

Humedales de flujo subsuperficial como biofiltros de aguas residuales en Colombia.

Subsurface Flow Wetland as Biofilters for Wastewater in Colombia.



Diego Alonso Rivera Vergara*

Tipo de artículo: Revisión.

Recibido: 25 de Marzo, 2015

Aceptado: 25 de Mayo, 2015

Resumen

El presente artículo expone una revisión sobre los humedales de flujo subsuperficial de tipo horizontal, vertical y su potencial aplicación en Colombia. Cuando se habla de los parámetros fisicoquímicos, la calidad del agua, su conservación y su importancia para la vida, los humedales de flujo subsuperficial (HSFS) se presentan como una alternativa económicamente viable, con bajas exigencias operativas y resultados eficientes para la descontaminación de cuerpos hídricos afectados por el desalojo de aguas residuales de centros urbanos. Los HSFS no solo implementan técnicas de recuperación del recurso hídrico, sino también la recuperación de los ecosistemas relacionados con el cuerpo de agua. Estos sistemas creados, o biofiltros, pueden fijar una serie de metales pesados, contaminantes y bacterias que son depositados al agua por diferentes tipos de actividades humanas. El desarrollo de estas tecnologías en Colombia se plantea entonces como una alternativa precisa para mejorar los parámetros de disposición final de aguas residuales.

Palabras clave: Descontaminación, biofiltros, aguas residuales, humedales de flujo subsuperficial, metales pesados.

Abstract

This paper is a review about studies of horizontal and vertical subsurface flow wetlands, and their application in Colombia. According to variables like physicochemical parameters, water quality, water conservation and the importance of water for life, Subsurface Flow Wetlands (SFW) are a cheap and viable alternative because of their low operational requirements and their efficient results for water decontamination when water has been affected by wastewater from urban centers. SFW do not only perform hydric recovery techniques, but also improve natural ecosystems related to bodies of water. These natural systems or biofilters can absorb some heavy metals, contaminants and bacteria that have been discharged into the water by different human activities. The development of these technologies in Colombia presents itself as an accurate alternative to improve the parameters of final disposal of sewage.

Keywords: Decontamination, biofilters, sewage, subsurface flow wetlands, heavy metals.

* Estudiante Ingeniera Ambiental. Tecnológico de Antioquia - Institución Universitaria. drivera7@correo.tdea.edu.co.

Introducción

Los humedales construidos son sistemas artificiales con una función fundamental en el tratamiento de las aguas residuales, de ahí que sean incluidos entre los llamados sistemas naturales de tratamiento. En estos sistemas los contaminantes presentes en las aguas residuales son removidos por una serie de procesos físicos, químicos y biológicos que se efectúan en el ambiente natural; entre estos procesos se encuentran la sedimentación, la adsorción a las partículas del suelo, la asimilación por las plantas y la transformación microbiana. (Watson, 1993; Brix, 1987).

Desde hace unos treinta años, los sistemas de humedales construidos se han utilizado en determinadas zonas (centro y norte de Europa) para tratar las aguas residuales de pequeños municipios. En la actualidad estos sistemas se están aplicando de forma creciente en gran parte del mundo, tanto en los países del norte, centro y sur de América, donde estos sistemas cumplen con la función de tratar aguas residuales. En los países del sur del continente, los humedales constituyen una alternativa francamente viable para abordar el problema del saneamiento (García y Corzo, 2009).

La disponibilidad de agua potable de buena calidad es un factor importante para preservar la salud humana, son demasiadas las enfermedades causadas por la contaminación de las aguas que en el pasado afectaron gravemente a la población. Actualmente, las instalaciones para la depuración existentes en la mayoría de los centros urbanos controlan estos problemas, sin embargo, el creciente desarrollo de la sociedad hace necesario aumentar continuamente la cantidad y los tipos de fuentes de contaminación ambiental (Gil, 1999).

La carencia de recursos económicos en algunos lugares del mundo ha llevado a que se empleen tecnologías innovadoras de fácil aplicación para otorgar una respuesta sencilla y económicamente viable a poblaciones de escasos recursos; los

humedales de flujo subsuperficial de tipo horizontal y vertical son tecnologías basadas a partir de este tipo de problemáticas.

En Colombia se experimenta actualmente una disminución continua, casi exponencial, de la oferta del recurso hídrico, debido fundamentalmente al vertimiento de aguas residuales de tipo industrial, doméstico y a los procesos de degradación de las cuencas, sumándose a esto la mala aplicación de la normatividad vigente en el país y la generación de contaminantes por la extracción minera. La depuración de estos afluentes hídricos es un reto ambiental y económico que se proyecta con el paso de los días como una de las actividades con más importancia en el país, donde se apuntan metas para el desarrollo e implementación de tecnologías limpias que contribuyan a la mitigación de este tipo de impactos.

