



Diseño y construcción de un tipo de biofiltro percolador de laboratorio para el tratamiento de aguas residuales (AR) de las pozas de estabilización de Cajamarca – Perú

“Design and construction of a type of laboratory trickling biofilter for the treatment of wastewater (AR) from the stabilization ponds of Cajamarca – Peru”

Paola Fiorella Estefanía Ponce-López ^{1*}; Heber Max Robles-Castillo ²

¹Escuela de Posgrado, Universidad Nacional de Trujillo, Av. Juan Pablo II s/n - Ciudad Universitaria, Trujillo, Perú.

²Facultad de Ciencias Biológicas, Escuela de Microbiología y Parasitología, Universidad Nacional de Trujillo, Av. Juan Pablo II s/n - Ciudad Universitaria, Trujillo, Perú

Paola Fiorella Estefanía Ponce-López
Heber Max Robles-Castillo



<http://orcid.org/0000-0002-7875-5783>
<https://orcid.org/0009-0009-1188-2209>

Artículo Original

Recibido: 11 de febrero de 2025
Aceptado: 30 de mayo de 2025

Resumen

El presente estudio tuvo como objetivo diseñar y construir un biofiltro percolador a escala de laboratorio para el tratamiento de aguas residuales provenientes de las pozas de estabilización de Cajamarca, Perú, así como evaluar su comportamiento hidrodinámico mediante el análisis del flujo y el tiempo de retención hidráulica. La investigación constituye un avance de la tesis doctoral titulada “Eficiencia de biodegradación de la materia orgánica de las pozas de estabilización de Cajamarca con un biofiltro microbiano de laboratorio”. El biofiltro fue construido empleando materiales de bajo costo y fácil acceso, conformando un lecho sólido compuesto por capas de material pétreo y suelo, destinado al desarrollo de biopelículas microbianas. El sistema operó bajo un régimen de recirculación continua durante 15 días, con monitoreo periódico del efluente. Se observó una mejora progresiva en las características organolépticas del agua tratada, evidenciada por la reducción de turbidez, color y olor, lo que indica una eficiente degradación de la materia orgánica asociada a la actividad de los biofilms desarrollados.

Palabras clave: biofiltro percolador, aguas residuales, biofilm, tratamiento biológico.

Abstract

The This study aimed to design and construct a laboratory-scale trickling biofilter for the treatment of wastewater from stabilization ponds in Cajamarca, Peru, and to evaluate its hydrodynamic performance through flow rate and hydraulic retention time. This research constitutes part of the doctoral thesis entitled “Biodegradation efficiency of organic matter from stabilization ponds in Cajamarca using a laboratory microbial biofilter.” The biofilter was built using low-cost and readily available materials, forming a solid bed composed of layered gravel and soil to promote microbial biofilm development. The system operated under continuous recirculation for 15 days, with periodic monitoring of the effluent. Progressive improvements in wastewater quality were observed, including reductions in turbidity, color, and odor. These changes indicate effective organic matter degradation associated with biofilm activity within the biofilter. The results demonstrate the feasibility of using laboratory-scale trickling biofilters as an efficient and accessible biological treatment alternative for wastewater stabilization pond effluents.

Keywords: trickling biofilter, wastewater treatment, biofilm, biological degradation.

*Autor para correspondencia: E. mail: pponce@unc.edu.pe

DOI: <http://dx.doi.org/10.17268/rebiol.2025.45.01.07>

Citar como:

Ponce López, P., & Robles Castillo, H. (2024). Eficiencia de biodegradación de materia orgánica de aguas de pozas de estabilización en Cajamarca, Perú, utilizando un biofiltro microbiano de laboratorio. *REBIOL*, 45(1), 68-74.



1. Introducción

La gestión eficiente de las aguas residuales (AR) constituye uno de los principales desafíos ambientales y sanitarios a nivel global, particularmente en regiones con limitaciones tecnológicas, económicas e institucionales. En este contexto, las pozas de estabilización representan una alternativa ampliamente utilizada para el tratamiento de aguas residuales en zonas rurales y semiurbanas; sin embargo, su desempeño suele verse comprometido por deficiencias en la degradación de la materia orgánica y en la remoción de contaminantes, lo que incrementa el riesgo de impactos negativos sobre los ecosistemas y la salud pública (Solano et al., 2022).

