



La importancia de la caracterización del medio geológico como buenas prácticas en la regeneración de aguas mediante tecnologías extensivas

Una decisiva *tarea previa*



En un filtro verde, el agua residual a tratar se aplica sobre un terreno con vegetación.

Por **I. BUSTAMANTE**. Doctora en Ciencias Geológicas por la Universidad Complutense de Madrid. Profesora titular de la Universidad de Alcalá de Henares. irene.bustamante@uah.es. **J. LILLO**. Doctor en Ciencias Geológicas por la Universidad de Leeds. Profesor titular de la Universidad Rey Juan Carlos. **A. DE MIGUEL**. Licenciado en Ciencias Ambientales. Estudiante PhD en iMdea Agua. **M. LEAL**. Licenciada en Ciencias Ambientales. Estudiante PhD en la Universidad Rey Juan Carlos.

La tecnología de filtros verdes se plantea como una alternativa eficaz para el tratamiento, gestión y reutilización de los efluentes líquidos procedentes de aglomeraciones urbanas de pequeño tamaño. Para su implantación se hace imprescindible un buen conocimiento del medio geológico que nos permita asegurar, por un lado, la protección del medio natural, específicamente las masas de agua subterránea, y por otro, la eficacia de su aplicación como tecnología de regeneración, en el contexto normativo actual. Para ello, se propone la metodología a seguir en las etapas iniciales de un proyecto de aplicación de filtro verde como tecnología de regeneración de aguas residuales. Como caso de demostración, se presentan los resultados preliminares obtenidos con la metodología de caracterización propuesta obtenidos en la parcela experimental del filtro verde que se va a instalar en la planta experimental de Carrión de los Céspedes (Sevilla).

España tiene unas tasas de explotación de agua (consumo anual/recursos) superiores al 30%, lo que nos convierte en el país europeo (excluidos Malta y Chipre) con mayor déficit hídrico.

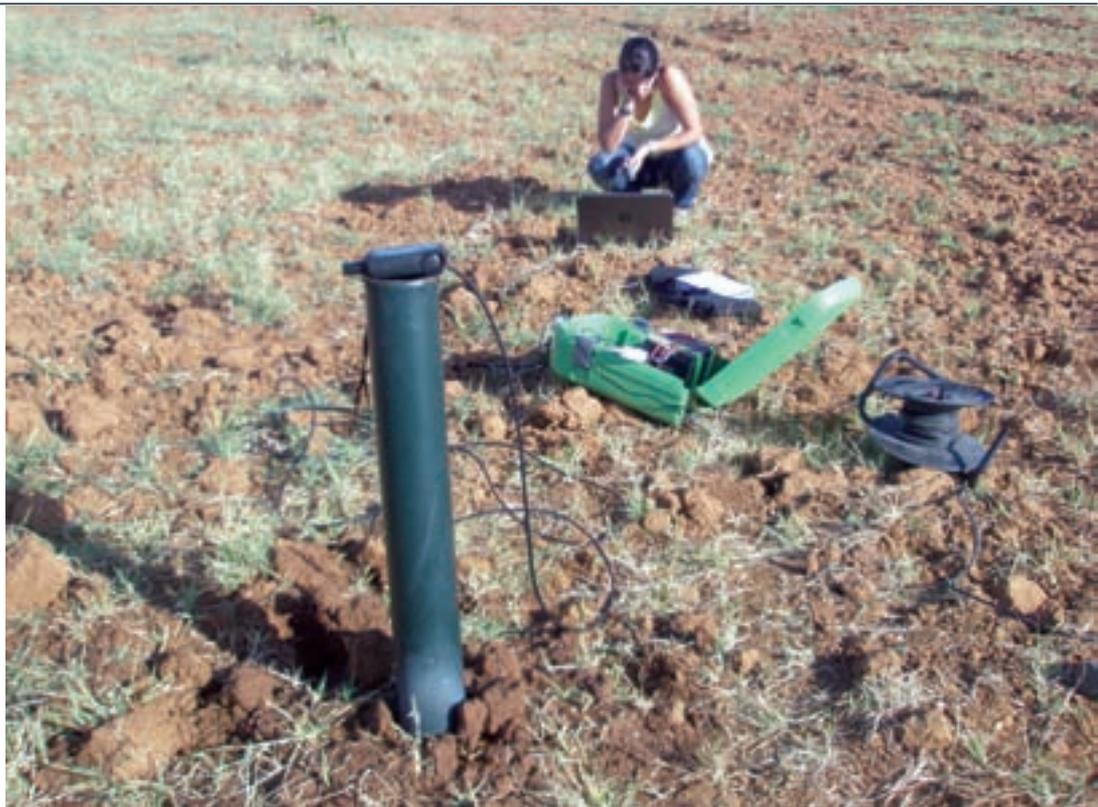
La escasez de agua en España es un tema sensible para un gran número de ciudadanos. Esta preocupación ha dado lugar a debates en los distintos ámbitos sociales sobre las soluciones posibles. A pesar de ello, a la reutilización del agua no se le ha dado la importancia que merece en ese debate, que se ha focalizado en alternativas costosas, tanto desde el punto de vista económico como de impacto ambiental. Sin embargo, la reutilización es una de las alternativas para la gestión y conservación del recurso hídrico que presenta mayores ventajas medioambientales, ya que no requiere un gran consumo energético y puede ser aplicada directamente en usos medioambientales, pudiendo llegar a competir económicamente con otras alternativas, sobre todo en el caso de las pequeñas poblaciones, que en España representan el 73% de los municipios. En definitiva, constituye un recurso no convencional que asegura la sostenibilidad, reduce la contaminación medioambiental y protege la salud pública. Por otro lado, este recurso hídrico alternativo representa una forma de conseguir que los recursos hídricos convencionales se puedan dedicar a cubrir aquellas demandas que exigen una calidad más elevada del agua.

Las aguas residuales urbanas, que incluyen entre otras las aguas domésticas, pluviales y algunas industriales, ejercen una gran presión contaminante sobre los sistemas acuáticos naturales, impacto que se puede reducir en función del tratamiento al que se sometan, y sobre todo si se reutilizan. Según datos del Instituto Nacional de Estadística, el volumen de agua residual recogido en 2007 fue de 5.204 Mm³, de los cuales únicamente se reutilizó un 11% (572 Mm³). Según el modelo desarrollado por Hochstrat, R. *et al.* [1] para determinar el potencial de reutilización de aguas, España tiene un potencial de 1.300 Mm³, un orden de magnitud superior a la realidad actual. Estas cifras de escasa reutilización son aún más significativas si se considera que en la Ley de Aguas de 1985 (art. 101), la modificación de la misma por la Ley 46/1999 (art. 101) y el texto refundido de la Ley de Aguas (Real Decreto Legislativo 1/2001, de 20 de julio, art.109), se señala que el Gobierno debe promocionar la reutilización de las aguas depuradas.

Las causas por las que no se ha realizado una apuesta decidida por la reutilización de las aguas residuales en España son muy variadas, desde las ya comentadas en relación con la percepción social, hasta causas técnicas o legales (el Real Decreto 1620/2007, por el que se establecen las condiciones básicas para la reutilización de las aguas depuradas, salió a la luz el 8 de diciembre de 2007).

