

ADAPTACIÓN DE LOS FILTROS VERDES: DE ESTACIONES DEPURADORAS DE AGUA (EDAR) A ESTACIONES DE REGENERACIÓN Y REUTILIZACIÓN DE AGUAS DEPURADAS (ERRAD)

de Bustamante Gutiérrez, I.⁽¹⁾, Lillo Ramos, J.⁽²⁾, Segura Redondo⁽³⁾, M., Iglesias Martín, J.A.⁽⁴⁾, Gómez Ortiz, D.⁽⁵⁾, Ortiz Bernar, I.⁽⁶⁾, Carreño Conde, F.⁽⁷⁾, Bienes Allas, R.⁽⁸⁾, Martín Crespo, T.⁽⁹⁾, Marquez González, A.⁽¹⁰⁾, Gil Gil, J.⁽¹¹⁾, Martín Velázquez, S.⁽¹²⁾, Carenas Fernández, B.⁽¹³⁾, Salas Rodríguez, J.J.⁽¹⁴⁾, de Miguel García, A.⁽¹⁵⁾, Leal Meca, M.⁽¹⁶⁾, Martín García, I.⁽¹⁷⁾, García Pacheco, R.⁽¹⁸⁾, Martínez Hernández, V.⁽¹⁹⁾

⁽¹⁾ Universidad de Alcalá. Departamento de Geología. Edificio Ciencias. 28871 Alcalá de Henares (Madrid). irene.bustamante@uah.es; ⁽³⁾ manuel.segura@uah.es; ⁽⁶⁾ irene.ortizbernad@uah.es; ⁽⁸⁾ ramon.bienes@madrid.org; ⁽¹¹⁾ javier.gil@uah.es;

⁽²⁾ Universidad Rey Juan Carlos. Departamento de Biología y Geología. Calle Tulipán s/n. 28933 Móstoles (Madrid). javier.lillo@urjc.es; ⁽⁵⁾ david.gomez@urjc.es; ⁽⁷⁾ francisco.carreno@urjc.es; ⁽⁹⁾ tomas.martin@urjc.es; ⁽¹⁰⁾ alvaro.marquez@urjc.es; ⁽¹²⁾ silvia.martin@urjc.es; ⁽¹⁶⁾ maria.leal@urjc.es; ⁽¹⁸⁾ raquel.pacheco@urjc.es;

⁽⁴⁾ Canal de Isabel II. Calle Santa Engracia 125. 28003 (Madrid) jaiglesias@cyii.es

⁽¹³⁾ Universidad Autónoma de Madrid. Departamento de Geología y Geoquímica. Edificio Ciencias. Campus Cantoblanco. 28049 Madrid. beatriz.carenas@uam.es

⁽¹⁴⁾ Centro de las Nuevas Tecnologías del Agua (CENTA). Planta Experimental de Carrión de los Céspedes. Autovía Sevilla-Huelva, Km 28. 41820 Carrión de los Céspedes (Sevilla). jjsalas@centa.org.es; ⁽¹⁷⁾ imartin@centa.org.es

⁽¹⁵⁾ Fundación IMDEA Agua. Calle Punto Net nº 4. Edificio ZYE 2ª Planta. Parque Científico Tecnológico de la Universidad de Alcalá. 28805 Alcalá de Henares (Madrid) angel.demiguel@imdea.org; ⁽¹⁹⁾ virtudes.martinez@imdea.org

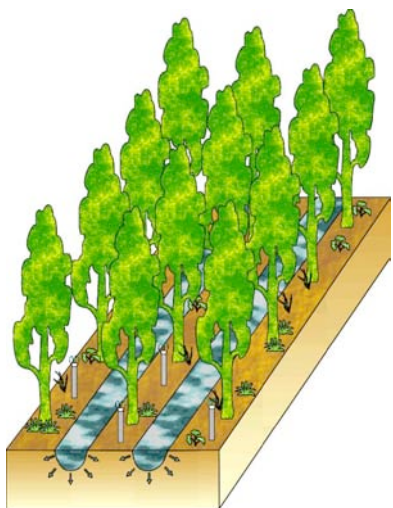
RESUMEN

La escasez de agua en el mundo es un preocupación a nivel global. La reutilización de aguas es una alternativa medioambiental necesaria pues evita un gran consumo energético y el impacto ambiental directo, y es una buena solución para el riego de especies vegetales destinadas a otros fines distintos a los del consumo humano. Los filtros verdes, constituyen una técnica de aplicación de aguas depuradas en riegos de masas forestales para su regeneración y la obtención de biomasa.

Esta técnica proporciona una serie de ventajas: 1) el agua tratada representa una fuente constante y segura de agua aún en periodos de sequía, 2) contribuye a la conservación de los recursos hídricos y 3) representa una posible reducción del coste económico del agua destinada a riego.

La reutilización constituye un recurso alternativo que asegura la sostenibilidad, reduce la contaminación medioambiental y protege la salud pública. Además, este recurso hídrico alternativo representa una forma de conseguir que los recursos convencionales se puedan dedicar a cubrir aquellas demandas que exigen una calidad más elevada del agua.

En este trabajo se expone la metodología que se está aplicando para utilizar los filtros verdes como estaciones de regeneración y reutilización de aguas depuradas para la obtención de biomasa y recarga de acuíferos por infiltración a través del terreno, atendiendo a las exigencias del RD 1620/2007.



