

EVALUACIÓN MEDIANTE TOMOGRAFÍA DE RESISTIVIDAD ELÉCTRICA DE LAS PROPIEDADES HIDRÁULICAS DE LA ZONA SATURADA Y NO-SATURADA DE HUMEDALES ARTIFICIALES PARA EL TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL

J.C. Tapias¹, M. Himi², R. Lovera², M. Folch¹, X. Font² y A. Casas²

¹Instituto del Agua. Departamento de Productos Naturales, Biología Vegetal y Edafología. Facultad de Farmacia. Universidad de Barcelona. Avda. Joan XXIII s/n, 08028-Barcelona. e-mail: jtapias@ub.edu

²Instituto del Agua. Departamento de Geoquímica, Petrología y Prospección Geológica. Facultad de Geología. Universidad de Barcelona. C/. Martí i Franquès s/n, 08028-Barcelona. e-mail: albert.casas@ub.edu

RESUMEN. Durante los últimos años ha crecido el interés por el uso de humedales construidos para la depuración de las aguas residuales de pequeñas comunidades, definidas por menos de 2000 habitantes equivalentes. Las ventajas de estos sistemas de tratamiento sobre los sistemas de depuración convencional son el bajo coste de operación y la sencillez de las tareas de mantenimiento. Sin embargo, con el tiempo el proceso de depuración conlleva la obstrucción progresiva de los poros de la capa de grava por la acumulación de sólidos en suspensión y materia orgánica, la precipitación de compuestos químicos y la compactación. La disminución de la porosidad del filtro provoca la reducción de la conductividad hidráulica a través de la capa de grava, reduce el suministro de oxígeno y como resultado, puede anular la eficacia del tratamiento. Por consiguiente, es esencial controlar la evolución del proceso de obstrucción y localizar en el espacio y el tiempo los problemas de funcionamiento del sistema. Con esta finalidad se ha analizado la eficacia de radar de subsuelo y tomografía eléctrica para caracterizar dos humedales de flujo subsuperficial horizontal existentes en Cataluña.

ABSTRACT. During the last years has been growing the interest by use of constructed wetlands for the treatment of wastewater in small communities of less than 2000 people equivalent. The advantages of these systems of treatment over conventional systems are the low cost of operation and ease of maintenance. However, over time the clogging process involves progressive blockage of the pores of the gravel layer by accumulation of solids in suspension and organics, precipitation of chemical compounds and the compaction. The reduction of the porosity of the filter causes a decrease in hydraulic conductivity through the layer of gravel, reduces the supply of oxygen and also causes a decrease of the effectiveness of the treatment. Therefore it is essential to determine the evolution of the process of occlusion and locate potential problems of functioning of the system in space and time. For this purpose ground probing radar and electrical resistivity tomography methods have been tested for characterizing two horizontal subsurface flow wetlands of Catalonia.

1.- Introducción

La Directiva Europea 91/271/CE sobre tratamiento de aguas residuales indica que los municipios de menos de 2000 habitantes equivalentes, o de menos de 10000 habitantes con vertido a zonas costeras abiertas han de depurar sus aguas con un "tratamiento adecuado". Para pequeños municipios la Directiva no establece unos mínimos numéricos de concentraciones o porcentajes de eliminación, pero requiere un tratamiento que garantice mantener los objetivos de calidad del medio receptor. Este supuesto tratamiento adecuado debe ser fiable, simple y de bajo coste de operación y mantenimiento, y además ha de generar pocos residuos. Los sistemas que cumplen estas características y tienen un marco legal favorable para su expansión son los denominados sistemas naturales, entre los que destacan los humedales artificiales de flujo sub-superficial, a veces combinados con lagunas de maduración.

Los humedales construidos son sistemas pasivos de depuración de aguas residuales, constituidos por lagunas o canales poco profundos, donde normalmente se plantan macrófitos (plantas propias de zonas húmedas) y donde la descontaminación se lleva a cabo mediante la acción simultánea de procesos físicos, químicos y biológicos. Estas tecnologías llevan ya algunos años de desarrollo en varios países y en Cataluña se ha tomado la iniciativa de instalar este tipo de sistemas en distintas localidades, considerando que en el actual contexto de crisis económica y concienciación ambiental constituyen una opción a tener en cuenta y con respaldo de la legislación vigente.



Fig. 1. Esquema de un humedal artificial de flujo sub-superficial horizontal para la depuración de agua residual

El principal problema de este tipo de instalaciones es la colmatación (*clogging*) que se desarrolla a lo largo del tiempo ya que obtura el medio granular y disminuye la vida útil del sistema. Debido a su trascendencia este fenómeno ha sido estudiado por diferentes autores, pero existen todavía numerosas incógnitas, ya que depende de la interacción de varios factores, entre los que destacan el material granular utilizado para la construcción del sistema filtrante, su porosidad y conductividad hidráulica, así como la carga química y orgánica del agua a tratar. Cuando el sistema filtrante se empieza a obturar el agua residual tiende a circular por la superficie del humedal artificial o por caminos preferenciales, reduciéndose su efectividad ya que se reduce el área y el tiempo de tratamiento.