En este artículo se desea dar a conocer una síntesis de estudios relevantes realizados sobre los HSFs, su aplicación, resultados y el potencial que presentan estos para el país, además de poder contribuir con herramientas de información para el desarrollo de esta tecnología de bajo costo, se pretende también fortalecer la investigación y el conocimiento de estos sistemas en Colombia.

Marco Teórico

Humedal natural y humedal artificial

Los humedales presentan cualidades y funciones que benefician al medio ambiente, específicamente a la sociedad y a las especies animales. Las funciones físicas que poseen estos sistemas radican en la regulación del ciclo del agua; sus funciones químicas apoyan la regulación de ciclos de nutrientes y descomposición de biomasa, y las funciones bioecológicas apuntan a la productividad biológica, estabilidad e integridad de ecosistemas y retención de óxido de carbono.

El humedal artificial funciona como un sistema diseñado especialmente para el tratamiento de

algún tipo de agua residual, mejorando la calidad de la misma mediante procesos físicos, químicos y biológicos que permiten la degradación de la materia orgánica. Además, estos sistemas son de bajo costo, fácil operación y mantenimiento; su nivel de eficiencia es mayor comparada con los sistemas de tratamiento convencionales (Suarez et al., 2014).

Humedales de flujo subsuperficial

Aunque existen varios tipos de humedales construidos, los que más se adaptan a las condiciones del trópico son los de flujo subsuperficial, debido a que estos cumplen con condiciones de luz todo el año, temperaturas constantes que inciden directamente sobre la actividad microbiológica y además no padecen largas heladas ni estaciones que puedan afectar los flujos del agua y el ciclo de vida de las plantas acogidas en ellos.

Las principales ventajas de los sistemas de flujo subsuperficial respecto a los superficiales son: mayor capacidad de tratamiento (admiten mayor carga orgánica), bajo riesgo de contacto del agua con las personas y de aparición de insectos, y menor utilidad para proyectos de restauración ambiental debido a la falta de lámina de agua accesible (García y Corzo, 2009).

En los humedales de flujo subsuperficial, la circulación del agua es de tipo subterráneo a través de un medio granular y en contacto con las raíces y rizomas de las plantas. La profundidad de la lámina de agua suele ser de entre 0.3 y 0.9 m. La biopelícula que crece adherida al medio granular y a las raíces y rizomas de las plantas cumple un papel fundamental en los procesos de descontaminación del agua (García y Corzo, 2009).

La gran cantidad de interacciones microbiológicas convierten a este sistema en un filtro natural que puede reestablecer algunos parámetros que influyen en la calidad del agua que ha sido tratada con este tipo de humedales, la cual podrá ser utilizada en algunos procesos vitales para el ser humano o

simplemente integrados nuevamente a los cuerpos hídricos, aportando así una recuperación gradual de la calidad del agua de la cuenca. Su aplicación en regiones con pocos recursos se convierte en la mejor alternativa para el tratamiento de aguas residuales de pequeñas y medianas poblaciones, debido a los bajos costos de mantenimiento y construcción (García y Corzo, 2009).

Al contrario de los sistemas convencionales de depuración de aguas residuales, esta tecnología de bajo costo necesita una mayor extensión de terreno por el régimen de flujo de aguas y las plantaciones que estos utilizan. El bajo consumo energético, una baja producción de residuos, un bajo impacto ambiental y sonoro, al igual que una buena integración en el paisaje (Bayona et al., 2004) de la zona en la cual se desea implementar, corroboran su buena adaptación a las problemáticas que se presentan en algunas poblaciones de Suramérica. En cuanto a su construcción, estos biofiltros pueden considerarse un reactor biológico; su estructura consiste en una biopelícula o recubrimiento sumergida, el agua entra por uno de sus extremos y se reparte atravesando la zona de grava sembrada con las plantas (halófilos), en el otro extremo el agua es recogida en el fondo (Figura 1).