Los filtros verdes, una tecnología emergente de regeneración y reutilización de aguas residuales

En materia de tratamiento de aguas residuales, las pequeñas aglomeraciones precisan actuaciones que compatibilicen las condiciones exigidas a los efluentes depurados con técnicas de fun-



Ensayos de infiltración en la parcela experimental de Carrión de los Céspedes.

cionamiento simple y con costes de explotación y mantenimiento que puedan ser realmente asumibles, y que a su vez requieran actuaciones de bajo impacto ambiental. Las tecnologías de depuración que reúnen estas características, que se conocían bajo el nombre genérico de tecnologías no convencionales, son denominadas en la actualidad tecnologías extensivas de depuración. La diferencia fundamental con las tecnologías de tratamientos convencionales (sedimentación, filtración, adsorción, precipitación química, intercambio iónico, degradación biológica, etc.) radica en que en las tecnologías extensivas no convencionales se opera a velocidad natural (sin aporte de energía), desarrollándose los procesos en un único reactor-sistema, compensándose el ahorro en energía con una mayor necesidad de superficie de aplicación.

En la actualidad, para el tratamiento de las aguas residuales urbanas de pequeñas poblaciones se recurre a la instalación de ambos tipos de tecnologías, convencionales y no convencionales. Si bien la realidad constata que ambas son

España tiene unas tasas de explotación de agua superiores al 30%, lo que nos convierte en el país europeo (excluidos Malta y Chipre) con mayor déficit hídrico

válidas para depurar los vertidos generados, también se evidencia que en los pequeños núcleos de población (por las ventajas ambientales y económicas anteriormente mencionadas) se debe dar prioridad a la elección de los sistemas de depuración de tecnologías robustas y de bajo coste de explotación y mantenimiento.

Dentro de las denominadas tecnologías extensivas se incluyen los sistemas de tratamiento de aguas residuales mediante aplicación al terreno, donde se emplea al suelo como elemento depurador. Los denominados filtros verdes quedan encuadrados en este tipo de tecno-

La reutilización es una de las alternativas para la gestión y conservación del recurso hídrico que presenta mayores ventajas medioambientales, pudiendo llegar a competir económicamente con otras alternativas

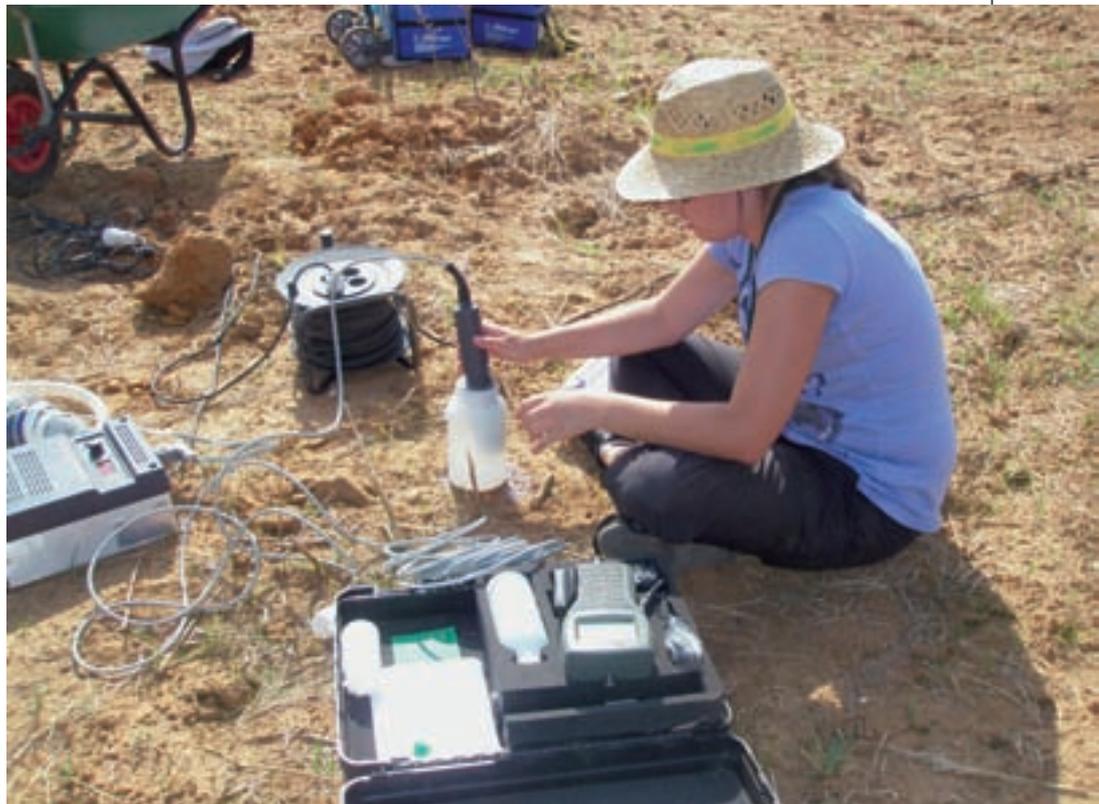
logías. Son procesos de baja carga hidráulica (volumen de agua aplicada por unidad de área de terreno en un determinado periodo de tiempo) donde el agua residual a tratar es aplicada sobre un terreno con vegetación, con lo que se consigue, de forma conjunta, la depuración de las aguas y el crecimiento de la vegetación implantada. Una fracción del agua aplicada al suelo se consume por evapotranspiración y la restante se infiltra a través del terreno, hasta llegar al acuífero. Con esta tecnología, las aguas residuales son reutilizables de forma inmediata para la producción de biomasa, y el sistema en conjunto puede ser considerado como una tecnología de depuración de las aguas que se infiltran en el terreno y se acaban incorporando a los acuíferos. Las bajas cargas que se aplican, así como la presencia de vegetación y del ecosistema asociado al suelo, contribuyen a que los sistemas de baja carga presenten los mayores rendimientos de depuración entre los diferentes sistemas existentes de aplicación al terreno.

En el contexto legal establecido por el RD 1620/2007, donde se define el concepto de aguas regeneradas como «aguas residuales depuradas que, en su caso, han sido sometidas a un proceso de tratamiento adicional o complementario que permite adecuar su calidad al uso al que se destinan», los filtros verdes también constituyen un sistema regenerador de aguas depuradas, ya que el agua infiltrada va a experimentar una mejora adicional de su calidad en su percolación a través del suelo. De esta manera, se puede considerar que esta tecnología no sólo constituye un método de reutilización de agua depura-

da para el riego de especies vegetales destinadas a otros fines distintos al consumo humano (cuadro 5, anexo I, RD 1620/2007), sino que también permite, a través de la infiltración de las aguas regeneradas, que se haga una reutilización de éstas para recarga de acuíferos por percolación localizada a través del terreno (cuadro 5, anexo I, RD 1620/2007). En definitiva, los filtros verdes son una tecnología de regeneración de aguas residuales que permite su reutilización en determinados usos ambientales según lo establecido por el RD 1620/2007, como son: a) recarga de acuíferos por percolación localizada a través del terreno y b) silvicultura.

Con la aplicación de filtros verdes se trata de utilizar una tecnología basada en procesos biogeoquímicos que permita la recarga de acuíferos por percolación, respetando la premisa fundamental de mantener la calidad del agua en el mismo. En este sentido, es importante reseñar que buena parte de los recursos hídricos que se utilizan actualmente proviene de las aguas subterráneas. Alrededor del 70 % de los municipios españoles y cerca de un millón de hectáreas de cultivos se abastecen con este tipo de recursos. Esto ha provocado que un porcentaje muy elevado de las masas de agua subterránea haya sido declarado en sobreexplotación, siendo muy difícil alcanzar su buen estado ecológico en las directrices que señala la Directiva Marco del Agua.