El acelerado proceso de urbanización ha intensificado la demanda de agua para usos domésticos, industriales y comerciales, generando una competencia directa con el sector agrícola por el recurso hídrico. Esta presión se agrava cuando las aguas residuales son vertidas sin tratamiento adecuado, afectando la disponibilidad y calidad del agua en zonas rurales y generando conflictos socioambientales entre áreas urbanas y agrícolas (Argüello, 2024). En este sentido, el tratamiento de aguas residuales debe abordarse desde un enfoque integral de gestión de cuencas, reconociendo al agua residual como parte del recurso hídrico disponible y promoviendo su aprovechamiento y control a lo largo de todo su ciclo dentro de la cuenca (Autoridad Nacional del Agua [ANA], 2013).

El monitoreo y evaluación de las pozas de estabilización requieren procedimientos estandarizados de muestreo que garanticen la representatividad de las características fisicoquímicas y microbiológicas del agua residual. Las muestras simples, tomadas en condiciones específicas de tiempo y lugar, constituyen una herramienta adecuada para el análisis de aguas residuales con predominio de contaminación fecal, siempre que las autorizaciones de vertimiento lo permitan (Aquistat, 2015).

Frente a estas limitaciones, los biofiltros han emergido como una alternativa tecnológica sostenible para el tratamiento biológico de aguas residuales. Estos sistemas están constituidos por un medio de soporte sólido que permite el paso del fluido y favorece el desarrollo de una biopelícula o biofilm, conformada por comunidades microbianas complejas —incluyendo bacterias, hongos, levaduras, protozoos y otros organismos— inmersas en una matriz de sustancias poliméricas extracelulares que confieren estabilidad estructural y funcional al sistema (Rodríguez, 2015). La actividad metabólica de estos microorganismos permite la biodegradación eficiente de la materia orgánica y otros contaminantes presentes en el agua residual.

Los biofiltros, también denominados sistemas de biopurificación o filtros biológicos, han demostrado una elevada capacidad para remover contaminantes orgánicos mediante procesos biológicos, empleando consorcios microbianos puros, mixtos o nativos, así como materiales de soporte de origen orgánico o inorgánico (Vidali, 2001; Baeta-Hall et al., 2005; Posada & Mosquera, 2007). Desde la década de 1990, diversos estudios

desarrollados en Europa y América del Norte sentaron las bases de los sistemas de lechos biológicos o *biobeds*, utilizando combinaciones de suelo, turba, residuos lignocelulósicos y materiales minerales, alcanzando altas eficiencias en la remoción de demanda química de oxígeno (DQO), demanda bioquímica de oxígeno (DBO₅), sólidos suspendidos totales (SST), nitrógeno total y coliformes fecales (Castillo et al., 2008; Den et al., 1998; Lens et al., 1994).

Los biofiltros percoladores, en particular, operan como biorreactores empacados en los que el agua residual percola a través de un lecho poroso colonizado por biopelículas microbianas. Este diseño permite un contacto prolongado entre el contaminante y la biomasa activa, favoreciendo su degradación bajo condiciones controladas de humedad, pH y disponibilidad de nutrientes (Ramírez, 2007). Debido a sus bajos costos operativos, facilidad de construcción y alta eficiencia de tratamiento, estos sistemas son considerados tecnologías limpias o verdes, especialmente adecuadas para países en desarrollo (Kennedy & Thalasso, 1998; Cabrera et al., 2011).

Estudios recientes han reportado eficiencias de remoción superiores al 90% en parámetros como DQO, DBO₅, SST y coliformes fecales en biofiltros percoladores operados a escala de laboratorio, lo que evidencia su potencial como solución sostenible para el tratamiento de aguas residuales municipales e industriales (Saboya, 2020; Atalaya, 2023). En el caso de la ciudad de Cajamarca, el crecimiento poblacional y la expansión de las actividades productivas han intensificado la presión sobre los sistemas de saneamiento existentes, agravando la contaminación de cuerpos de agua y ecosistemas asociados.

