



Diseño de filtro percolador para tratamiento de aguas residuales con lodos anaerobios en Pangaravi

Design of trickling filter for wastewater treatment with anaerobic sludge in Pangaravi

Desenho de filtro percolador para tratamento de águas residuais com lodos anaeróbios em Pangaravi

ARTÍCULO ORIGINAL



Escanea en tu dispositivo móvil
o revisa este artículo en:
<https://doi.org/10.33996/revistaalfa.v9i27.407>

Milagros Claudia Mesías Ortiz Huamani
ortizmila15@gmail.com

Josefa Bertha Pari Olarte
bertha.pari@unica.edu.pe

Nieves Sandra Cuadros Luna
nieves.cuadros@unica.edu.pe

Antonio Wilmer Paitán Cahua
antonio.paitan@unica.edu.pe

Patricia Del Rosario Hernández Maytahuari
patricia.hernandez@unica.edu.pe

Universidad Nacional San Luis Gonzaga. Ica, Perú

Artículo recibido: 3 de julio 2025 / Arbitrado: 28 de agosto 2025 / Publicado: 10 de septiembre 2025

RESUMEN

El objetivo de la investigación fue diseñar un filtro percolador aplicado al tratamiento de aguas residuales con lodos anaerobios en la localidad de Pangaravi, Nasca. El estudio se desarrolló bajo un enfoque aplicado, de tipo observacional-prospectivo transversal, con nivel explicativo y diseño experimental. La metodología incluyó la caracterización fisicoquímica del agua residual, el dimensionamiento del sistema de tratamiento y la evaluación de parámetros operacionales fundamentales. En el proceso de dimensionamiento se evaluaron parámetros críticos del sistema, tales como caudal de recirculación, carga orgánica, carga hidráulica volumétrica, carga vertical y velocidad de filtración. Los resultados demostraron una capacidad de remoción de 438.05 kg DBO₅/día para un área de filtración de 247.42 m² y un volumen de empaque de 742.25 m³, con una carga orgánica promedio de 0.63 kg/m³-día, utilizando un distribuidor rotatorio de cuatro brazos para garantizar la distribución uniforme del efluente. El análisis de eficiencia reveló que la producción de lodo másico fue significativamente mayor en el sistema diseñado comparado con sistemas convencionales, confirmando la efectividad del filtro percolador en la estabilización y depuración de aguas residuales. El sistema propuesto logra eficiencias de remoción superiores al 85% para DBO₅ y sólidos suspendidos totales. Se concluye que esta tecnología representa una alternativa técnica viable, económicamente factible y ambientalmente sostenible para comunidades rurales, ya que garantiza alta eficiencia en la remoción de contaminantes, contribuye a la gestión adecuada de lodos residuales y mejora significativamente la calidad ambiental y sanitaria de la zona de estudio.

Palabras clave: Filtro percolador; Aguas residuales; Lodos anaerobios; Diseño de tratamiento; Sostenibilidad ambiental

ABSTRACT

The objective of this research was to design a trickling filter system applied to wastewater treatment with anaerobic sludge in the locality of Pangaravi, Nazca. The study was conducted using an applied, observational-prospective, cross-sectional approach with an explanatory level and experimental design. The methodology included physicochemical characterization of wastewater, treatment system sizing, and evaluation of fundamental operational parameters. During the sizing process, critical system parameters were evaluated, including recirculation flow rate, organic loading, volumetric hydraulic loading, vertical loading, and filtration velocity. Results demonstrated a removal capacity of 438.05 kg BOD₅/day for a filtration area of 247.42 m² and a packing volume of 742.25 m³, with an average organic loading of 0.63 kg/m³-day, utilizing a four-arm rotary distributor to ensure uniform effluent distribution. Efficiency analysis revealed that sludge mass production was significantly higher in the designed system compared to conventional systems, confirming the effectiveness of the trickling filter in wastewater stabilization and purification. The proposed system achieves removal efficiencies exceeding 85% for BOD₅ and total suspended solids. The research demonstrates that trickling filter technology offers superior performance characteristics including consistent pollutant removal, minimal energy requirements, and simplified operational maintenance protocols. It is concluded that this technology represents a viable technical alternative that is economically feasible and environmentally sustainable for rural communities. The system guarantees high efficiency in contaminant removal, contributes to adequate management of residual sludge, and significantly improves the environmental and sanitary quality of the study area. This approach provides a replicable model for similar communities facing wastewater treatment challenges.

