

Eficiencia de diferentes sustratos de filtros de suelo plantados en la depuración de aguas residuales domésticas

Maira María Pérez Villar, Elena Rosa Domínguez, Pastora de la Concepción Martínez Nodal, María Elena López Vega, Yaribey Mayusca Gonzáles Roche y Mercedes Monteagudo Serrano.

Centro de Estudio de Química Aplicada, Facultad Química Farmacia, Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas, Carretera a Camajuani kilómetro 5½, Santa Clara, Villa Clara, correo electrónico: mairapv@uclv.edu.cu

Recibido: 13 de octubre de 2008.

Aceptado: 11 de mayo de 2009.

Palabras clave: depuración, filtros plantados, humedales, aguas residuales.
Key words: planted soil filters, wetlands, wastewater, purification.

RESUMEN. Se evaluó la influencia de cuatro sustratos de filtros de suelo plantados de flujo vertical en la depuración del efluente del sedimentador primario de la planta de tratamiento de aguas residuales de la Universidad Central de Las Villas. La instalación experimental consta de cuatro filtros independientes de 0,3 m de diámetro y 0,8 m de altura, a los cuales se les hizo pasar de forma intermitente el agua residual (cuatro días de reposo y dos funcionando a razón de doce litros por día). La planta escogida fue la *Typha domingensis*; Se obtuvo un incremento del oxígeno disuelto en todos los casos, así como un elevado porcentaje de reducción (por encima del 80 %) de la demanda bioquímica de oxígeno, la demanda química de oxígeno, los sólidos suspendidos totales y el nitrógeno Kjeldhal por debajo del límite máximo permisible promedio (LMPP) para el vertimiento según NC-27-1999. No se observaron diferencias significativas entre los parámetros de los filtros evaluados. La reducción del fósforo fue baja (menos de 40 %), siendo menor en el filtro que contenía suelo pardo con carbonato como sustrato, los valores de este parámetro no se redujeron por debajo del LMPP (4 mg/L). Se evaluó además, el funcionamiento de los filtros con el tiempo. Los mejores resultados correspondieron a los que contenían como sustrato suelo pardo con carbonato mezclado con zeolita en polvo y suelo ferralítico rojo, en el resto, se encontraron síntomas de colmatación.

ABSTRACT. The influence of four planted soil filters substrate in the depuration of the primary settlement effluent of the wastewater treatment plant of the Central University of Las Villas was evaluated. The experimental installation consists of four independent filters, with 0,3 m of diameter and 0,8 m of height. The plant selected was *Typha domingensis*, the filters are passed the wastewater intermittent (four days of rest and two days working). It was obtained an increase of the dissolved oxygen in all the cases, as well as the high removal percent (more of 80 %) of the biochemical oxygen demand, chemical oxygen demand, total suspended solid and Kjeldhal nitrogen, being below the average permissible maximum limit (APML) for the discharging, according to NC-27-1999. There was no significant differences among the filters for these parameters, the phosphorus removal was low, being smaller in the filter that contains brown soil with carbonate soil as substratum, the values of this parameter didn't decrease below the APML (4 mg/L). It was also evaluated the function of the filters with the time, offering the best results the filter that contained mixture of powder zeolite and brown soil with carbonate and the filters that contained red ferralitic soil as substrate. In the rest of the filters were observed obstruction symptoms.

INTRODUCCIÓN

En el ámbito mundial, existen numerosos estudios que proporcionan datos alarmantes acerca del impacto negativo que el hombre ocasiona a los recursos hídricos y se observa un incremento de la contaminación de los cuerpos receptores debido al manejo y vertimiento inadecuado de las aguas residuales de origen urbano e industrial.¹⁻³

En Cuba por su condición de país en vías de desarrollo, con escasos recursos naturales, hay un elevado déficit de mantenimiento y atención a la operación de los sistemas de tratamiento de aguas residuales, lo que ha originado la falta de depuración de las aguas residuales urbanas y el mal funcionamiento de las depuradoras existentes.

