

Artículo científico

Uso de la filtración en bloques de suelo como tratamiento secundario de aguas residuales ordinarias.

Use of soil block filtration as secondary treatment of ordinary Wastewater.

Ingeniero Alejandro Quirós Ivankovich
Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados, Costa Rica
Dirección para correspondencia: aquirossev@gmail.com
Recibido 07.07.2021 Aceptado 27.09.2021

Resumen

Este artículo se basa en experimentación realizada con el sistema de Filtración en Bloques de Suelo o *Multi Soil Layering System* (MSL) que constituye una tecnología de depuración de aguas residuales novedosa, cuyas características la hacen ideal para ser aplicada en zonas rurales y de manera colectiva. Las investigaciones previas han mostrado resultados prometedores al tratar aguas residuales domésticas, eliminando gran cantidad de materia orgánica, sólidos suspendidos, nutrientes, entre otros contaminantes. El sistema MSL se puede construir a bajo costo, con materiales locales, ofreciendo un buen desempeño y una operación y mantenimiento sencillas y baratas. Se utiliza como tratamiento secundario, requiriendo un área varias veces menor que otras tecnologías típicamente recomendadas para poblaciones rurales.

Para la realización del estudio se construyeron cuatro pilotos MSL, los cuales reciben el efluente de un Reactor Anaerobio de Flujo Ascendente (RAFA) que cuenta con un pretratamiento previo. Se miden parámetros de calidad a la entrada y salida de los sistemas, tales como DBO, DQO, SST, entre otros.

Todos los pilotos lograron cumplir con los límites establecidos en la legislación costarricense, y se lograron porcentajes de remoción de al menos 75% para DBO, DQO y SST. Sin embargo, estos parámetros son considerablemente mejores en algunos de los cuatro pilotos probados en el estudio.

Palabras clave: Plantas de tratamiento, DBO, DQO, SST, sostenibilidad, filtros percoladores, eficiencia de remoción, zonas rurales.

Abstract

This article is based on experimentation with the Multi Soil Layering System (MSL), which constitutes a novel wastewater treatment technology, its characteristics make it ideal to be applied in rural areas as a centralized system. Previous research has shown promising results when treating domestic wastewater, removing large amounts of organic matter, suspended solids, nutrients, among other contaminants. The MSL is a low cost system that can be built with local materials, offering good performance and a simple and inexpensive operation and maintenance. It is used as a secondary treatment, requiring an area several times smaller than other technologies typically recommended for rural populations.

To carry out the study, four MSL pilots were built, which receive the effluent from an Upflow Anaerobic Sludge Blanket (UASB) reactor that has a previous pretreatment. Quality parameters are measured at the entrance and exit of the systems, such as BOD, COD, TSS, among others.

All pilots were able to comply with the limits established in the national law, and removal percentages of at least 75% were achieved for BOD, COD and TSS. However, these parameters are considerably better in some of the four pilots tested in the study.

Keywords: Treatment plants, BOD, COD, TSS, sustainability, trickling filters, removal efficiency, rural areas.

Introducción

En las comunidades rurales de Centroamérica existen grandes dificultades para acceder a proyectos de saneamiento de aguas residuales, y para darle sostenibilidad a los sistemas colectivos existentes, de manera que se asegure el cumplimiento con la legislación de cada país en materia de vertido de aguas tratadas.

Esto se debe principalmente a los elevados costos de construcción, operación y mantenimiento que demandan las Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR), así como la complejidad técnica de su funcionamiento.

Es por estas razones que en este artículo se presenta una tecnología de depuración de aguas residuales novedosa, cuyas características la hacen ideal para ser aplicada en zonas rurales y de manera colectiva.

Se trata del sistema de tratamiento en bloques de suelo o MSL por sus siglas en inglés (*Multi Soil Layering System*), un sistema de tratamiento secundario que fue investigado por primera vez en Japón durante la década de 1990, y que tiene similitudes con los filtros percoladores.

El sistema MSL se basa en la experiencia de que el suelo cuenta con propiedades favorables para realizar el tratamiento de aguas residuales, ya que es un material complejo en el que se dan procesos físicos, químicos y biológicos. Se busca mejorar las propiedades de flujo del agua a través del suelo, con lo que se evita colmatación y se permite una mayor carga hidráulica superficial (CHS).