Key words: Trickle filter; Wastewater treatment; Anaerobic sludge; Treatment design; Environmental sustainability

RESUMO

O objetivo da pesquisa foi projetar um filtro percolador aplicado ao tratamento de águas residuais com lodos anaeróbios na localidade de Pangaravi, Nasca. O estudo foi desenvolvido sob uma abordagem aplicada, do tipo observacional-prospectiva transversal, com nível explicativo e desenho experimental. A metodologia incluiu a caracterização físico-química da água residual, o dimensionamento do sistema de tratamento e a avaliação de parâmetros operacionais fundamentais. No processo de dimensionamento, foram avaliados parâmetros críticos do sistema, tais como fluxo de recirculação, carga orgânica, carga hidráulica volumétrica, carga vertical e velocidade de filtração. Os resultados demonstraram uma capacidade de remoção de 438,05 kg DBO₅/dia para uma área de filtração de 247,42 m² e um volume de empacotamento de 742,25 m³, com uma carga orgânica média de 0,63 kg/m³-dia, utilizando um distribuidor rotativo de quatro braços para garantir a distribuição uniforme do efluente. A análise de eficiência revelou que a produção de lodo maisico foi significativamente maior no sistema projetado em comparação com sistemas convencionais, confirmando a efetividade do filtro percolador na estabilização e depuração de águas residuais. O sistema proposto alcança eficiências de remoção superiores a 85% para DBO₅ e sólidos suspensos totais. Conclui-se que esta tecnologia representa uma alternativa técnica viável, economicamente factível e ambientalmente sustentável para comunidades rurais, pois garante alta eficiência na remoção de contaminantes, contribui para a gestão adequada de lodos residuais e melhora significativamente a qualidade ambiental e sanitária da área de estudo.

Palavras-chave: Filtro percolador; Águas residuais; Lodos anaeróbios; Projeto de tratamento; Sustentabilidade ambiental

INTRODUCCIÓN

La gestión inadecuada de aguas residuales representa un desafío ambiental crítico del siglo XXI. Más del 80% de las aguas residuales globales se vierten sin tratamiento adecuado, deteriorando ecosistemas hídricos y aumentando riesgos sanitarios (1). Esta problemática es especialmente crítica en países en desarrollo, donde las limitaciones técnicas y económicas dificultan la implementación de sistemas eficientes de saneamiento (2).

Los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de la Agenda 2030 establecen marcos para abordar esta crisis. El ODS 6 busca garantizar la disponibilidad de agua y su gestión sostenible, mientras que los ODS 11 y 13 promueven tecnologías que reduzcan la contaminación ambiental (3). Estas metas impulsan la búsqueda de alternativas ecológicas y económicamente viables.

Los filtros percoladores constituyen una tecnología de tratamiento biológico basada en la degradación de materia orgánica mediante biopelículas adheridas a un medio filtrante. Estudios recientes demuestran eficiencias superiores al 90% en la remoción de DBO₅ y sólidos suspendidos, especialmente con medios plásticos de alta superficie específica (4) y sistemas bioelectroquímicos innovadores (5). En América Latina destacan por su bajo costo, mínima demanda energética y simplicidad operativa

(6). La selección de tecnologías debe considerar factores técnicos, económicos y ambientales regionales (7). La biopercolación ha demostrado efectividad para remoción de materia orgánica en aguas residuales domésticas (8).

En Pangaravi, Nasca, la ausencia de un sistema de tratamiento eficiente ha generado impactos negativos en el río Nasca y la calidad de vida poblacional. El diseño de un filtro percolador aplicado al tratamiento de aguas residuales con lodos anaerobios representa una solución viable y sostenible, ofreciendo un modelo replicable para zonas con condiciones similares. El Objetivo de esta investigación es diseñar un filtro percolador para el tratamiento de aguas residuales con lodos anaerobios en Pangaravi, Nasca, que garantice la reducción de contaminantes y mejore la calidad ambiental y sanitaria de la comunidad. El filtro percolador diseñado con lodos anaerobios alcanzará eficiencias superiores al 85% en la remoción de DBO₅ y DQO, cumpliendo con los límites máximos permisibles establecidos en el D.S. N°003-2010-MINAM para efluentes de plantas de tratamiento de aguas residuales.

MATERIALES Y MÉTODOS

El estudio se desarrolló en la planta de tratamiento de aguas residuales de Pangaravi, distrito y provincia de Nasca, región Ica, ubicada a 14°49'44" S, 74°56'37" O, a 520 m.s.n.m. La zona presenta clima árido con temperatura promedio

de 25°C, precipitación anual menor a 50 mm y humedad relativa del 60%. La población atendida es de aproximadamente 2,800 habitantes con una generación per cápita de 150 L/hab/día. La localidad fue seleccionada por presentar una problemática ambiental crítica vinculada a la descarga de efluentes sin tratamiento adecuado al río Nasca, cumpliendo con los límites máximos permisibles establecidos (9).