En gran medida, la remoción ocurre en los primeros metros a la entrada del humedal, debido a las condiciones tranquilas y a la poca profundidad del agua en el sistema. El nivel máximo se regula de manera que no aflore la lámina de agua y se mantenga unos centímetros por debajo de la grava, haciendo visitable el humedal e impidiendo la proliferación de moscas y mosquitos (Lahora, 2001). Está diseñado específicamente para el tratamiento de algún tipo de agua residual o su fase final de tratamiento y está construido típicamente en forma de un lecho o canal que contiene un medio apropiado. Se caracterizan por el crecimiento de plantas emergentes usando el suelo, grava o piedras como sustrato de crecimiento en el lecho del canal (EPA, 2000). La biopelícula crece adherida a las partes subterráneas de las plantas y sobre el medio granular. Alrededor de las raíces se

crean microambientes aeróbicos donde tienen lugar procesos microbianos que usan el oxígeno, como la degradación aeróbica de la materia orgánica y la nitrificación (García y Corzo, 2009). Dentro del lecho, los microbios facultativos atacan al medio acuoso y las raíces de las plantas, contactando de este modo el agua residual que fluye horizontalmente a través del lecho; mientras que el sobrante baja a la superficie del medio (Llagas y Gómez, 2006).

Los humedales de flujo subsuperficial cumplen con características muy similares, son entonces clasificados según el sentido de circulación del fluido, teniendo en cuenta lo anterior, estos pueden ser horizontales o verticales.

Humedales de flujo horizontal

En este tipo de sistemas el agua circula horizontalmente a través del medio granular y los rizomas y raíces de las plantas. La profundidad del agua es de entre 0,3 y 0,9 m. Se caracterizan por funcionar permanentemente inundados (el agua

se encuentra entre 0,05 y 0,1 m por debajo de la superficie) y con cargas de alrededor de 6 g DBO/m² día (García y Corzo, 2009).

Humedales de flujo vertical

En general, los sistemas verticales se combinan con horizontales para que sucedan de forma progresiva los procesos de nitrificación y desnitrificación, consiguiéndose así eliminar nitrógeno. La circulación del agua es de tipo vertical y tiene lugar a pulsos, de manera que el medio granular no está permanentemente inundado. La profundidad del medio granular es de entre 0,5 y 0,8 m. Operan con cargas de alrededor de 20 g DBO/m² día. Los sistemas verticales tienen una mayor capacidad de tratamiento que los horizontales (requieren de menor superficie para tratar una determinada carga orgánica). Por otra parte, son más susceptibles a la colmatación (García y Corzo, 2009). Podemos observar en la siguiente figura las partes y funcionamiento de los sistemas.

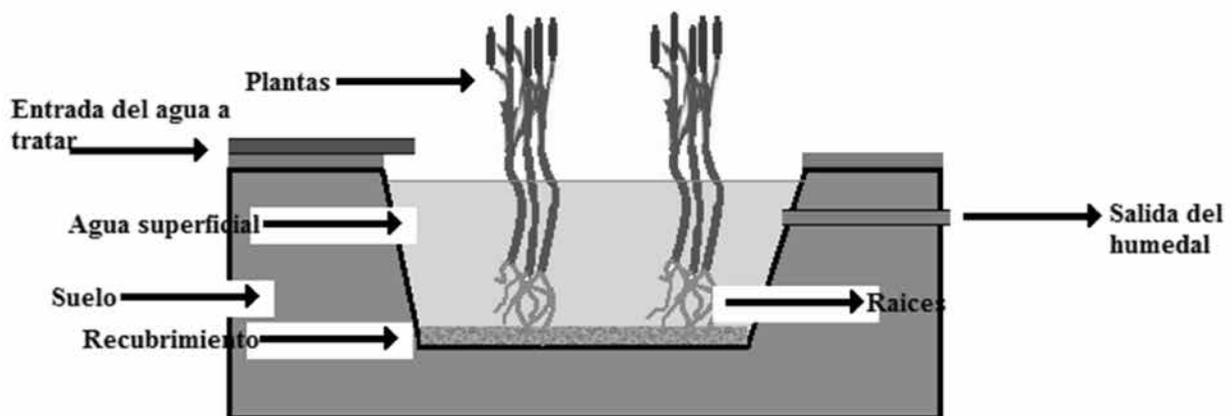


Figura 1. Humedales de flujo subsuperficial horizontal.

Fuente: Elaboración propia (2015).

