

Artículo Científico / Scientific Article

Eficiencia de remoción de DQO en un filtro percolador utilizando tapas de botellas de polipropileno como medio filtrante

COD Removal efficiency in a trickling filter using polypropylene bottle caps as filter media

Helen Cecilia López López¹, Pedro Cipriano Saravia Celis²

¹Empresa Municipal de Agua-EMPAGUA- ²Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos, Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala

Dirección para recibir correspondencia: ceecii2109.cl@gmail.com

Recibido: 08/07/2025 Revisión: 10/10/2025 Aceptado: 14/12/2025

Resumen

Esta investigación evaluó la eficiencia de remoción de la demanda química de oxígeno (DQO) en un filtro percolador de una sola etapa con tapas de botellas de polipropileno como medio filtrante. La unidad experimental, de 3 m de altura y 0.60 m de diámetro, operó por gravedad y sin recirculación en la planta piloto de tratamiento de aguas residuales "Ing. Arturo Pazos Sosa". El lecho incluyó 57,312 tapas distribuidas aleatoriamente. En nueve muestreos se determinaron las concentraciones de DQO a la entrada y salida del sistema conforme al Método 106B del Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. La concentración promedio fue de 396.22 mg/L en el afluente y 195.89 mg/L en el efluente. La eficiencia promedio de remoción alcanzó 50.94 % (51 % al redondear), con valores entre 21 % y 63 %. El caudal promedio fue de 0.085 L/s; su reducido intervalo de variación impidió evaluar su efecto en los resultados obtenidos. El filtro demostró capacidad para reducir la DQO a escala experimental.

Palabras clave: aguas residuales domésticas, filtro percolador, demanda química de oxígeno, polipropileno reciclado, medio filtrante, tratamiento biológico.

Abstract

This study evaluated chemical oxygen demand (COD) removal efficiency in a single-stage trickling filter using polypropylene bottle caps as filter media. The experimental unit, measuring 3 m in height and 0.60 m in diameter, operated by gravity without recirculation at the "Ing. Arturo Pazos Sosa" wastewater treatment pilot plant. The filter bed contained 57,312 randomly distributed caps. Influent and effluent COD concentrations were determined in nine sampling events in accordance with Method 106B of *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*. Average COD concentrations were 396.22 mg/L in the influent and 195.89 mg/L in the effluent. Average removal efficiency was 50.94% (51% when rounded), with values ranging from 21% to 63%. The average flow rate was 0.085 L/s; its narrow range of variation prevented evaluation of its effect. The filter demonstrated the capacity to reduce COD at an experimental scale.

Keywords: domestic wastewater, trickling filter, chemical oxygen demand, recycled polypropylene, filter media, biological treatment.



Introducción

El tratamiento de las aguas residuales domésticas requiere alternativas que reduzcan la carga contaminante y sean compatibles con las necesidades de operación y mantenimiento. Los filtros percoladores constituyen una opción de tratamiento biológico cuya eficiencia debe evaluarse bajo condiciones de operación definidas (Rehman et al., 2021). En este contexto, el aprovechamiento de materiales reciclados como medios de soporte plantea una alternativa de interés para investigar su desempeño. Sus posibles ventajas económicas y ambientales constituyen una motivación para el estudio, pero requieren evaluaciones específicas, por lo que esta investigación pretende ser un punto de partida para el análisis de uso de tapitas de polipropileno como medio soporte en un filtro percolador.

Los filtros percoladores utilizan un medio de soporte para el desarrollo de biopelículas que participan en la transformación de la materia orgánica del agua residual. Su desempeño depende tanto de las características del medio como de las condiciones de alimentación y operación (Martins et al., 2021; Kachhadiya & Patel, 2024). El área superficial específica, expresada como superficie por unidad de volumen, describe una propiedad geométrica del soporte, pero no equivale necesariamente a la superficie efectivamente colonizada. Por ello, la evaluación de la remoción de materia orgánica y la caracterización de la biomasa adherida deben considerarse mediciones complementarias.

