

Optimización de la superficie de un humedal construido de flujo subsuperficial mediante la evaluación de la calidad del efluente.

Andreo, P.; García-Martínez, N.; Almela, L.

Departamento de Química Agrícola, Geología y Edafología. Universidad de Murcia.
Campus de Espinardo. 30100 Murcia. (España).

Resumen

En el sureste de España, el agua residual generada por viviendas aisladas sin conexión a la red de alcantarillado público, puede causar problemas medioambientales importantes como la contaminación de los acuíferos. Una posible solución es el uso de sistemas sostenibles de depuración, como son los humedales construidos. En este sentido, la optimización del diseño del humedal es muy importante en orden a su perfecto funcionamiento y economía de construcción.

En esta investigación se evaluó la optimización de la superficie de un humedal construido de flujo subsuperficial horizontal, a partir de la eficacia de depuración del agua conseguida por un sistema previamente implantado. El sistema estudiado estaba ubicado en una vivienda unifamiliar situada en Torrellano Bajo (Elche, Alicante). Los parámetros monitorizados fueron los exigidos por la legislación europea para vertidos en zonas sensibles (DBO₅, DQO, STS, NT y PT), además de otros considerados de interés, como la temperatura, pH, NH₄-N, NO₃-N y NO₂-N.

En el agua tratada se consiguieron elevados porcentajes de eliminación de nutrientes y contaminantes; y de acuerdo con la normativa vigente, el humedal permitía la realización de vertidos. No obstante, la elevada evapotranspiración de la zona originó la desecación del lecho del humedal, que no se reequilibra hasta la recuperación del régimen hídrico. La optimización de las dimensiones del humedal se realizó con respecto a la DBO₅ que es el parámetro limitante en zonas no sensibles. Los cálculos realizados mostraron que la superficie del humedal podría ser unas 5 veces inferior a la que había sido diseñado.

Palabras claves: depuración agua residual, humedal construido, clima mediterráneo, Phragmites australis. optimización diseño.

Introducción

En España existen viviendas aisladas y pequeñas poblaciones en zonas rurales sin acceso a la red pública para el tratamiento del agua residual. En esta situación se suelen usar sistemas tradicionales como el uso de tanques sépticos con absorción al suelo. Sin embargo, estas prácticas implican un riesgo de contaminación de las aguas subterráneas y los correspondientes daños ambientales. Uno de estos ejemplos se sitúa en el Campo de Elche (Alicante, España), donde existen más de 9.000 viviendas aisladas sin conexión a la red de alcantarillado. En estos casos, la Directiva Marco del Agua de la

UE (EC, 2000) establece como requisito para la depuración un “tratamiento adecuado”, sin marcar límites legales específicos, requisitos que sí existen para el caso de poblaciones de más de 2.000 habitantes-equivalentes (h-e). Por ello, hasta el momento, en pequeñas poblaciones se han adoptado los límites para comunidades de más de 2.000 h-e. Para solventar este vacío legal, el Plan Nacional de Calidad de las Aguas 2007-2015 ha impulsado la búsqueda de soluciones de bajo costo para la depuración de aguas residuales en pequeñas poblaciones.

Una solución alternativa son los humedales construidos. Estos sistemas constan de un receptáculo impermeabilizado y constituido por varias capas de grava o arena de diferente tamaño de partícula, en los que se implanta una vegetación cuyas raíces soportan la carga microbiana responsable, en gran parte, de la eliminación de los contaminantes (EPA, 2000). Se ha demostrado que los humedales construidos son eficaces para la eliminación de compuestos orgánicos e inorgánicos, sólidos en suspensión, nutrientes y microorganismos en aguas residuales domésticas y municipales (Vymazal y Kröpfelová, 2008). Entre sus ventajas se puede destacar que son económicos, eficientes, fáciles de operar, ecológicamente sostenibles y que actúan como apoyo a los hábitats de la vida silvestre (Abou-Elela y col., 2013).

Los humedales construidos de flujo subsuperficial (HCH-FSS), a diferencia de otros tipos, no presentan agua estancada superficial ya que circula por debajo del lecho de forma horizontal. En este tipo de humedales hay gran número de variables físicas, químicas y biológicas involucradas (sedimentación, filtración, precipitación, adsorción, absorción por la planta, descomposición microbiana). Los factores ambientales también afectan al proceso de depuración, por lo que es precisa su consideración a la hora de la construcción (García y col, 2010; García y col., 2004).

La investigación tuvo como objetivo la evaluación de la efectividad de un HCH-FSS previamente implantado y, a partir de los datos obtenidos, valorar el diseño para una posible optimización, si fuera necesario.