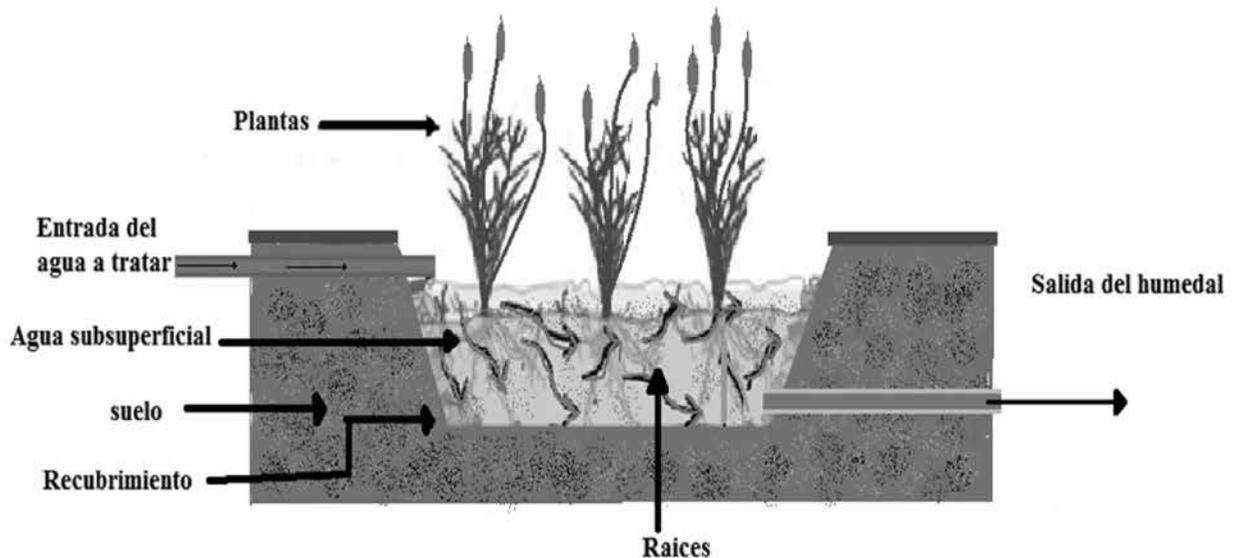


Figura 2. Humedales de flujo subsuperficial vertical.

Fuente: Elaboración propia (2015).

El mecanismo mediante el cual la planta extrae del agua residual el contaminante es el siguiente: las plantas acuáticas, que constituyen la base de la tecnología de los humedales, tienen la propiedad de inyectar grandes cantidades de oxígeno hacia sus raíces. El aire que no es aprovechado por la planta y que ésta expelle, es absorbido por microorganismos como bacterias y hongos, que se asocian a la raíz y se encargan de metabolizar los contaminantes que entran al sistema. (OTT, 2004).

Según Londoño y Marín (2009), en su tesis de grado hacen un seguimiento a las plantas para evaluar su capacidad de adaptación en los humedales artificiales. Después de siete meses de evaluación de tres sistemas de humedales subsuperficiales, obtuvieron resultados en remoción de DQO (Demanda Química de Oxígeno), DBO (Demanda Biológica de Oxígeno) y SST (Sólidos Suspendidos Totales) mayores al 80 %; en NTK (Nitrógeno Total por método Kjeldahl) mayores al 45 % y para fósforo total mayores al 55 %; la remoción de Cu, Zn y Cd fue del 99 %, 97 % y 99 %, respectivamente.

Los halófitos asimilan macronutrientes (N y P) en unas tasas calculadas en 12-120 g N/m²/año y 1,8-

18 g P/m²/año, y micronutrientes, incluidos metales pesados (Hg, Cr, Pb) (Kadlec & Knight, 1996). La importancia de estas plantas en la asimilación de este tipo de nutrientes se ve directamente relacionada con los procesos de eliminación de nitrógeno y fósforo de los cuerpos de agua que son los encargados de los procesos de eutrofización de ríos y lagos. La remoción de estos nutrientes, que por lo general llegan a los cuerpos de agua por contaminación antropogénica, provocan el aumento de biomasa y la disminución de la biodiversidad; su eliminación estará reflejada en la buena calidad de la cuenca a través de grandes extensiones y periodos de tiempo.

En los humedales construidos se ha utilizado una variedad de plantas emergentes semejantes a las encontradas en los humedales naturales. Las plantas que con más frecuencia se utilizan son: las espadañas o eneas (*Typha* sp.), la caña o junquillo (*Phragmites communis*) y los juncos (*Juncos* sp.), (*Scirpus* sp.) y (*Carex* sp.) (EPA, 2000). Según Estrada (2010), además, es de considerar que las especies de plantas resistentes y por ende adaptables al clima tropical de Colombia con mejores resultados son la *Typha* sp. Seguida del *Juncus* sp.

HSFS en Colombia

En Colombia se han construido humedales de flujo subsuperficial, enfocados primordialmente a la realización de pruebas piloto en el tratamiento de agua residual doméstica, con caudales y poblaciones de diseño relativamente pequeñas (Díaz, 2014). A continuación, se procede a la recopilación de una pequeña síntesis de resultados procedentes de los HSFS en Colombia.