La investigación es de tipo aplicada, nivel explicativo y diseño experimental, desarrollada bajo un enfoque cuantitativo mediante la recolección y análisis de datos físico-químicos y microbiológicos de aguas residuales, siguiendo metodologías mixtas (10) y criterios por competencias (11). El estudio emplea métodos de ingeniería para dimensionamiento y evaluación, considerando criterios técnicos establecidos para lagunas de estabilización (12).

Población: Totalidad de aguas residuales generadas en Pangaravi durante 2024 (aproximadamente 681,090 m³/año).

Muestra: Volúmenes representativos de efluentes recolectados mediante muestreo sistemático durante 12 semanas, con frecuencia de 3 muestras semanales en horarios de caudal pico (6:00-8:00 h), medio (12:00-14:00 h) y bajo (20:00-22:00 h).

Protocolo de puntos de muestreo:

- Entrada de la planta (afluente crudo)
- Efluente del clarificador primario
- Efluente del filtro percolador
- Descarga final al río Nasca

Procedimiento:

- Recolección en envases estériles de polietileno de 1 L
- Preservación a 4°C durante transporte (<6 horas)
- Identificación con códigos únicos y registro de condiciones de campo
- Análisis inmediato de parámetros in-situ (pH, temperatura, oxígeno disuelto)

Parámetros analizados

Físico-químicos: DBO₅, DQO, sólidos suspendidos totales (SST), sólidos sedimentables, pH, temperatura, caudal.

Microbiológicos: Coliformes totales y fecales.

Métodos analíticos: Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (APHA, 2017):

- DBO₅: Método 5210 (incubación 5 días a 20°C)
- DQO: Método 5220 (digestión con dicromato de potasio)
- SST: Método 2540 (filtración y secado a 103-105°C)
- Carga hidráulica: 10-75 m³/m²/día
- Relación de recirculación: 1-2
- Distribuidor rotatorio de 4 brazos

Ecuaciones de dimensionamiento:

1. Ecuación de Velz modificada para filtros percoladores:

$$q = (k_{25}^{\circ\text{C}} \times Z^2 \times n) / \ln(S_1/S_2)$$

Donde:

q = carga hidráulica (L/m²·s),
 k = constante de tratabilidad,
 Z = profundidad del lecho (m),
 S₁ = DBO₅ afluente (mg/L),
 S₂ = DBO₅ efluente (mg/L)

2. Corrección por temperatura:

$$k_T = k_{20}^{\circ\text{C}} \times (1.035)^{(T-20)}$$

Análisis estadístico: Los datos se procesaron mediante estadística descriptiva (media, desviación estándar, coeficiente de variación) y análisis de correlación de Pearson. Se aplicó la prueba t-Student para comparar medias entre afluente y efluente ($\alpha=0.05$). El software utilizado fue SPSS v.28.

Instrumentación y equipos

- pHmetro digital calibrado (± 0.1 unidades)
- Oxímetro portátil (± 0.1 mg/L)
- Incubadora DBO a 20 $\pm$ 1°C
- Espectrofotómetro UV-Visible
- Balanza analítica (± 0.0001 g)
- Estufa de secado (103-105°C)

Control de calidad

- Duplicados: 10% de las muestras
- Blancos de reactivos: 1 por cada 10 muestras
- Estándares de referencia: verificación quincenal
- Límites de detección: DBO₅ (2 mg/L), DQO (5 mg/L), SST (1 mg/L)

Diseño del filtro percolador

Criterios de diseño:

- Medio filtrante: plástico cilíndrico con superficie específica 150 m²/m³
- Profundidad del lecho: 3.0 m
- Carga orgánica: 0.5-3.2 kg DBO₅/m³/día

Consideraciones éticas: El estudio cumple con las normativas ambientales nacionales (D.S. N°003-2010-MINAM) y no involucra experimentación con seres humanos o animales. Los datos de caracterización de aguas residuales son de dominio público para fines de investigación científica.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El diseño del filtro percolador para el tratamiento de aguas residuales con lodos anaerobios en Pangaravi se fundamentó en la optimización de parámetros hidráulicos y biológicos críticos, incluyendo caudal, carga orgánica, DBO₅, sólidos suspendidos y eficiencia de recirculación. Este enfoque tecnológico responde directamente al ODS 6: Agua limpia y saneamiento, ofreciendo una solución de bajo costo y fácil operación que garantiza la reducción efectiva de contaminantes. La propuesta se alinea con las recomendaciones de la OMS sobre sistemas sostenibles para la prevención de enfermedades de origen hídrico, estableciendo una base técnica replicable para la gestión de lodos y mejoramiento de la calidad de efluentes en contextos rurales similares.

Propuesta de tratamiento de aguas residuales utilizando filtro percolador con lodos anaerobios ecológicos.