1. INTRODUCCIÓN

Hasta el año 2007, en el que en España entra en vigor el Real Decreto 1620/2007 de 7 de diciembre, por el que se establecen las condiciones básicas para la reutilización de las aguas regeneradas, los filtros verdes se utilizaban como tecnologías de depuración de aguas residuales en pequeñas comunidades (BOE, 2007). A partir de este momento, hay que modificarlos para utilizarlos como estaciones de regeneración de aguas depuradas.

Un filtro verde (figura 1) es una parcela o parcelas, dimensionadas en función del caudal a tratar (De Bustamante *et al.*, 2001 y 2009), donde se instala vegetación arbórea, que se riegan con el agua residual. El agua aplicada se evapora

parcialmente, y el resto es captada por las raíces de los árboles y filtrada o no (dependiendo de los criterios de diseño) a través del suelo.

El tratamiento (actualmente regeneración), se produce mediante la acción conjunta del suelo, los microorganismos y las plantas, a través de mecanismos físicos, químicos y biológicos (Navarro, 1978 y 1987; Nicolás y Fernández, 1984; Metcalf-Eddy, 1985; De Bustamante *et al.*, 1998; Palazzo y Jenkins, 1979).

Los principales procesos que actúan en los filtros verdes y que contribuyen a la regeneración del agua aplicada son: 1) eliminación de sólidos en suspensión (se separan por decantación y sobre todo por fenómenos de filtración a través del conjunto que forma el substrato con los rizomas y raíces. La filtración depende de la granulometría y textura del suelo); 2) eliminación de materia orgánica (realizada por microorganismos, que en un sistema forestal tienen un desarrollo y una actividad muy elevados); 3) eliminación del nitrógeno (las reacciones bioquímicas primarias relacionadas con el ciclo del nitrógeno en el terreno comprenden la nitrificación, desnitrificación y la mineralización); 4) eliminación del fósforo (por absorción por parte de las plantas; por fenómenos de adsorción sobre partículas de arcilla, partículas orgánicas y compuestos de aluminio y hierro; y por fenómenos de precipitación de fosfatos insolubles); 5) eliminación de azufre (bajo condiciones aeróbicas las reacciones microbianas pueden llevar a la mineralización de los sulfatos orgánicos y a la oxidación de los sulfuros metálicos y del SH_2 a SO_4^{2-}); 6) eliminación de otros iones inorgánicos (la comunidad microbiana del suelo proporciona diversos mecanismos para la eliminación de compuestos inorgánicos, siendo el más importante aquel que promueve la movilidad de los iones y los hace asimilables por las plantas); 7) eliminación de microorganismos patógenos (por filtración y adsorción en partículas de arcilla, toxicidad por antibióticos producidos por las raíces y la acción depredadora de otros organismos bacteriófagos y protozoos).

Las ventajas que presenta este tipo de instalación son la regeneración del agua depurada, la producción maderera, la reutilización del recurso (en riegos y recarga de acuíferos) y, además, producen un impacto visual positivo.

2. OBJETIVOS

En este trabajo se presenta la metodología que se está aplicando en una parcela en la Planta Experimental de Carrión de los Céspedes (Sevilla), para utilizar los filtros verdes como estaciones de regeneración y reutilización de aguas depuradas para la obtención de biomasa y recarga de acuíferos mediante infiltración a través del terreno, con el fin de valorizar el recurso hídrico “agua regenerada”. Se presentan los primeros resultados sobre el medio físico y la caracterización fisicoquímica de las aguas subterráneas.

3. RESULTADOS

En Carrión de los Céspedes (Sevilla), la Junta de Andalucía, a través de la Consejería de Medio Ambiente, tiene instalada una planta experimental (PECC) de tratamiento de depuración en pequeñas comunidades. En una superficie de 35.000 m² se ensayan distintas técnicas intensivas y extensivas de tratamiento, así como combinaciones entre los mismos.

Para la realización de este proyecto, se ha acondicionado una parcela de 6.000 m² anexa a la PECC (figura 2), en la que se va a instalar dos barreras reactivas y 4 parcelas de cultivo (2 regadas con aguas depuradas y 2 con las mismas especies regadas con agua de pozo, para utilizar como parcelas de referencia). En las parcelas de cultivo se va a plantar: *Eucalyptus camaldulensis* y *Sorghum bicolor*

sudanensis. La calidad del agua a utilizar es la fijada en los puntos 5.1 (a) y 5.3 (a) del anexo 1.a del Real Decreto 1620/2007. En las barreras reactivas horizontales, se va a ensayar con distintos materiales (turbas, arcillas, hierro cerivalente, etc.), con el fin de producir aguas regeneradas que cumplan no sólo los criterios de calidad establecidos en el RD1620/2007, sino que, aplicando unos criterios más restrictivos de protección ambiental, además sean capaces de retener (en la medida de lo posible) contaminantes prioritarios y emergentes.



Figura 2. Esquema de situación de la PECC y de la parcela de experimentación.