En este contexto, el desarrollo de tecnologías de tratamiento a escala de laboratorio constituye un paso fundamental para la implementación futura de soluciones *in situ* adaptadas a las condiciones locales. Por ello, el presente estudio tuvo como objetivos: diseñar y construir un biofiltro percolador microbiano a escala de laboratorio para el tratamiento de aguas residuales provenientes de las pozas de estabilización de Cajamarca; evaluar su comportamiento hidrodinámico y eficiencia en la biodegradación de la materia orgánica; y determinar los microorganismos más frecuentes asociados a la biopelícula desarrollada en el sistema.

2. Materiales y Métodos

Área de estudio

El estudio se desarrolló en las pozas de estabilización de aguas residuales del distrito de Cajamarca, departamento de Cajamarca, Perú. El sistema cuenta con una antigüedad aproximada de 22 años y está conformado por seis pozas de oxidación que ocupan un área cercana a 16 hectáreas, ubicadas en las inmediaciones del proyecto Qhapac Ñan (Figura 1).

Las pozas fueron diseñadas originalmente para una población de aproximadamente 57 000 habitantes, con una capacidad de tratamiento de hasta 70 L·s⁻¹. Actualmente, el distrito de Cajamarca alberga cerca de 180 000 habitantes, además de una población flotante estimada en 20 000 personas diarias, lo que genera un caudal aproximado de 187 L·s⁻¹ de aguas residuales. Esta sobrecarga ha provocado el colapso operativo del sistema desde hace más de una década, reduciendo significativamente su eficiencia de tratamiento.

Figura 1

Pozas de estabilización



Nota: Pozas de estabilización localizadas en la provincia de Cajamarca, Departamento de Cajamarca – Perú.

Diseño del estudio

Se realizó un estudio experimental a escala de laboratorio, orientado al diseño, construcción y evaluación hidrodinámica de un biofiltro percolador microbiano para el tratamiento de aguas residuales provenientes de las pozas de estabilización de Cajamarca.

Población y muestra

La población de estudio estuvo constituida por las aguas residuales generadas en las pozas de estabilización del distrito de Cajamarca. La muestra consistió en aguas residuales recolectadas en puntos estratégicos del sistema de tratamiento. Se seleccionaron inicialmente las pozas 1 y 3 para el muestreo aleatorio, y durante el quinto y sexto muestreo se incluyeron adicionalmente las pozas 5 y 6, con el fin de garantizar la representatividad de las muestras.

Material biológico

El material biológico estuvo constituido por muestras de aguas residuales provenientes de las pozas de estabilización. Adicionalmente, se emplearon cultivos microbianos proporcionados por el Laboratorio de Biotecnología e Ingeniería Genética de la Facultad de Ciencias Biológicas de la Universidad Nacional de Trujillo, los cuales se utilizaron para favorecer la colonización y formación de la biopelícula en el biofiltro percolador.

Procedimiento experimental

Reconocimiento del área de estudio

Se realizaron visitas de campo para la observación directa y evaluación del entorno, con el objetivo de identificar posibles fuentes de contaminación y riesgos naturales o antrópicos asociados al sistema de tratamiento. Estas actividades se desarrollaron con el apoyo técnico de la empresa prestadora de servicios de saneamiento SEDACAJ.

Muestreo, preservación y transporte

El muestreo se realizó siguiendo procedimientos estandarizados para asegurar la integridad y representatividad de las muestras. Las aguas residuales fueron recolectadas en recipientes limpios y preservadas según el parámetro a analizar, utilizando aproximadamente 1 mL de preservante por cada 500 mL de muestra. El transporte al laboratorio se efectuó bajo condiciones controladas, manteniendo la cadena de custodia desde la recolección hasta el análisis.