Según Lara et al., (2002), se construyó un HSFS de un emisario final complementario de agua residual doméstica tratada previamente en un reactor anaerobio UASB en el barrio Los Muiscas, en la ciudad de Tunja. El sistema fue construido en 1997 y operado hasta febrero de 1999, presentando especificaciones con tiempos de retención entre 0,9 días y 3 días, caudal promedio de 2,2 m³/d, material vegetal utilizado para el tratamiento: junco (*Typha domingensis*); obteniendo las siguientes eficiencias promedio en la remoción de demanda química de oxígeno (DQO): 51.7 %, demanda bioquímica de oxígeno (DBO₅): 45.1 %, nitrógeno total: 15.0 %, fósforo total: 31.0 %, sólidos suspendidos totales (SST): 88.6 %, y sólidos totales (ST): 22.5 %.

El estudio realizado por Lara y Vera (2005) presentó el funcionamiento en su etapa inicial de un humedal subsuperficial diseñado para servir a la Estación Experimental Javeriana en el municipio de Cogua, Cundinamarca, para tratar las aguas residuales domésticas provenientes de las viviendas y las aulas de esta universidad. El humedal manejó un caudal promedio de 1.34 m³/d y un afluente esperada en DBO₅ de 132 mg/L y un efluente de 44 mg/L. El reactor fue una celda de 2 m de ancho por 5.8 m de largo, con una profundidad efectiva de 0.6 m, área del humedal de 11.6 m², tiempo de retención hidráulica de 1.6 días y una carga hidráulica de 0.23m/d. Con este sistema se obtuvieron remociones promedio de DBO₅, entre el 66 % y el 80 %, de nitrógeno total entre el 30 % y el 70 %, para el fósforo alrededor del 28 %; en sólidos suspendidos totales, entre el 44 % y el 90 %.

En otro estudio, según Montoya (et al., 2010), se hizo un estudio comparativo de la remoción de materia orgánica en humedales construidos de flujo horizontal subsuperficial en la sede principal del Tecnológico de Antioquia – Institución Educativa, ubicada en el barrio Robledo, en la ciudad de Medellín. La investigación indagó sobre la remoción de materia orgánica con agua residual sintética, en términos de demanda química de oxígeno (DQO), demanda biológica de oxígeno (DBO₅) y mediciones in situ de pH, oxígeno y temperatura cada 15 días, durante tres meses, en seis sistemas de humedales construidos de flujo subsuperficial horizontal, a escala piloto, sembrados con tres diferentes macrófitas: *Canna limbata*, *Heliconia psittacorum* y *Phragmites* sp; las remociones medias de DQO fueron de 97.31 % y 95.94 % para *Canna limbata*; 94.49 % y 93.50 % para *Heliconia psittacorum*; 97.39 % y 97.13 % para *Phragmites* sp. En DBO₅ fueron de 100 % y 99.36 % para *Canna limbata*; 99.09 % y 97.49 % para *Heliconia psittacorum*; 100 % y 99.45 % para *Phragmites* sp.

Según Díaz y Romero (2013), en la Escuela Colombiana de Ingeniería de la ciudad de Bogotá, se construyó y monitoreó un humedal piloto de flujo subsuperficial horizontal, construido con medio de carbón mineral y una vegetación macrófita de tipo ornamental *Zantedeschia aethiopica*. Se operó el humedal bajo las condiciones de intemperie, realizando la alimentación del sistema con un agua residual sintética de caracterización doméstica. El humedal trató un flujo volumétrico promedio de 96 L/d, con un tiempo de retención hidráulica de 4 días, manejando una carga hidráulica superficial promedio de 480 m³/ha.d, una carga promedio de DQO de 506 kg DQO/ha.d y una carga de DBO₅ 188 kg DBO₅/ha.d, obteniendo remociones promedio superiores al 85 % para turbiedad y SST. Las remociones promedio observadas para DQO y DBO₅ fueron respectivamente de 70 % y 52%.

Metodología

Los sistemas creados con base en la realización de pruebas piloto para el tratamiento de agua residual se basan principalmente en tres procesos o partes, los cuales son: Sistemas de alimentación, reactor (humedal), sistema de disposición final. Para poder intentar acercarse al modelo ideal de biofiltro es de gran importancia realizar un cuidadoso diseño hidráulico basado en los métodos constructivos apropiados y al área de interés donde éste se desee aplicar. Adicional a lo anterior, deben efectuarse estudios de agua residual para obtener información sobre las condiciones iniciales y las necesidades de tratamiento; la teoría resalta el desarrollo metodológico de sistemas pilotos en los cuales el flujo del agua en el interior del humedal debe romper las resistencias creadas por la vegetación, capa de sedimentos, raíces y sólidos acumulados, teniendo en cuenta que el fluido no debe superar una velocidad de 7m/d para minimizar el arrastre de la biopelícula (esto según EPA, 2000).