También se han instalado 7 nidos de piezómetros (figura 3), con el fin de llevar a cabo el control de la recarga en las balsas y en las parcelas de riego. Cada nido de piezómetros está formado por tres unidades, de profundidad 10, 6 y 2 m. Se perforaron por el método de rotación con recuperación de testigo (figura 4), con un diámetro de perforación de 145 mm, entubándose con tubería ciega de acero inoxidable de diámetro de 65 mm (figura 5) y tubería filtrante de acero inoxidable ranurada de 65 mm. La zona filtrante en cada sondeo tiene una longitud de 1 m, colocándose un metro por encima del final del sondeo; salvo en los sondeos de 2 m de profundidad en los que la zona filtrante se sitúa entre el metro 1 y 2. El espacio anular se rellenó con grava silíceo de diámetro 1-2 mm desde el final del sondeo hasta un metro por encima del comienzo de la tubería filtrante (figura 6). A continuación se coloca un tapón de bentonita de un metro de espesor, formado con pelets de bentonita y desde ahí hasta la boca del sondeo se rellena de grava más gruesa de 5 mm de diámetro.



Figura 3. Nido de piezómetros



Figura 4. Perforación



Figura 5. Tubería ciega de acero inoxidable

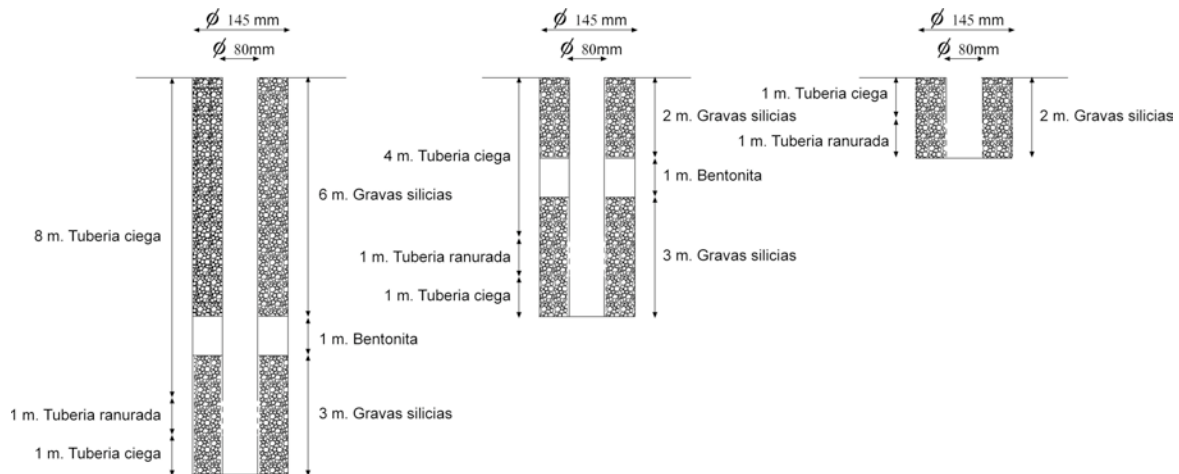


Figura 6. Esquema de los sondeos de 10 m, 6 m y 2 m

De estas perforaciones se han obtenido testigos continuos de muestra inalterada, de los que se ha levantado las correspondientes columnas estratigráficas y se están realizando análisis texturales, de humedad, densidad y fisicoquímicos. Adicionalmente se han realizado, dos calicatas con levantamiento de perfiles edáficos, de los que se están realizando las correspondientes analíticas.

3.1. Caracterización geológica

La parcela estudiada presenta una suave pendiente hacia el sur, lindando hacia el NW con la PECC, al NE con campos de cultivo de cereales y hacia el S con campos de olivares. Los datos obtenidos sobre el terreno de la observación en las calicatas y, de la testificación de los sondeos y de su correlación (figura 7), permiten diferenciar tres conjuntos litológicos, por debajo de un suelo edáfico de espesor variable (entre 0,2 y 0,6 m):