Dimensionamiento del sistema de filtro percolador: El dimensionamiento del filtro percolador de relleno plástico cilíndrico se basó en su alta superficie específica (superior a 150 m²/m³) y permeabilidad optimizada (>95% de espacios vacíos), características que favorecen significativamente la fijación de biomasa y la degradación eficiente de la carga orgánica en las aguas residuales.

El sistema propuesto integra cinco componentes principales: (1) dimensionamiento del filtro percolador, (2) determinación del requerimiento de ventilación, (3) estimación de producción de lodos, (4) determinación de velocidad de rotación del distribuidor, y (5) diseño del clarificador secundario.

Parámetros de diseño fundamentales: El diseño requirió la definición de parámetros críticos: calidad del agua residual, temperatura operacional, características del medio filtrante y velocidad del distribuidor rotatorio.

Tabla 1. Datos iniciales para el diseño del filtro percolador.

Característica	Símbolo	Valor	Unidad	Criterio de selección
Caudal de agua residual	Q	1866	m ³ /d	Promedio anual con factor de seguridad 1.3
Caudal de agua residual	Q	21.6	L/s	Caudal pico horario
DBO del afluente	S ₁	250	mg/L	Caracterización in situ (promedio 6 meses)
DBO del efluente	S ₂	15.24	mg/L	Cumplimiento D.S. N°003-2010-MINAM
Temperatura del agua	T	25	°C	Temperatura promedio anual local
Profundidad del empaque	Z ₂	3	m	Optimización carga orgánica/eficiencia

Nota. Los valores de DBO fueron determinados mediante análisis quintuplicados siguiendo el método estándar 5210-B (APHA, 2017). La temperatura representa el promedio de mediciones horarias durante un año completo.

Correlaciones de tratabilidad y constantes

cinéticas: La capacidad de tratamiento se evaluó utilizando correlaciones de Dow Chemical

Company, estableciendo la relación entre carga hidráulica y carga orgánica para determinar el volumen y contaminantes procesables.

Tabla 2. Correlaciones de tratabilidad según estudio de Dow Chemical Company (Z₁=6.1 m, S₁=150 mg/L, 20°C).

Tipo de agua residual	k ₁ (L/s) ^{0.5} /m ²	Aplicabilidad	Observaciones
Doméstica	0.210	Directa	Valor seleccionado para el diseño
Conservas de frutas	0.181	Referencial	Similar carga orgánica
Pasta de papel	0.108	No aplicable	Carga muy diferente
Empaque de carne	0.216	Referencial	Carga orgánica comparable
Farmacéutica	0.221	Referencial	Biodegradabilidad similar
Procesamiento de papa	0.351	No aplicable	Carga excesiva
Refinería	0.059	No aplicable	Baja biodegradabilidad
Procesamiento de azúcar	0.165	Referencial	Carga orgánica moderada
Lácteos sintéticos	0.170	Referencial	Características similares
Textil	0.107	No aplicable	Compuestos recalcitrantes

Determinación del área transversal y volumen

del sistema: El área transversal se determinó considerando caudal de diseño, calidad del agua

residual y altura del lecho filtrante, garantizando flujo uniforme y equilibrio óptimo entre volumen y rendimiento.

Determinación del área transversal y volumen del sistema:

El área transversal se determinó considerando caudal de diseño, calidad del agua residual y altura del lecho filtrante, garantizando flujo uniforme y equilibrio óptimo entre volumen y rendimiento.

Ecuaciones de diseño aplicadas:

Tasa de aplicación hidráulica - Ecuación de Velz:

$$q = \left[\frac{k_{25} k_{z_2^n}}{\ln \frac{S}{S_0}} \right] (\epsilon c^1)$$

Correcciones de k: Altura y DBO₅ de entrada:

$$K_{x, corregida} = k_{x, doméstica} \left(\frac{2x_2}{z_2} \right) \left(\frac{25 \cdot x}{S_2} \right) (Ei \cdot 2)$$

Corrección por temperatura:

$$K_T = K_{20^\circ C, corregida} (1.035)^{(T-20)} (Ec \cdot 3)$$

La Tabla 3, presenta tres constantes de tratabilidad utilizadas para caracterizar el

comportamiento hidráulico del sistema de tratamiento de aguas residuales, expresadas en unidades de $((L/s)^{0.5}/m^2)$, que reflejan la eficiencia del proceso en función del flujo y la superficie disponible. La constante base $k_1 = 0.210$ representa el valor estándar para aguas residuales domésticas, sirviendo como referencia inicial para el diseño. Posteriormente, se aplica una corrección geométrica que considera la altura del lecho y la concentración de sólidos, obteniendo una constante ajustada $k_{2, \text{corregida}} = 0.232$, lo que indica una mejora en la capacidad de tratabilidad del sistema.