La configuración del lecho, la profundidad del medio y las cargas aplicadas deben considerarse al interpretar el rendimiento de estos sistemas. Kachhadiya y Patel (2024) observaron diferencias en la retención de biomasa entre medios de polietileno y poliuretano al aumentar la carga hidráulica, mientras que Rehman et al. (2021) documentaron variaciones estacionales en la remoción de DQO de un filtro piloto. Estos antecedentes muestran que las eficiencias obtenidas en distintas instalaciones deben contextualizarse según el medio, la configuración, la alimentación y el régimen de operación, sin atribuir sus diferencias exclusivamente a una característica del soporte.

Las tapas de botellas de polipropileno representan un medio de soporte reciclado no convencional cuyo

desempeño requiere evaluación experimental. Como antecedente complementario, Ginter-Kramarczyk et al. (2021) estudiaron la formación de biopelículas sobre materiales poliméricos mediante análisis microbiológicos cualitativos y cuantitativos en el contexto de reactores de lecho móvil. Esta investigación permite apreciar el proceso de colonización bacteriana en materiales poliméricos, lo cual debe profundizarse al utilizarse en filtros percoladores. La presente investigación se limita a describir la remoción de DQO de una unidad piloto; no cuantifica la superficie colonizada ni la hidrodinámica del lecho, y tampoco compara directamente materiales ni determina ventajas económicas o ambientales.

El objetivo de la presente investigación fue evaluar la eficiencia de remoción de la demanda química de oxígeno (DQO) en un filtro percolador de una sola etapa, operado por gravedad y sin recirculación, utilizando tapas de botellas de polipropileno como medio filtrante, bajo las condiciones de operación de la planta piloto de tratamiento de aguas residuales "Ing. Arturo Pazos Sosa". El aporte se circunscribe a la caracterización descriptiva del desempeño de esta unidad mediante nueve campañas de muestreo de agua residual doméstica previamente sometida a sedimentación primaria.

Antecedentes

La Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos (ERIS), de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, ha desarrollado durante varias décadas investigaciones relacionadas con filtros percoladores en la planta piloto de tratamiento de aguas residuales "Ing. Arturo Pazos Sosa", utilizando diferentes configuraciones y materiales filtrantes (Huamaní & Pocasangre, 2020). Esta infraestructura ha permitido evaluar el comportamiento de distintas alternativas para el tratamiento biológico de aguas residuales domésticas provenientes de la colonia Aurora II, zona 13 de la ciudad de Guatemala.

Entre los antecedentes locales, López (2010) investigó la remoción de DQO en filtros percoladores de tres etapas con ripio clasificado de concreto; Cáceres (2012) evaluó material de desecho PET como soporte en filtros biológicos; y Ramírez (2012) estudió la eficiencia de etapas en serie en filtros percoladores.

Estos trabajos permiten contextualizar el uso de diferentes medios y configuraciones en la ERIS. Como antecedentes externos, Muñoz-Sánchez y Reyes-Mazzoco (2013) evaluaron la remoción de materia orgánica y nitrógeno con un nuevo empaque.

Rehman et al. (2021) evaluaron un filtro percolador piloto alimentado con agua residual doméstica durante 330 días, bajo temperaturas de 12 a 38 °C. Reportaron reducciones de DQO de 51–73 % fuera de la temporada invernal y de 13 a 49 % durante el invierno.

Martins et al. (2021) compararon filtros percoladores con grava y agregado de arcilla expandida, con y sin vegetación de vetiver. El estudio aporta un antecedente de evaluación del medio y de la incorporación de vegetación dentro de una misma investigación.

Kachhadiya y Patel (2024) evaluaron filtros percoladores multietapa con medios de polietileno y poliuretano, alimentados con agua residual sintética. Con una DQO de entrada cercana a 350 mg/L, ambos sistemas alcanzaron una remoción de 97 % a cargas hidráulicas de 2 a 6 m/d. A 6 m/d, el sistema con polietileno presentó un arrastre considerable de biomasa, mientras que el medio de poliuretano mantuvo su retención. Este antecedente destaca la relación entre las características del soporte y las condiciones hidráulicas; sin embargo, el uso de alimentación sintética, medios esponjosos y múltiples etapas difiere respecto al prototipo evaluado en esta investigación.