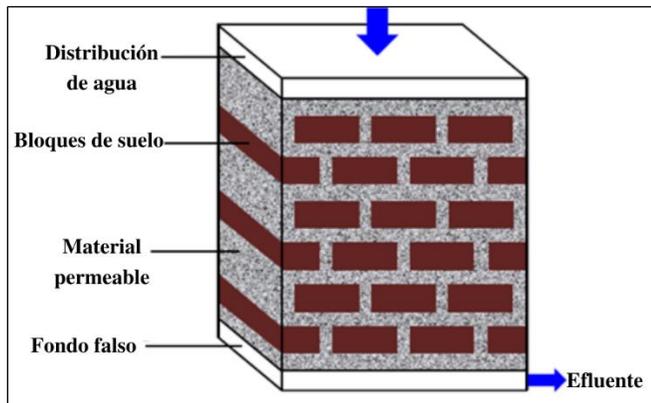
Algunas características del sistema MSL son:

- Ofrece altos porcentajes de remoción para contaminantes orgánicos, sólidos suspendidos, nitrógeno, fósforo, entre otros.

- Se puede construir con materiales locales y desechos de otras industrias.
- No requiere de equipo especializado para su construcción ni operación.
- No requiere energía eléctrica.
- Su construcción y operación son de bajo costo.
- Bajo requerimiento de área en comparación con otros sistemas recomendados para zonas rurales (como lagunas y humedales).
- Su altura se encuentra entre 0.6 y 1.2 m.
- Puede ser construido enterrado o sobre el nivel del suelo.
- Su operación es sencilla, por lo que no requiere personal especializado.
- Se ha comprobado que su vida útil es de entre 15 y 20 años (Sato et al, 2019).
- Una vez terminada la vida útil del sistema, se puede utilizar los materiales del sistema como mejoradores de suelo para agricultura, ya que cuentan con una gran cantidad de nutrientes y materia orgánica.

La Figura 1 muestra un esquema típico de un sistema MSL, el cual consiste en un arreglo similar al de unos ladrillos, con bloques de suelo intercalados y material permeable en medio de ellos.

Figura 1. Esquema típico de un sistema MSL.



Fuente: Adaptado de An et al. (2015)

Los materiales y composición típica de los bloques de suelo son los siguientes:

- Suelo (desde 50 hasta 75% de la mezcla).
- Carbón (desde 0 hasta 10% de la mezcla).
- Hierro (desde 10 hasta 15% de la mezcla).
- Materia orgánica (desde 5 hasta 30% de la mezcla).
- Bolsas biodegradables (confinamiento).

Así mismo, las principales alternativas utilizadas como material permeable son:

- Zeolita
- Grava
- Perlita
- Carbón activado granular

En cuanto a CHS, se considera que el sistema puede operar adecuadamente en el rango de 200 hasta 1000 L/m²día (An et al., 2015).

En los sistemas MSL se presenta una combinación compleja de factores que permite la remoción de distintos contaminantes, entre los procesos que se desarrollan se encuentran la precipitación, filtración, adsorción y biodegradación (Chen et al., 2009; Sato et al., 2011).

Así mismo, An et al. (2015) indican que con el paso del agua residual y los contaminantes que contiene, la matriz de suelo en los bloques permite procesos como

adsorción de partículas, intercambio iónico, oxidación- reducción, migración y precipitación, consumo por parte de animales y plantas, entre otros.

Las características únicas de permeabilidad, estructura y distribución del agua en sistemas MSL hace posible que los bloques de suelo operen como zonas saturadas anaeróbicas y las capas permeables operen como zonas aeróbicas, esto permite que se dé una gran variedad de procesos dentro del sistema.

Antecedentes

El sistema MSL fue desarrollado en Japón, en los años 90, y desde entonces se ha continuado su investigación en dicho país (Chen et al, 2009).

También se han realizado experimentos en otros países como China, India, Marruecos, Tailandia, Taiwán e Indonesia, todos ellos con resultados prometedores.

An et al. (2015) realizaron una recopilación de numerosos experimentos ejecutados con esta tecnología, entre los años 2000 y 2015, de sus tablas resumen se desprende que:

- Se han realizado pruebas con cargas hidráulicas superficiales que van desde los 200 hasta los 4000 L/m² día.
- En términos generales, se aprecia mayores porcentajes de remoción para cargas hidráulicas menores a 600 L/m² día.
- Presenta porcentajes de remoción para DBO: desde 52.6 hasta 99.8 %.
- Presenta porcentajes de remoción para DQO: desde 22.9 hasta 98.1 %.
- Presenta porcentajes de remoción para sólidos suspendidos totales: desde 32.4 hasta 97.2 %.
- Presenta porcentajes de remoción para Nitrógeno total: desde 22 hasta 99.7 %.
- Presenta porcentajes de remoción para Fósforo total: desde 26.1 hasta 99.1 %.