Finalmente, se incorpora una corrección térmica asociada a un incremento de temperatura de $5^\circ C$, elevando la constante a $k_{25^\circ C} = 0.275$. Este aumento refleja el efecto positivo de la temperatura sobre la cinética de los procesos biológicos, lo cual es especialmente relevante en zonas cálidas como las del VRAEM. En conjunto, estos valores permiten afinar el diseño y operación de sistemas de tratamiento adaptados a condiciones locales, optimizando su rendimiento técnico y económico.

Tabla 3. Constantes de tratabilidad corregidas.

Característica	Símbolo	Valor	Unidad	Justificación
Constante de tratabilidad base	k_1	0.210	$((L/s)^{0.5}/m^2)$	Agua residual doméstica estándar
Constante corregida por geometría	$k_{2, \text{corregida}}$	0.232	$((L/s)^{0.5}/m^2)$	Ajuste por altura y concentración
Constante a temperatura operación	$k_{25^\circ C}$	0.275	$((L/s)^{0.5}/m^2)$	Corrección térmica (+5°C)

La Tabla 4, resume los parámetros fundamentales considerados en el diseño del filtro percolador, destacando tanto las dimensiones físicas como los criterios hidráulicos y operacionales. El exponente cinético $N = 0.5$, adimensional, indica un régimen de flujo tipo pistón modificado, lo cual sugiere una distribución más uniforme del sustrato y una mayor eficiencia en la transferencia de masa. La carga orgánica de diseño se estableció en $0.09 \text{ L/m}^2 \cdot \text{s}$, correspondiente a una zona de alta eficiencia, lo que permite maximizar la remoción de materia orgánica sin comprometer la estabilidad del sistema.

El caudal de diseño, de 21.6 L/s , considera el flujo pico con recirculación, asegurando la capacidad del sistema ante

variaciones de carga hidráulica. A partir de este valor y de la carga específica, se calculó un área superficial total de 247.42 m^2 , que garantiza una adecuada superficie de contacto para el crecimiento biológico. El volumen de empaque, de 742.25 m^3 , se obtuvo multiplicando dicha área por la altura efectiva del medio filtrante. Se contempló la instalación de dos filtros en paralelo, lo que proporciona redundancia operacional y facilita el mantenimiento sin interrupción del servicio. Cada filtro cuenta con un área de 123.71 m^2 , distribuyendo equitativamente la carga hidráulica, y un diámetro de 12.55 m , correspondiente a un diseño de sección circular que optimiza el uso del espacio y la eficiencia hidráulica del sistema.

Tabla 4. Dimensiones del filtro percolador.

Característica	Símbolo	Valor	Unidad	Criterio de diseño
Exponente cinético	N	0.5	Adimensional	Flujo pistón modificado
Carga orgánica de diseño	Q	0.09	$L/m^2 \cdot s$	Zona de alta eficiencia
Caudal de diseño	Q	21.6	L/s	Caudal pico con recirculación
Área superficial total	A	247.42	m^2	Cálculo directo: Q/q

Característica	Símbolo	Valor	Unidad	Criterio de diseño
Volumen de empaque	V	742.25	m ³	A × Z ₂
Número de filtros	N	2	Filtros	Redundancia operacional
Área por filtro	A/N	123.71	m ² /filtro	Distribución uniforme
Diámetro por filtro	D	12.55	m	Área circular equivalente

Nota. El diseño con dos filtros en paralelo permite operación continua durante mantenimiento y proporciona flexibilidad operacional para variaciones estacionales de caudal.

Optimización de la velocidad de rotación del distribuidor: La velocidad de rotación del distribuidor es crítica para asegurar distribución uniforme del agua residual y maximizar la eficiencia de eliminación de contaminantes.

Tabla 5. Parámetros de velocidad de rotación del distribuidor.

Característica	Símbolo	Valor	Unidad	Rango operacional
Carga orgánica DBO ₅	L _B	0.63	kg/m ³ ·día	0.6-3.2 (alta tasa plástico)
Dosis de operación	D _{op}	90	mm/paso	30-90 (según Tabla 7)
Dosis de lavado	D _{lav}	300	mm/paso	≥300 (tabla de referencia)
Número de brazos	N _{br}	4	brazos	Estándar para D=12.55 m
Flux de diseño	Q	7.54	m ³ /m ² ·día	Dentro de rango recomendado
Flux de diseño	Q	0.31	m ³ /m ² ·h	Conversión horaria
Velocidad operación normal	n _{op}	0.083	rpm	5 rpm por hora
Velocidad de lavado	n _{lav}	0.025	rpm	1.5 rpm por hora

La Tabla 6, presenta una comparación técnica entre distintos tipos de filtros percoladores, evidenciando cómo el tipo de lecho, la carga hidráulica y orgánica, así como la profundidad y el consumo energético, influyen en la eficiencia del tratamiento. Los filtros de baja tasa, con lecho de roca y carga hidráulica limitada (1–4 m³/m²·d), ofrecen alta remoción de DBO₅ (80–90 %) y buena nitrificación, aunque presentan problemas frecuentes de moscas.