Por otra parte, la demanda creciente en el sector de los biocombustibles hace que la reutilización de aguas regeneradas pue-



Análisis *in situ* del terreno, uno de los pasos de la metodología propuesta.

da considerarse como una buena alternativa para el riego de cultivos, ya que este tipo de sistemas de filtros verdes proporciona una serie de ventajas adicionales, como son: a) el agua tratada representa una fuente constante y segura de agua, aún en periodos de sequía, b) es un aporte continuo de nutrientes (N, P, K y otros microelementos) para las plantas, lo que representa además un ahorro en gastos de fertilización, c) contribuye a la conservación de los recursos hídricos de mayor calidad para otros usos, y d) representa una posible reducción del coste económico del agua destinada a riego.

Justificación y objetivos de la caracterización del medio geológico como buena práctica en la aplicación de filtros verdes

Con la definición de buenas prácticas en la aplicación de la tecnología extensiva de filtros verdes se persigue establecer un conjunto de pautas que aseguren, por un lado, la protección del medio natural, específicamente las masas de agua subterránea, y por otro, la eficacia de su aplicación como tecnología de regeneración, en el contexto normativo actual.

Entre ese conjunto de buenas prácticas que se deberían seguir se incluyen varios aspectos que a su vez definen diferentes fases de trabajo:

- La caracterización del medio geológico.
- El diseño del filtro verde, incluyendo elección de especies vegetales.
- Ejecución e instalación del filtro verde.
- El control y monitorización de los efectos del riego y la eficiencia en la regeneración.
- El mantenimiento del filtro y las instalaciones de control.
- La evaluación de la tecnología (efectos en el medio y eficiencia).



Un momento del proceso de perforación y testificación.

- La corrección del diseño y las herramientas de control, si procede.

La necesidad de la caracterización del medio geológico deriva del hecho de que un filtro verde es un sistema donde se va a producir una interacción entre las aguas tratadas de riego y el conjunto suelo-roca-organismos. Precisamente esas interacciones son las que definen al sistema como un auténtico depurador natural, fundamento en el que se basa la utilización de esta tecnología en la regeneración de las aguas. Así, es necesario conocer cuáles son los factores y procesos que pueden intervenir, y el alcance y los efectos (negativos y positivos) de tales interacciones. Sólo de esa manera se puede desarrollar un diseño adecuado que permita alcanzar una mayor eficiencia, económica y ambiental, en la aplicación de la tecnología.

En el presente trabajo se propone la

En los filtros verdes se aplica agua residual sobre un terreno con vegetación para conseguir la depuración de las aguas y el crecimiento de la vegetación implantada

metodología a seguir en las etapas iniciales de un proyecto de aplicación de filtro verde como tecnología de regeneración de aguas residuales tratadas de origen urbano, en lo relativo a la caracterización del medio geológico (suelos, substrato litológico y aguas subterráneas) y a la instalación de herramientas de monitorización del mismo. Como caso de demostración, se presentan los re-



sultados preliminares obtenidos con la metodología de caracterización propuesta obtenidos en la parcela experimental del filtro verde que se va a instalar en la planta experimental de Carrión de los Céspedes (Sevilla).

Los objetivos que se plantean en la caracterización del medio geológico, definida como una buena práctica en la aplicación de la tecnología extensiva de filtros verdes, incluyen:

- La definición del estado original del medio antes de la aplicación del riego con aguas tratadas, lo que se conoce como «línea de base» o estado de referencia, que permita posteriormente hacer una evaluación correcta de los efectos de ese riego.
- La evaluación de los posibles efectos en el medio, una vez se aplique el riego con aguas tratadas, que permita hacer un diseño correcto del filtro verde.

Metodología propuesta para la caracterización del medio geológico

1. Caracterización de los suelos y las litologías (litoestratigrafía) del substrato

- Estudio geofísico de superficie mediante métodos indirectos (por ejemplo, georadar, tomografía eléctrica, etc.). Con él se puede conocer, mediante perfiles 2-D, la distribución espacial de los diferentes tipos de materiales en profundidad, así como la posición del nivel freático.
- Estudio en campo (sondeos y calicatas) del perfil edáfico. Estudio *de visu*. Identificación de estructuras, horizontes y clasificación del suelo. Se pretende conocer el alcance del *solum* en profundidad y la distribución de los horizontes que lo constituyen. Es fundamental para hacer una primera valoración agronómica y taxonómica del suelo, y para llevar a cabo el muestreo que permita caracterizar al suelo con mayor rigor.
- Estudio en campo (sondeos y afloramientos) de la litoestratigrafía. Estudio *de visu*. Identificación de tipos de litologías, cambios de facies y estructuras sedimentarias. De forma similar al estudio de campo de los suelos, en este estudio se determina la variación en profundidad de la naturaleza de los materiales, lo que permite el ajuste de los perfiles geofísicos a espesores y profundidades reales. Sirve, además, para identificar cambios laterales en la naturaleza de los materiales (cambios laterales de facies) y para llevar a cabo el muestreo que permita caracterizar las propiedades físicas y composicionales de los materiales.
- Análisis mineralógicos, sobre muestras en laboratorio. Se llevan a cabo sobre muestras litológicas y de suelos, y con ellos se determina la composi-

ción mineralógica de los diferentes materiales reconocidos. Se identifica la presencia y determina la composición química y textura de las fases minerales reactivas con el agua de riego en las condiciones de aplicación. Las técnicas a utilizar son complementarias entre sí.

- Difracción de rayos X.
- Microscopía óptica.
- Microscopía electrónica de barrido.
- Microanálisis (Energía dispersiva de rayos X).
- Análisis químicos, sobre muestras en laboratorio. También se llevan a cabo sobre muestras litológicas y de suelos, determinándose con ellos la composición química de los diferentes materiales.
 - Elementos mayores y trazas (por ejemplo, fluorescencia de rayos X y activación neutrónica instrumental).
 - Determinación de carbonato.
 - Determinación de carbono orgánico.
- Análisis de las propiedades físicas del material, sobre muestras en laboratorio. Como sucede en los casos de análisis mineralógicos y químicos, también se hacen sobre muestras litológicas y de suelos, y con ellos se determinan propiedades físicas relevantes para los procesos de interacción.
 - Textura (granulometría).
 - Densidad aparente y densidad real. Porosidad.
 - Capacidad de retención de agua.
- Análisis de las propiedades físico-químicas, sobre muestras en laboratorio. Aunque se plantean como imprescindibles en el caso de las muestras de suelos, dependiendo de la naturaleza de las litologías a estudiar, puede ser conveniente llevarlos a cabo también sobre muestras litológicas.
 - pH.
 - Conductividad.
 - Capacidad de intercambio catiónico.



Figura 1. Esquema de la planta de Carrión de los Céspedes y parcela de experimentación.

minantes (pesticidas, productos farmacéuticos, antisépticos y de cuidado personal).

- Determinación de parámetros físico-químicos. Incluye la determinación de parámetros en campo y en laboratorio: pH, conductividad, oxígeno disuelto, Eh, etc.
- Análisis biológicos de las aguas sub-superficiales. Incluye la determinación en laboratorio de nematodos intestinales y de *Escherichia coli*.

Resultados en el caso estudiado: la parcela experimental de la planta de Carrión de los Céspedes

Se ha estudiado una parcela situada en las inmediaciones de la población de Carrión de los Céspedes (Sevilla), anexa a la planta experimental de la Fundación Centro de Nuevas Tecnologías del Agua (PECC) (fig.1). Con una extensión aproximada de 6.000 m², la parcela presenta

- Determinación de porcentaje de bases y sodio intercambiable.