En conjunto, estos antecedentes justifican evaluar medios alternativos sin presuponer que sus eficiencias sean directamente comparables entre estudios. Las publicaciones recientes seleccionadas no examinan la misma combinación de tapas perforadas de polipropileno distribuidas aleatoriamente, un lecho de tres metros, agua residual doméstica sedimentada y operación por gravedad sin recirculación. En consecuencia, el aporte de esta investigación es documentar el desempeño de esa configuración a escala piloto, sin establecer superioridad del material, mecanismos de colonización ni viabilidad técnica integral.

Materiales y método

Enfoque metodológico

La investigación tuvo un alcance exploratorio y descriptivo y se desarrolló mediante el seguimiento temporal de una única unidad experimental a escala piloto, operada de forma continua. El estudio se centró en caracterizar la remoción de demanda química de oxígeno (DQO) en un filtro percolador de una sola etapa, empacado con tapas de botellas de polipropileno reciclado y operado por gravedad sin recirculación. Se documentó el desempeño del prototipo bajo las condiciones reales de operación. Las observaciones temporales corresponden a la misma unidad y no constituyen réplicas experimentales independientes.

Variables de estudio

La variable de respuesta fue la eficiencia de remoción de la DQO, determinada a partir de las concentraciones medidas a la entrada y salida del filtro percolador. El caudal de operación se midió y registró durante cada campaña de muestreo, sin regularlo para mantener un valor establecido. La concentración de DQO del afluente y el caudal se utilizaron para describir las condiciones observadas en cada campaña.

Muestra y muestreo

El estudio se realizó utilizando aguas residuales domésticas provenientes del sistema de alcantarillado de la colonia Aurora II, zona 13 de la ciudad de Guatemala, previamente sometidas a sedimentación primaria en la planta piloto de tratamiento de aguas residuales "Ing. Arturo Pazos Sosa".

El monitoreo comprendió nueve campañas de muestreo para describir el desempeño del filtro durante el período observado. En cada campaña se obtuvieron muestras puntuales del afluente y del efluente. Para la estimación del número de muestras, se utilizó la ecuación (1).

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

Donde:

N = Número sugerido de muestras.

t = Valor crítico de la distribución t de Student para el nivel de confianza y los grados de libertad utilizados.
 s = Desviación estándar global.
 U = Incertidumbre aceptable utilizada en la estimación del número de muestras.

Considerando una desviación estándar de 0.020 y una incertidumbre aceptable de 0.015, la relación s/U fue aproximadamente 1.33. Utilizando la curva del 95 % de confianza de la Figura 1060:1 de Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (American Public Health Association et al., 2017), se obtiene una estimación de nueve muestras.

El monitoreo comprendió nueve campañas, con una muestra puntual del afluente y otra del efluente obtenidas en cada campaña.

Unidad experimental e instrumentos de obtención de información

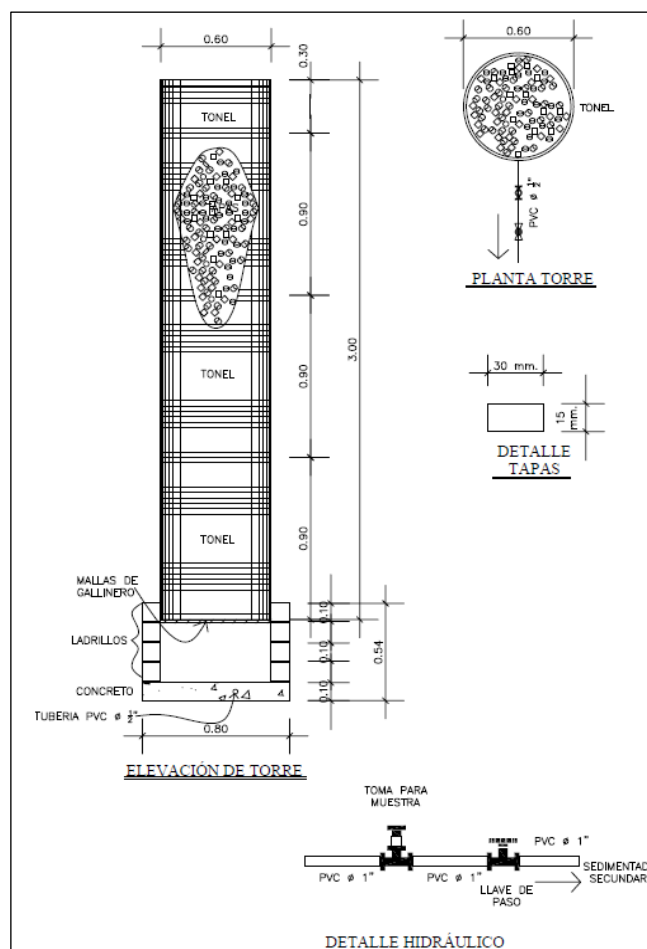
La unidad experimental consistió en un filtro percolador de tres metros de altura efectiva y 0.60 m de diámetro, construido mediante toneles metálicos de acero laminado en frío y operado por gravedad sin recirculación, como se presenta en la Figura 1. Como medio filtrante se utilizaron 57,312 tapas de polipropileno distribuidas aleatoriamente dentro del filtro. La evaluación de remoción de DQO no incluyó ensayos para evaluar la resistencia y estabilidad del material a largo plazo.