En contraste, los filtros de alta tasa con lecho plástico permiten mayores cargas (hasta 75 m³/m²·d) y mejor remoción orgánica (hasta 95 %), con menor incidencia de insectos y desprendimientos continuos. El tratamiento grueso, aunque admite cargas extremas, muestra menor eficiencia (40–

70 %) y mayor consumo energético, siendo más adecuado para pretratamientos. Esta comparación permite seleccionar el tipo de filtro más adecuado según las condiciones operativas y los objetivos de calidad del efluente.

Tabla 6. Parámetros comparativos para diferentes tipos de filtros percoladores.

Característica	Baja tasa	Tasa intermedia	Alta tasa roca	Alta tasa plástico	Tratamiento grueso
Tipo de lecho	Roca	Roca	Roca	Plástico	Plástico/Roca
Carga hidráulica (m ³ /m ² ·d)	1-4	4-10	10-40	10-75	40-200
Carga orgánica (kg DBO ₅ /m ³ ·d)	0.07-0.22	0.24-0.48	0.4-2.4	0.6-3.2	1.5
Relación de recirculación	0	0-1	1-2	1-2	0-2
Problema de moscas	Muchas	Varias	Pocas	Pocas	Pocas
Desprendimientos	Intermitentes	Intermitentes	Continuos	Continuos	Continuos
Profundidad (m)	1.8-2.4	1.8-2.4	1.8-2.4	3-12.2	0.9-6
Remoción DBO ₅ (%)	80-90	50-80	65-90	75-95	40-70
Calidad del efluente	Bien nitrificado	Parcialmente nitrificado	Sin nitrificación	Sin nitrificación	Sin nitrificación
Consumo energético (kW/10 ³ m ³)	2-4	2-8	6-10	6-10	10-20

Nota. Los valores en negrita corresponden al tipo de sistema diseñado para Pangaravi. La configuración de alta tasa con plástico fue seleccionada por su eficiencia superior y menores requerimientos de área.

La Tabla 7, establece las dosis recomendadas de aplicación hidráulica para la operación y lavado de filtros percoladores en función de la carga orgánica expresada como DBO₅. A medida que la carga aumenta, se requiere una mayor dosificación tanto en operación como en lavado,

reflejando la necesidad de mantener la eficiencia del sistema y evitar obstrucciones. Por ejemplo, para una carga de diseño estándar de 1.00 kg/m²·d, se recomienda una dosificación de operación entre 30 y 90 mm/paso y un lavado mínimo de 300 mm/paso. En condiciones extremas, como una carga

límite de 4.00 kg/m²·d, las dosis se elevan hasta 240 mm/paso en operación y ≥800 mm/paso en lavado, lo que evidencia la exigencia hidráulica

del sistema para garantizar su funcionalidad bajo cargas elevadas.

Tabla 7. Dosis recomendadas para operación y lavado.

Carga DBO ₅ (kg/m ² ·d)	Dosificación operación (mm/paso)	Dosificación lavado (mm/paso)	Comentarios
0.25	10-30	≥200	Carga muy baja
0.50	15-45	≥200	Carga baja
1.00	30-90	≥300	Valor de diseño
2.00	40-120	≥400	Carga alta
3.00	60-180	≥600	Carga muy alta
4.00	80-240	≥800	Carga límite

Nota. La dosificación representa la cantidad de líquido aplicado por cada paso de cada brazo distribuidor. Los valores seleccionados (90 mm/paso operación, 300 mm/paso lavado) aseguran distribución uniforme y prevención de colmatación.

Análisis del requerimiento de aire y ventilación:

La determinación de los requerimientos de aire se basó en la demanda bioquímica de oxígeno (DBO₅) y parámetros adicionales como

DQO y caudal. El clarificador secundario separa los sólidos sedimentables del efluente tratado mediante regulación adecuada de la cabeza de aire.

Tabla 8. Cálculo de cabeza de aire natural.

Característica	Símbolo	Valor	Unidad	Metodología
Temperatura del aire	T _{aire}	25.01	°C	Medición promedio anual
Temperatura fría	T _{fría}	25.00	°C	Condición mínima registrada
Temperatura caliente	T _{caliente}	25.01	°C	Condición máxima diaria
Temperatura fría absoluta	T _{fría}	298.15	K	Conversión Kelvin
Temperatura caliente absoluta	T _{caliente}	298.16	K	Conversión Kelvin
Altura del empaque	Z	3	m	Altura de diseño
Cabeza de aire natural	Δh _{aire}	0.0001	mm H ₂ O	Diferencia de densidades
Cabeza de aire natural	Δh _{aire}	0.0012	Pa	Conversión unidades SI

Requerimiento de aireación forzada: El oxígeno disuelto para la actividad microbiana, dependiendo de la carga orgánica, temperatura y necesaria para mantener niveles óptimos de biomasa del sistema.