Diseño y construcción del biofiltro percolador

El biofiltro percolador fue diseñado a escala de laboratorio tomando como referencia un modelo experimental previamente desarrollado. El sistema estuvo conformado por cuatro unidades de filtración construidas con botellas plásticas de 3 L, dispuestas sobre un soporte metálico. Cada unidad contenía un lecho sólido compuesto por capas sucesivas de piedras de distinto tamaño, papel filtro y una capa de suelo, que actuó como soporte para el desarrollo de la biopelícula microbiana. El sistema incluyó cubetas superiores para la alimentación del agua residual, mangueras de conexión, aireadores para la oxigenación del lecho y dispositivos de control de entrada y salida de flujo. Previamente al inicio del experimento, el sistema fue inspeccionado utilizando agua potable para verificar la ausencia de fugas y asegurar su correcto funcionamiento.

Operación del biofiltro

Una vez verificada la integridad del sistema, se adicionó aproximadamente 1.2 L de agua residual en las cubetas superiores de cada biofiltro, permitiendo la recirculación del efluente a través del lecho filtrante. De este volumen, 1 L fue recolectado para análisis, mientras que el volumen restante permaneció en el sistema para favorecer la formación y maduración de la biopelícula microbiana. El biofiltro operó bajo un régimen de recirculación periódica durante 15 días. Durante este periodo, se realizó un monitoreo visual del efluente, registrándose cambios progresivos en color, turbidez y olor, como indicadores cualitativos del proceso de biodegradación de la materia orgánica.

Evaluación hidrodinámica

El comportamiento hidrodinámico del biofiltro se evaluó mediante el cálculo del flujo y del tiempo de retención hidráulica (TRH). El volumen de agua que percoló a través del biofiltro por unidad de tiempo se determinó a partir del conteo de gotas por segundo, mientras que el volumen del sistema se estimó utilizando la expresión:

$$V = \pi r^2 h$$

donde V es el volumen del biofiltro, r el radio interno del recipiente y h la altura del lecho filtrante.

3. Resultados

La calibración del flujo en los biofiltros percoladores de laboratorio permitió establecer un régimen hidráulico estable para la operación del sistema. Tal como se muestra en la Tabla 1, el flujo promedio registrado fue de $4.2 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$, equivalente a $252 \text{ mL} \cdot \text{h}^{-1}$ ($0.252 \text{ L} \cdot \text{h}^{-1}$), lo que representa un volumen tratado de 1.008 L cada 4 horas de recirculación. Este caudal permitió asegurar una percolación continua y uniforme del agua residual a través del lecho filtrante, condición fundamental para el desarrollo y estabilidad de la biopelícula microbiana.

Tabla 1

Calibración de flujo en biofiltros percoladores de laboratorio

Flujo ($\text{mL} \cdot \text{min}^{-1}$)	Flujo ($\text{mL} \cdot \text{h}^{-1}$)	Flujo ($\text{L} \cdot \text{h}^{-1}$)	Volumen tratado ($\text{L} \cdot 4 \text{ h}^{-1}$)
4.2	252	0.252	1.008

Nota. El flujo hidráulico fue determinado mediante calibración gravimétrica, considerando un régimen de percolación continua durante la operación del biofiltro.

Las dimensiones geométricas del biofiltro percolador se presentan en la Tabla 2. El sistema correspondió a un reactor cilíndrico con un diámetro de 11.5 cm y un radio de 5.75 cm. El área basal calculada fue de 103.87 cm^2 , mientras que la altura efectiva del lecho filtrante fue de 10

cm. A partir de estas dimensiones, se determinó un volumen del lecho sólido de 1.0387 L, valor que representa el espacio disponible para la colonización microbiana y la retención de biomasa activa.

Tabla 2

Dimensiones geométricas y volumen del biofiltro percolador a escala de laboratorio

Variable	Valor (cm)	Valor (m)	Valor (L)
Diámetro interno	11.5	0.115	—
Radio interno	5.75	0.0575	—
Área de la base	103.87 cm^2	—	—
Altura del lecho filtrante (h_p)	10	0.1	—
Volumen del lecho sólido	—	—	1.039

Nota. El volumen del lecho sólido fue calculado asumiendo una geometría cilíndrica ($V = \pi r^2 h$). El valor de π considerado fue 3.1416.