Fig. 2. Flujo superficial en el humedal artificial de Verdú como consecuencia de la colmatación (*clogging*) de la capa de grava

Como la inversión económica necesaria para reemplazar la capa de grava es elevada se considera esencial poder evaluar de antemano la evolución del proceso y detectar los posibles fallos a tiempo para tomar las medidas necesarias que garanticen su operatividad (Knowles et al., 2011).

2.- Zonas de estudio

La Agencia Catalana del Agua (ACA) construyó hace más de 10 años una docena de humedales artificiales para el tratamiento del agua residual de varias localidades rurales distribuidas por todo el territorio (García et al, 2001). Estos sistemas han funcionado con notable eficacia a pesar de que alguno de ellos con el tiempo ha dado muestras de agotamiento. Con el objetivo de evaluar la eficacia de los métodos geofísicos en delimitar el grado de colmatación del sistema filtrante en los humedales artificiales se han seleccionado las plantas de tratamiento de aguas residuales de Verdú y Corbins, provincia de Lleida (Figura 3).

La elección de estas dos plantas se fundamenta en el hecho de que mientras la de Verdú lleva más de 10 años de funcionamiento con el mismo lecho de grava, la de Corbins ha substituido recientemente la grava original calcárea por una nueva silíceo de igual textura. El sistema filtrante de ambas plantas está constituido por grava gruesa (D_{60} igual a 10 mm y C_u igual a 2) con una conductividad hidráulica de 1000 m día^{-1} .



Fig. 3. Situación de los humedales de Verdú y Corbins

La planta de tratamiento de Verdú dispone como sistema de tratamiento primario de tres fosas sépticas en paralelo con un volumen de 50 m^3 con tres cámaras cada una. A continuación el efluente primario se distribuye a través de 4 humedales construidos de flujo horizontal subsuperficial anteriormente plantadas con *Phragmites australis*, pero actualmente eliminadas. Finalmente, hay dos balsas de maduración de un metro de profundidad seguidas de unos filtros de refinado antes de su vertido al Segre (Figura 3).



Fig. 3. Vista aérea de la EDAR de Verdú

En la planta de tratamiento de Corbins el agua residual entra primero en un tanque Imhoff de 7 m de diámetro y 10 m de altura desde donde el efluente primario se distribuye de forma equitativa a dos humedales artificiales de flujo subsuperficial horizontal. Luego sigue a través de tres balsas en serie: una facultativa de 1,5 m de profundidad y dos balsas aeróbicas de 1,0 m de profundidad). El efluente de la última balsa es finalmente dirigido a otro humedal construido seguido de tres filtros de arena en paralelo antes

de su vertido a un afluente del río Noguera Pallaresa.

3.- Metodología

Con el objetivo de analizar su eficacia para determinar las variaciones de las propiedades hidráulicas de la capa de grava de los humedales se han aplicado dos técnicas geofísicas distintas: radar de subsuelo (GPR) y tomografía de resistividad eléctrica (ERT). Para la adquisición de las secciones GPR se utilizó un equipo SIR 3000 fabricado por GSSI (Geophysical Survey Systems) con una antena de 400 MHz de frecuencia central. La adquisición de los datos GPR en ambos humedales se realizó en perfiles lineales con una traza cada 10 cm de forma continua controlada por medio del odómetro e intervalo entre perfiles de 0,5 m. Para facilitar la interpretación los datos registrados fueron posteriormente procesados con el software REFLEXW incluyendo *stacking*, recuperación de ganancias, filtrado y migración.



Fig. 4. Equipo GRP utilizado en este estudio

Las secciones de tomografía eléctrica se han adquirido con un resistímetro SYSCAL PRO de 48 electrodos con un dispositivo Wenner-Schlumberger y separación entre los electrodos entre 1 y 0,5 m, para obtener así una máxima resolución lateral y una profundidad de investigación aproximada de 4 m, suficiente para el objetivo previsto. Los valores experimentales de resistividad aparente se han invertido con el programa RES2DINV que supone el subsuelo dividido en celdas de dimensiones determinadas cuyos valores de resistividad eléctrica se modifican de forma iterativa hasta conseguir un ajuste aceptable entre los datos experimentales y la respuesta del modelo, siguiendo un proceso de optimización no-lineal por mínimos cuadrados (Loke y Barker, 1996).