2. Caracterización hidrogeológica e hidroquímica

- Estudio de niveles piezométricos e identificación de flujos subterráneos principales. Requiere la actualización de los datos del inventario de pozos de la zona donde se va instalar el filtro, incluyendo la medida de niveles de éstos. Una vez actualizados, se procede a la elaboración del mapa piezométrico, identificando los flujos subterráneos principales que pueden afectar y verse afectados por la actuación.
- Análisis de la composición química de las aguas. Incluye la determinación de especies iónicas mayores, elementos minoritarios y los principales contaminantes emergentes y microconta-



Figura 2. a) Perforación de los sondeos; b) tubería ciega para entubar los sondeos; c) testigos de los sondeos; d) detalle de uno de los testigos.



Figura 3. Calicatas en la parcela de experimentación de la PECC. a) Perfil 1 (*Oxyaquic Xerofluvents*); b) Perfil 2 (*Calcic Haploxeralf*).

una suave pendiente hacia el sur, lindando hacia el NO con la PECC, al NE con campos de cultivo de cereales y hacia el sur con campos de olivares.

Para efectuar el estudio se han realizado 21 sondeos mecánicos por el método de rotación con recuperación de testigo, con un diámetro de perforación de 145 mm (fig. 2). Además, se han realizado dos calicatas de 2 metros de profundidad (fig. 3). Aprovechando las perforaciones, se han instalado 7 nidos de piezómetros, para obtener datos de niveles y muestras de aguas subterráneas. Cada nido está formado por tres piezómetros de 10, 6 y 2 m de profundidad, construidos con tubería de acero inoxidable de 65 mm de diámetro, con una zona filtrante de 1 m situada encima del final del sondeo, excepto en los piezómetros de 2 m, en los que la zona filtrante se sitúa entre el primer y segundo metro.

1. Caracterización de los suelos y las litologías (litoestratigrafía) del substrato

Los datos obtenidos sobre el terreno de la observación en las calicatas y de la

testificación de los sondeos y de su correlación, así como la información obtenida en los perfiles de tomografía eléctrica (fig. 4), permiten diferenciar un conjunto de materiales superficiales edáficos de espesor variable (entre 0,2 y 0,6 m) y tres conjuntos litológicos por debajo de ellos.

A partir del estudio *de visu* de las dos calicatas, se han podido caracterizar y clasificar dos perfiles edáficos (*Oxyaquic Xerofluvents* y *Calcic Haploxeralf*) (fig. 3), desarrollados sobre sedimentos aluviales recientes, sin apenas diferenciación edáfica entre horizontes. Los principales procesos de transformación que han tenido lugar son humificación, brunificación y gleificación, así como pro-

Los filtros verdes son una tecnología de regeneración de aguas residuales que permite su reutilización para la recarga de acuíferos por percolación localizada a través del terreno y la silvicultura

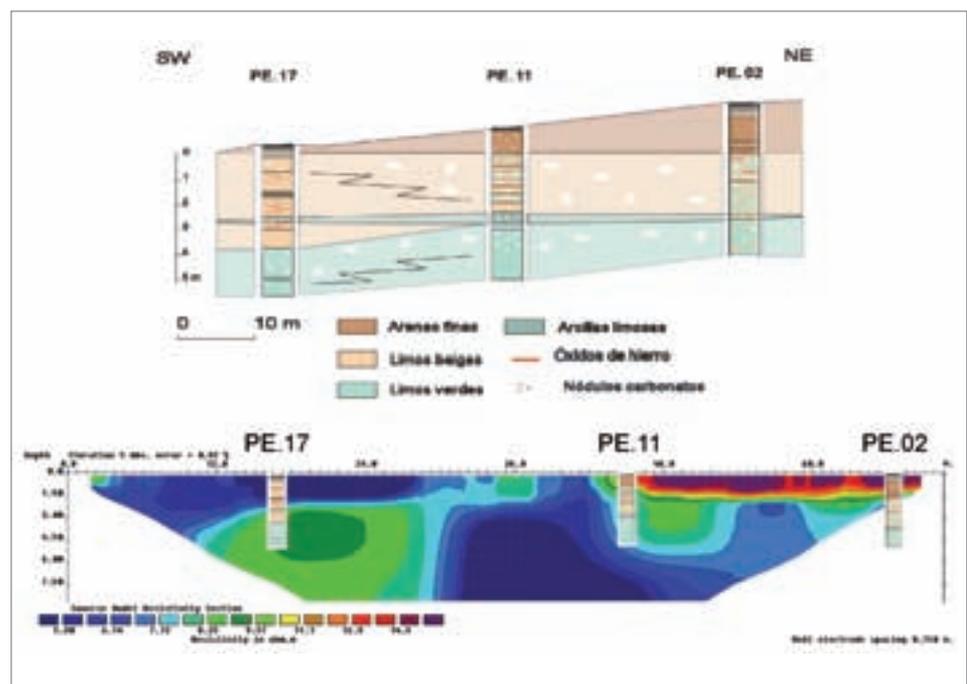


Figura 4. Perfil de resistividad (tomografía eléctrica vertical) representativo de la parcela, con las columnas litoestratigráficas de los sondeos.

Tabla 1. Propiedades físico-químicas de los suelos de la parcela de experimentación.

Perfil	Horizonte	Prof. (cm)	Arcilla (%)	pH	CE ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	CO (%)	CaCO ₃ (%)	M.O. (%)	NO ₃ ⁻ (mg/Kg)
<i>Oxyaquic Xerofluvents</i>	A1	0-23	59.77	8,29	2160	1,68	0,83	2.9	53
	AC	23-37	62.27	8,29	6460	1,15	0,71	1.98	23
	C1	37-90	64.05	8,63	2720	0,61	0,21	1.07	5
	C2	90-110	54.52	8,86	1570	0,59	0,62	1.02	4
	C3g	>110	52.05	8,79	1523	0,46	0,54	0.8	4
<i>Calcic Haploxeralf</i>	Ap1	0-14	54.42	7,75	738	1,21	0,21	2.09	29
	A2	14-32	57.01	8,17	740	0,96	3,32	1.65	10
	A3	32-50	59.07	8,26	724	0,52	0,33	0.89	10
	Bt1	50-63	74.02	8,22	1082	0,70	0,12	1.21	1
	Bt2	63-80	74.05	8,24	871	0,57	0,41	0.98	<1
	Bt3	80-109	68.79	7,83	2880	0,54	0,12	0.92	<1
	Bt4k	109-140	55.77	7,85	4780	0,50	10,37	0.86	<1

cesos de disolución y reprecipitación de carbonatos como nódulos, seudomicelios, rellenos, a diferentes profundidades de los perfiles.