Las tapas se clasificaron para mantener un diámetro externo de $30.10 \text{ mm} \pm 0.15 \text{ mm}$, una altura máxima de $15.40 \text{ mm} \pm 0.20 \text{ mm}$ y un peso neto de $1.90 \text{ g} \pm 0.30 \text{ g}$ por unidad. Aunque el polipropileno utilizado es reciclable, el estudio no midió la porosidad ni el área superficial específica del lecho. Tampoco evaluó la resistencia del material al impacto, la rotura, la compresión o la tensión, ni verificó de forma sistemática la ausencia de aplastamiento, compactación o degradación durante el período experimental.

Previamente, a cada tapa se le practicó una perforación para evitar la acumulación de agua residual en su interior y favorecer el paso del flujo de agua residual a través del medio filtrante. Las muestras fueron analizadas en el Laboratorio Unificado de Química y Microbiología Sanitaria "Dra. Alba Tabarini Molina", donde las concentraciones de DQO se determinaron mediante el método 5220 D, de reflujos

cerrado colorimétrico, de Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (American Public Health Association et al., 2017).

Figura 1. Detalles de la unidad experimental utilizada en la investigación.



Trabajo de campo

El agua residual fue captada a la salida del sedimentador primario existente en la planta piloto e ingresó a la unidad experimental mediante flujo por gravedad. Posteriormente, el efluente del filtro fue conducido hacia el sedimentador secundario del sistema.

Durante el período experimental se realizaron nueve campañas de muestreo. En cada campaña se recolectaron muestras puntuales del afluente y del efluente aproximadamente al mismo tiempo para determinar sus concentraciones de DQO, y se midió y

registró el caudal de operación. La muestra del efluente se recolectó antes de su ingreso al sedimentador secundario. Las concentraciones correspondientes a cada campaña se utilizaron para calcular la eficiencia de remoción.

Análisis de datos

Los datos se analizaron mediante estadística descriptiva. Se calcularon medidas de tendencia central y dispersión para caracterizar las concentraciones de DQO, la eficiencia de remoción y el caudal registrados durante el período de observación. Las mediciones corresponden al seguimiento temporal de una única unidad experimental y no se consideraron réplicas experimentales independientes; por ello, no se aplicaron procedimientos de inferencia estadística que requirieran independencia muestral. Se examinaron descriptivamente las variaciones de la eficiencia de remoción junto con las concentraciones de DQO del afluente y el caudal del filtro percolador, sin establecer relaciones causales.

Resultados

La Tabla 1 presenta las concentraciones de Demanda Química de Oxígeno (DQO) medidas a la entrada y salida del filtro percolador durante los nueve muestreos realizados, así como el caudal registrado en cada evaluación.

Tabla 1. Caudal y concentraciones de DQO del afluente y del efluente en las nueve campañas de muestreo.