La adquisición de datos de tomografía de resistividad eléctrica se ha realizado con estrategias diferentes en ambos humedales. En el caso del humedal de Verdú los perfiles se dispusieron perpendiculares a la dirección del flujo de agua residual a través del filtro de grava, mientras que en el

humedal de Verdú los perfiles se dispusieron tanto en dirección perpendicular como paralela a la dirección del flujo subsuperficial.

Además, en el caso del humedal de Verdú, para evitar el encharcamiento superficial que provoca la obstrucción por efecto del *clogging* en la capa de grava, se hizo descender el nivel del agua unos 30 cm por debajo de la superficie, dejando una zona superficial no saturada y otra inferior saturada con el agua residual. Esta situación, necesaria para poder hacer las medidas en condiciones técnicas y también sanitarias favorables, ha permitido además definir mejor las diferencias de comportamiento eléctrico entre el nivel saturado y el no saturado, y proporcionar un mejor diagnóstico sobre el estado de colmatación del filtro de grava.

4.- Resultados

En el humedal construido de Corbins todas las secciones de tomografía eléctrica obtenidas después del proceso de inversión muestran un modelo de dos capas con un nivel superficial de baja resistividad eléctrica correspondiente al nivel de gravas saturado con agua residual y una inferior de alta resistividad eléctrica (> 1000 ohm·m) asociada al nivel impermeable del nivel geotextil situado bajo el filtro. Los valores de resistividad de la capa superficial de 1 metro de grosor saturada con agua residual de conductividad eléctrica igual a 1300 $\mu\text{S}/\text{cm}$ oscilan entre 29 y 35 ohm·m (Figura 5).

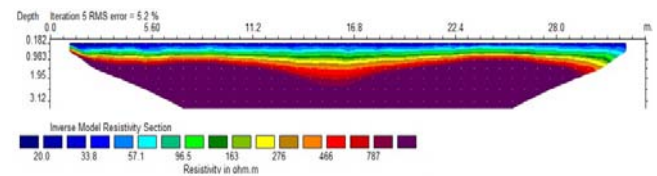


Fig. 5. Perfil típico de tomografía eléctrica en el humedal artificial de Corbins

Otra característica destacable en los perfiles de tomografía eléctrica del humedal de Corbins es la presencia de zonas de baja resistividad eléctrica en la capa resistiva inferior. Estas zonas de baja resistividad eléctrica que se muestran alineadas transversalmente desde un perfil a los contiguos y se interpreta como consecuencia de la filtración de agua residual hacia el sustrato geológico a causa de la rotura del geotextil situado en la base de la capa de grava (Figura 6).

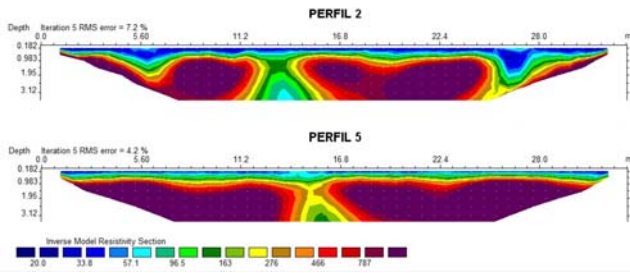


Fig. 6. Perfiles de tomografía eléctrica en el humedal de Corbins mostrando las anomalías en la capa inferior interpretadas como defectos de impermeabilización del geotextil

Los perfiles de tomografía eléctrica del humedal artificial de Verdú se adquirieron en dos direcciones: perpendicular y paralela al flujo del agua residual a través de la capa de grava y ofrecen también información muy significativa sobre la geometría del humedal y la distribución de zonas con diferente conductividad hidráulica en la capa de grava como resultado de la obturación por el efecto del *clogging*.

Las secciones de tomografía eléctrica de Verdú muestran que el grosor de la capa de grava es mayor que en Corbins, oscilando de 1,5 a 2,5 m, con una pendiente suave de tendencia regular a aumentar en dirección al flujo del agua residual. Otra diferencia significativa de las secciones de tomografía obtenidas en Verdú respecto de las de Corbins es la presencia de tres capas de resistividad eléctrica bien contrastada: una capa superior de muy alta resistividad eléctrica, una intermedia de baja resistividad y una capa inferior también de alta resistividad eléctrica.

La resistividad eléctrica de la capa superior corresponde a las gravas no saturadas y presenta una variabilidad notable creciendo en dirección al flujo del agua residual. Como en esta capa no existe conductividad eléctrica de tipo iónica por tener un electrolito saturando las gravas, las variaciones de conductividad eléctrica se interpretan que están causadas por el efecto de conducción de la corriente eléctrica a través del biofilm que cubre la grava de forma análoga a lo propuesto por Abdel et al (2004) que a partir de experimentos realizados en columnas bióticas y abióticas encontraron un aumento temporal de la conductividad eléctrica en la columna biótica, que atribuyeron a procesos microbianos (Figura 7).