Metodología

El HCH-FSS estaba situado en Torrellano Bajo / Elche (Alicante), a una altura de 56 m sobre el nivel del mar. El clima de la zona es mediterráneo seco con una temperatura media anual de $17,0 \pm 1,4$ °C y precipitaciones de $199,6 \pm 139,1$ mm, en los últimos 10 años (IVIA, 2013).

El humedal artificial estaba formado por un decantador (Riuvert®, Alicante, España) y un humedal de flujo subsuperficial horizontal impermeabilizado, de 27 m² de superficie y 60 cm de profundidad, con varias capas de relleno y plantado con *Phragmites australis* (4 plantas/m²). El flujo de entrada medio diario fue de 0,27 m³/día con un tiempo de retención de 22,6 d y una tasa de carga hidráulica de 1 cm/d. Un tanque colector almacenó el agua depurada a la salida del sistema (Figura 1).

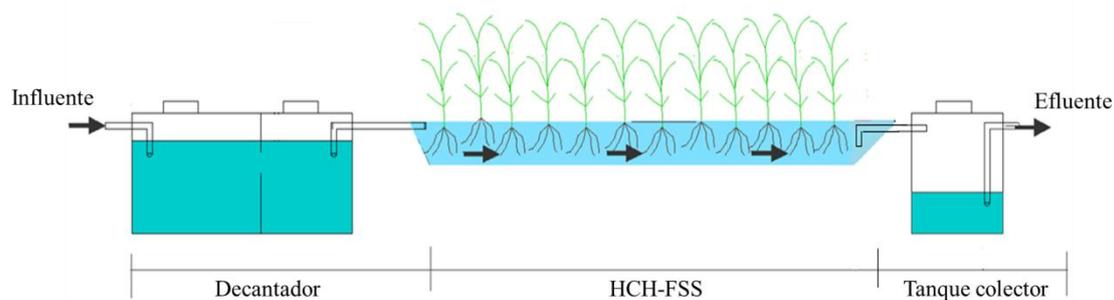


Figura 1. Sistema de depuración de aguas residuales domésticas mediante un HCH-FSS.

Las variables analíticas y los límites de vertido fueron los exigidos por la Directiva Marco del Agua de la UE (EC, 2000) para zonas sensibles: demanda bioquímica de oxígeno (DBO₅), demanda química de oxígeno (DQO), sólidos totales en suspensión (STS), nitrógeno total (NT) y fósforo total (PT) (Tabla 1).

Tabla 1. Límites para los vertidos procedentes de instalaciones de depuración de aguas residuales urbanas. Se aplica el valor de concentración o el porcentaje de reducción.

Parámetros	Límite legal	% Reducción
DBO ₅ (mg/L O ₂)	25	70-90
DQO (mg/L O ₂)	125	75
STS (mg/L)	35 (> 10.000 h-e)	90 (> 10.000 h-e)
	60 (2.000-10.000 h-e)	70 (2.000-10.000 h-e)
NT (mg/L)	15 (10.000-100.000 h-e)	70-80
	10 (>100.000 h-e)	
PT (mg/L)	2 (10.000-100.000 h-e)	80
	1 (>100.000 h-e)	

Se realizaron muestreos mensuales durante 24 meses a la entrada (influyente) y salida (efluente) del humedal, siguiendo las normas ISO-5667-1 (1980), ISO-5667-2 (1991) e ISO-5667-3 (1994). Las muestras se almacenaron a una temperatura inferior 4 °C y se analizaron por triplicado.

Además de los parámetros indicados en la tabla 1 se analizó: temperatura (T), pH, amonio (NH₄-N), nitrato (NO₃-N) y nitrito (NO₂-N). La temperatura se midió "in situ" con el medidor multiparamétrico HI 9146 N (Hanna Instrumento, Bedfordshire, Reino Unido); STS se determinó según las recomendaciones de la American Public Health Association (APHA, 1989); pH se midió utilizando un medidor CRISON-GLP 21 (Hach Lange España, L'Hospitalet de Llobregat, España); el resto de parámetros se determinaron utilizando los kits rápidos NANOCOLOR[®] y el fotómetro NANOCOLOR[®] 500D (Macherey-Nagel GmbH, Düren, Alemania). La eficiencia en la eliminación de un contaminante C_i en el efluente, respecto a su contenido inicial C₀ se evaluó según:

$$\text{Reducción}(\%) = 100 \times \frac{\Delta C_i}{C_0}$$

Resultados y discusión

En la Tabla 2 se muestran los valores medios de los parámetros analizados para el agua de entrada y salida del humedal, así como la correspondiente tasa de eficiencia de eliminación de contaminantes.

Tabla 2. Valores medios de los parámetros analíticos en el agua de entrada y salida al HCH-FSS y eficiencia de eliminación.

