



TÍTULO DEL TRABAJO

“Tecnologías de depuración de aguas residuales mediante filtros verdes: diseño, funcionamiento, evolución y control de la contaminación de las aguas subterráneas”

TÍTULO RESUMIDO

“Filtros verdes: diseño, funcionamiento, evolución y control de la contaminación de las aguas subterráneas”

NOMBRE DE AUTORES

I. de Bustamante^{*(1)}, S. Vera⁽²⁾, J.M. Sanz⁽¹⁾, J. Alpuente⁽³⁾, J. Mateos⁽¹⁾, V. León⁽²⁾, P. López⁽²⁾, J.L. Corvea⁽⁴⁾, J. Larrañaga⁽⁵⁾

NOMBRE Y DIRECCIÓN DE LAS INSTITUCIONES

⁽¹⁾ Universidad de Alcalá. Dpto. Geología. Edificio Ciencias. Campus Universitario. 28871 Alcalá de Henares.

⁽²⁾ Universidad de Alcalá. Dpto. Química Analítica e Ingeniería Química. Edificio Ciencias. Campus Universitario. 28871 Alcalá de Henares.

⁽³⁾ Universidad de Alcalá. Dpto. Teoría de la Señal y Comunicaciones. Edificio Politécnico. Campus Universitario. 28871 Alcalá de Henares.

⁽⁴⁾ Centro de Investigaciones y Servicios Ambientales. CITMA. Pinar del Río. Cuba

⁽⁵⁾ Universidad Complutense. Dpto. Análisis Económico. Facultad de CC. Información. Av. Complutense s/n. 28040 Madrid.

NÚMERO DE TELÉFONO, FAX Y E-MAIL

Tfno.:918854921, Fax.. 918855090; irene.bustamante@uah.es

FIGURAS Y TABLAS

7 figuras, 4 tablas.

FILTROS VERDES: DISEÑO, FUNCIONAMIENTO, EVOLUCIÓN Y CONTROL DE LA CONTAMINACIÓN DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS

LAND APPLICATION: DESIGN, PERFORMANCE, EVOLUTION AND CONTROL OF GROUNDWATER POLLUTION

RESUMEN: Un filtro verde (con masa forestal) es una parcela o parcelas, dimensionadas en función del influente a tratar, donde se instala vegetación arbórea, que se riegan con el agua residual. El agua residual se evapora parcialmente, y el resto es captada por las raíces de los árboles y filtrada a través del suelo.

En este trabajo se exponen: los resultados sobre la capacidad de depuración de aguas residuales en filtros verdes; el desarrollo de una metodología estandarizada para su implantación, así como el desarrollo de un sistema de gestión computerizado de los mismos y la puesta en funcionamiento de equipos de campo para la determinación *in situ* y en continuo de parámetros analíticos del agua, como herramientas para el control de la calidad de las aguas subterráneas.

La metodología propuesta, se ha aplicado al filtro verde de Redueña, viéndose cómo con los parámetros con los que se diseñó dicho filtro (1Ha/200 e-h) la planta estaba sobredimensionada (18.000 m²) y con la metodología propuesta los resultados se ajustan a la experiencia (3.000 m²). Puede apreciarse que la diferencia es de 15.000 m².

También se ha comprobado que la manera más eficaz de dimensionar un filtro verde está en función de la carga hidráulica aplicada, controlando si se quiere producir o no recarga de acuerdo al grado de afección que se produzca en los acuíferos por esta actividad.

PALABRAS CLAVE: tecnología ambiental, depuración, reutilización.

ABSTRACT: land application is a plot or group of plots (where trees are cultivated), sized in function of the influent to be treated and irrigated with wastewater. The wastewater is partially evaporated, and the rest is captured by the roots of the trees and infiltrated through the ground.

In this work we present: the result about the capability of wastewater treatment in land application system; the development of a standardized methodology for its establishment; the development of a management computerized system and also the bringing into operation of the field equipments, which are going to be used to determine *in situ* and in continue the analytical parameters of the water, as tools for the groundwater quality control.

The methodology proposed, has been applied to the land application of Redueña (Madrid-Spain), and has been observed that the parameters with which this system (1Ha/200 IE) were designed the plot was over-sized (18.000 m²), and with the methodology proposal in this work, the results are on line with the reality (3.000 m²). It can be appreciated that there is a difference of 15.000 m².

Also, it has been tested that the most efficient way to size the land application is in function of the hydraulic load which is going to be applied, and controlling if is necessary the recharge, according to the degree of pollution produced to the aquifers for this activity.

KEYWORDS: environmental technology, wastewater treatment, reuse

1. INTRODUCCIÓN

La depuración en los filtros verdes (figura 1), se produce mediante la acción conjunta del suelo, los microorganismos y las plantas, a través de mecanismos físicos, químicos y biológicos. Esta técnica tiene un amplio campo de aplicación dadas sus ventajas de economía, flexibilidad y operatividad de aplicación en pequeñas comunidades.