Los procesos de adición se evidencian tanto por un incremento de materia orgánica (tabla 1), derivado de la presencia y actividad de la vegetación, como por pequeñas aportaciones aluvionares. Entre los procesos de transformación, destaca la humificación de restos vegetales (básicamente de los sistemas radiculares), responsable de que el suelo presente un contenido moderado a alto de materia orgánica hasta los 32-37 cm (tabla 1), muy por encima de los contenidos habituales de una tierra de labor, como consecuencia de que el suelo haya permanecido en barbecho durante varios años. En uno de los perfiles (*Oxyaquic Xerofluvents*) se han observado transformaciones ferríferas contrastadas, destacando la brunificación (condiciones oxidantes) en la mitad superior del perfil y la gleificación (condiciones reductoras) en la parte inferior del perfil, consecuencia directa de un drenaje del suelo impedido. El otro perfil estudiado (*Calcic Haploxeralf*) se caracteriza por la presencia de un horizonte de acumulación de arcilla (argílico) muy potente, en el que destaca su

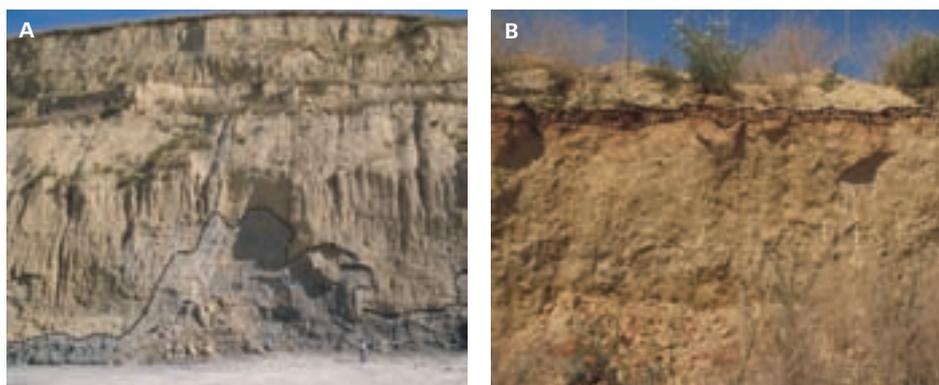


Figura 5. Puntos de observación para la caracterización geológica. a) Cantera de Castilleja de la Cuesta, con limos arcillosos en la parte superior (unidad principal) y margas en la parte inferior (unidad subyacente); b) Talud del polígono de Carrión de los Céspedes, con arenas finas y limos rojos en la zona superficial (unidad superior).

estructura prismática gruesa y el cambio abrupto en su límite superior, el cual representa un importante obstáculo para el desarrollo radicular. La conductividad hidráulica de este horizonte argílico es bastante baja, lo que dificulta el drenaje y provoca la formación de capas colgadas de agua que pueden llegar a aflorar ocasionalmente. A pesar de ello, en ese perfil no se han observado procesos de gleificación tan acusados como en el otro perfil.

La principal limitación del suelo estudiado de cara al cultivo es su drenaje deficiente y su bajo contenido en agua útil (capacidad de campo-punto de mar-

chitamiento), lo que exigirá que las dotaciones de riego sean bajas pero frecuentes.

Por debajo de los niveles edáficos se han reconocido tres unidades litoestratigráficas (fig. 5):

- **Unidad superior.** Arenas finas a muy finas, sueltas, de color marrón rojizo y de espesor variable (disminuye hacia el SW hasta desaparecer), con bajo contenido en agua. Profundidad máxima 1,5 – 2 m. Aparece en la mitad E y en la zona N de la parcela (figura 2). Materiales de mayor resistividad.
- **Unidad principal.** Limos arcillosos de color ocre a verde con abundantes nódulos

dulos y algunos niveles de precipitación de carbonatos, aspecto radicular. Sugiere origen paleoedáfico. En el extremo SW se ha desarrollado un suelo agrícola con abundante materia orgánica y algunos pequeños nódulos carbonatados. Espesor superior a 10 m.

■ **Unidad subyacente.** Se describe regionalmente la unidad de las margas azules. Arcillas calcáreas de color gris azulado. Presentan fósiles marinos (Mioceno superior: Tortoniense-Messinense). Muestran una inicial compactación. Materiales prácticamente impermeables y actúan como límite inferior de los acuíferos.

Como se refleja en la tabla 2, en todas las muestras se han identificado carbonatos (calcita), cuarzo y minerales de la arcilla (esmectita-montmorillonita, illita y caolinita) (fig. 6). Otros minerales frecuentes en las muestras son albita (plagioclasa sódica) y anortita (plagioclasa cálcica). También hay que destacar la presencia de halita en dos de las muestras, lo que podría explicar los altos valores de conductividad y de concentración de Na⁺ y Cl⁻ encontrados en los análisis hidroquímicos. Así, la composición mineralógica de los materiales estudiados es coherente con la composición hidroquímica de las aguas, como

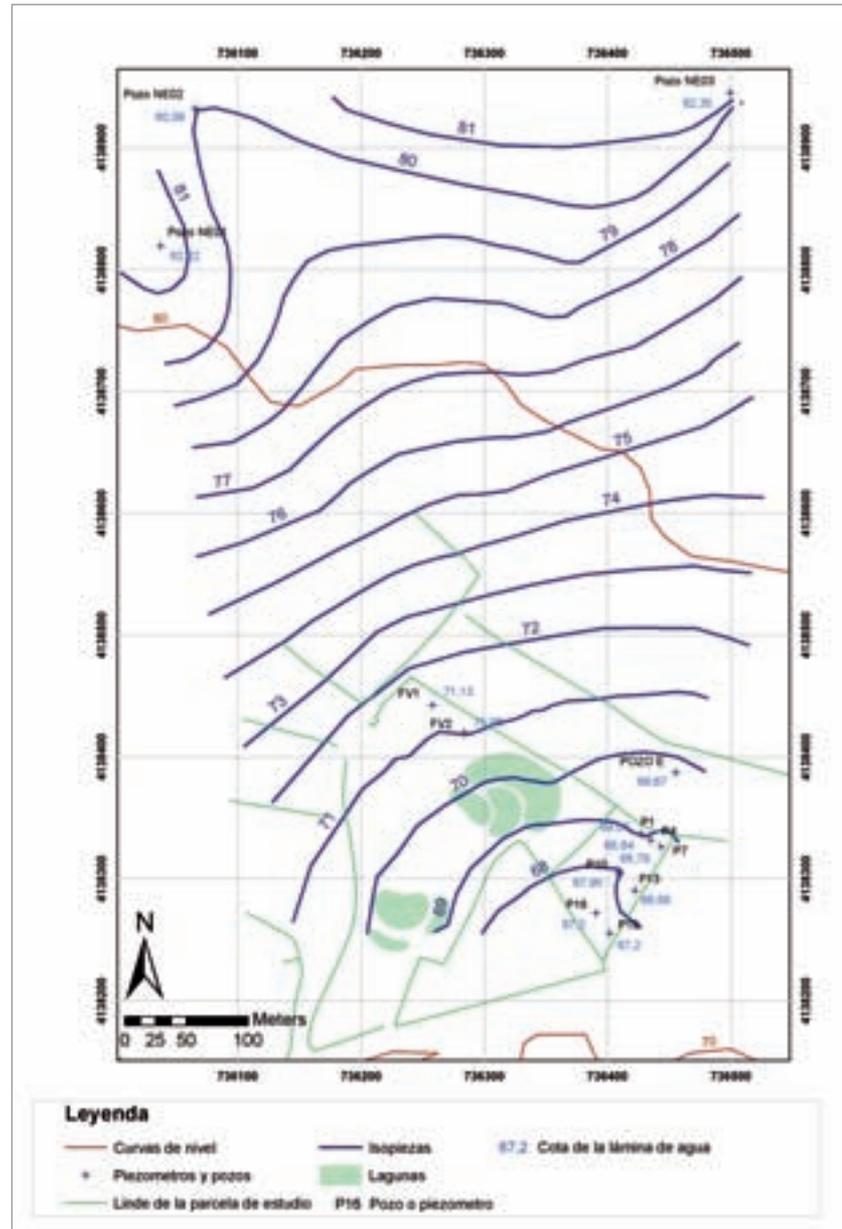


Figura 6. Límite superior de la zona saturada en el entorno de la PECC.

Tabla 2. Resumen de la mineralogía de la parcela de experimentación identificada mediante difracción de rayos X y microscopía electrónica de barrido ambiental.