El dimensionamiento de humedales de flujo subsuperficial se realiza en dos etapas: en la primera se determina la superficie necesaria de tratamiento (dimensionamiento biológico) y en la segunda se establecen las dimensiones geométricas del sistema (dimensionamiento hidráulico). (García y Corzo, 2009).

El sistema de alimentación conduce la entrada del agua residual; en algunas de las pruebas piloto realizadas se utiliza agua residual sintética, la cual cumple con especificaciones propuestas según la fórmula Dangcong, utilizando glucosa ($C_6H_{12}O_6$) para proporcionar los sustratos de carbono orgánico, además de cloruro de amonio (NH_4Cl), cloruro de magnesio ($MgCl_2 \cdot 6H_2O$), fosfato dihidrogenado de potasio (KH_2PO_4) y fosfato dipotásico hidrogenado (K_2HPO_4) con el fin de suministrar los principales nutrientes que requerirán los microorganismos.

El humedal puede construirse en diferentes materiales que soporten el peso de los factores integrados a éste como son sustrato, plantas y

fluido, principalmente. En el caso de su aplicación en campo, deben hacerse estudios previos al sustrato sobre el cual se desee implantar, buscando con ello poder observar la resistencia que se presenta a este tipo de fuerzas externas que inciden sobre las características del suelo a intervenir. En los humedales pilotos construidos en el Tecnológico de Antioquia – Institución Universitaria se desarrollaron, según Montoya (et al., 2010), seis humedales construidos a escala piloto en fibra de vidrio, de 1.0 m de largo, 0.6 m de alto y 0.6 m de ancho; se les agregó grava de diámetro 3.2-6.4 mm, de 48 % de porosidad, gravedad específica 2.5, hasta 0.3 m de alto, una lámina de agua de 0.25 m de alto, 6 plantas macrófitas por metro cuadrado, con un tiempo de retención hidráulica de 7 días y un caudal de 7 ml m⁻¹, teniendo en cuenta las variables climatológicas de 18 °C y 28 °C de temperatura, y una precipitación media anual de 1.500 mm.

El sistema de recogida, según García y Corzo (2009), consta de una tubería de drenaje y una arqueta de salida. La tubería de drenaje está perforada para permitir el paso del agua, pero no del árido de gran tamaño. Existen tuberías de drenaje en el mercado con ranuras totales (en todo su perímetro, 360°), parciales (en un arco de 220°) o miniranuradas (ranuras en un arco de 108°). También se puede obtener una tubería de drenaje taladrando una tubería convencional (agujeros, por ejemplo, de 5 mm). En cualquier caso, la tubería de drenaje se coloca sobre el fondo de la celda y se conecta a un tubo que atraviesa el talud hasta llegar a una arqueta, donde la conducción termina en forma de “L” invertida; la altura a la que se coloque el extremo superior de esta conducción permite controlar el nivel de agua dentro de la celda.

Para medir las variaciones y los resultados arrojados por estos sistemas, autores como Montoya (et al., 2010) sugieren que para verificar si los resultados provienen de una distribución normal se debe aplicar la prueba de Sminorv-Kolmogorov, en un análisis exploratorio de los resultados mediante el cálculo de sus estadígrafos básicos en SPSS, versión 16, con un análisis de varianza (ANOVA) para comprobar

la existencia de diferencias significativas en la DQO y DBOs entre las diferentes plantas.

En la aplicación de estos sistemas creados se sugiere seguir un cronograma de actividades enmarcado en el diagrama de Gantt, con el cual se pueda planear el desarrollo de este tipo de investigaciones, enfocadas prioritariamente a cubrir las necesidades que se deseen sanear con los sistemas de humedales artificiales de flujo subsuperficial, presentando un enfoque frente a la densidad poblacional de la zona o lugar donde se desee desarrollar y teniendo en cuenta todo tipo de variables que puedan afectar el sistema: las condiciones climáticas, topográficas y las disponibilidad de recursos tanto monetarios como humanos.

Para llegar a obtener resultados pertinentes basados en el desarrollo de este tipo de biofiltros se sugieren diferentes análisis o pruebas, enmarcados en el análisis del fluido (a la entrada y salida del sistema), como también en el análisis de los sedimentos presentes en el humedal.

El análisis microbiológico con tinción de raíces, según el método De Phillips & Hayman, sirve para determinar la presencia de micorrizas vesículo arbusculares, las cuales son solubilizadoras de fósforo y complementan la absorción de nutrientes y metales pesados. Adicionalmente, estas estructuras fúngicas participan en la degradación de materia orgánica como celulosa y diferentes tipos de azúcares.