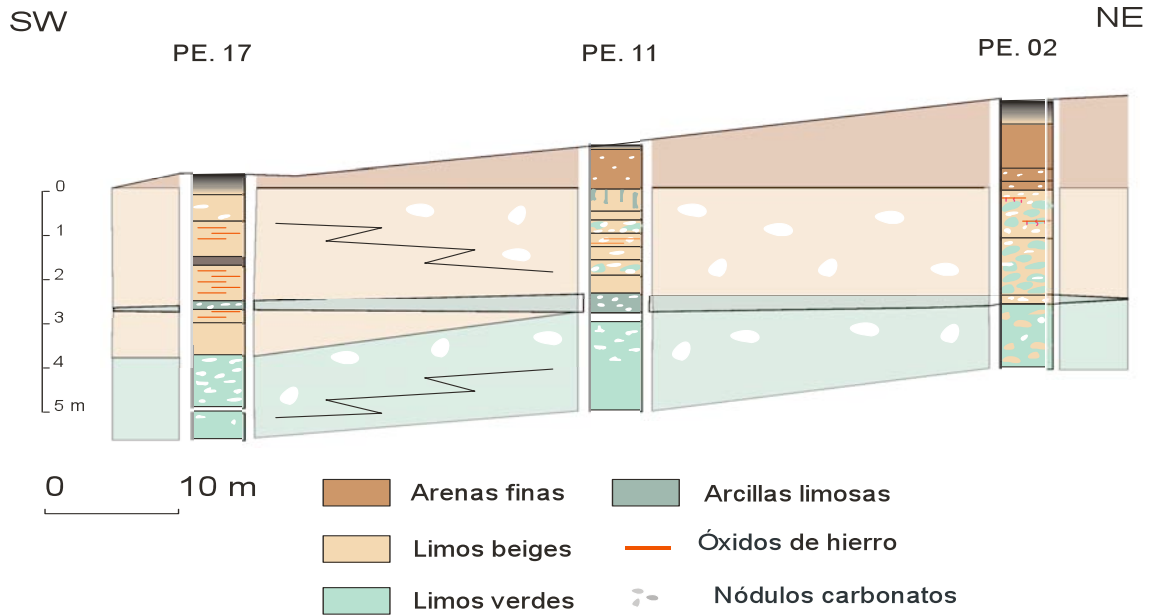


Figura 7. Sección estratigráfica a partir de los sondeos , mostrando las unidades litoestratigráficas y los cambios de facies.

- Unidad superior, formada por arenas finas a muy finas, sueltas, de color marrón rojizo y espesor variable (a la izquierda en la figura 8). Esta unidad solo aparece en la mitad E y en la zona N de la parcela, donde alcanza más de dos metros. Su espesor disminuye hacia el SW hasta desaparecer.
- Unidad intermedia, formada por limos y arenas muy finas de colores beige, localmente manchas ocre. Contienen concentraciones de carbonatos de aspecto radicular o formando nódulos que pueden llegar a ser muy abundantes en algunas zonas (a la derecha en la figura 8). Su espesor oscila entre 2 y 4 m.
- Unidad inferior, también formada por limos arcillosos y arenas muy finas de colores verdosos, con abundantes nódulos de carbonatos semejantes a los del tramo anterior (figura 9) en la parte superior. La concentración de carbonatos es tal según zonas, que puede llegar a formar niveles de hasta 5 - 10 cm. Estos nódulos no se observan por debajo de los 5 m de profundidad, haciéndose la roca de color acusadamente más verdosa.

A una profundidad de unos 3 m, casi entre ambos tramos se reconoce un tramo de limos arcillosos de color verde eléctrico con una gran concentración de carbonatos y disposición lenticular.



Figura 8. Detalle del testigo PE-11 de la unidad superior y de la unidad intermedia.



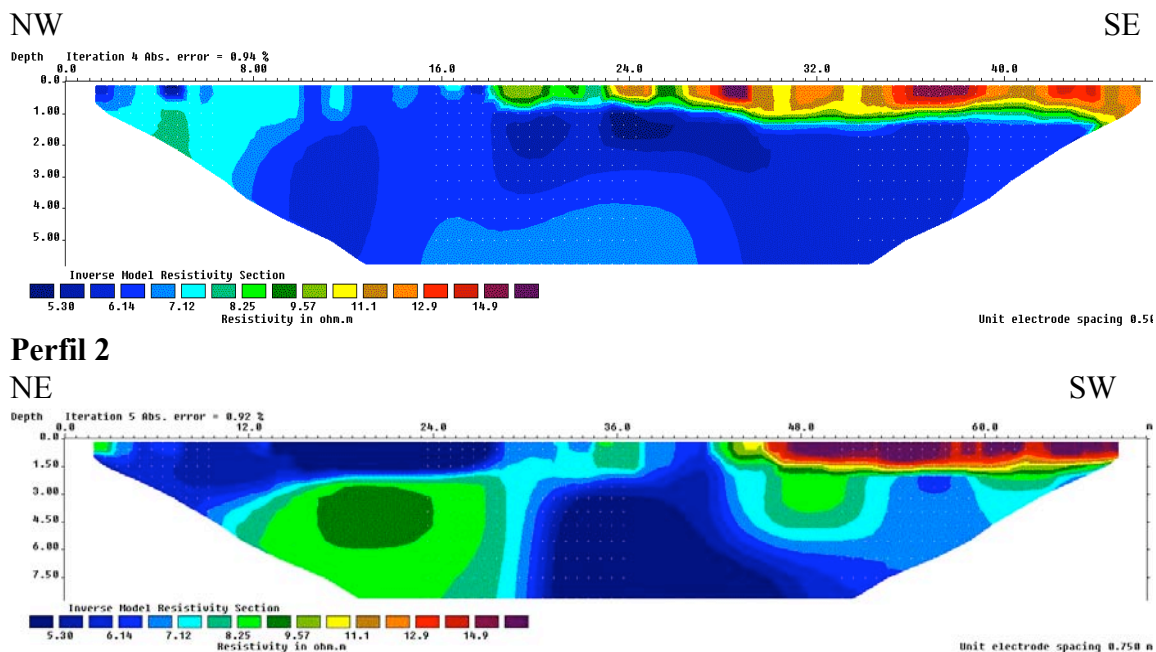
Figura 9. Detalle del testigo PE-11 de la unidad inferior.

No existen diferencias de composición apreciables entre los dos tramos inferiores, por lo que deben ser considerados como parte de una misma unidad litológica, e interpretados como los “limos arenoso-calcareos amarillos” descritos en esta zona y atribuidos al Andaluciense (Leiva y Copeiro del Villar, 1976). Unos metros por debajo de la zona sondeada están las margas azules de edad Tortonense, materiales que se caracterizan por su baja permeabilidad.