En la Tabla 3 se muestran las variables estructurales del biorreactor completo. El biofiltro presentó una altura total de 28 cm y un volumen interno de 2.91 L, coherente con la capacidad nominal de 3 L del sistema experimental. Esta relación volumétrica permitió una adecuada distribución entre el volumen del lecho sólido y el volumen hidráulico disponible para el paso del agua residual.

Tabla 3

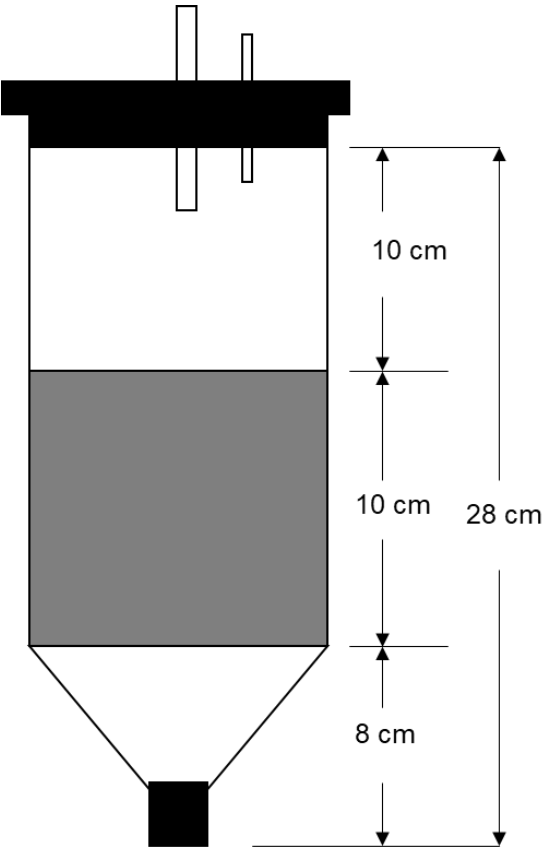
Dimensiones y volumen operativo del biorreactor del biofiltro percolador

Variable	Valor (cm)	Volumen (cm^3)	Volumen (L)
Altura total del biorreactor	28	—	—
Volumen interno del biorreactor	—	2,908.34	2.91

Nota. El volumen del biorreactor fue calculado considerando una geometría cilíndrica ($V = \pi r^2 h$), en concordancia con la capacidad nominal de 3 L del sistema experimental.

La Figura 2 ilustra las dimensiones generales del biofiltro percolador de laboratorio, confirmando la correspondencia entre el diseño teórico y la estructura construida, así como la correcta disposición del lecho filtrante dentro del reactor.

Figura 2
Dimensiones geométricas del biofiltro percolador a escala de laboratorio (3 L)



Nota. El biofiltro presenta una geometría cilíndrica con un volumen interno indicando una capacidad nominal de 3 L. El lecho filtrante sólido tiene una altura efectiva de 10 cm y un volumen aproximado de 1.04 L, destinado al desarrollo de la biopelícula microbiana.

El tiempo de retención hidráulica (TRH) se evaluó a lo largo de 15 días de operación continua del sistema. Según

los resultados presentados en la Tabla 4, cada biofiltro operó con un TRH de 4 horas por recirculación, realizándose tres recirculaciones diarias. Esto representó un tiempo total de tratamiento de 12 horas por día y un TRH acumulado de 180 horas por biofiltro, equivalente a 7.5 días efectivos de tratamiento. Este comportamiento fue consistente en los cuatro biofiltros evaluados, lo que evidencia la reproducibilidad hidráulica del sistema experimental.

Tabla 4
Tiempo de retención hidráulica (TRH) del biofiltro percolador a escala de laboratorio

Parámetro	Valor
Tiempo de retención hidráulica por ciclo (h)	4
Número de recirculaciones por día	3
Tiempo total de operación (días)	15
Tiempo de tratamiento diario (h·día ⁻¹)	12
TRH acumulado por biofiltro (h)	180
TRH efectivo total (días)	7.5

En conjunto, los resultados confirman que el biofiltro percolador a escala de laboratorio presentó un diseño hidráulico y volumétrico adecuado, garantizando condiciones estables de operación y tiempos de contacto suficientes para favorecer los procesos de biodegradación de la materia orgánica en aguas residuales provenientes de las pozas de estabilización de Cajamarca..