Por el contrario, los perfiles de GRP no han proporcionado resultados satisfactorios para delimitar la estructura del filtro ni tampoco para evaluar indirectamente la variabilidad de las propiedades hidráulicas de la capa de grava. Esto puede deberse a la falta de contraste de permitividad dieléctrica entre el fluido y el biofilm (Van der Wal, 1997). Sólo es patente algún cambio de amplitud de las reflexiones como consecuencia de diferencias en la atenuación de la señal.

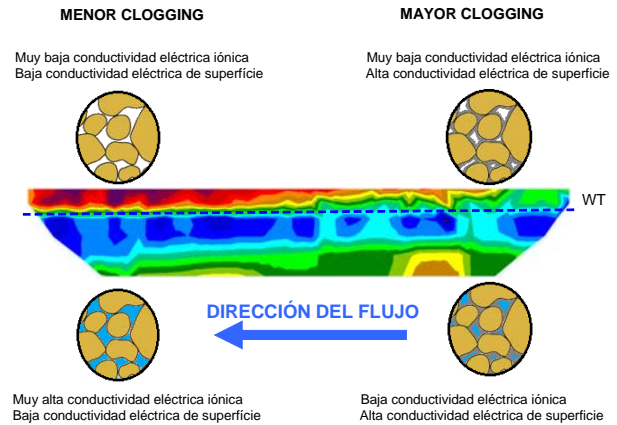


Fig. 7. Interpretación de los resultados de tomografía eléctrica en la ZNS y zona saturada del humedal de Verdú

5.- Conclusiones

Los resultados de esta investigación muestran que la tomografía de resistividad eléctrica puede ser una técnica muy útil para investigar la geometría de los humedales artificiales de flujo subsuperficial, así como para delimitar la extensión de los procesos de colmatación que obturan la capa de grava.

En el caso de Verdú en la zona no saturada, la resistividad eléctrica es mayor al final del filtro, ya que los poros están con aire que es dieléctrico, mientras que al inicio del filtro la resistividad es menor por la conducción eléctrica de la materia orgánica situada alrededor de las gravas. Contrariamente, en la zona saturada, la resistividad eléctrica es menor al final del filtro, ya que los poros contienen una mayor proporción de agua residual de elevada conductividad eléctrica iónica, mientras que al inicio del filtro la resistividad eléctrica es más elevada al tener una menor porosidad debido al aumento de materia orgánica.

En el caso de Corbins HSSF CW el hecho más relevante es la homogeneidad general de la resistividad eléctrica de la capa de grava, que no muestra signos de tener problemas de colmatación. Sin embargo, la capa más inferior que corresponde al sustrato impermeable muestra anomalías puntuales que pueden interpretarse como consecuencia de filtraciones de agua residual a través de fisuras u otros defectos estructurales en el geotextil.

Agradecimientos. Este trabajo ha sido financiado en parte por el Ministerio de Economía y Competitividad a través de los proyectos "Correlación entre parámetros hidrogeológicos y geofísicos para calibrar la evaluación de la vulnerabilidad a la contaminación de los acuíferos mediante métodos geofísicos" (CGL2009-07025) y "Tratamiento de aguas residuales y reutilización para una gestión sostenible, TRAGUA" (CSD2006-00044) en el marco del Programa Consolider. Los autores expresan también su gratitud a los técnicos de Aigües de Catalunya, y en particular a Ángel Lázaro por facilitarnos la toma de datos experimentales.

6.- Bibliografía

- Abdel, G.Z., E.A. Atekwana, L.D. Slater, y E.A. Atekwana, 2004. Effects of microbial processes on electrolytic and interfacial electrical properties of unconsolidated sediments. *Geophys. Res. Lett.* 31, L12505, doi:10.1029/2004GL020030.
- Van Der Wal, A.M., W. Minor, A.J. Norde, B. Zehnder, y J. Lyklema, J. 1997. Conductivity and dielectric dispersion of gram-positive bacterial cells. *J. Colloid. Interface Sci.* 186, 71–79.
- García, J.; R. Mujeriego, J.M. Obis, y J. Bou, 2001 Wastewater treatment for small communities in Catalonia (Mediterranean region). *Water Policy.* 3(4), 341–350.
- Knowles, P., G. Dotro, J. Nivala, y J. Garcia, 2011. Clogging in subsurface-flow treatment wetlands: Occurrence and contributing factors. *Ecol. Eng.* 37(2), 99-112.
- Loke, M.H., y R.D. Barker, 1996. Rapid least-squares inversion of apparent resistivity pseudosections using a quasi-Newton method. *Geophys. Prosp.*, 44, 131–152.