La planta de tratamiento de aguas residuales de la Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas se

ha deteriorado y además, no es capaz de satisfacer las necesidades existentes, debido a que la población se ha ido incrementando gradualmente y por ende, el flujo de residuos emitido. Ante esta situación, se deben contemplar alternativas de solución que impliquen un método de tratamiento apropiado; consideren tecnologías eficientes, con bajo costo de inversión y mantenimiento y se adapten a las variaciones de caudales y cargas contaminantes, entre los que se encuentran los métodos naturales de depuración.³⁻⁵

Los humedales de flujo subsuperficial o filtros plantados se incluyen dentro de estos métodos de tratamiento. En ellos 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.^{3,6}

Debido a que el medio poroso brinda mayor área superficial para el crecimiento de los microorganismos

la velocidad de remoción en los sistemas con flujo sub-superficial es mayor que en los de flujo superficial,⁷ se reportan muy buenos resultados con el empleo de estos métodos en el tratamiento secundario de aguas residuales urbanas.^{5,8-14}

Según diversas fuentes,^{8,15-17} existen diferentes factores que influyen en la depuración de las aguas residuales mediante esos métodos de tratamiento. El más investigado es la planta emergente, la cual tiene una gran importancia, ya que proporciona superficies adecuadas para la formación de películas bacterianas, facilita la filtración y la adsorción de los constituyentes del agua residual y permite la transferencia del oxígeno a la columna de agua y se recomienda escoger plantas que abundan en la zona, adecuadas al clima.^{7,10,11,18-23} Otro factor importante es el tipo de flujo, en el que los humedales horizontales funcionan permanentemente inundados, mientras que los verticales lo hacen intermitentemente. Esto hace que los sistemas con flujo vertical operen con cargas superiores que los horizontales, produzcan efluentes más oxigenados y libres de malos olores.^{8,24,25} La altura recomendada para los filtros verticales es 0,8 m y las dimensiones dependen del flujo y la carga del agua residual a tratar.²⁶⁻³¹

El sustrato tiene una gran influencia en los procesos de depuración en los filtros plantados. Es el medio donde ocurren las transformaciones químico físicas, se les usa como soporte para las bacterias y además, es un depósito para minerales y nutrientes.^{16,23} Como sustrato se puede utilizar suelo, arena, grava o mezclas de ellos con otros aditivos. Los sistemas que utilizan suelo tienen una mayor capacidad de remoción de fósforo y amonio.^{14,24}

El presente trabajo tuvo como objetivo evaluar la efectividad de diferentes sustratos de filtros plantados de suelo para la depuración del efluente del sedimentador primario de la planta de tratamiento de aguas residuales de la Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas. Los resultados se comparan con los aspectos que establece la NC-27-1999 para verter aguas residuales a un cuerpo de agua en el que son captadas para el riego agrícola y además, se realizan actividades recreativas en contacto con ella (cuerpo receptor B).

MATERIALES Y MÉTODOS

Planificación del experimento

Teniendo en cuenta lo reportado sobre los mecanismos de remoción de los filtros plantados de suelo y sus principales componentes,^{14,23,24,32} se realizó un diseño de experimento de un solo factor, un bloque y cuatro niveles, tomando como factor el sustrato. Se consideraron como variables respuestas los parámetros siguientes: demandas

química y bioquímica de oxígeno (DQO, DBO₅), sólidos suspendidos totales (SST), fósforo total (PT), nitrógeno Kjeldahl (NK), nitrógeno amoniacal (N-NH₄⁺), pH, sólidos totales disueltos (STD), conductividad eléctrica (CE) y oxígeno disuelto (OD)^{25,10} en el agua residual efluente de los cuatro filtros estudiados, los cuales fueron evaluados mediante métodos analíticos estandarizados (Tabla 1).³³

La figura 1 muestra la instalación experimental utilizada. En ella, los cuatro sustratos fueron colocados en los filtros de la forma siguiente:

Filtro 1: 0,15 m de grava + 0,25 m de zeolita granulada + 0,35 m suelo pardo con carbonato.