4. Discusión

El diseño y la operación del biofiltro percolador a escala de laboratorio permitieron establecer condiciones hidráulicas estables y reproducibles, fundamentales para evaluar su desempeño potencial en el tratamiento de aguas residuales provenientes de las pozas de estabilización de Cajamarca. La calibración del flujo (Tabla 1) evidenció un régimen de percolación constante de $0.252 \text{ L}\cdot\text{h}^{-1}$, equivalente a un volumen tratado de 1.008 L cada 4 h, lo cual garantizó una distribución uniforme del agua residual a través del lecho filtrante. Este comportamiento hidráulico es consistente con lo reportado para biofiltros percoladores operados a escala de laboratorio, donde flujos bajos y controlados favorecen el desarrollo y la estabilidad de la biopelícula microbiana (Ramírez, 2007; Kennes & Thalasso, 1998).

Las dimensiones geométricas del biofiltro (Tabla 2) y del biorreactor completo (Tabla 3), así como su representación esquemática (Figura 2), confirman que el sistema fue adecuadamente dimensionado para asegurar un equilibrio entre el volumen hidráulico y el volumen del lecho sólido. El lecho filtrante presentó un volumen aproximado de 1.04 L, lo que proporcionó una superficie suficiente para la colonización microbiana, mientras que el volumen total del reactor ($\approx 3 \text{ L}$) permitió un tiempo de contacto adecuado entre el agua residual y la biomasa activa. Este tipo de configuración coincide con los principios de diseño descritos para sistemas de biofiltración, en los que el material de soporte cumple un rol clave en la retención de microorganismos y en la eficiencia del proceso de biodegradación (Rodríguez, 2015; Vidali, 2001).

El análisis del tiempo de retención hidráulica (Tabla 4) mostró que cada biofiltro operó con un TRH de 4 h por recirculación, realizándose tres ciclos diarios durante un periodo total de 15 días. Esto representó un TRH acumulado de 180 h por biofiltro, equivalente a 7.5 días efectivos de tratamiento. La estabilidad de este parámetro en los cuatro biofiltros evaluados evidencia la reproducibilidad hidráulica del sistema experimental, aspecto fundamental para futuras evaluaciones de eficiencia de remoción de contaminantes. Diversos estudios han señalado que tiempos de retención prolongados favorecen la degradación de la materia orgánica y la remoción de contaminantes, al incrementar el contacto entre el efluente y la biopelícula microbiana (Lens et al., 1994; Cabrera et al., 2011).

El régimen de recirculación manual aplicado tres veces al día permitió mantener condiciones adecuadas de humedad y oxigenación del lecho filtrante, factores críticos para la actividad metabólica de los microorganismos asociados al biofilm. Este enfoque resulta particularmente relevante en contextos con limitaciones tecnológicas y económicas, como los descritos para sistemas de saneamiento en países en desarrollo, donde se requieren soluciones simples, de

bajo costo y fácil operación (ANA, 2013; Argüello, 2024). En este sentido, el biofiltro percolador evaluado se alinea con el concepto de tecnologías limpias o verdes, caracterizadas por su bajo consumo energético y alta eficiencia potencial (Kennes & Thalasso, 1998).