Parámetro	Influyente (mg/L)	Efluente (mg/L)	Reducción (%)
T	22,9±4,6	20,6±4,9	-
pH	7,5±0,3	7,5±0,4	-
DBO ₅	377,2±125,5	18,7±11,0	94,2
DQO	715,7±181,2	125,6±48,6	81,2
STS	186,6±33,9	13,8±8,6	92,4
NT	139,6±12,1	36,5±15,1	72,8
NH ₄ -N	103,5±10,2	6,4±8,7	92,7
NO ₂ -N	< 0,3	0,4±0,1	-
NO ₃ -N	2,2±1,2	23,0±9,2	-
PT	19,2±4,2	3,0±0,6	83,3

En el influente se encontró una concentración de contaminantes y nutrientes superior a la de otras zonas geográficas similares (Metcalf y Eddy, 1991). Esta circunstancia la interpretamos como resultado de la mentalización en lo referente a las prácticas de ahorro de agua por parte de los habitantes del sureste español y coincide con las observaciones de Puigagut y col, (2007).

El valor medio de DBO₅ en el efluente fue inferior al máximo permitido; mientras que el porcentaje de reducción fue muy superior al legislado. DQO en el efluente estuvo en los límites máximos de demanda permitidos, pero el porcentaje de reducción medio cumplió las recomendaciones de la Directiva. No obstante, los resultados medios para DBO₅ y DQO habrían sido mejores de no mediar una etapa de deshidratación del humedal en la época veraniega, donde la evapotranspiración de la gran superficie del humedal fue mayor que el aporte de agua procedente de la vivienda. Este incidente hídrico provocó un comportamiento anómalo (valores anormalmente altos) en los meses inmediatamente siguientes, debido a la aparición de caminos preferentes para el agua en el lecho, hasta que el humedal se reequilibró nuevamente.

Los STS se eliminaron de forma efectiva, generando un efluente con poca materia particulada. La eliminación de los STS se produce principalmente a través de floculación y sedimentación, proceso favorecido por las raíces de las plantas que reducen la velocidad del agua (EPA, 2000).

Los valores medios de NT y el PT fueron superiores a los límites establecidos por la normativa, pero los porcentajes de reducción de ambas variables fueron superiores a los establecidos para vertido, incluso en zonas sensibles, cumpliendo con la legislación.

El contenido total de nitrógeno en las aguas residuales es la suma del presente en formas orgánica e inorgánica. El nitrógeno orgánico se encuentra en forma de aminoácidos, urea, ácido úrico y bases nitrogenadas; mientras que las formas inorgánicas son el amonio, nitrito, nitrato y nitrógeno gaseoso que incluye NH_3 , N_2 , NO_2 y N_2O . En los humedales construidos, el nitrógeno orgánico sufre etapas de amonificación, que transforma el nitrógeno orgánico en amonio ($\text{NH}_4\text{-N}$), y etapas en las que el $\text{NH}_4\text{-N}$ es convertido por las bacterias en nitrito y nitrato en presencia de oxígeno.

El porcentaje de eliminación de $\text{NH}_4\text{-N}$ en el sistema fue superior al 92%, lo que confirma que el humedal transformó casi todo el amonio en nitrato, como se confirma por el aumento de la concentración de $\text{NO}_3\text{-N}$ en el efluente. El bajo contenido de nitrito se puede justificar por la oxidación preferencial de $\text{NO}_2\text{-N}$ a $\text{NO}_3\text{-N}$, favorecido por el suministro de oxígeno de las raíces de las plantas.

En definitiva, la calidad del efluente fue lo suficientemente buena, cumpliendo el humedal con los límites exigidos por la Directiva Marco del Agua de la UE (EC, 2000).

A pesar de la buena calidad global del agua de salida del humedal, el incidente hídrico provocado por la desecación en la época de mayor temperatura y escasa o nula pluviometría (julio y agosto) modificó negativamente el rendimiento del humedal, ya que en la etapa inmediatamente posterior todos los parámetros se vieron afectados en mayor o menor medida. Esta situación ya había sido observada en experiencias en zonas de características climáticas similares como Marruecos (Rousseau y col., 2008). Por todo ello nos planteamos la reevaluación de la superficie del humedal considerando las características climáticas y el aporte real de agua procedente de la vivienda.

La optimización de las dimensiones del humedal se realizó con respecto a la variable DBO_5 que es el parámetro limitante en zonas no sensibles.

Para redimensionar la superficie del humedal (A_s) se siguió el modelo propuesto por Reed y col. (1995), basado en una cinética de primer orden que utiliza como variables el flujo de agua de entrada Q (m^3/d), DBO_5 inicial y final y el espesor de la capa de agua en el humedal (m); n es un factor que depende de la porosidad del medio sólido de relleno (en nuestro caso 0,38).

$$A_s = \frac{Q \cdot (\ln \text{DBO}_{5i} - \ln \text{DBO}_{5f})}{K_t \cdot d \cdot n}, \quad \text{donde } K_t = (1.104) \cdot (1.06)^{(T_0 - 20)}$$

K_t es una constante cinética dependiente de la temperatura media (T_0) del agua de entrada al humedal ($^{\circ}\text{C}$).