Metodología

La tecnología MSL fue evaluada en el presente artículo por medio de un estudio experimental de investigación cuantitativa. Esto se logró mediante la construcción y monitoreo de sistemas piloto, que pueden ser replicados en comunidades rurales del área centroamericana.

Sitio de estudio

El estudio se realizó en la PTAR de la Urbanización Los Cenízaros, ubicada en Barrio Corazón de Jesús. Este sitio pertenece al distrito de Aserrí, de la provincia de San José, justo en las afueras de la Gran Área Metropolitana de Costa Rica.

La Figura 2 muestra la ubicación de la PTAR.

Figura 2. Ubicación de PTAR Urb. Los Cenízaros.



Fuente: Adaptado de Google Earth. (2020)

Esta planta de tratamiento da servicio a 150 viviendas, y cuenta con un tren de pretratamiento que consiste en canal de rejillas, desarenador y desengrasador, seguido de un tratamiento primario mediante Reactor Anaerobio de Flujo Ascendente (RAFA).

Se utilizó el efluente del reactor para desviar un porcentaje del caudal y alimentar a los pilotos de MSL, los cuales funcionan como tratamiento secundario para la porción de agua desviada.

De esta manera, la PTAR seleccionada cumple con los criterios de inclusión de tratar únicamente aguas residuales domésticas y encontrarse fuera del área urbana. Además, permite la utilización del sistema MSL como tratamiento secundario.

Sistemas piloto

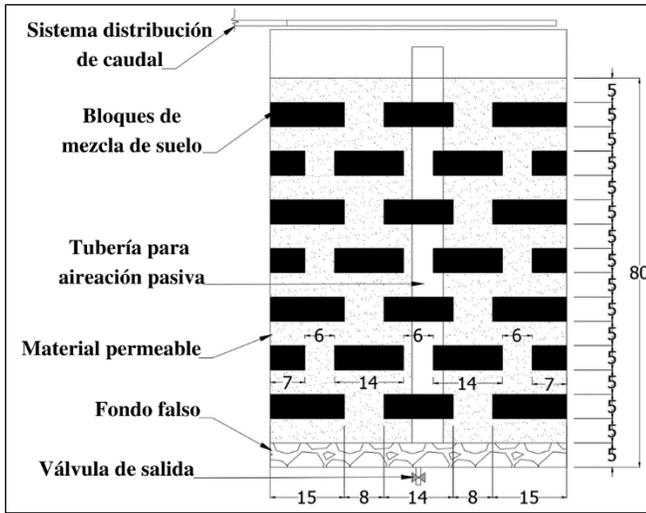
Se construyen 4 pilotos distintos, cada uno compuesto por un estañón de polietileno, el cual se rellena, de manera alternada, con capas de material permeable y de bloques de suelo.

Los bloques de suelo son elaborados mediante la mezcla, según proporción por peso seco, de 70% suelo, 10% aserrín, 10% trozos de hierro y 10% carbón activado en polvo, todo esto confinado dentro de bolsas de yute.

El fondo falso se logra mediante la colocación de una capa de piedra cuarta (38 mm) y el posterior relleno de los espacios grandes observados con piedra quintilla (12.5 mm).

En la Figura 3 se muestra el esquema del diseño final de un piloto MSL utilizado para el presente estudio.

Figura 3. Diseño final pilotos MSL.



Nota: Dimensiones en cm.

La Tabla 1 indica las características que diferencian a cada uno de los pilotos instalados.

Tabla 1. Características de cada piloto instalado.

Característica	Piloto 1	Piloto 2	Piloto 3	Piloto 4
Material permeable	Antracita	Piedra	Antracita	Piedra
Suelo utilizado en la mezcla	Arenoso	Arenoso	Limoso	Limoso
Capas de material permeable	8	8	8	8
Capas de bloques de suelo	7	7	7	7

La CHS promedio utilizada a la entrada de los pilotos fue de 535 L/m²día.