Muestra	Caudal L/s	DQO Afluente mg/L	DQO Efluente mg/L
1	0.089	313	191
2	0.077	288	110
3	0.094	401	156
4	0.083	415	154
5	0.084	385	167
6	0.078	557	336
7	0.087	352	279
8	0.083	541	250
9	0.089	314	120
Min	0.077	288	110
Max	0.094	557	336
Promedio	0.085	396.22	195.89
Desviación estándar muestral	0.005	96.10	76.72

Las concentraciones de DQO del afluente variaron entre 288 y 557 mg/L, mientras que las del efluente oscilaron entre 110 y 336 mg/L. A partir de los nueve registros de la Tabla 1, las medias aritméticas fueron de 396.22 mg/L y 195.89 mg/L, respectivamente. En las nueve campañas, la concentración de DQO del efluente fue inferior a la del afluente.

En las nueve campañas de muestreo, el caudal de operación registrado varió entre 0.077 y 0.094 L/s, con un promedio de 0.085 L/s y una desviación estándar muestral de 0.005 L/s. Estos valores describen una variación acotada del caudal en las mediciones realizadas, pero no permiten establecer su estabilidad durante los intervalos entre campañas.

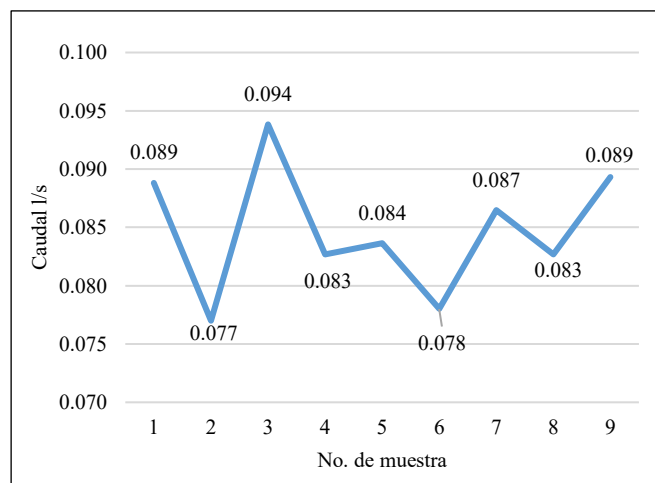
La Tabla 2 presenta la eficiencia de remoción de DQO correspondiente a cada una de las nueve campañas. Las eficiencias, expresadas como porcentajes enteros, oscilaron entre 21 % y 63 %, con un promedio de 50.94 % (51 % al redondear a un entero), calculado a partir de las eficiencias individuales sin redondeo previo. Este promedio corresponde a las eficiencias de las campañas y no a una eficiencia calculada a partir de las concentraciones medias del afluente y del efluente. La mayor eficiencia se registró en la campaña 4, con 63 %, seguida de las campañas 2 y 9, ambas con 62 % al redondear a porcentajes enteros. La menor eficiencia correspondió a la campaña 7, con 21 %.

Tabla 2: Eficiencia de remoción de la DQO

Muestra	Caudal L/s	DQO Afluente mg/L	DQO Efluente mg/L	DQO Eficiencia %
1	0.089	313	191	39
2	0.077	288	110	62
3	0.094	401	156	61
4	0.083	415	154	63
5	0.084	385	167	57
6	0.078	557	336	40
7	0.087	352	279	21
8	0.083	541	250	54
9	0.089	314	120	62
Promedio	0.085	396.22	195.89	50.94

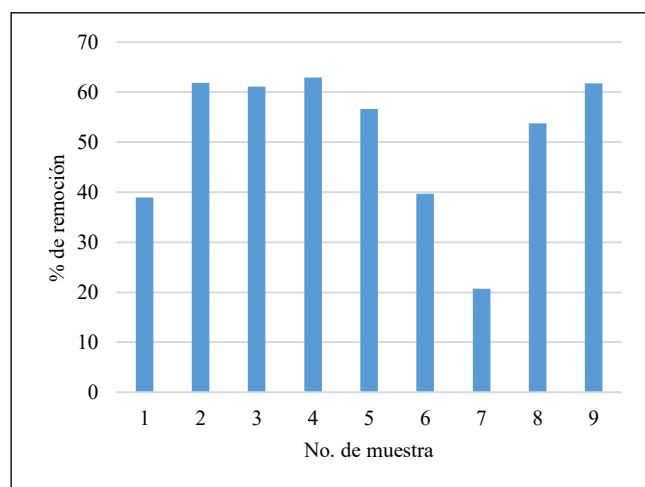
La Figura 2 muestra los caudales registrados en las nueve campañas de muestreo. Los valores oscilaron entre 0.077 y 0.094 L/s; la comparación entre campañas es descriptiva y no se evaluó mediante pruebas de significación estadística.