Para la remoción de coliformes fecales se aprovecha el establecimiento natural de la red trófica presente en el humedal, donde los organismos protozoarios se alimentan de estos individuos patógenos. Para la apreciación de estos resultados se realizan pruebas de carácter microbiológico mediante el cultivo de medios líquidos provenientes de la entrada y la salida del humedal, haciendo una comparación entre las dos muestras de agua respecto a los resultados en unidades formadoras de colonias de estos agentes patógenos.

En cuanto a la remoción de fósforo, ésta se produce mediante su captación por parte de las plantas, la adsorción al medio y la sedimentación (Watson, 1993; Brix, 1987). La remoción de nitrógeno se da por diferentes tipos de procesos integrados en el biofiltro, entre las plantas y el sustrato: filtración, sedimentación, adsorción, nitrificación y desnitrificación (EPA, 2000).

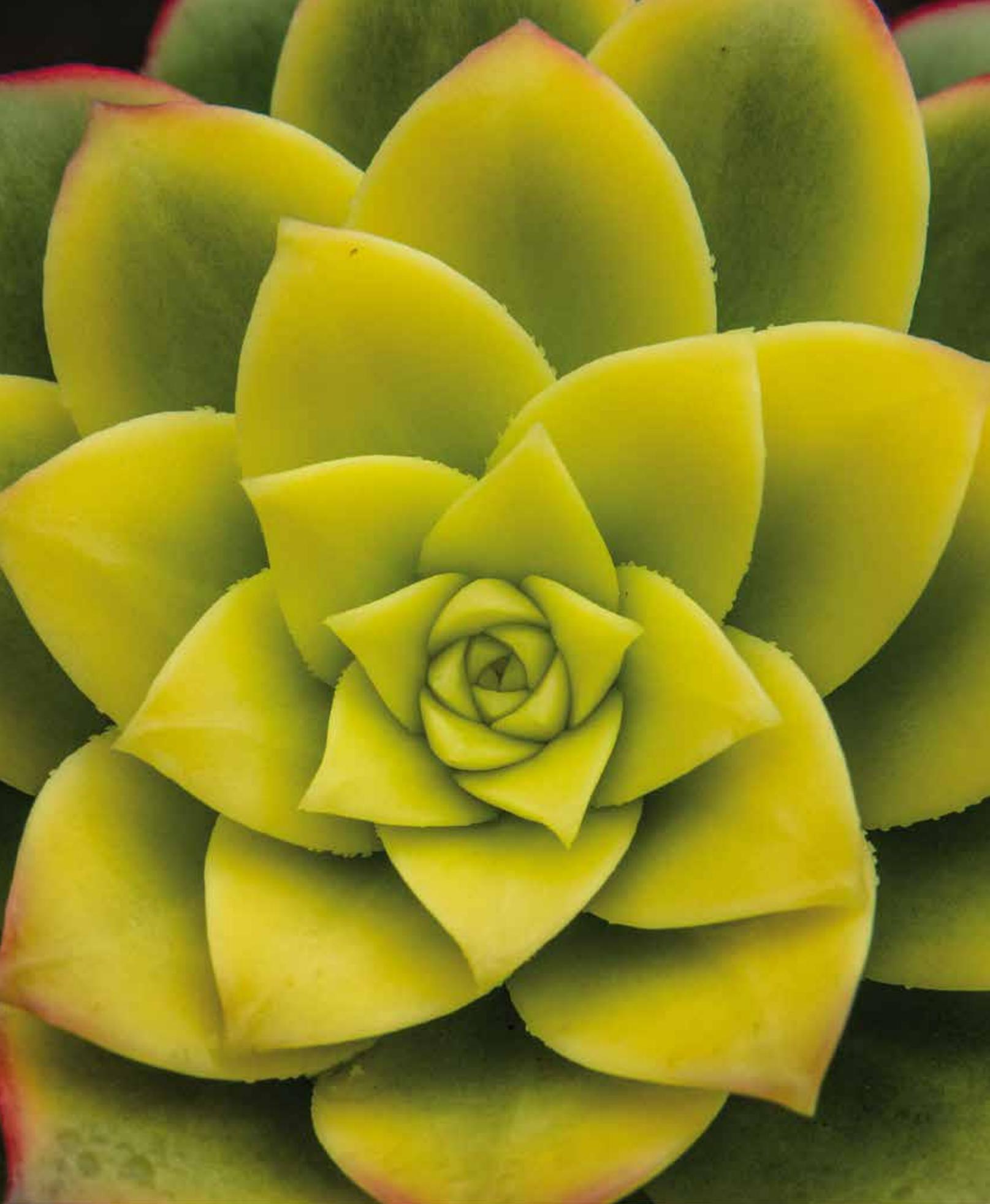
El agua que entra a estos sistemas puede mejorar notablemente su calidad debido a la remoción de DQO, DBO y SST, que puede ser determinada por medio de análisis de carácter fisicoquímico.