Filtro 2: 0,15 m de grava + 0,60 m de suelo pardo con carbonato.

Filtro 3: 0,15 m de grava + 0,25 m de zeolita granulada + 0,35 m de una mezcla de zeolita en polvo con suelo pardo con carbonato (una parte de zeolita por siete partes de suelo).

Filtro 4: 0,15 m de grava + 0,60 m de suelo ferralítico rojo.

Para los cuatro filtros se mantuvieron constantes los parámetros siguientes:

Las dimensiones: 0,3 m de diámetro y 0,8 m de altura (de esta forma se garantizó mantener la altura recomendada para los sistemas verticales²⁶⁻³¹).

El flujo: 12 L/d de forma intermitente dos días continuos y cuatro de reposo.^{8,24,25}

La planta: *Typha domingensis* (cuatro plantas por filtro) especie adecuada al clima y con muy buenos resultados en la depuración de aguas residuales urbanas.^{7,11,13,14,19,21}



Fig. 1. Instalación experimental utilizada.

Tabla 1. Parámetros de calidad y métodos analíticos empleados.

Parámetros.	Símbolo	Unidades	Método empleado
Potencial de hidrógeno	pH	pH	Electrométrico
Conductividad eléctrica a 25 °C	CE	μS/cm	Electrométrico
Sólidos totales disueltos	STD	mg/L	Electrométrico
Demanda química de oxígeno	DQO	mg O ₂ /L	Dicromato
Demanda biológica de oxígeno	DBO ₅	mg O ₂ /L	Winkler e incubación
Oxígeno disuelto	OD	mg O ₂ /L	Winkler
Nitrógeno Kjeldahl	NK	mg/L	Volumétrico, previa digestión
Nitrógeno amoniacal	N-NH ₄	mg/L	Volumétrico
Fósforo total	PT	mg/L	Espectrofotométrico
Sólidos suspendidos totales	SST	mg/L	Gavimétrico

El muestreo se realizó sobre la base del criterio de toma de muestras compuestas proporcionales al flujo, según Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos.³⁴ El periodo de funcionamiento de los filtros fue de 24 semanas. Las muestras del efluente se tomaron semanalmente de manera inicial y después quincenalmente durante 12 semanas. Posteriormente, se realizaron dos muestreos más, a las 23 y 24 semanas, para determinar si existían síntomas de colmatación en los filtros.

La evaluación estadística de los resultados se realizó a través del análisis de la varianza y con el empleo de los paquetes de programas Excel y Statgraphics.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En los valores medios y la desviación estándar de los parámetros evaluados del afluente y de los efluentes de los diferentes filtros, así como los porcentajes de reducción logrados, (Tabla 2) se pudo apreciar el incremento significativo del OD en todos los casos, lo que corroboró lo planteado por diferentes autores, en cuanto a este tipo de sistema de flujo vertical y las ventajas del empleo del flujo intermitente.^{23-25,30} Asimismo, se observó un elevado porcentaje de reducción (mayor del 80 %) de la DBO₅, DQO, NK y SST.

Las concentraciones de nitrógeno en el efluente se encontraron por debajo de 5 mg/L que es el límite de detección del método analítico utilizado, asumiéndose este valor para el cálculo del porcentaje de reducción. A los valores obtenidos de estos parámetros, se les realizó un análisis de varianza y no se obtuvieron diferencias significativas (p > 0,3), lo que indicó la no ocurrencia de un efecto de sustrato en los filtros evaluados.

Los menores porcentajes de reducción se obtuvieron para el fósforo, reafirmando lo planteado por diferentes autores,^{5,24,32,35} sobre la necesidad de emplear tiempos de retención hidráulicos mayores para lograr la reducción de este contaminante mediante filtros plantados. En este caso, sí existieron diferencias significativas entre los filtros, (p = 0,000 6), específicamente, entre el 2 y el resto. Este filtro presentó una menor eficiencia en la reducción de fósforo (Tabla 3).