Figura 2. Gráfica de comportamiento de caudales de ingreso en el filtro objeto de la investigación



La Figura 3 presenta las eficiencias de remoción de DQO de las nueve campañas de muestreo, cuyo promedio fue de 50.94 % (51 % al redondear a un entero). De los nueve valores expresados como porcentajes enteros, siete se situaron entre 40 % y 63 %; los dos restantes correspondieron a las campañas 1 y 7, con 39 % y 21 %, respectivamente.

Figura 3. Eficiencias de remoción de DQO en las nueve campañas de muestreo.



Discusión de resultados

El filtro percolador evaluado alcanzó una eficiencia promedio de remoción de DQO de 50.94 % (51 % al redondear a un entero), con valores entre 21 % y 63 %. La inspección descriptiva de los nueve muestreos no muestra una correspondencia simple entre las variaciones de la eficiencia y las concentraciones de DQO del afluente; sin embargo, el diseño del estudio no permite cuantificar una asociación estadística ni establecer relaciones causales. El caudal se mantuvo entre 0.077 y 0.094 L/s, por lo que su escasa variabilidad impidió evaluar adecuadamente el efecto de la carga hidráulica. En consecuencia, las fluctuaciones observadas deben interpretarse como el resultado conjunto de factores operativos y biológicos que no fueron medidos de forma independiente.

Al comparar estos resultados con investigaciones previas desarrolladas en la planta piloto de la ERIS, se observa que López (2010) y Cáceres (2012) reportaron eficiencias promedio de remoción de 85.19 % y 90 %, respectivamente. Ambos estudios utilizaron filtros percoladores de seis metros de altura divididos en tres etapas, mientras que la unidad evaluada en esta investigación tuvo tres metros de altura y una sola etapa. Además, emplearon medios filtrantes diferentes: ripio clasificado de concreto y material PET, respectivamente. Estas diferencias de configuración, material y condiciones de operación limitan la comparación directa y podrían contribuir a explicar los mayores porcentajes informados; no obstante, el presente estudio no permite aislar el efecto de la altura, el tiempo de contacto, o la superficie efectivamente colonizada.

Ramírez (2012) evaluó un filtro percolador de tres metros de altura, similar al utilizado en este estudio, con piedra volcánica como medio filtrante, y obtuvo una eficiencia promedio de remoción de 61.30 %. La diferencia de 10.36 puntos porcentuales respecto del promedio de 50.94 % registrado en la presente investigación debe interpretarse con cautela, porque ambos trabajos no constituyen una comparación experimental controlada y pueden diferir en sus condiciones de operación. Por ello, estos resultados únicamente permiten contextualizar el desempeño de las tapas de polipropileno.

Muñoz-Sánchez y Reyes-Mazzoco (2013) reportaron eficiencias de remoción de 26 % a 46 % en un filtro percolador con medio plástico estructurado y

una altura efectiva de 0.79 m. Frente a ese intervalo, el promedio de 50.94 % obtenido con las tapas de polipropileno aporta otra referencia sobre el desempeño de medios plásticos bajo una configuración experimental diferente.

Ballesteros et al. (2023) informaron una eficiencia promedio de 15 % en un filtro de 0.29 m de altura con medio de PVC, aunque registraron valores puntuales cercanos al 90 %. La amplitud de esos resultados ofrece una referencia adicional sobre la variabilidad que puede presentarse en filtros de menor escala, pero las diferencias de altura, medio y condiciones de operación impiden atribuir el contraste observado a una sola característica del sistema.