En la Figura 4 se muestran los cuatro pilotos instalados, junto con el sistema de distribución de caudal, el cual cuenta con agujeros de 1/8 de pulgada de diámetro, que permiten el goteo del agua de la manera más equitativa posible dentro del área del filtro.

Figura 4. Pilotos MSL instalados.



Número de muestras

Para determinar el número de muestras a evaluar para cada uno de los parámetros de calidad, se utiliza el método propuesto por el manual *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*, edición número 23.

El manual establece que, para una matriz móvil como el agua, se puede determinar el número de muestras con la ecuación 1.

$$N \geq \left(\frac{t*s}{U} \right)^2 \tag{1}$$

Donde:

- N: es el número de muestras
- t: es la t de Student para un nivel de confianza determinado
- s: es la desviación estándar
- U: es el nivel aceptable de incertidumbre de la medición

Los valores de “s” para cada uno de los parámetros a medir son tomados del manual anteriormente mencionado, que contiene datos estadísticos obtenidos en numerosos ensayos de laboratorio.

Por otro lado, los valores de “U” son consultados en los manuales del fabricante de los equipos que se

utilizan para realizar las pruebas de laboratorio, según el método de medición elegido para cada caso.

Existen gráficos que permiten calcular el número de muestras según esta metodología de t de Student, pero en este caso se utilizó la calculadora de tamaño muestral GRANMO (Marrugat, 2012) para realizar la estimación, ya que se basa en el mismo principio, pero ajusta sus resultados para el tamaño de muestra.

Se decide utilizar un nivel de confianza del 95% para estimar el número de muestras requerido. Este nivel se considera adecuado para un estudio de este tipo.

Toma de muestras

El estudio se realizó a lo largo de 5 meses, con muestreos semanales del agua que ingresa a los pilotos y del efluente de cada uno de ellos. Estos se efectuaron en diferentes días de la semana y a horas distintas, de manera que se tiene representatividad de distintos momentos de generación de agua residual.

Al tomar las muestras se aseguró que no existiera contaminación debido a agentes externos al sistema, se homogenizó el contenido del recipiente y se transportó en envases limpios e inertes a una temperatura de 4 °C.

Se logró recolectar un total de 15 muestras distintas para cada uno de los cinco puntos de muestreo: entrada al sistema y salida de cada uno de los pilotos.

Con estas muestras se realizaron ensayos de laboratorio para determinar parámetros de calidad del agua, tales como Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO_{5,20}), Demanda Química de Oxígeno (DQO) y Sólidos Suspendidos Totales (SST).

Análisis de muestras

Los métodos utilizados para medir los parámetros mencionados se toman del *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (2017), y son los siguientes:

- 5210 D: Método respirométrico mediante aparato manométrico (para medir la DBO_{5,20}).
- 5220 D: Método colorimétrico de reflujo cerrado, mediante digestión en reactor (para medir la DQO).
- 2540 D: Método gravimétrico con secado a 103-105 °C (para medir los SST).

Posteriormente, los resultados se comparan con los valores límite establecidos en el Reglamento de Vertido y Reuso de Aguas Residuales (RVRAR) para descargas a cuerpos de agua.

El RVRAR es el documento que regula la materia relacionada con la manera en que se dispone de las aguas residuales tratadas de cualquier edificación o establecimiento de Costa Rica.

Operación del sistema

Con el fin de garantizar el buen funcionamiento de los pilotos instalados, es necesario realizar actividades periódicas en el sistema, estas actividades son sumamente sencillas, se realizan 3 veces a la semana, e incluyen:

- Limpieza de hojas, telarañas y suciedad en la superficie y alrededores de los pilotos.
- Manipulación de válvulas con el fin de evitar el taponamiento del sistema de distribución de caudal.
- Purga del sistema de distribución de caudal.
- Medición y calibración del caudal.
- Limpieza de la tubería de derivación de caudal en el RAFA.
- Revisión general en busca de algún problema que requiera mantenimiento.

A esto se debe agregar la operación diaria que requiere el pretratamiento y tratamiento primario de la PTAR, la cual también consiste en actividades que requieren poca especialización (limpieza de rejillas y desarenador, purga de lodos, entre otros).

Resultados

Se muestra el número de muestras calculado. Así como los valores de DBO, DQO y SST medidos a la entrada del sistema y en el efluente de cada uno de los pilotos durante la realización del experimento.