Comportamiento de los filtros con el tiempo

Se comprobó la ocurrencia de un incremento de la CE y de los STD al pasar el agua residual por los filtros, en el primer mes de funcionamiento, lo que pudo deberse al intercambio con el sustrato (Fig. 2).

Se observó una tendencia en el tiempo hacia el incremento de las DQO y DBO₅ en los filtros 1 y 2 a partir de las 23 semanas, sin exceder el límite máximo permisible promedio (LMPP)³⁴ (Figuras 3 y 4). Teniendo en cuenta esto, se recomienda utilizar el suelo pardo con carbonato mezclado con zeolita en polvo y el ferralítico rojo como sustratos más factibles de utilizar para la depuración de las aguas residuales.

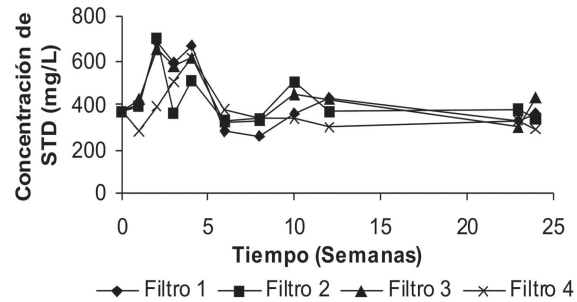


Fig. 2. Evolución de los sólidos totales disueltos.

Tabla 3. Análisis entre grupos para el fósforo.

Contraste	Diferencia	¹ Límite ±
F1-F2	-1,764*	0,872
F1-F3	-0,136	0,872
F1-F4	-0,288	0,872
F2-F3	1,628*	0,872
F2-F4	1,476*	0,872
F3-F4	-0,152	0,872

* Los grupos tienen diferencias significativas.

¹ Límite de error del intervalo de confianza.

Tabla 2. Valores medios y reducción de los parámetros analizados.

Valores medios	DBO ₅	DQO	PT	CE	STD (%)	pH	NK	N-NH ₄ ⁺	SST	OD
Afluente	121,55	268,37	9,27	735,71	367,14	7,60	28,82	22,59	178,8	0,67
DE	60,01	149,11	4,14	206,06	101,28	0,45	12,88	10,63	135,9	0,83
F1	5,80	28,93	5,65	896,25	585,00	7,53	< 5,00	< 5,00	7,2	6,09
DE	8,68	18,15	0,67	284,30	155,43	0,24	—	—	18,9	1,54
R(%)	95,2	89,2	39,1	—	—	—	82,7	77,9	95,9	—
F2	3,72	28,27	7,09	881,25	437,63	7,65	< 5,00	< 5,00	4,0	5,79
DE	8,14	14,66	1,45	227,57	116,67	0,17	—	—	32,7	1,97
R(%)	96,9	89,5	23,6	—	—	—	82,7	77,9	97,8	—
F3	3,28	30,29	5,85	946,25	471,25	7,91	< 5,00	< 5,00	9,2	7,11
DE	3,25	14,97	0,85	239,65	122,93	0,26	—	—	17,3	0,88
R(%)	97,29	88,7	36,9	—	—	—	82,7	77,9	94,8	—
F4	3,04	27,86	6,08	793,75	392,50	7,65	< 5,00	< 5,00	4,2	6,31
DE	3,49	9,80	0,92	205,32	104,05	0,53	—	—	9,9	1,14
R(%)	97,5	89,6	34,4	—	—	—	82,7	77,9	97,6	—

DE Desviación estándar. R(%) Reducción. F1, F2, F3, F4 Efluentes de los filtros 1, 2, 3 y 4.