Otras referencias amplían esta contextualización al mostrar que el desempeño de los filtros percoladores también varía con la temperatura, la carga hidráulica, la configuración del lecho y la capacidad del medio para retener biomasa. Rehman et al. (2021) documentaron variaciones estacionales en la remoción de DQO de un filtro piloto; Martins et al. (2021) evaluaron, dentro de un mismo diseño experimental, el efecto de distintos medios y de la incorporación de vegetación; y Kachhadiya y Patel (2024) observaron diferencias en la retención de biomasa entre medios de polietileno y poliuretano al modificar la carga hidráulica. Estos estudios permiten interpretar la eficiencia obtenida en este estudio como el resultado de una configuración y unas condiciones de operación específicas, sin atribuirla únicamente al uso de tapas de polipropileno ni establecer comparaciones directas de desempeño entre materiales.

En síntesis, la unidad piloto con tapas de polipropileno alcanzó una eficiencia promedio de remoción de DQO de 50.94 % bajo las condiciones evaluadas. El principal aporte de esta investigación es proporcionar una referencia inicial del comportamiento de esta configuración de una sola etapa, operada por gravedad y sin recirculación. Para ampliar su evaluación será necesario analizar en investigaciones futuras, la biomasa adherida, la pérdida de carga, la colmatación y la durabilidad del medio.

Conclusiones

El filtro percolador de una sola etapa empacado con tapas de botellas de polipropileno alcanzó una eficiencia promedio de remoción de DQO de 50.94 % (51 % al redondear a un entero), con valores entre 21 % y 63 % en las nueve campañas de muestreo. Este resultado documenta el desempeño de la unidad piloto bajo operación por gravedad y sin recirculación, sin establecer su comportamiento fuera de las condiciones evaluadas.

En las nueve campañas, la concentración de DQO del efluente fue inferior a la del afluente, lo que confirma la reducción de DQO durante el paso del agua residual por la unidad evaluada. Sin embargo, el estudio no midió la biomasa adherida, los sólidos retenidos ni la superficie efectivamente colonizada; por ello, los resultados no permiten describir el mecanismo biológico responsable de la remoción observada.

Los estudios citados muestran que la eficiencia de remoción de DQO en los filtros percoladores depende de múltiples variables, entre ellas la temperatura, la carga hidráulica, la configuración y altura del lecho, las características del medio filtrante y la retención de biomasa. En consecuencia, los resultados obtenidos con las tapas de polipropileno constituyen una referencia inicial que debe tener continuidad mediante investigaciones que incorporen y controlen estas variables, a fin de comprender con mayor precisión su influencia sobre el desempeño del sistema.

La inspección descriptiva de las nueve campañas no mostró una correspondencia simple entre las variaciones de la eficiencia de remoción y las concentraciones de DQO del afluente. Asimismo, el caudal se mantuvo entre 0.077 y 0.094 L/s; este intervalo reducido no permitió evaluar adecuadamente el efecto de la carga hidráulica. Debido al alcance descriptivo y al seguimiento de una sola unidad, estos resultados no permiten cuantificar asociaciones estadísticas ni establecer relaciones causales entre las variables observadas.

El aporte de esta investigación consiste en proporcionar parámetros iniciales de operación y desempeño para un filtro percolador de una sola etapa empacado con tapas de polipropileno, operado por gravedad y sin recirculación. Los datos disponibles no permiten establecer la viabilidad técnica integral del medio. Para evaluarla, se requieren estudios que midan

la biomasa adherida, la pérdida de carga, la colmatación, la durabilidad y los costos, mediante diseños que comparen distintos materiales bajo condiciones equivalentes. En ese marco, los resultados obtenidos constituyen una base para futuras investigaciones sobre el uso de tapas de polipropileno en filtros percoladores de pequeña escala.

Financiamiento

Este trabajo fue financiado con fondos propios de los autores.

Conflicto de interés

Los autores declaran no tener ningún tipo de conflicto de interés que pudiera haber influido en esta investigación.