Las arenas finas que afloran al techo en la mitad norte y oriental de la parcela pueden observarse detalladamente en un talud abierto en el Polígono industrial situado al este de esta parcela, donde se comprueba que descansan suavemente discordantes sobre los limos arenoso-calcareos amarillos con una pendiente deposicional de unos 5°-10°. De acuerdo con los estudios regionales (Leiva y Copeiro del Villar, 1976), estas arenas deberían ser atribuidas al Plio-Cuaternario. Son materiales muy edafizados y removidos ya que son de interés para la agricultura local.

La ausencia en la parte sur de la parcela de materiales Plio-Cuaternarios, se debe a la erosión del arroyo Alcarayón.

Se han realizado 5 perfiles de tomografía eléctrica, 3 de ellos transversales a la parcela y 2 de ellos longitudinales (figura 10). Los resultados obtenidos han permitido determinar variaciones texturales y de contenido en agua del terreno, tanto en la horizontal como en la vertical. Así, se observa que aparece una unidad superior (hasta 1,5-2 m de profundidad) claramente delimitada en la mitad SE, más resistiva, que corresponde con limos arenosos con menos agua, mientras los materiales más superficiales de la mitad norte corresponderían a arenas arcillosas con mayor contenido en agua. Esta disposición parece invertirse en profundidad por debajo de los 2 primeros m, ya que en la mitad norte aparecen materiales más resistivos que en la mitad sur, hecho que estaría relacionado con variaciones texturales del material (p.e. un carácter más arcilloso) que determinarían a su vez variaciones en el contenido en agua (figura). Un esquema similar se obtiene en el caso de los perfiles de orientación E-O, en cuyo caso los materiales superficiales más resistivos aparecen en la mitad E del perfil.



Perfil 5
 Figura 10. Perfiles de resistividad (Tomografía eléctrica vertical) representativos de la parcela de experimentación.

3.2. Caracterización edafológica

Para el estudio de los suelos presentes en la parcela de ensayo se ha procedido a la apertura y descripción de dos calicatas (figura 11: Perfiles Carrión1 y Carrión 2). Se trata de dos suelos muy diferentes con grados de evolución y limitaciones distintas.

3.2.1. Perfil CARRIÓN 1 (figura 12)

El suelo se ha desarrollado sobre sedimentos aluviales recientes, sin apenas diferenciación edáfica entre horizontes. Los procesos de adición se evidencian tanto por un incremento de materia orgánica, derivado de la presencia y actividad de la vegetación, como de aportaciones de materiales al suelo derivadas de procesos de aluvión y sedimentación de materiales procedentes de la erosión. Entre los procesos de transformación, destaca la *humificación* de restos vegetales (básicamente de los sistemas radiculares) responsable de que se haya generado un epipedón notablemente más oscuro que el resto del perfil del suelo. Simultáneamente a este proceso, han tenido lugar transformaciones férricas, destacando la *brunificación* en la mitad superior del perfil y la *gleificación* en la parte inferior del perfil, consecuencia directa de un drenaje del suelo impedido que provoca que el hierro sufra un proceso de reducción. En la parte media del perfil, en donde alternan momentos que imperan condiciones aerobias con otros en que

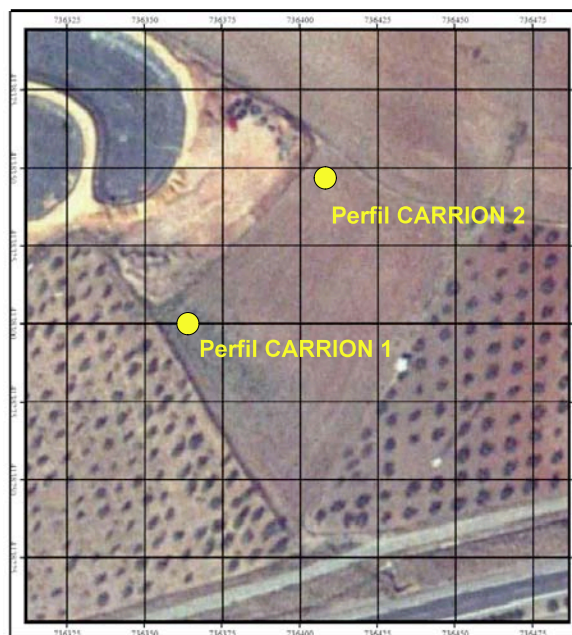


Figura 11. Localización de los perfiles de suelo

Simultáneamente a este proceso, han tenido lugar transformaciones férricas, destacando la *brunificación* en la mitad superior del perfil y la *gleificación* en la parte inferior del perfil, consecuencia directa de un drenaje del suelo impedido que provoca que el hierro sufra un proceso de reducción. En la parte media del perfil, en donde alternan momentos que imperan condiciones aerobias con otros en que



Figura 12: Perfil CARRION 1

campo – punto de marchitamiento), lo que exigirá que las dotaciones de riego sean bajas pero frecuentes.

3.2.2. Perfil CARRIÓN 2 (figura 13)



Figura 13: Perfil CARRIÓN 2 con marcada diferenciación de horizontes. Destacan los procesos de iluviación y calcificación.

predominan condiciones anaerobias, puede observarse moteados rojizos (formas férricas) alternando con otros grises o negros (formas ferrosas).