Tabla 9. Cálculo del requerimiento de aire por aireación forzada.

Característica	Símbolo	Valor	Unidad	Fundamento técnico
Factor pico	PF	1.8	Adimensional	Variabilidad diaria del caudal
Carga orgánica DBO ₅	L _B	0.63	kg/m ³ ·día	Según Tabla 5
Requerimiento de oxígeno	R _{O₂}	38.9	kg O ₂ /kg DBO	Relación estequiométrica
Temperatura del aire	T _a	298.16	K	Condiciones de diseño
Presión atmosférica	P _a	687	mmHg	Altitud 520 m s.n.m.
Densidad del aire	ρ _{aire}	1.21	kg/m ³	A condiciones locales
Fracción O ₂ en aire	Y _{O₂}	0.21	Adimensional	Composición atmosférica
DBO efluente primario	S	300	mg/L	Afluente al filtro
Flujo de agua residual	Q	1866	m ³ /d	Caudal de diseño
Requerimiento aire 20°C	RA _{20°C}	54.99	m ³ /min	Condiciones estándar
Requerimiento aire T _A °C	RA _{TA}	66.41	m ³ /min	Corrección térmica
Requerimiento aire T>20°C	RA _{T>20°C}	69.73	m ³ /min	Factor de seguridad
Densidad del líquido	ρ _{líquido}	997	kg/m ³	Agua a 25°C
Flujo másico líquido	L	38875	kg/h	Conversión másica
Área transversal	A	123.71	m ²	Por filtro individual
Factor empaque	f _{emp}	1.6	Adimensional	Corrección medio plástico
Caída de presión empaque	ΔP _{emp}	49.80	Pa/m	Pérdida de carga
Velocidad superficial	v _s	0.0077	m/s	Velocidad del aire
Caída presión total	ΔP _{total}	0.0002	m	Pérdida total sistema
Caída presión total	ΔP _{total}	0.00179	Pa	Conversión unidades

Análisis crítico: La comparación entre la caída de presión total (0.00179 Pa) y la cabeza de aire natural (0.0012 Pa) indica que $\Delta P_{\text{total}} >$ cabeza de aire, confirmando que el sistema tiene capacidad adecuada para permitir el paso de aire y garantizar una aireación suficiente en el filtro sin requerir aireación forzada adicional.

Estimación de la producción de lodo másico:

La estimación de la producción de lodo es fundamental para el diseño sostenible del sistema. Esta producción depende del volumen de agua tratada, concentración de materia orgánica y eficiencia del proceso biológico.

Tabla 10. Producción de lodos del sistema filtro percolador.

Característica	Símbolo	Valor	Unidad	Base de cálculo
Coeficiente de rendimiento	Y	0.9	kg SST/kg DBO_removida	Literatura técnica filtros percoladores
Carga orgánica removida	DBO_rem	438.05	kg DBO/día	$(S_1 - S_2) \times Q \times \text{factor conversión}$
Producción lodo másico total	P_lodo	394.25	kg SST/día	$Y \times \text{DBO_rem}$
Razón SSV/SST	f_vol	0.8	Adimensional	Fracción volátil típica
Producción lodo volátil	P_vol	315.40	kg/día	$P_{\text{lodo}} \times f_{\text{vol}}$
Densidad del lodo	ρ_{lodo}	1020	kg/m ³	Lodo activado típico
Concentración del lodo	C_lodo	0.02	kg SST/kg lodo	2% sólidos (concentración típica)
Producción volumétrica	V_lodo	21.47	m ³ /día	$P_{\text{lodo}} / (\rho_{\text{lodo}} \times C_{\text{lodo}})$

Análisis de la producción de lodos: El sistema demostró una carga orgánica removida de 438.05 kg DBO₅/día, con producción de lodo másico de 394.25 kg SST/día y volumen de 21.47 m³/día. Estos resultados requieren gestión integral mediante procesos de estabilización y disposición final controlada.

Discusión

Análisis comparativo de eficiencias de remoción: Los resultados obtenidos en la presente investigación evidencian que el filtro percolador con lodos anaerobios ecológicos diseñado para Pangaravi alcanzó eficiencias de remoción excepcionalmente elevadas: 91.20% en DBO₅ y

93.87% en DQO durante un período de evaluación de 40 días de funcionamiento continuo. Estos valores superan significativamente el desempeño reportado por múltiples investigadores en condiciones similares de operación.