Resultados número de muestras

Mediante la calculadora de tamaño muestral GRANMO (Marrugat, 2012), se obtiene el número de muestra mínimo para estimar el promedio de cada

parámetro, a un 95% de confianza, los resultados se muestran en la Tabla 2.

Tabla 2. Resumen de resultados para DQO en los pilotos.

Parámetro	Desv. Est. (s)	Equipo medición	Incert. (U)	N, 95% conf.
DBO (mg/L)	30.5	Velp Scientifica DBO S. 6	18	12
DQO (mg/L)	13	Colorímetro Hach DR900	15	3
SST (mg/L)	2.8	Balanza ADAM PGL 303	2.35	6

Fuente: Adaptado de Baird et al. (2017) y Marrugat, J. (2012)

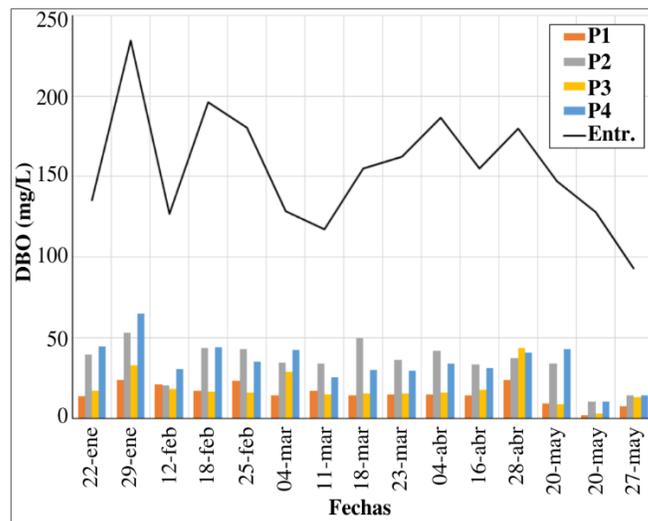
Resultados para DBO

En la Tabla 3 se presenta el resumen de los resultados de DBO_{5,20} en la entrada y salida de los pilotos MSL, mientras que en la Figura 5 se muestra un gráfico con la variación a lo largo del tiempo.

Tabla 3. Resumen de resultados para DBO en los pilotos.

Parámetro	E	P1	P2	P3	P4
No. de resultados	15	15	15	15	15
Valor max (mg/L)	234.55	23.86	52.88	43.38	64.88
Valor min (mg/L)	93.00	2.00	10.00	3.00	10.00
DBO prom (mg/L)	155.01	15.27	34.87	18.28	34.55
Desv est. DBO (mg/L)	36.09	6.16	11.96	9.85	13.20
% remoción prom	-	90%	78%	88%	78%
Desv est. % rem	-	4%	6%	6%	7%

Figura 5. Gráfico de DBO_{5,20} para los pilotos MSL.



Resultados para DQO

En la Tabla 4 se muestra una recopilación de los resultados de DQO en la entrada y salida de los pilotos MSL, mientras que en la Figura 6 se muestra un gráfico con la variación a lo largo del tiempo.

Tabla 4. Resumen de resultados para DQO en los pilotos.

Parámetro	E	P1	P2	P3	P4
No. de resultados	15	15	15	15	15
Valor max (mg/L)	434.6	72.92	104.34	99.92	119.8
Valor min (mg/L)	217.50	20.66	34.81	15	22.85
DQO prom (mg/L)	288.89	48.83	68.57	49.10	64.54
Desv est. DQO (mg/L)	61.93	15.76	18.38	23.26	21.24
% remoción prom	-	83%	76%	82%	78%
Desv est. % rem	-	5%	6%	9%	6%

Figura 6. Gráfico de DQO para los pilotos MSL.