Aplicando los datos de diseño del humedal construido (profundidad), el caudal medio de agua de entrada y las DBO_5 entrada/salida obtenidas, el área resultante fue de 5,22 m^2 , unas 5 veces inferior al del diseño del humedal estudiado, dato que está en consonancia con los obtenidos en experiencias similares (Parra y Chiang, 2013). El modelo de Reed también posibilita la verificación de la superficie calculada a partir de los balances de energía. En nuestra experiencia, esta verificación fue favorable (datos no

mostrados por simplicidad) y confirmó la optimización calculada para la superficie del humedal a partir de la variable DBO₅, parámetro limitante en zonas sensibles.

Conclusiones

Los humedales construidos de flujo subsuperficial horizontal son una herramienta muy efectiva y económica para la depuración de aguas residuales domésticas en viviendas aisladas en las condiciones climáticas del sureste español, ya que permiten cumplir con los requisitos legales para la realización de vertidos. No obstante es preciso optimizar su dimensionamiento en función de las necesidades reales (habitantes-equivalentes) o características climatológicas, para conseguir un rendimiento óptimo. El sobre-dimensionamiento no solo encarece la instalación y el mantenimiento, si no que produce episodios de desecación indeseables para un correcto funcionamiento.

Bibliografía

- Abou-Elela, S.I., Golinielli, G., Abou-Taleb, E.M., Hellal, M.S., (2013). Municipal wastewater treatment in horizontal and vertical flows constructed wetlands. *Ecol. Eng.* 61, 460-468.
- APHA, (1989). American Public Health Association. Standard methods for the examination of water and wastewater. Washington, DC, USA.
- EC, (2000). Directive 2000/60/EC of the European Parliament and of the Council of 23 October 2000 establishing a framework for Community action in the field of water policy. Off. J L327, 1-73.
- EPA, (2000). Constructed Wetlands Treatment of Municipal Wastewaters. EPA/625/R-99/010. Office of Research and Development, Cincinnati (OH), USA.
- García, J., Chiva, J., Aguirre, P., Álvarez, E., Sierra, J.P., Mujeriego, R., (2004). Hydraulic behaviour of horizontal subsurface flow constructed wetlands with different aspect ratio and granular medium size. *Ecol. Eng.* 23, 177-187.
- García, J., Rousseau, D.P.L., Morató, J., Lesage, E.L.S., Matamoros, V., Bayona, J. M., (2010). Contaminant Removal Processes in Subsurface-Flow Constructed Wetlands: A Review. *Crit. Rev. Environ. Sci. Technol.* 40, 561-661.
- ISO-5667-1, (1980). Water quality, Sampling, Part 1: Guidance on the design of sampling programmes and sampling techniques. International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland.
- ISO-5667-2, (1991). Water quality, Sampling, Part 2: Guidance on sampling techniques. International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland.
- ISO-5667-3, (1994). Water quality, Sampling, Part 3: Preservation and handling of water samples. International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland.
- IVIA, (2013). Riegos IVIA datos meteorológicos [Internet]. Valencia (Spain); [Consultada: 10/09/2013]. Disponible en: <http://riegos.ivia.es/datos-meteorologicos>
- Metcalf-&-Eddy, (1991). Wastewater engineering: treatment, disposal, and reuse. McGraw-Hill, New York, USA.
- Parra, I., Chiang, G., (2013). Modelo integrado de un sistema de biodepuración en origen de aguas residuales domiciliarias. Una propuesta para comunidades periurbanas del centro sur de Chile. *Revista Gestión y Ambiente.* 16, 39-51.
- Puigagut, J., Villaseñor, J., Salas, J.J., Bécars, E., García, J., (2007). Subsurface-flow constructed wetlands in Spain for the sanitation of small communities: A comparative study. *Ecol. Eng.* 30, 312-319.

- Reed, S.C., Crites, R.W., Middlebrooks, E.J., (1995). Natural systems for waste management and treatment, 2^a Ed. McGraw-Hill, New York, USA.
- Rousseau, D. P. L., Lesage, E., Story, A., Vanrolleghem, P.A., De Pauw, N., (2008). Constructed wetlands for water reclamation. *Desalination*. 218, 181-189.
- Vymazal, J., Kröpfelová, L., (2008). Wastewater Treatment in Constructed Wetlands with Horizontal Sub-Surface Flow. Springer Dordrecht, The Netherlands.