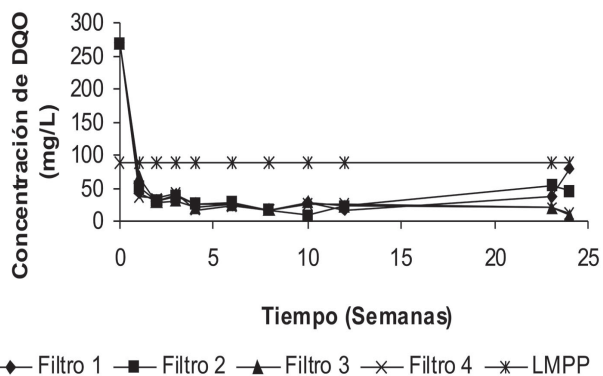


Fig. 3. Evolución de la DQO.
LMPP Límite Máximo Permisible Promedio.

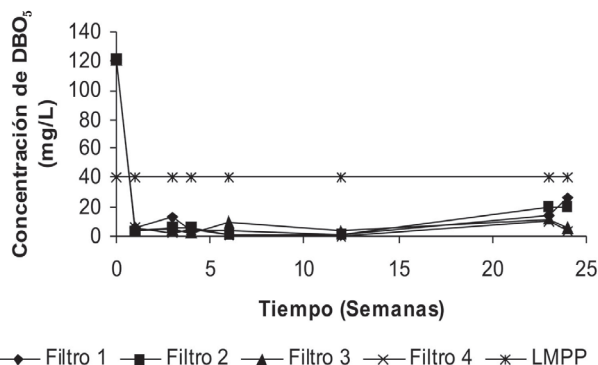


Fig. 4. Evolución de la DBO₅.
LMPP Límite Máximo Permisible Promedio.

La evolución de los nutrientes no ocurrieron de la misma forma que para la materia orgánica, ya que las concentraciones de nitrógeno se redujeron por debajo de 5 mg/L desde la primera semana de funcionamiento de los filtros y el fósforo se mantuvo estable a partir de la segunda semana, teniendo una menor remoción el filtro 2. Este parámetro se mantuvo durante todo el periodo del experimento por encima de 4 mg/L que es el LMPP³⁴

La concentración de OD del agua residual efluente se mantuvo por encima de la del afluente, observándose un decrecimiento al cabo del primer mes de funcionamiento (Fig. 5). A partir de los dos meses, se incrementó nuevamente, periodo en el cual las plantas se habían desarrollado, confirmando el papel de ellas como suminiistradoras de oxígeno al sistema.

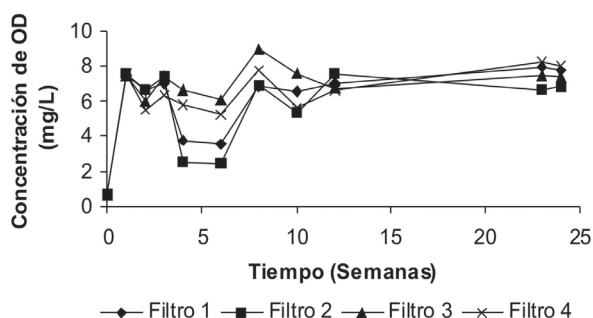


Fig. 5. Evolución del oxígeno disuelto.

Para lograr la depuración del flujo promedio efluente del sedimentador (125 m³/d), se realizó un diseño preliminar, considerando estos sistemas como reactores biológicos,^{5,8} con lo que se obtuvo un área para el filtro de 900 m² (tres zanjas de 3 m por 300 m, por la intermitencia del sistema).

CONCLUSIONES

Los filtros con los sustratos evaluados permiten la reducción de la materia orgánica, los sólidos suspendidos totales y el nitrógeno Kjeldhal por encima del 80 % y además, incrementan el oxígeno disuelto en el agua residual.

La reducción del fósforo en el agua residual en los cuatro filtros con los sustratos evaluados es baja, siendo menor en el filtro que contiene suelo pardo con carbonato.

Los filtros que contienen suelo pardo con carbonato mezclado con zeolita en polvo y suelo ferralítico rojo como sustrato, mantienen un comportamiento estable al cabo de los seis meses de funcionamiento, mientras que el resto tiene una tendencia hacia el aumento de la concentración de parámetros fundamentales como la DBO₅ y DQO, presentando síntomas de colmatación, por lo que se recomiendan los dos primeros sustratos como más factibles.