Los resultados obtenidos respaldan la viabilidad del uso de biofiltros percoladores como alternativa tecnológica para complementar o mejorar el desempeño de las pozas de estabilización, cuyo funcionamiento suele verse comprometido por el crecimiento poblacional y la sobrecarga hidráulica, tal como se ha documentado en Cajamarca y en otras regiones similares (Solano et al., 2022). Estudios previos han reportado eficiencias de remoción superiores al 90% en parámetros como DQO, DBO_5 y SST en biofiltros percoladores operados a escala de laboratorio, lo que refuerza el potencial de estos sistemas para el tratamiento de aguas residuales municipales e industriales (Saboya, 2020; Atalaya, 2023). En conjunto, la evaluación hidráulica y volumétrica del biofiltro percolador desarrollado en este estudio demuestra que el sistema presenta condiciones operativas adecuadas para favorecer los procesos de biodegradación de la materia orgánica. Estos resultados constituyen una base sólida para futuras investigaciones orientadas a cuantificar la eficiencia de remoción de contaminantes y a evaluar la implementación de esta tecnología a mayor escala, como una alternativa sostenible para el tratamiento de aguas residuales provenientes de las pozas de estabilización de Cajamarca.

5. Conclusiones

El biofiltro percolador construido a escala de laboratorio presentó un desempeño adecuado para el tratamiento de aguas residuales provenientes de las pozas de estabilización de Cajamarca. A lo largo del periodo experimental se evidenció la formación progresiva de una biopelícula microbiana sobre el lecho sólido, lo que se reflejó en una mejora visible de las características organolépticas del agua tratada, manifestada por la reducción del color, la turbidez y el olor del efluente al final del periodo de operación.

El lecho filtrante, conformado por material pétreo y suelo, cumplió una función clave tanto en la regulación del flujo hidráulico como en el soporte para la colonización y actividad de los microorganismos responsables de la biodegradación de la materia orgánica. La configuración del sistema permitió una percolación uniforme del agua residual y condiciones favorables para el desarrollo del biofilm.

El diseño geométrico y volumétrico del biofiltro percolador fue adecuado para garantizar un equilibrio entre el volumen hidráulico y el volumen del lecho sólido, asegurando tiempos de contacto suficientes entre el agua residual y la biomasa activa. Asimismo, el régimen de operación basado en un flujo controlado y un tiempo de retención hidráulica constante permitió una operación

estable y reproducible del sistema experimental.

En conjunto, los resultados obtenidos demuestran que el biofiltro percolador a escala de laboratorio constituye una alternativa tecnológica viable y de bajo costo para el tratamiento biológico de aguas residuales, con potencial aplicación como sistema complementario o de mejora para las pozas de estabilización existentes en contextos con limitaciones técnicas y económicas, como el caso de Cajamarca.

5. Agradecimientos

A la Universidad Nacional de Trujillo por sus instalaciones y la contribución del material Biológico.

Al Dr. Heber Max Robles Castillo por brindar el apoyo con sus conocimientos y guía durante al estudio.

6. Contribución de los autores

PFEPL: En la concepción y el diseño del estudio, HMRC: El análisis y la interpretación de los datos y la aprobación definitiva de la versión que se presenta.

7. Conflicto de intereses

Los autores declaran que no existe conflicto de intereses.

8. Referencias Bibliográficas

- Autoridad Autoridad Nacional del Agua. (2015). *Política y estrategia nacional de recursos hídricos*. Revista *Agua y +*. https://www.ana.gob.pe/sites/default/files/publication/files/revista_aguaymas_edicion_junio_2015.pdf
- Argüello, R. (2024). *Reutilización de aguas residuales para áreas verdes en la urbanización Icon Bay en Isla Mocolí, 2022–2023* [Tesis de maestría, Universidad Laica Vicente Rocafuerte de Guayaquil]. Repositorio ULVR. <http://repositorio.ulvr.edu.ec/bitstream/44000/6994/1/TM-ULVR-0663.pdf>
- Atalaya, M. (2023). *Eficiencia de un filtro a base de Sphagnum magellanicum Brid. en el efluente del Centro Piscícola Ingenio, Huancaayo* [Tesis para el título profesional de Ingeniero Sanitario, Universidad Nacional de Cajamarca]. Repositorio UNC. <http://190.116.36.86/bitstream/handle/20.500.14074/6797/TESIS-ATALAYA-ABANTO-MIGUEL.pdf>
- Baeta-Hall, L., Céu, M., Lourdes, M., Anselmo, F., & Rosa, M. (2005). Biodegradation of olive oil husks in composting aerated piles. *Bioresource Technology*, 96(1), 69–78. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2003.06.007>
- Bassazin, M., Tadele, A., & Genet, B. (2024). Bioremediation of petroleum hydrocarbon contaminated soil: A review on principles, degradation mechanisms, and advancement. *Frontiers in Environmental Science*, 12, Article 1354422. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2024.1354422>
- Cabrera, G., Ramírez, M., & Cantero, D. (2011). Bioreactors design: Biofilters. En *Comprehensive Biotechnology* (2nd ed., Vol. 2, pp. 303–318). Elsevier.
- Carrión, D., & Narva, A. (2023). *Mejoramiento del sistema de agua potable*