La metodología utilizada en la actualidad para el diseño de filtros verdes no es la más adecuada, al considerarse en la misma sólo la carga contaminante de entrada, sin tener en cuenta factores tan importantes como los climáticos, geóticos y bióticos. La metodología propuesta se ha aplicado en el filtro verde de Redueña.

El filtro verde de Redueña se construyó en 1988 a lo largo del fondo de valle del Arroyo de las Huertas. El criterio de diseño que se utilizó fue el de plantar 1 ha de *Populus euroamericana* por cada 200 h-e, por lo que la superficie resultante fue de 18.000 m², en

donde el agua residual se somete a un pretratamiento y posteriormente se distribuye por una canalización abierta de dimensiones 20 x 30 cm que transcurre a lo largo de la parcela. En esta canalización hay una serie de compuertas de apertura manual mediante las cuales se controla la aplicación en las diferentes zonas del filtro, que se riega mediante surcos.

El objetivo que se desarrolla en este trabajo es el estudio de la depuración mediante filtros verdes, evaluando la eficacia de los mismos, para posteriormente pasar a desarrollar un modelo de gestión y su automatización.

2. METODOLOGÍA

La figura 2 representa las actividades que se han realizado para el desarrollo del modelo metodológico de diseño y gestión de los filtros verdes, que abarca tres aspectos fundamentales:

- a) Estudio de la eficiencia de los filtros verdes como tecnología de depuración no convencional: caracterización del medio físico; caracterización del influente y del agua infiltrada en el terreno (hidráulica y físico-químicamente); estudio del efecto de la vegetación en la eliminación de la carga contaminante; modelización de las variables obtenidas; desarrollo de una metodología estandarizada para el diseño de filtros verdes multietapa (De Bustamante *et al.*, 1998 y 2000).
- b) Desarrollo de un modelo de gestión y monitorización computerizado: desarrollo de una unidad de gestión de riego automatizada; desarrollo de un sistema de monitorización del filtro verde para los niveles de calidad del suelo y el agua en la parcela bajo control; desarrollo de un sistema de transmisión (De Bustamante *et al.*, 2001).
- c) Estudio socioeconómico comparativo de la implantación del sistema desarrollado.

3. RESULTADOS

A continuación se exponen los resultados obtenidos, siguiendo el orden metodológico expuesto anteriormente.

a) Estudio de la eficiencia de los filtros verdes como tecnología de depuración no convencional. El Arroyo de las Huertas, es un arroyo estacional que permanece seco la mayor parte del año. El substrato geológico del entorno del filtro verde son arcillas y margas del Cretácico Superior con niveles intercalados de calizas, que buzcan hacia el norte. Dicho arroyo ha dejado un depósito aluvial de arenas y gravas gruesas con abundantes cantos, que se apoyan mediante discordancia erosiva sobre el substrato cretácico. Tapizando las laderas y presumiblemente una gran parte del fondo de valle, existe un recubrimiento constituido básicamente por limos areno-arcillosos de color marrón claro con cantos dispersos y angulosos de calizas. A la altura de la caseta y de las instalaciones de pretratamiento del filtro, llega desde el norte un barranco que acumula sedimentos y desarrolla una pequeña llanura aluvial conectada con la del Arroyo de Las Huertas (figura 3).

Desde el punto de vista geomorfológico, el filtro verde se localiza en la llanura aluvial del Arroyo de las Huertas; esta unidad, bien desarrollada en su margen derecha, se caracteriza por una morfología plana de mínima pendiente en la que se encuentra fuertemente encajado el curso fluvial.

El nivel freático parece estar dentro de los sedimentos cretácicos arcillosos, a más de 3 m de profundidad. No obstante, la escasa permeabilidad de este substrato favorece la existencia de un nivel colgado en las gravas y arenas del aluvial del arroyo.

El contenido de materia orgánica del suelo va disminuyendo a medida que aumenta la profundidad, pasando del 1,17% en superficie al 0% a 2,90 m (figura 4). Además, se observa una mejora del suelo en las parcelas de los filtros (en comparación con las parcelas aledañas), debido al aporte de materia orgánica.

La infiltración en períodos secos es de 1.500 L/m²/día y en períodos húmedos de 2.800 L/m²/día. La velocidad de infiltración vertical es muy alta, de 3 m/hora, lo que se corresponde con una textura de suelo franco arcillosa. La capacidad de campo (estimada) es del 15%.