AGRADECIMIENTOS

Al Proyecto de Cooperación Inter Universidades, Flemish Interuniversity Council Program (VLIR), por su aporte para la realización de este trabajo.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- García-Armisen T, Tournon A, Petit F, Servais P. Source of fecal contamination in the seine estuary (France). *Estuaries*. 2005;28:257-264.
- Geary P. Effluent tracing and the transport of contaminants from domestic septic system. *Water Science and Technology*. 2005;51:1345-1351.
- Moreno L, Fernández MA, Rubio JC, Calaforra JM, López JA, Beas J, Alcaín G, Murillo JM, Gómez JA. La Depuración de Aguas Residuales Urbanas de Pequeñas Poblaciones Mediante Infiltración Directa en el Terreno Fundamentos y Casos Prácticos. Primera edición. Volumen 1, España, 2003. Consultado: marzo 2006. Disponible: <http://www.aguas.igme.es>
- Brix H. Use of constructed wetland in water pollution control: Historical development, present status, and future perspectives. *Water Sciences Technology*. 1994;30:209-223.
- Reed SC. Natural Systems for waste management and treatment. 2da Edición. New York: McGraw Hill: 1995: pp.124-189.
- Watson JT, Reed SC, Kadlec RH, Knight RL, Whitehouse AE. Performance Expectations and Loading Rates for Constructed Wetlands. En Hammer D.A. (ed) *Constructed Wetlands for Wastewater Treatment*. Municipal, Industrial and Agricultural, Lewis Publishers, Chelsea: 1989: pp51-319.
- Kuschik P, Wiexner A, Kappelmeyer U, Weixbrodt E, Kastner M, Stottmeister U. Annual cycle of nitrogen removal by a pilot-scale subsurface horizontal flow in a constructed wetland under moderate climate. *Water Research*. 2003;37:4239-4242.
- Kadlec RH, Knight RL, Vymazal J, Brix H, Cooper P, Haberl R. *Constructed Wetlands for Pollution Control: Processes, Performance, Design and Operation*, IWA Specialist Group on use of Macrophytes in Water Pollution Control, IWA Publishing London UK: 2000:pp.425-509.
- Lesage E, Rousseau D, Meers E, Van de Moortel A, Du Laing G, Tack F, De Pauw N, Verloo M. Accumulation of Metals in the Sediment and Reed Biomass of a Combined Constructed Wetland Treating Domestic Wastewater. *Water Air Soil Pollut*. 2007;183:253-264.