Este suelo presenta una profundidad efectiva suficiente para la mayoría de los cultivos herbáceos y un contenido moderado a alto de materia orgánica hasta los 37 cm, muy por encima de los contenidos habituales de una tierra de labor. Ello es consecuencia de haber estado de pastizal (inculta) durante muchísimos años, siendo los sistemas radiculares de las herbáceas los que han aportado la mayor parte de esta materia orgánica al suelo.

La principal limitación de este suelo de cara al cultivo es su drenaje deficiente y su bajo contenido en agua útil (capacidad de

Este suelo se ha desarrollado sobre materiales aluviales de una terraza media. En primer lugar, se observa que tuvo lugar una *movilización de los carbonatos* con reprecipitación y formación de nódulos calizos en profundidad, y que encontramos a partir del metro de profundidad. En un sondeo próximo, hemos observado que estos nódulos siguen presentes incluso a profundidades de 3 m. Por debajo de esta profundidad, no son nódulos de origen edáfico sino clastos de calcita que fueron depositados por la acción del río junto con otros sedimentos más finos. Posteriormente a este lavado de la caliza le sucede el proceso de la *iluviación de la arcilla* con formación del horizonte argílico. Por último, ha tenido lugar un aporte de sedimentos ricos en carbonato cálcico, el cual en época reciente ha sido arrastrado hasta la parte superior del argílico, en donde ha precipitado a modo de pseudomicelios y enrejado calizo. Esta *rearbonatación secundaria* ha rellenado los huecos tubulares dejados por las raíces finas al descomponerse.

Este perfil presenta un grado de evolución alto y ha precisado de bastante tiempo para su formación, por lo que se le considera un perfil maduro.

Al igual que el perfil anterior, el “CARRIÓN 2” también presenta un contenido de moderado a alto de materia orgánica en los 32 cm superiores, muy por encima de los contenidos habituales de una tierra de labor. Esta acumulación de carbono orgánico tiene su origen en la cubierta de pastizal que ha desarrollado durante años. Presenta un horizonte de acumulación de arcilla (argílico) muy potente, en el que destaca su estructura prismática gruesa y el cambio abrupto en su límite superior (entre el AB y el B1tca), el cual representa un importante obstáculo para el desarrollo radicular. En este horizonte las raíces limitan su desarrollo a las caras de los agregados, no explorándolo realmente. 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, cuando adquieren gran desarrollo, pueden llegar a aflorar. A diferencia del perfil anterior (CARRIÓN 1), el encharcamiento temporal que se produce no se debe a la presencia de un nivel freático elevado, sino a la formación de una capa colgada de agua, por debajo de la cual el suelo no está saturado y, por tanto, no se dan condiciones reductoras. Este proceso de formación de capa colgada se manifiesta en una coloración más amarilla de los horizontes B2t y B3t, en especial este último, lo que contrasta con unas condiciones más oxidantes presentes en el horizonte B4tca y que son responsables del mayor enrojecimiento de este horizonte.

La principal limitación de este suelo de cara al cultivo se deriva de la presencia del horizonte argílico, el cual condiciona su drenaje. Las dosis de riego que se empleen han de considerar este aspecto, no siendo recomendable emplear dotaciones de riego grandes.

3.3. Caracterización físicoquímica de las aguas subterráneas

Una vez realizados los piezómetros y llevada a cabo su limpieza, se recogieron muestras de agua para su análisis, antes de iniciar el riego y la recarga con aguas tratadas, con el fin de obtener valores de base o referencia. En la tabla I aparecen los resultados de las mismas.

Tabla I. Análisis fisicoquímicos de las muestras de agua recogidas en los piezómetros de la PECC										
FECHA: 9-2-2009										
MUESTRAS	PE - 1	PE - 4	PE - 7	PE - 10	PE - 11	PE - 13	PE - 16	PE - 19	PE - 20	PE - 21
PROF. SONDEO	10	6	10	10	6	10	10	10	6	2
NIVEL AGUA (msnm)	74,04	71,69	72,42	69,79	73,57	72,10	70,26	67,93	70,74	71,18
ANÁLISIS FÍSICO-QUÍMICO										
Conductividad $\mu\text{S/cm}$	6.700	5.950	8.280	8.460	11.820	9.690	2.970	6.190	10.800	1.777
pH	7,00	7,56	6,72	6,9	6,8	6,86	7,09	6,8	6,78	6,51
TSS mg/L	29,8	91,6	101,6	28,4	611,2	185	58,8	92	668,8	391,2
TOC ppm	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	0,6
TC ppm	123,7	121,3	148,8	131,6	121,2	38,2	64,2	91	63,6	24,9
IC ppm	131,3	129,8	159,7	140,1	128	150,2	168	168,3	98,4	24,3
DQO mg/L	6,6	4,3	4,8	12	< 4	11,3	4,8	7,1	8,4	< 4
Turbidez UNT	53,2	104,3	84,7	12,7	705,1	93,3	71,5	62,2	226,5	382,8
Dureza meq/L CaCO_3	1.545,6	1.314,8	2.072,1	1.869,8	2.936,9	2.287,9	952,9	1.301,9	3.098,5	495,4
Alcalinidad mg/L	556,8	578,9	673,3	604,3	549,4	628,1	818,9	763,2	435,2	89,5
ANIONES										
F^- mg/L	0,6	1,1	0,8	0,8	0,6	0,7	0,4	0,8	0,2	0,3
Cl^- mg/L	1.621,4	1.384,6	2.047,6	2.120,6	2.872,2	2.301,1	497,9	1.435,1	2.960,4	416,8
NO_2^- mg/L	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
Br^- mg/L	5,5	4,6	6,9	6,3	9,01	8,4	1,6	5,1	8	0,9
NO_3^- mg/L	2	14,2	N.D.	N.D.	3,4	5,2	N.D.	N.D.	7,01	4,7
HPO_4^{2-} mg/L	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
SO_4^{2-} mg/L	810,4	661,3	993,4	1.091,7	2.210,7	1.539,2	235,3	585,2	1.464,8	152,6
CO_3^- mg/L	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
HCO_3^- mg/L	556,8	578,9	673,3	604,3	549,4	628,1	818,9	763,2	435,2	89,5
CATIONES										
Li^+ mg/L	N.D.	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	N.D.	< 0,5
Na^+ mg/L	895,8	804,7	1.091,1	1.219,9	1.668,1	1.370,1	273,9	861,1	1.340,4	155,8
NH_4^+ mg/L	2,3	1,8	1,1	2,9	1,8	0,6	0,5	1,6	2,3	< 0,5
K^+ mg/L	8,9	8,7	14,4	10,1	6,7	18,3	4,8	8,8	1,1	5,3
Mg^{2+} mg/L	232,1	210,2	340,6	317,5	458,1	363,8	135,9	209,2	229,8	18,3
Ca^{2+} mg/L	236,2	179,9	268,1	225,20	420,7	316,3	157,5	176,4	861,9	168,2