Los resultados de los análisis fisicoquímicos realizados tanto en el influente como en el efluente (tablas 1 y 2), demuestran que el mayor porcentaje de depuración se produce en los primeros 50 cm de suelo, obteniéndose rendimientos medios del 85% para los sólidos en suspensión, del 98% para la DBO₅, el 93% para la DQO, el 70% para el nitrógeno y el 80% para el fósforo total. También se ha analizado el agua del piezómetro situado dentro del filtro verde y no presenta ningún síntoma de contaminación.

Los valores medios de macronutrientes en las hojas de los árboles del filtro son: 20 mg N/g_{muestra}; 28 mg K/g_{muestra} y 5 mg P/g_{muestra} y en la vegetación herbácea: 24 mg N/g_{muestra}; 77 mg K/g_{muestra} y 3 mg P/g_{muestra}, por lo que no existe déficit de nitrógeno y fósforo en los chopos ni en la hierba. Se realizaron estos mismos análisis en hojas y hierbas recogidas fuera del filtro y los resultados fueron muy similares.

El rendimiento anual de la masa forestal es del 42,72% en longitud y del 12,68% en diámetro (con respecto al año anterior), por lo que la producción maderera se estima en 0,3 m³/a.

Una vez alcanzados los resultados anteriores, se procedió a realizar un modelo de diseño y gestión de los filtros verdes. Para ello se evaluó el comportamiento hídrico ambiental de diferentes cadenas riparias para transferir el conocimiento al diseño de filtros verdes, definiendo el concepto de filtro verde multietapa (figura 5) como adaptación a la alternancia de períodos secos y húmedos propios de nuestra climatología.

El filtro verde de Redueña está formado por choperas con praderas polífitas, por lo que para el cálculo de la evapotranspiración según Blaney y Criddle (1950), se ha tenido en cuenta el período en el que existe crecimiento vegetativo de cada uno de los cultivos. Los coeficientes de consumo utilizados para el cálculo han sido los de Urbano Terrón (1992) y para los meses en los que se carecen de datos para las praderas (noviembre, diciembre, enero, febrero y marzo) se han tomado los valores determinados por Blaney y Criddle (1962) en Pasadena (California). Los resultados se muestran en la tabla 3.

b) Desarrollo de un modelo de gestión y monitorización computerizado. El aprovisionamiento de energía eléctrica en el filtro verde, se realizó mediante la instalación de un panel monocristalino ATERSA A 120 WP. El sistema de cableado y terminales se retrazado bajo canaleta, adaptando las líneas de 220VCA al Reglamento de Instalaciones de Baja Tensión, trazando un circuito de tubo y cajas de conexión herméticas de la caseta al pretratamiento y a la acequia de distribución, instalando cables de alimentación y de control del caudalímetro y del control de la compuerta por los tubos de distribución y soterrando todo el sistema eléctrico exterior (figura 6).

Para la distribución de agua se diseñó un repartidor equitativo de caudal de ocho líneas, con tubos de salida para adaptar a otros tantos tubos flexibles de distribución, y una compuerta

motorizada con posibilidad de uso manual, con un programador electromecánico de riego con prestaciones de riego forzado.

Se realizó una aplicación software para leer, los datos recogidos por una serie de sensores (climatológicos, humedad, de caudal, etc.) en períodos de tiempo definibles, y que los va archivando y preparando para su posterior transmisión vía GSM. El programa puede ser manipulado a distancia y permite a su vez establecer umbrales de alarma.

Se ha desarrollado un programa BHUA 1.0 (Balance Hídrico Universidad de Alcalá), de adquisición y tratamiento de datos climatológicos, que permite ir realizando el balance hídrico día a día en base a la información recibida. Con los datos de balance hídrico se genera un calendario semanal que se transmitirá hasta la EDAR, empleando el sistema de comunicaciones anteriormente mencionado. El programa ha sido realizado mediante programación en Visual Basic.

c) Estudio socioeconómico comparativo de la implantación del sistema desarrollado. El análisis de los principales indicadores socioeconómicos de Redueña (tabla 4), recomiendan que para aumentar el rendimiento tanto desde el punto de vista económico como medioambiental del filtro, sería recomendable la utilización de la producción maderera obtenida como biomasa. Desde el punto de vista económico, se presenta la dificultad del reducido consumo nacional de biomasa, en la actualidad parte de la biomasa tiene que ser exportada a otros países. Las medidas que en la actualidad está estudiando el Ministerio de Industria para permitir que las calderas de las centrales térmicas, puedan utilizar biomasa, además de carbón para producir electricidad, aumentará el consumo nacional de biomasa.