y alcantarillado con biodigestores en tres centros poblados del distrito de San Juan, Cajamarca [Tesis de maestría, Universidad Privada Antenor Orrego]. Repositorio UPAO. <https://repositorio.upao.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12759/17992>

- Castillo, M., & Rogelio, E. (2013). Dynamics of microbial communities related to biochemical parameters during vermicomposting and maturation of agroindustrial lignocellulosic wastes. *Bioresource Technology*, 146, 345–354.
- Comisión Económica para América Latina y el Caribe. (2023). *Informe del proceso regional de América Latina y el Caribe para la aceleración del cumplimiento del ODS 6*. https://www.cepal.org/sites/default/files/events/files/informe_del_proceso_regional_de_america_latina_y_el_caribe_para_la_aceleracion_del_cumplimiento_del_ods_6_.pdf
- Del Castillo, M., Luján, J., Llaque, G., Valderrama, M., & Calvanapón, F. (2022). Diseño de un biofiltro con mucílago de *Caesalpinia spinosa* para reducir la turbidez de aguas superficiales. *International Multiconference on Entrepreneurship, Innovation and Regional Development*, 5(7). <https://doi.org/10.18687/LEIRD2022.1.1.22>
- Dorji, U., Dorji, P., Shon, H., Badeti, U., Dorji, C., Wangmo, C., Tijing, L., Kandasamy, J., Vigneswaran, S., Chanan, A., & Phuntsho, S. (2022). On-site domestic wastewater treatment using shredded waste plastic bottles as biofilter media. *Chemosphere*, 286, 131729. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.131729>
- Kennes, C., & Thalasso, F. (1998). Waste gas biotreatment technology. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, 72(4), 303–319.
- Lens, P., Moscoso, J., Hulshoff Pol, L., & Lettinga, G. (1994). Biological treatment of industrial wastewaters. *Water Science and Technology*, 30(12), 11–20.
- Ramírez, M. (2007). *Viabilidad de un proceso para la eliminación conjunta de H₂S y NH₃ en efluentes gaseosos* [Tesis doctoral]. Universidad de Zaragoza. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/tesis?codigo=52054>
- Rodríguez, I. (2015). *Desarrollo de biofiltros de residuos orgánicos para la eliminación de contaminantes orgánicos emergentes* [Tesis de maestría]. Escuela Politécnica Superior de Orihuela.
- Saboya, X. (2020). Evaluación de la eficiencia de un lombrifiltro en la remoción de contaminantes de aguas residuales domésticas. *Muro de la Investigación*, 6(1). <https://doi.org/10.17162/rmi.v6i1.1439>
- Sistema Mundial de Información sobre el Agua y la Agricultura de la FAO. (2015). *Recursos hídricos renovables en América Latina*. AQUASTAT. <https://www.fao.org/aquastat>
- Solano, J., Siguencia, M., & Paucar, J. (2022). Análisis sobre la gestión de aguas residuales en la ciudad de Cuenca: Caso ETAPA-EP. *Polo del Conocimiento*, 7(8), 513–532.
- Vidali, M. (2001). Bioremediation: An overview. *Pure and Applied Chemistry*, 73(7), 1163–1172.
- Xu, A., Zhang, X., Wu, S., Xu, N., Huang, Y., Yan, X., Zhou, J., Cui, Z., & Dong, W. (2021). Pollutant degrading enzymes: Catalytic mechanisms and expanded applications. *Molecules*, 26(16), 4751. <https://doi.org/10.3390/molecules26164751>