En la tabla II figura la metodología analítica utilizada.

Tabla II. Metodología analítica	
DETERMINACIÓN	INSTRUMENTACIÓN
pH	pHmetro Ph-25 CRISON
Conductividad	Conductímetro CM-35 CRISON
TSS	Filtración por 0.45µm. Filtros Millipore.
Carbono Orgánico Total	Total Organic Carbon Analyzer. Shimadzu
Carbono Total	Total Organic Carbon Analyzer. Shimadzu
Carbono Inorgánico	Total Organic Carbon Analyzer. Shimadzu
DQO	Spectroquant TR420 y Spectroquant NOVA60. Merck
Turbidez	Turbiquant 3000 IR. Merck
Alcalinidad	Valorador Titrande 809 Metrohm
Dureza	Sistema de Cromatografía iónica de doble canal Metrohm Advanced Compact IC.
Fluoruros	Sistema de Cromatografía iónica de doble canal Metrohm Advanced Compact IC.
Cloruros	Sistema de Cromatografía iónica de doble canal Metrohm Advanced Compact IC.
Nitritos	Sistema de Cromatografía iónica de doble canal Metrohm Advanced Compact IC.
Bromuros	Sistema de Cromatografía iónica de doble canal Metrohm Advanced Compact IC.
Nitratos	Sistema de Cromatografía iónica de doble canal Metrohm Advanced Compact IC.
Fosfatos	Sistema de Cromatografía iónica de doble canal Metrohm Advanced Compact IC.
Sulfatos	Sistema de Cromatografía iónica de doble canal Metrohm Advanced Compact IC.
Carbonatos	Valorador Titrande 809 Metrohm
Bicarbonatos	Valorador Titrande 809 Metrohm
Litio	Sistema de Cromatografía iónica de doble canal Metrohm Advanced Compact IC.
Sodio	Sistema de Cromatografía iónica de doble canal Metrohm Advanced Compact IC.
Amonio	Sistema de Cromatografía iónica de doble canal Metrohm Advanced Compact IC.
Potasio	Sistema de Cromatografía iónica de doble canal Metrohm Advanced Compact IC.
Magnesio	Sistema de Cromatografía iónica de doble canal Metrohm Advanced Compact IC.
Calcio	Sistema de Cromatografía iónica de doble canal Metrohm Advanced Compact IC.

Como puede observarse, las aguas están muy mineralizadas, con altos contenidos en cloruros y sodio, presentando los valores más bajos los piezómetros PE-16 y PE-21, con profundidades de 10 m y 2 m respectivamente. Así todas las aguas pueden clasificarse como cloruradas sódicas, excepto la PE-16 que es clorurada sódico-magnésica, la PE-20 clorurada sódico-cálcica y la PE-21 clorurada cálcico-sódica (figura 14).

En cuanto a los parámetros indicadores de algún tipo de contaminación, carbono orgánico, nitratos y amonio, están dentro de los rangos normales, sin presentar signos de contaminación.