4. DISCUSIÓN

Si tenemos en cuenta que el filtro verde se basa en un sistema forestal sujeto a condicionantes hídricos, su superficie deberá estimarse realizando un balance hídrico del sistema, partiendo del agua total a aplicar al terreno (suma de la precipitación natural y del agua residual), y considerando la parte que regresa a la atmósfera por evapotranspiración. Así, se puede evaluar qué cantidad de agua residual puede aplicarse sin tener excedentes que produzcan encharcamientos, ni déficit que produzca estrés hídrico. De esta forma, y con el fin de garantizar el aporte de agua suficiente para el mantenimiento de la plantación en los meses estivales, la dimensión máxima del filtro verde (S) resultaría de dividir el caudal total mensual de entrada entre la evapotranspiración (ET) máxima mensual:

$$S(m^2) = \frac{Q_{(efluente)}(L)}{ET(L/m^2)}$$

Teniendo en cuenta que estacionalmente en muchas áreas se producen grandes diferencias climatológicas, los dos aspectos apuntados anteriormente se pueden subsanar introduciendo el concepto de “filtro verde multietapa”, en el que se instalaría una primera etapa con vegetación higrófila (la cual necesitaría un aporte hídrico anual constante, y una segunda etapa o etapas sucesivas, en las que se instalaría vegetación con menor necesidad hídrica, en función de las variaciones climatológicas del medio, con lo que cuando los aportes de caudal sean mayores el agua residual pueda repartirse en una superficie mayor.

Así, se diseñó una primera etapa de chopos y pradera polífita de 2.000 m², que se regaría durante todo el año en la que se aplicarían exclusivamente los caudales requeridos por la vegetación y una segunda etapa de 1.000 m² con pradera polífita exclusivamente, en la que se aplicarían los caudales sobrantes (figura 7). En esta etapa se produciría una recarga del acuífero de 21.833 m³/año.

La primera etapa se dividiría (por operatividad), en cuatro parcelas de 500 m² cada una, en donde se plantarían 16 árboles en dos filas y ocho columnas y se instalarían tubería de riego en tres filas y nueve columnas. La segunda etapa, se dividiría en dos parcelas de 500 m², en las que el sistema de riego sería igual o similar al de la primera etapa.

La superficie del filtro se ha calculado como se comentó anteriormente, obteniendo un valor total de 3.000 m², frente a los 18.000 m² del proyecto inicial, esto es debido a que el nuevo dimensionamiento ha tenido en cuenta las necesidades hídricas de la vegetación y la cantidad de agua a aportar con el riego, y no solo la carga contaminante en habitantes equivalentes. La superficie anterior era excesiva para el caudal de riego disponible, y provocaba la **desección de la vegetación**, ya que no se cubrían sus necesidades.

Además, un ahorro de 15.000 m² reduce los costes de tratamiento de las aguas residuales, facilitando la optimización económica del filtro, al reducirse tanto los costes de inversión, como de explotación.

Los resultados de los análisis de la vegetación parecen indicar que el desarrollo de los chopos no se ve afectado por el riego con aguas residuales.

Por todo esto, se puede decir que la manera más eficaz de dimensionar un filtro verde es hacerlo en función de la carga hidráulica aplicada, controlando si se quiere producir o no recarga de acuerdo al grado de afección que se produzca en los acuíferos por esta actividad. Esta afección está relacionada con la cantidad de contaminantes (nitrógeno, materia orgánica, etc.) que se pueden lixiviar; mientras que la capacidad depuradora del conjunto “suelo-microorganismos-vegetación” frente a la materia orgánica que contienen las aguas residuales urbanas llega a ser superior al 98%, la capacidad depuradora del nitrógeno es inferior y se tiene peor cuantificada.

AGRADECIMIENTOS: proyecto de investigación REN2003-01248 del MCYT

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Blaney, H.F. y Criddle, W.D. (1950). Determining water requirements in irrigated areas from climatological and irrigation data. *USDA SCS-TP*, 96.

Blaney, H.F., Criddle, W.D. (1962). Determining consumptive use and irrigation water requirements. *USDA Tech. Bull.*, 1275, 1-59.

De Bustamante, I., Dorado, M., Vera, S. y Oliveros, C. (1998). Filtros verdes. Un sistema para la depuración y reutilización de aguas residuales. *Tecnoambiente*, 79,73-75.

De Bustamante, I., Mateos, J., Tomás, A., Dorado, M., Sanz, J.M. y Vera, S. (2000). “Filtros verdes”: a system of wastewater purification and reuse. *1st World Water Congress of the IWA*.

De Bustamante, I., Alpuente, J., Sanz, J.M., López, P., Dorado Valiño, M., López, F. y Roquero, E. (2001). Nueva metodología de diseño, control y gestión de filtros verdes. Aplicación a sistemas en funcionamiento. *Hidrogeología y Recursos Hidráulico*, XXIV, 585-594.

IECM. (2005). *Anuario Estadístico de la Comunidad de Madrid 1985-2005*. Madrid: CAM.

Urbano Terrón, P., (1992). Ajuste de fitotecnia general. Madrid: Ediciones Mundi-Prensa.