	DRX	ESEM
Carbonatos	Calcita	Calcita
Tectosilicatos	Cuarzo	Cuarzo
	Albita	Albita
	Anortita	
Filosilicatos	Illita	Illita
	Montmorillonita	Montmorillonita
	Caolinita	Biotita
Haluros	Halita	

se expondrá más adelante. La presencia de otros minerales solubles, como la calcita, también tendrá una interacción notable (disolución) con el agua de riego y una aplicación prolongada del riego, con mantenimiento de condiciones de humedad en el suelo por encima de la capacidad de campo, y conducirá al lavado progresivo del carbonato de los horizontes superficiales. Por otra parte, los análisis mineralógicos ponen de manifiesto que el complejo de cambio en los materiales está constituido fundamentalmente por montmorillonita (arcilla

del grupo de las esmectitas), acumulada en los horizontes subsuperficiales (Bt del *Calcic Haploxeralf*). En el caso de estudio, aunque existe cierta acumulación de materia orgánica en los horizontes superficiales, las determinaciones de CIC señalan que, efectivamente, la CIC es mayor en dichos horizontes Bt que en el horizonte A. Sin embargo, el papel como agente depurador de la montmorillonita se ve reducido por el propio comportamiento de ésta como arcilla expansiva, lo que hace que se establezca un flujo de agua percolante (y con ello la interacción agua-fase mineral) restringido a las grietas de los agregados prismáticos.

2. Caracterización hidrogeológica e hidroquímica

La zona de estudio se ubica en la unidad hidrogeológica 05.51 Almonte-Marismas, formada por unos potentes depósitos detríticos, cuya base impermeable son las margas azules. Es un acuífero multicapa muy heterogéneo. La zona donde se encuentra la parcela está cons-



Parcela donde se ha instalado el filtro verde en Carrión de los Céspedes.

tituida fundamentalmente por materiales de baja permeabilidad (arenas, limos, arcillas y margas).

En la figura 7 se pueden apreciar las isolíneas del límite superior de la zona saturada (nivel freático) obtenidas a partir de la recopilación de datos de niveles, de las que se deducen las principales direcciones de flujo subterráneo en la zona, y cómo éste se concentra en el

Un porcentaje muy elevado de masas de agua subterránea ha sido declarado sobreexplotado, siendo muy difícil alcanzar su buen estado ecológico de acuerdo a la Directiva Marco del Agua

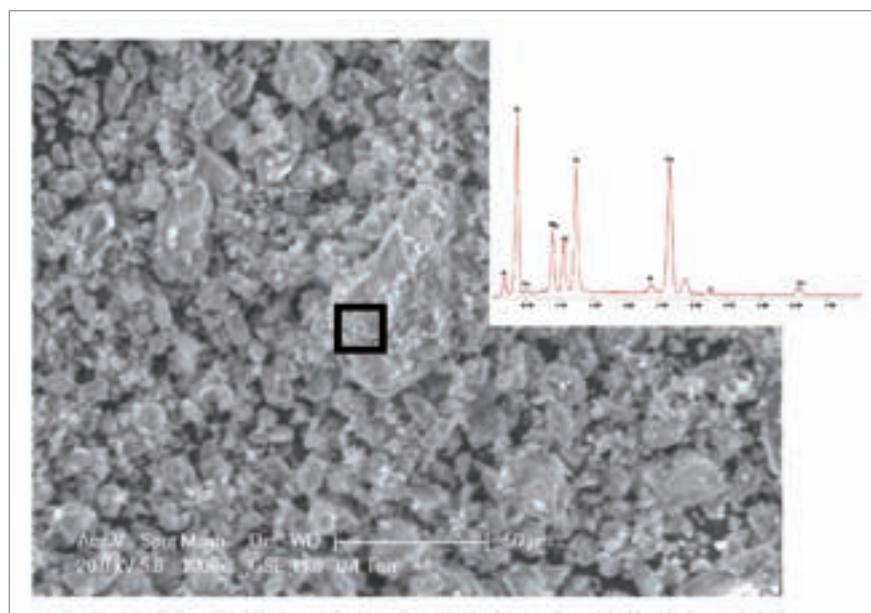


Figura 7. Imagen de microscopio electrónico de barrido (electrones retrodispersados) y microanálisis por energía dispersiva de rayos X de una partícula de arcilla.

límite sur de la parcela. Desde un punto de vista más restringido al ámbito de la parcela, hay que tener en cuenta que la presencia de niveles arcillosos puede determinar que localmente la percolación se encuentre impedida y haya un cierto predominio de flujos laterales.

Las aguas subterráneas analizadas son aguas cloruradas sódicas (fig. 8), con unas conductividades muy elevadas, de entre 8.000 y 12.000 microS/cm, debido principalmente al aporte de iones Na+ por parte de la fracción limosa del terreno. A priori no parece existir ningún tipo de contaminación de origen antrópico, y su composición viene derivada de la naturaleza de los materiales que contienen dichas aguas.

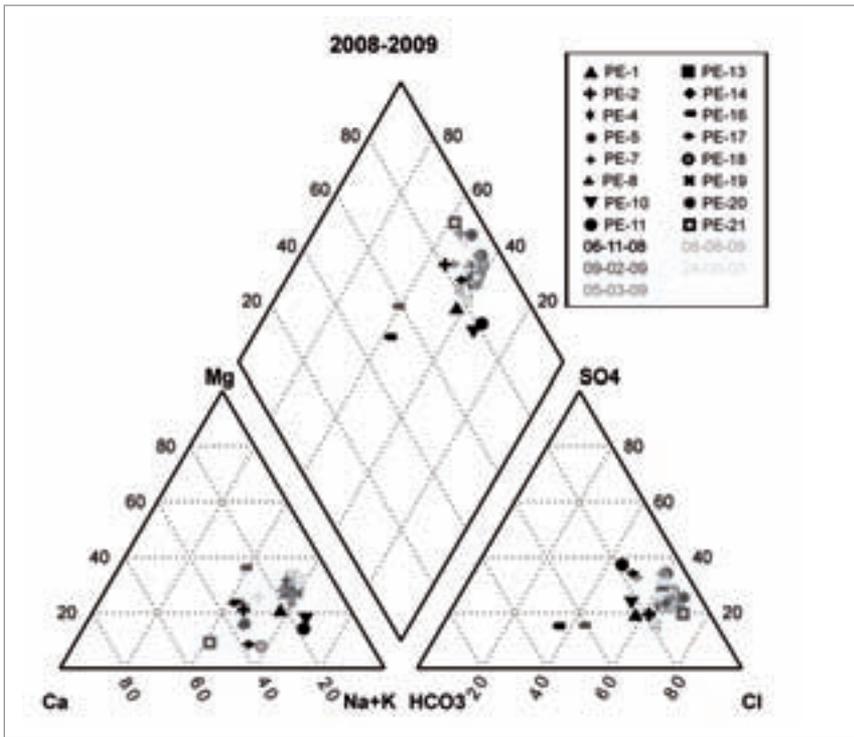


Figura 8. Diagrama de Piper de las muestras de agua analizadas.

En cuanto a los contaminantes emergentes, se han analizado más de 80 sustancias, encontrándose restos de nicotina (y sus derivados), cafeína y ácido salicílico. Esto hace pensar que estos compuestos son integrantes de una contaminación de fondo regional, y que una vez se comience a regar, su presencia no podrá ser asignada directamente al riego con aguas residuales tratadas. En este caso se interpreta que al ser compuestos utilizados durante mucho tiempo (más de un siglo en el caso del ácido salicílico y varios siglos en el caso de la nicotina y cafeína), han pasado a formar parte del sistema natural.