Conclusiones

En Colombia se tratan las aguas residuales domésticas sólo en 235 de sus 1.092 municipios, es decir, cerca del 21 % de las aguas vertidas. Considerando que en los centros urbanos del país se vierten 67 m³/s de aguas residuales, y que gran parte de los sistemas de tratamiento instalados presentan deficiencias operativas y no cumplen con el proceso completo de tratamiento, se está ante una situación en extremo complicada cuya solución involucra grandes esfuerzos políticos (Villegas et al., 2006) y económicos. Con la aplicación y puesta en marcha de este tipo de tecnología, en Colombia se reduciría y mitigaría un gran número de efectos negativos vinculados directamente con la calidad del agua, la cual es tan requerida para todas nuestras actividades diarias. Los humedales construidos son tecnologías de tratamiento de aguas residuales simples de operar, con baja producción de lodos residuales y sin consumo energético. No requieren de la adición de reactivos químicos ni de energía para airear el agua o recircularla. La infraestructura necesaria para su construcción es muy simple y asequible, su mantenimiento es relativamente fácil y económico. Es una tecnología muy adecuada para ser aplicada en proyectos de cooperación, dado que no genera dependencia tecnológica (García y Corzo, 2009). Los humedales artificiales se proyectan como una muy buena estrategia para mitigar los efectos de las aguas residuales en Colombia y el trópico.

Referencias

- Bayona, J. M., García, J. y Morató, J. (2004). CSIC Consejo Superior de Investigaciones Científicas. Barcelona: Delegación en Cataluña.
- Brix, H. (1987). Wastewater Treatment in Constructed Wetlands with Horizontal Subsurface Flow. *Water Science and Technology*, 19 (23), 107-118.
- Díaz, A. C. (2014). Tratamiento de aguas residuales a través de humedales. V Congreso Internacional de Ingeniería Civil, Tunja.
- Díaz, C. y Romero, J. (2013). Evaluación de la remoción de DBO, DQO, SST, NTK, PT y CF en un humedal de flujo subsuperficial construido con carbón mineral y cultivado con *Zantedeschia aethiopica*. Colombia. *Revista Escuela Colombiana de Ingeniería*, 1 (89), 29-37.
- EPA. United States Environmental Protection Agency. (2000). Folleto informativo de tecnología de aguas residuales. Humedales de flujo subsuperficial. Washington: Office of Water.
- Estrada, Y. (2010). Monografía sobre humedales artificiales de flujo sub superficial (HAFSS) para remoción de metales pesados en aguas residuales. Pereira.
- García, J. y Corzo, A. (2009). Guía práctica de diseño, construcción y explotación de sistemas de humedales de flujo subsuperficial. Catalunya.
- Gil, E. (1999). Remoción y recuperación de metales pesados de aguas residuales industriales. *Revista Facultad de Ingeniería. Universidad de Antioquia*, 11 (18), 3-48.
- Kadlec, R H. & Knight, R L. (1996). *Treatment Wetlands*. Boca Raton Florida: Lewis Publisher.
- Lahora, A. (2001). Depuración de aguas residuales mediante humedales artificiales: La Edar de los Gallardos (Almería). *Gestión de Aguas del Levante Almeriense*, 99-111.
- Lara, C., Díaz, J., Usaquén, O. y Forero, L. (2002). Tratamiento y Postratamiento de Aguas Residuales Seminario Internacional. Boyacá: Ediciones Uniboyacá.
- Lara, J. y Vera, I. (2005). Implantación y evolución de un humedal artificial de flujo subsuperficial en Cogua, Cundinamarca, Colombia. *Ingeniería y Universidad / Pontificia Universidad Javeriana*, 9, (1), 47-63.
- Llagas, W. y Gómez, E. (2006). Diseño de humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales en la UNMSM. *Revista del Instituto de Investigaciones de la Facultad de Geología, Minas, Metalurgia y Ciencias Geográfica*. 15 (17), 85-96.
- Londoño, L. y Marín, C. (2009). Evaluación de la eficiencia de remoción de materia orgánica en humedales artificiales de flujo horizontal sub superficial alimentados con agua residual sintética. Pereira.
- Montoya, J., Ceballos, L., Casas, J. y Morató, J. (2010). Estudio comparativo de la remoción de materia orgánica en humedales construidos de flujo horizontal subsuperficial usando tres especies de macrófitas. Recuperado de: http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1794-12372010000200007



Echeveria rosa francesa / Autor: Diego Alonso Rivera Vergara