2004): Groundwater recharge with reclaimed municipal wastewater: health and regulatory considerations. *Water Research*, 38: 1941-1951.
- Cazurra, T. (2006): Water Reuse of South Barcelona’s wastewater reclamation plant. *Desalination*, 218: 43-51.
- Crook, J., Asano, T. y Nellor, M. (1990): Groundwater recharge with reclaimed water in California. *Water Environment & Technology*, 2(4): 42-49.
- Hördt, A., Blaschek, R., Kemna, A. y Zisser N. (2007): Hydraulic conductivity estimation from induced polarisation data at the field scale – the Krauthausen case history. *Journal of Applied Geophysics*, 62: 33-46.
- Iglesias, R. y Ortega, E. (2008): Present and future of wastewater reuse in Spain. *Desalination*, 218: 105–119.
- Loke, M.H. (2002): *RES2DINV ver. 3.50. Rapid 2-D resistivity and IP inversion using the least square method*. Geotomo Software.
- Scheffer, F. y Schachtschabel, P. (1984): *Lehrbuch der Bodenkunde*. Enke Verlag, Stuttgart.
- Slater, L. (2007): Near surface electrical characterization of hydraulic conductivity: From petrophysical properties to aquifer geometries -A review. *Surveys in Geophysics*, 28: 169–197.
- Tapias, J.C., Himi, M., Masachs, A., Nieto, C., Brissaud, F., Salgot, M. y Casas, A. (2006): Using electrical imaging for assessing suitability of reclaimed water recharge at Begur, Spain. *Desalination*, 188: 69–77.