Conclusiones

La metodología propuesta para la caracterización del medio geológico incluye la aplicación de un conjunto de técnicas encaminadas a:

- La caracterización de los suelos y las litologías (litoestratigrafía) del subs-

trato (estudio geofísico de superficie mediante métodos indirectos, estudio edafológico y litoestratigráfico en afloramientos, calicatas y sondeos, análisis mineralógicos, análisis químicos y estudio de las propiedades físicas y fisicoquímicas del material).

- La caracterización hidrogeológica e hidroquímica de las aguas subterráneas (estudio de niveles piezométricos e identificación de flujos subterráneos principales, análisis de la composición química de las aguas, determinación de parámetros físico-químicos, análisis biológicos de las aguas subterráneas).

La caracterización del medio geológico es fundamental como buena práctica para desarrollar un diseño adecuado

La caracterización del medio geológico es fundamental para desarrollar un diseño adecuado y alcanzar una mayor eficiencia, económica y ambiental, en la aplicación de la tecnología de los filtros verdes



Tomografía eléctrica para conocer la distribución de materiales en profundidad y el nivel freático.

y alcanzar una mayor eficiencia, económica y ambiental, en la aplicación de la tecnología extensiva de filtros verdes, ya que con ello se establecen las bases para el diseño adecuado de estas aplicaciones del terreno, de forma que se asegure, por un lado, la protección del medio natural, específicamente las masas de agua subterránea, y por otro, la eficacia de su aplicación como tecnología de regeneración, en el contexto normativo actual. Los resultados preliminares obtenidos en el caso estudiado así lo confirman. ♦

Agradecimientos

Los autores agradecen a FUNDACIÓN MAPFRE la subvención concedida para la realización de este trabajo de investigación. También quieren expresar su agradecimiento a la Fundación iMdea agua, cuyo apoyo ha sido de gran importancia para el desarrollo del proyecto, tanto en lo que se refiere a uso de instalaciones y equipos como al personal involucrado en los trabajos. Igualmente agradecen la colaboración de la Fundación Centro de Nuevas Tecnologías del Agua (CENTA) y a su personal de la planta experimental de Carrión de los Céspedes por las facilidades dadas para llevar a cabo las tareas de campo e instalación de piezómetros en la parcela experimental. Gran parte de este trabajo se ha hecho en el marco del Programa Consolider-Tragua (Micinn) y no hubiera sido posible sin la intervención de los siguientes grupos participantes en el programa: R2 (Universidad

de Alcalá: Irene de Bustamante, José Francisco García-Hidalgo, Javier Gil, Pablo L. López, Irene Ortiz, Manuel Segura, José Antonio Iglesias, Ramón Arturo Bienes, Ángel de Miguel, Beatriz Carenas, Virtudes Martínez, Juan Ríos, Ana Berreteaga), R3 (Universidad Rey Juan Carlos: F. Javier Lillo, Álvaro Marqués, Francisco Carreño, David Gómez, Tomás Martín, Silvia Martín, María Leal, Raquel García) y TC10 (Universidad de Almería-CIEMAT: Amadeo Rodríguez, Ana Agüera, Pilar Fernández, María Dolores Hernando, Sixto Malato, Iván Muñoz, Milagros Mezcuca, Nikolaus Klammerth).

Para saber más

<http://www2.uah.es/filtrosverdes/>
<http://www.consolider-tragua.com/1280.htm>
<http://www.centa.es/index.php/seccion/pecc.html>

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Hochstrat, R.; Wintgens, T.; Melin, T.; Jeffrey, P. (2005). Wastewater reclamation and reuse in Europe: a model-based potential estimation. *Water Supply Vol 5 No 1* pp 67-75.
- [2] Salas Rodríguez, J. J.; Pídre Bocardo, J. R.; Fahd, K. (2007). Manual de tecnologías no convencionales para la depuración de aguas residuales: filtros de turba (Vol V). CENTA. Sevilla. 113 p.
- [3] De Bustamante, I.; Lillo, J.; Corvea, J.L.; Sanz, J.M.; Gómez, D.; Carreño, F.; Martín, T.; Iglesias, J.A.; Salas, J.J.; De Miguel, A.; Leal, M. (2009). Filtros verdes: un sistema sostenible de regeneración y reutilización de aguas depuradas. *Geociencias 2009*, en: *Geomorfología, Carso e Hidrogeología*. 9 pp.
- [4] De Bustamante, I.; Lillo, F.J.; Sanz, J.M.; De Miguel, A.; García, E.; Carreño, F.; Gómez, D.; Martín, T.; Martínez, F.; Corvea, J.L. (2009). A comparison of different methodologies for land application systems: application to reduce a's wwt. *Desalination and Water Treatment*. 4 (2009) 98-102.
- [5] Lillo, F.; Carreño, F.; Martín, T.; López, P.L.; De Bustamante, I. (2009). Using electrical resistivity tomography to evaluate the infiltration in land application systems. A case study in the Carrión de los Céspedes wastewater treatment plant. (Sevilla, Spain). *Desalination and Water Treatment*, 4 (2009) 111-115.
- [6] Cabrera, M.C.; De Bustamante, I.; Candela, L. (2009). Los trabajos del proyecto Consolider-Tragua: estudios de la afección a las aguas subterráneas por la reutilización de aguas regeneradas. En: *Contaminación y protección de los recursos hídricos*. Edit.: C.J. Schulz y M.C. Cabrera. Ref.: 1ª Ed. Buenos Aires: Asociación Civil Grupo Argentino de la AIH. Pp 13-22. ISBN 978-987-1082-40-7.
- [7] De Bustamante, I., Lillo, J., Segura, M., Iglesias, J.A., Gómez, D., Ortiz, I., Carreño, F., Bienes, R., Martín, T., Márquez, A., Gil, J., Martín, S., Carenas, B., Salas, J.J., De Miguel, A., Leal, M., Martín, I., García, R., Martínez, V. (2009). Adaptación de los filtros verdes: de estaciones depuradoras de agua (EDAR) a estaciones de regeneración y reutilización de aguas depuradas (ERRAD). <http://www.consolider-tragua.com/eventos/ADECA-GUA/COMUNICACIONES/R1-BUSTAMANTE.pdf>
- [8] Segura, M., Carenas, B., Gil, J., García-Hidalgo, F.J., De Bustamante, I., Lillo, J., Iglesias, J.A., Gómez, D., Ortiz, I., Carreño, F., Bienes, R., Martín-Crespo, T., Márquez, A., Martín-Velázquez, S., Salas, J.J., De Miguel, A., Leal, M., Martín, I., García, R., Martínez, V. (2009). Caracterización geológica y edafológica de la EDAR de Carrión de los Céspedes. www.consolider-tragua.com/documentos/ALICANTE/POSTERS/R/POSTER%20R2_R3_Aguas.pdf
- [9] De Bustamante, I., Lillo, J., Segura, M., Iglesias, J.A., Gómez-Ortiz, D., Ortiz-Bernard, I., Carreño, F., Bienes, R., Martín-Crespo, T., Márquez, A., Gil, J., Martín-Velázquez, S., Carenas, B., Salas, J.J., De Miguel, A., Leal, M., Martín, I., García-Pacheco, R., Martínez, V. (2009). Caracterización físico-química de las aguas subterráneas de Carrión de los Céspedes. www.consolider-tragua.com/documentos/ALICANTE/POSTERS/R/POSTER%20R2_R3_Aguas.pdf
- [10] Gómez, M.J.; Agüera, A.; Bueno, M.J.; Gómez, M.M.; Herrera, S.; Muñoz, I.; Fernández-Alba, A.R.; (2008). Caracterización química de las aguas residuales. metodología analítica y resultados. www.consolider-tragua.com/documentos/POSTERS/C/POSTER%20TC10-Monitoring.pdf