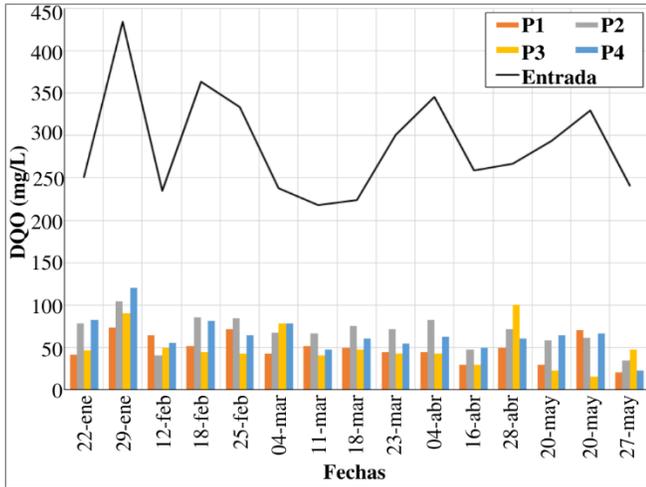
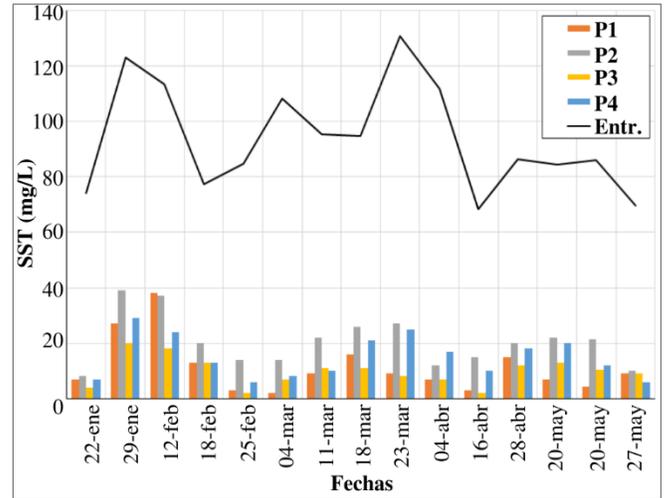


Figura 7. Gráfico de SST para los pilotos MSL.



Resultados para SST

En la Tabla 5 se presentan las principales estadísticas de ensayos de sólidos suspendidos totales en la entrada y salida de los pilotos MSL, mientras que en la Figura 7 se muestra un gráfico con la variación de los resultados obtenidos a lo largo del tiempo.

Tabla 5. Resumen de resultados para SST en los pilotos.

Parámetro	E	P1	P2	P3	P4
No. de resultados	15	15	15	15	15
Valor max (mg/L)	130.72	38	39	20	29
Valor min (mg/L)	68.4	2	8	2	6
SST prom (mg/L)	93.89	11.29	20.49	9.83	15.07
Desv est. SST (mg/L)	19.50	9.79	9.05	5.17	7.51
% remoción prom	-	88%	78%	90%	84%
Desv est. % rem	-	8%	7%	5%	6%

Valores límite RVRAR de Costa Rica

La Tabla 6 muestra los límites máximos permitidos para los tres parámetros discutidos en este artículo.

Tabla 6. Límites máximos de descarga a cuerpo receptor.

Parámetro	Unidad	Límite máximo, cuerpo receptor
DBO	mg/L	50
DQO _{5,20}	mg/L	150
SST	mg/L	50

Fuente: Adaptado de MINAE y MINSa, RVRAR. (2006)

Discusión de resultados

El tratamiento secundario que realizan los pilotos muestra eficiencias de remoción por encima del 75% para remover DBO, DQO y SST. Esta capacidad de depuración se considera adecuada para un sistema de este tipo.

Los resultados presentan consistencia a lo largo de los 5 meses en que se tomaron muestras, y una desviación estándar aceptable, por lo que se confirma la fiabilidad del sistema al ser utilizado como tratamiento secundario para remover estos contaminantes en aguas residuales de origen doméstico.

Se aprecia una mayor remoción en los Pilotos 1 y 3, los cuales difieren en el tipo de suelo utilizado, pero coinciden en la utilización de antracita como material permeable. Esto lleva a pensar que el tipo de suelo no es tan determinante en la capacidad de remover estos contaminantes, y que el tipo de material permeable tiene más influencia en la eficiencia de depuración.

Se intuye, además, que la mayor eficiencia para remover DBO, DQO y una porción de los sólidos suspendidos, se debe al área superficial y porosidad más elevadas con los que cuenta la antracita, lo cual permite la mayor proliferación de microorganismos, quienes se encargan de realizar la digestión de estos contaminantes.

Sin embargo, se considera particularmente valioso el uso de grava como material permeable, ya que consiste en un material sumamente sencillo de conseguir en zonas rurales, y que requeriría una baja inversión inicial y menos probabilidad de pagar transporte desde otra región.

Esta conveniencia se refuerza al observar que los pilotos MSL construidos con grava lograron cumplir los valores límite establecidos por la legislación de vertidos costarricense

Al comparar esta información con los resultados de las Tablas 3, 4 y 5, se aprecia que todos los pilotos cumplen con la regulación costarricense para los contaminantes citados.