Agradecimiento

Los autores expresan su especial agradecimiento a don Tereso de Jesús Pérez Bor (q. e. p. d.), operador de la planta piloto "Ing. Arturo Pazos Sosa", y al personal técnico del Laboratorio Unificado de Química y Microbiología Sanitaria "Dra. Alba Tabarini Molina", por su colaboración técnica.

Cómo citar este documento

López López, H. C., & Saravia Celis, P. C. (2025). Eficiencia de remoción de DQO en un filtro percolador utilizando tapas de botellas de polipropileno como medio filtrante. *Agua, Saneamiento & Ambiente*, 20(1), 1–9. <https://doi.org/10.36829/08ASA.v20i1.2142>

Consentimiento informado

No aplica.

Contribuciones de autor

H. C. L. L.: conceptualización de la investigación, diseño metodológico, trabajo de campo, construcción e implementación de la unidad experimental, toma y análisis de muestras, procesamiento estadístico de

datos, interpretación de resultados y redacción del manuscrito.

P. C. S. C.: diseño y supervisión de la investigación y revisión del manuscrito.

Referencias

- American Public Health Association, American Water Works Association, & Water Environment Federation. (2017). *Standard methods for the examination of water and wastewater* (23rd ed.). American Public Health Association.
- Ballesteros, L., Díaz, E., Ortiz, L., Sánchez, M., & Lizcano Sandoval, V. A. (2023). *Hydrodynamic evaluation and startup of a laboratory-scale trickling filter* (Version 1.0) [Data set]. Zenodo. <https://doi.org/10.5281/zenodo.8133136>
- Cáceres, J. O. (2012). Implementación de material desecho PET como material filtrante en filtros biológicos. *Agua, Saneamiento & Ambiente*, 7(1), 18–22. <https://doi.org/10.36829/08ASA.v7i1.1461>
- Ginter-Kramarczyk, D., Kruszelnicka, I., Michałkiewicz, M., Muszyński, P., Zajchowski, S., & Tomaszewska, J. (2021). Biofilm on the polymer composites—Qualitative and quantitative microbiological analysis. *Journal of Environmental Health Science and Engineering*, 19, 641–649. <https://doi.org/10.1007/s40201-021-00634-9>
- Huamaní Galindo, Z., & Pocasangre Collazos, A. E. (2020). Estudio de coeficientes cinéticos de filtros percoladores por etapas, con medio filtrante de piedra volcánica. *Agua, Saneamiento & Ambiente*, 15(1), 57–67. <https://doi.org/10.36829/08ASA.v15i1.1133>
- Kachhadiya, N., & Patel, U. D. (2024). Low-cost, reliable, and highly efficient removal of COD and total nitrogen from sewage using a sponge-filled trickling filter. *Water Science & Technology*, 90(3), 665–679. <https://doi.org/10.2166/wst.2024.252>
- López, J. A. (2010). *Investigación de la eficiencia de remoción de la demanda química de oxígeno en filtros percoladores de tres etapas utilizando ripio clasificado de concreto*. [Estudio especial

de maestría, Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos, Universidad de San Carlos de Guatemala].

Martins, V. F., Silva, G. J. da, & Borges, A. C. (2021). Effects of packing media and the insertion of vegetation on the performance of biological trickling filters. *Water*, 13(13), Article 1735. <https://doi.org/10.3390/w13131735>

Muñoz-Sánchez, D., & Reyes-Mazzoco, R. (2013). Evaluación de la eficiencia de remoción de materia orgánica y nitrógeno en un filtro percolador con nuevo empaque. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, 12(3), 575–583.

Ramírez Sánchez, O. L. (2012). *Investigación de la eficiencia de las etapas en serie de filtros percoladores de la planta de tratamiento de aguas residuales de la Universidad de San Carlos* [Estudio especial de maestría, Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos, Universidad de San Carlos de Guatemala].

Rehman, A., Anees, M., Sehar, S., Alhewairini, S. S., Saroj, D. P., & Ahmed, S. (2021). Simulated modelling, design, and performance evaluation of a pilot-scale trickling filter system for removal of carbonaceous pollutants from domestic wastewater. *Water*, 13(22), Article 3210. <https://doi.org/10.3390/w13223210>