LEGISLACIÓN CONSULTADA

- [1] Real Decreto 1514/2009, de 2 de octubre, por el que se regula la protección de las aguas subterráneas contra la contaminación y el deterioro.
- [2] Real Decreto 1620/2007, de 7 de diciembre, por el que se establece el régimen jurídico de la reutilización de las aguas depuradas.
- [3] Real Decreto 907/2007 de 6 de julio, por el que se aprueba el Reglamento de la Planificación Hidrológica.
- [4] Directiva 2000/60/CE del Parlamento Europeo y del Consejo por la que se establece un marco comunitario de actuación en el ámbito de la política de aguas.
- [5] Real Decreto 2116/1998, de 2 de octubre, por el que se modifica el RD 509/1996, de 15 de marzo, de desarrollo del Real Decreto-Ley 11/1995, de 28 de diciembre, por el que se establecen las normas aplicables al tratamiento de las aguas residuales urbanas.
- [6] Real Decreto 509/1996, de 15 de marzo, de desarrollo del Real Decreto-Ley 11/1995, de 28 de diciembre, por el que se establecen las normas aplicables al tratamiento de las aguas residuales urbanas.
- [7] Real Decreto 261/1996, de 16 de febrero, sobre la protección de las aguas contra la contaminación producida por los nitratos procedentes de fuentes agrarias.
- [8] Real Decreto-Ley 11/1995, de 28 de diciembre, que establece normas aplicables al tratamiento de aguas residuales urbanas.
- [9] Directiva 91/676/CEE, de 12 de diciembre de 1991, relativa a la protección de las aguas contra la contaminación producida por nitratos utilizados en la agricultura.
- [10] Directiva 91/271/CEE, de 21 de mayo de 1991, sobre el tratamiento de las aguas residuales urbanas.

GLOSARIO

Acuífero. Una o más capas subterráneas de roca o de otros materiales geológicos que tienen la suficiente porosidad y permeabilidad para permitir un flujo significativo de aguas subterráneas y su extracción en cantidades significativas.

Agua regenerada. Según el R.D. 1620/2007, aguas residuales depuradas que, en su caso, han sido sometidas a un proceso de tratamiento adicional o complementario que permite adecuar su calidad al uso al que se destinan.

Aguas residuales urbanas. Según la Directiva 91/271/CEE, son las aguas residuales domésticas o la mezcla de las mismas con aguas residuales industriales y/o aguas de corriente pluvial.

Aguas subterráneas. Según la Directiva Marco del Agua (DMA), son todas las aguas que se encuentran bajo la superficie del suelo en la zona de saturación y en contacto directo con el suelo y el subsuelo.

Arcillas expansivas: Filosilicatos susceptibles de almacenar agua entre sus láminas dando lugar a un incremento del volumen o hinchamiento del material.

Brunificación. Proceso de enriquecimiento en hierro dando lugar a goethita o minerales ricos en hierro y otorgándole al suelo una coloración de tonos marrones o rojizos.

Calicata. Excavación o zanja que se practica en el terreno para el estudio de suelos y rocas o de la naturaleza del subsuelo. También se aplica a la exploración que se hace con labores mineras en el terreno.

Capacidad de campo. Cantidad de agua retenida por el suelo una vez drenada el agua gravífica (agua que fluye en el suelo por efecto de la gravedad).

Capacidad de intercambio catiónico. Propiedad de una partícula para retener cationes e intercambiarlos con los presentes en la fase líquida del suelo.

Carga hidráulica. Volumen de agua residual aplicado por unidad de superficie de terreno en un determinado periodo de tiempo.

Complejo de cambio. Conjunto de partículas con capacidad para adsorber moléculas polares e iones de las soluciones del suelo. Estos complejos están formados fundamentalmente por arcillas y materia orgánica.

Contaminación. La introducción directa o indirecta, como consecuencia de la actividad humana, de sustancias o calor a la atmósfera, el agua o el suelo, que puedan ser perjudiciales para la salud humana o para la calidad de los ecosistemas acuáticos, y que causen daños a los bienes materiales o deterioren o dificulten el disfrute y otros usos legítimos del medio ambiente.

Contaminación de las aguas. Según la Ley de Aguas (1985), es la acción y el efecto de introducir materias o formas de energía, o introducir condiciones en el agua que, de modo directo o indirecto, impliquen una alteración perjudicial de su calidad en relación con los usos posteriores o con su función ecológica.

Contaminantes emergentes. Contaminantes previamente desconocidos o no regulados pero que pueden ser candidatos a serlo en el futuro, cuya presencia en el medio ambiente no es necesariamente nueva, pero sí la preocupación por sus posibles consecuencias. Son fundamentalmente derivados de los productos de cuidado personal, de fármacos y de productos de limpieza. La mayoría de estos contaminantes no

son eliminados en las plantas convencionales de depuración de aguas residuales urbanas.

Edafología. Disciplina científica que estudia todos los aspectos relacionados con los suelos, entre los que se incluyen sus propiedades físicas y químicas, el papel de los organismos en el desarrollo del suelo, la descripción del suelo y el origen y la formación del mismo.

Filtro verde. Técnica de depuración no convencional, en la que se aplica periódicamente agua residual al terreno, con el fin de conseguir una depuración mediante la acción conjunta del suelo, los microorganismos y las plantas, a través de mecanismos físicos, químicos y biológicos. Se trata de un método de depuración apropiado para núcleos de población reducidos.

Geofísica. Disciplina que estudia la Tierra a partir del análisis cuantitativo de sus propiedades físicas.

Geología. Ciencia cuyo objeto es el estudio científico de la Tierra y su aplicación a la búsqueda de recursos naturales, reducción de efectos causados por desastres naturales y la preservación del medio ambiente.

Gleificación. Procesos que tienen lugar en medios saturados en agua en los que dominan condiciones reductoras y que favorecen la formación de óxidos de hierro ferroso.

Humificación. Conjunto de procesos responsables de la transformación de la materia orgánica en el suelo y la formación de sustancias húmicas.

Nivel piezométrico. Energía total por unidad de peso del agua subterránea en un punto de un acuífero. La energía total es igual a la suma de la energía potencial más la presión intersticial; la energía cinética puede despreciarse debi-

do a los valores de velocidad bajos habituales en las aguas subterráneas. Se mide en unidades de longitud y es igual a la cota que tendría el agua en un pozo perforado en ese punto.

Piezómetro. Sondeo de pequeño diámetro especialmente construido para medir el nivel del agua subterránea, y que se utiliza también para el muestreo de ésta.

Punto de marchitamiento. Cantidad de agua o grado de humedad que hay en un suelo cuando la fuerza de succión de las plantas es inferior a la de retención del agua en suelo, y por tanto, las plantas son incapaces de extraer agua.

Suelo. Es la capa superior de la superficie terrestre, formada por partículas sólidas (roca y minerales mezclados con materia orgánica transformada), líquidos y gases. Se caracteriza por tener horizontes o capas diferenciadas del material original como resultado de adiciones, pérdidas, transferencias y transformaciones de energía y materia.

Tecnologías extensivas para la regeneración de aguas. Técnicas de regeneración de aguas residuales basadas en actuaciones de bajo impacto ambiental con grandes requerimientos de terreno, logrando una disminución de la carga contaminante con costes de operación inferiores a los de los tratamientos convencionales.

Zona saturada. Parte del subsuelo localizada por debajo del nivel freático donde todos los poros, fisuras y cavidades de los materiales que la constituyen están saturados de agua.

Zona no saturada. En general, parte del subsuelo situada por encima del nivel freático, parcialmente saturada en agua, con aire en los poros.