10. Solano ML, Soriano P, Ciria MP. Constructed Wetlands as a Sustainable Solution for Wastewater Treatment in Small Villages. *Biosystems Engineering*. 2004;87(1):109-118.
11. Calheiros C, Rangel A, Castro P. Constructed wetland systems vegetated with different plants applied to the treatment of tannery wastewater. *Water Research*. 2007;41(8):1790-1798.
12. Tunçsiper B. Removal of nutrient and bacteria in pilot-scale constructed wetlands. *Journal of Environmental Science and Health*. 2007;42(8):1117-1124.
13. Puigagut J, Salvado H, Garcia D, Granes F, Garcia J. Comparison of microfauna communities in full scale subsurface flow constructed wetlands used as secondary and tertiary. *Water Research*. 2007;41(8):1645-52.
14. Healy MG, Rodgers M, Mulqueen J. Treatment of dairy wastewater using constructed wetlands and intermittent sand filters. *Bioresource Technology*. 2007;98(12):2268-81.
15. Gorra R, Coci M, Ambrosoli R, Laanbroek HJ. Effects of substratum on the diversity and stability of ammonia-oxidizing communities in a constructed wetland used for wastewater treatment. *Journal of Applied Microbiology*. 2007;103:1442-1452.
16. Vacca G, Wand H, Nikolausz M, Kusch P, Kästner M. Effect of plants and filter materials on bacteria removal in pilot-scale constructed wetlands. *Water research*. 2005;39(7):1361-73.
17. Garcia J, Aguirre P, Mujeriego R, Huang Y, Ortiz L, Bayona JM. Initial contaminant removal performance factors in horizontal flow reed beds used for treating urban wastewater. *Water Research*. 2004;38(7):1669-78.
18. Mantovi P, Marmiroli M, Maestri E, Tagliavini S, Piccinini S, Marmiroli N. Application of a horizontal subsurface flow constructed wetland on treatment of dairy parlor wastewater. *Bioresource Technology*. 2003;88(2):85-94.
19. Lamchaturapatr J, Su WY, Jae S. Nutrient removals by 21 aquatic plants for vertical free surface-flow (VFS) constructed wetland. *Ecological Engineering*. 2007;29:287-293.
20. Zhang Z, Rengel Z, Meney K. Nutrient Removal from Simulated Wastewater Using *Canna indica* and *Schoenoplectus validus* in Mono- and Mixed-Culture in Wetland Microcosms. *Water Air Soil Pollute*. 2007;183:95-105.
21. Tjasa G. Long term performance of a constructed wetland for landfill leachate treatment. *Ecological Engineering*. 2006;26(4):365-374.
22. Lee BH, Scholz M. What is the role of *Phragmites australis* in experimental constructed wetland filters treating urban runoff? *Ecological Engineering*. 2007;29(1):87-95.
23. Stottmeister U, Wieszner A, Kusch P, Kappelmeyer U, Kastner M, Bederski O, *et al.* Effects of plants and microorganisms in constructed wetlands for wastewater treatment. *Biotechnology Advances*. 2003;22(1):93-117.
24. Prochaska CA, Zouboulis AI. Removal of phosphates by pilot vertical-flow constructed wetlands using a mixture of sand and dolomite as substrate. *Ecological Engineering*. 2006;26(3):293-303.
25. Molle P, Liénard A, Grasmick A, Iwema A. Effect of reeds and feeding operations on hydraulic behaviour of vertical flow constructed wetlands under hydraulic overloads. *Water Research*. 2006;40(3):606-612.
26. Vymazal J. Horizontal sub-surface flow and hybrid constructed wetlands systems for wastewater treatment. *Ecological Engineering*. 2005;25(5):478-90.
27. Öövel M, Tooming A, Mairing T, Mander Ü. Schoolhouse wastewater purification in a LWA-filled hybrid constructed wetland in Estonia. *Ecological Engineering*. 2007;29(1):17-26.
28. Vymazal J. Removal of nutrients in various types of constructed wetlands. *Science of the Total Environment*. 2007;380(1-3):48-65.
29. Sleytr K, Tietz A, Langergraber G, Haberl R. Investigation of bacterial removal during the filtration process in constructed wetlands. *Science the Total Environment*. 2007;380(1-3):173-180.
30. Brix H, Arias CA. The use of vertical flow constructed wetlands for on-site treatment of domestic wastewater: New Danish guidelines. *Ecological Engineering*. 2005;25(5):491-500.
31. Gross A, Shmueli O, Ronen Z, Raveh E. Recycled vertical flow constructed wetland (RVFCW) a novel method of recycling greywater for irrigation in small communities and households. *Chemosphere*. 2007;66:916-923.
32. Frechen FB, Schier W, Felmeden J. Plant-covered retention soil filters (RSF) Fulda Fellenweg for advanced CSO treatment-a ten year field report, 10th International Conference on Urban Drainage, Copenhagen/Denmark, 2005.
33. APHA, AWWA, WEF. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 21th ed. Washington DC: American Public Health Association, 2000.
34. Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos. Procedimiento para la aplicación de la norma NC-27:1999. Vertimiento de aguas residuales a las aguas terrestres y al alcantarillado. Especificaciones. Mayo, 2004.
35. Kinga A, Krogstad T, Vrale, Sovik A, Jenssen P. Phosphorus retention in the filter materials shellsand and Filtralite P®-Batch and column experiment with synthetic P solution and secondary wastewater. *Ecological Engineering*. 2007;29(2):200-208.