DIAGRAMA DE PIPER

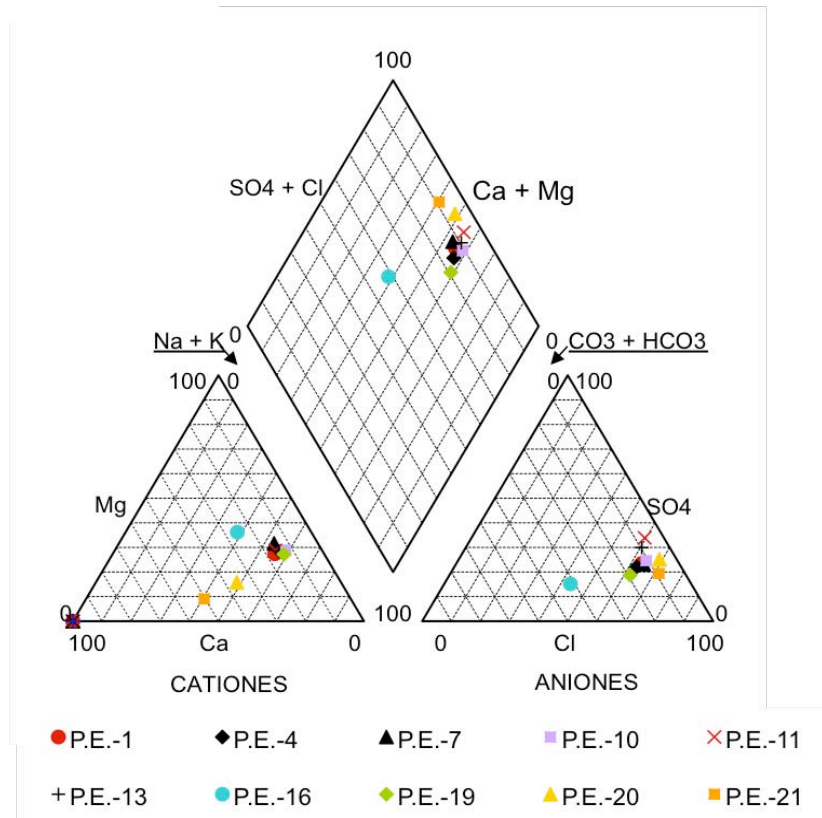


Figura 14. Diagramas de Piper de análisis de aguas subterráneas de la parcela experimental

CONCLUSIONES

La parcela se asienta sobre dos tipos de materiales litológicamente muy próximos: limos arcillosos, presentes en todo el área y arenas finas presentes sólo en la mitad E y con un espesor próximo a los 2 m.

La presencia de un porcentaje significativo de carbonatos secundarios, pueden estar reduciendo la porosidad eficaz.

La principal limitación de los suelos de la parcela de cara al cultivo, es su drenaje deficiente y su bajo contenido en agua útil (capacidad de campo – punto de marchitamiento), lo que exigirá que las dotaciones de riego sean bajas pero frecuentes.

Desde el punto de vista medioambiental, los filtros verdes son sistemas que suponen la regeneración del agua residual depurada, la reutilización de la misma para la obtención de biomasa y recarga de acuíferos subyacentes y la mejora paisajística del medio (por la incorporación de zonas arboladas). Todo ello puede favorecer la integración socioeconómica del entorno.

Las aguas muestreadas son fundamentalmente de composición cloruro sódica, con altos valores de mineralización. Aún está pendiente por determinar si dicha composición tiene su origen en los materiales estudiados.

Este trabajo pone de manifiesto que para alcanzar la mayor eficiencia en la regeneración del agua, y con ello la protección ambiental implícita en la aplicación de estos sistemas, es fundamental desarrollar una caracterización del medio adecuada que sirva como base de referencia para el diseño del sistema en el lugar elegido.

AGRADECIMIENTOS: Proyecto CSD2006-00044 y Fundación Mapfre.

BIBLIOGRAFÍA

- BOE (2007). Real Decreto 1620/2007, de 7 de diciembre, por el que se establece el régimen jurídico de la reutilización de las aguas depuradas (BOE nº 294, de 8 de diciembre de 2007).
- De Bustamante, I., Dorado, M., Vera, S.; Oliveros, C., (1998). Filtros verdes. Un sistema para la depuración y reutilización de aguas residuales. *Tecnoambiente*, 79: 73-76.
- De Bustamante, I.; Alpuente, J.; Sanz, J.M.; López, P.; Dorado Valiño, M.; López, F.; Roquero, E. (2001). Nueva metodología de diseño, control y gestión de filtros verdes. Aplicación a sistemas en funcionamiento. En: A. Fernández Uría (Ed.), *Hidrogeología y Recursos Hidráulicos*, T. XXIV, A.E.H.-Ministerio de Ciencia y Tecnología- IGME, Murcia, pp: 585-594.
- 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 redueña's wwtp. *Desalination and Water Treatment* (en prensa, fecha publicación marzo, 2009).
- Leyva Cabello, F. y Ramirez Copeiro del Villar, J. (1976). Cartografía y Memoria del mapa Geológico Nacional a escala 1:50.000 (Plan Magna) de la hoja 983 Sanlúcar La Mayor. Instituto Geológico y Minero de España, Madrid.
- Metcalf, R. y Eddy, J. (1985). *Ingeniería sanitaria. Tratamiento, evacuación y reutilización de aguas residuales*. Ed. Labor, 2ª edic, Barcelona, 969 pp.
- Navarro Garnica, N. (1978). La aplicación de aguas residuales en selvicultura. *Bol. Inf. Medioambiente*, 5: 69-117.
- Navarro Garnica, N. (1987). La depuración por aplicación de aguas residuales al terreno. En: *Congreso sobre tecnologías de bajo coste para la depuración de aguas residuales*, Madrid.
- Nicolás Isasa, J. y Fernández Casals, M.J. (1984). Experiencias de filtros verdes en Madrid y Castilla-La Mancha. En: *II Congr. Nac. Recuperación de recursos de los residuos*, Soria.
- Palazzo, A. y Jenkins, T. (1979). Land application of wastewater: effects on soil and plants potassium. *J. Environ. Qual.*, 8: 309-312.