En los gráficos de las Figuras 5, 6 y 7 se observa que solamente una de las muestras superó, de manera leve, el límite establecido en el RVRAR, únicamente para el caso de DBO del Piloto 2 y el Piloto 4, en el resultado de 29 de enero. Este evento se considera un caso aislado, ya que se observó que algún evento extraordinario ocurrió, y aumentó considerablemente la carga orgánica de entrada a la planta de tratamiento y a los pilotos.

Conclusiones

El efluente del sistema MSL, utilizado como tratamiento secundario de aguas residuales domésticas en una comunidad, logró porcentajes de remoción de al menos 75% para DBO, DQO, SST. Sin embargo, estos parámetros son considerablemente mejores en

los pilotos que utilizan antracita como material permeable.

Los pilotos MSL en los que se utilizó antracita como material permeable mostraron una eficiencia mayor, cercana al 90%, para la remoción de DBO, DQO y SST.

El tipo de suelo utilizado para la mezcla de los bloques de suelo no representó una diferencia significativa en la capacidad de depuración de los pilotos, para los tres parámetros evaluados en este artículo.

El efluente de los cuatro pilotos MSL utilizados en este estudio cumplió con los límites establecidos en el Reglamento de Vertido y Reuso de Aguas Residuales de Costa Rica. Por lo que se considera que es una opción aplicable para tratamiento de agua en este país.

La facilidad de adquisición de los materiales utilizados, así como los bajos costos de implementación, operación y mantenimiento del sistema, hacen que los filtros MSL se consideren adecuados para ser implementados en zonas rurales de Costa Rica y de otros países de Centroamérica con condiciones similares.

A estos aspectos se suma la ventaja de la poca especialización requerida para operar el sistema. Por lo que podría ser atendido por personal de organizaciones comunales que administran servicios de agua.

Agradecimientos

A la ASADA Poás y Bo. Corazón de Aserri por facilitar sus instalaciones para la realización de este estudio. Al Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados por los materiales y apoyo brindados. A la Universidad de Costa Rica, por su colaboración y préstamo de laboratorios para realizar los ensayos al agua residual.

Referencias

An, C. J. (2015). Multi-Soil-Layering Systems for Wastewater Treatment in Small and Remote Communities. *Journal of Environmental Informatics*.
<https://doi.org/10.3808/jei.201500328>

Baird, R., Rice, E. W., Eaton, A. D., Bridgewater, L., & Water Environment Federation. (2017). Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. American Public Health Association.

Chen, X., Luo, A. C., Sato, K., Wakatsuki, T., & Masunaga, T. (2009). An introduction of a multi-soil-layering system: a novel green technology for wastewater treatment in rural areas. *Water and Environment Journal*, 23(4), 255-262. <https://doi.org/10.1111/j.1747-6593.2008.00143.x>

Marrugat, J. (2012). Calculadora de Tamaño Muestral GRANMO del Instituto Municipal de Investigación Médica de Barcelona [Programa de cálculo online]. Recuperado 6 de abril de 2021, de <https://www.imim.cat/ofertadeserveis/software-public/granmo/>

MINAE, & MINSA. (2006, agosto 9). DE-No 33601: Reglamento de Vertido y Reuso de Aguas Residuales. Recuperado 25 de abril de 2020, de http://www.pgrweb.go.cr/scij/Busqueda/Normativa/Normas/nrm_texto_completo.aspx?nValor1=1&nValor2=59524

Sato, K., Iwashima, N., Wakatsuki, T., & Masunaga, T. (2011). Quantitative evaluation of treatment processes and mechanisms of organic matter, phosphorus, and nitrogen removal in a MSL system. *Soil Science and Plant Nutrition*, 57(3), 475-486. <https://doi.org/10.1080/00380768.2011.590944>

Sato, K., Wakatsuki, T., Iwashima, N., & Masunaga, T. (2019). Evaluation of Long-Term Wastewater Treatment Performances in Multi-Soil-Layering Systems in Small Rural Communities. *Applied and Environmental Soil Science*, 2019, 1-11. <https://doi.org/10.1155/2019/1214368>

Información del Autor

MSc. en Ingeniería Sanitaria de la Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos (ERIS) de la Universidad de San Carlos de Guatemala.