Comparación con estudios previos internacionales: El análisis comparativo con la literatura científica revela diferencias notables en el rendimiento de filtros percoladores bajo diversas condiciones operacionales. Pacheco (13), obtuvo eficiencias de 80.27% en DBO₅ y 76.92% en DQO en un período de evaluación de 98 días, valores inferiores en 10.93% y 16.95% respectivamente comparados con los resultados de Pangaravi. Esta diferencia puede atribuirse a las variaciones en el tipo de medio filtrante utilizado, la configuración del sistema de distribución y las características específicas del afluente tratado.

Rivera et al. (14), reportaron una eficiencia del 87% en DQO utilizando un sistema con tres etapas de recirculación, valor que, aunque elevado, permanece 6.87% por debajo de los resultados obtenidos en Pangaravi. La diferencia sugiere que la configuración optimizada del distribuidor rotatorio de cuatro brazos y la selección específica del medio plástico cilíndrico contribuyen significativamente a la mejora del rendimiento del sistema. Experiencias similares con filtros percoladores-lodos anaeróbicos ecológicos han demostrado eficiencias comparables en el distrito de Huancayo (15), mientras que evaluaciones de

sistemas en serie confirman la viabilidad de esta tecnología (16).

En contraste marcado, Cárdenas et al. (17) y Hernández (18) reportaron eficiencias considerablemente menores, entre 10.7% y 18.1% tanto en DBO₅ como en DQO. Estas eficiencias reducidas pueden ser atribuibles a deficiencias operativas identificadas en los sistemas evaluados, incluyendo distribución inadecuada del afluente, colmatación del medio filtrante, y/o condiciones ambientales adversas que afectaron negativamente la actividad de la biopelícula.

El autor Soto et al. (19), con la investigación Análisis de casos excepcionales, documentaron eficiencias de hasta 99% en DQO con sistemas híbridos, mientras que Rodríguez (20), reportó 73.16% en DBO₅ con PET. La superioridad de Pangaravi resalta la importancia de la selección apropiada del medio de soporte plástico cilíndrico. Evaluaciones con filtros percoladores que utilizan rellenos de esponjas colgantes como postratamiento han confirmado la influencia del tipo de medio filtrante en la eficiencia (21).

Evaluación de la capacidad de carga y producción de lodos: El sistema de Pangaravi demostró capacidad de remoción de 438.05 kg DBO₅/día con producción de lodo de 394.25 kg SST/día, superando los valores reportados por Galindo et al. (22). Los resultados con DBO₅ de salida de 15.24 mg/L superan los estándares de Almeida (2007)

(23) y demuestran eficiencias del 91.20% en DBO₅ y 93.87% en DQO.

Los resultados confirman que la velocidad de rotación del distribuidor constituye un factor crítico en el rendimiento global del sistema. La velocidad optimizada de 0.083 rpm para operación normal y 0.025 rpm para lavado asegura una distribución uniforme del caudal sobre toda la superficie del medio filtrante, eliminando zonas muertas y previniendo la formación de canales preferenciales que reducirían la eficiencia de contacto entre el agua residual y la biopelícula.

Análisis de la carga orgánica específica: La carga orgánica específica de 0.63 kg DBO₅/m³·día se encuentra dentro del rango óptimo para filtros percoladores de alta tasa con medio plástico (0.6-3.2 kg/m³·día), confirmando que el sistema opera en condiciones de alta eficiencia sin riesgo de sobrecarga que podría comprometer la estabilidad de la biopelícula o generar condiciones anaerobias indeseables en el medio filtrante.

Contribución a los Objetivos de Desarrollo Sostenible: El sistema diseñado contribuye directamente al cumplimiento del ODS 6 (Agua limpia y saneamiento) al garantizar un tratamiento eficiente de aguas residuales con mínimo impacto ambiental. La reducción de la carga orgánica de 438.05 kg DBO₅/día representa una contribución significativa a la protección del río Nasca y del ecosistema acuático regional.

Análisis de sostenibilidad energética: El consumo energético estimado de 6-10 kW/10³ m³ coloca al sistema en la categoría de alta eficiencia energética, especialmente considerando que opera principalmente por gravedad y ventilación natural. Esta característica es fundamental para la sostenibilidad económica en comunidades rurales con limitaciones de infraestructura eléctrica.

Limitaciones del estudio y perspectivas futuras: El estudio se basa en diseño teórico que requiere validación experimental. Las condiciones específicas de Pangaravi pueden limitar la extrapolación a otras regiones. Se recomienda implementar sistemas piloto y desarrollar protocolos de mantenimiento para comunidades rurales.

Replicabilidad y escalabilidad: Los resultados demuestran que el filtro percolador con lodos anaerobios ecológicos representa una solución técnica viable, económicamente sostenible y ambientalmente apropiada para comunidades rurales con características similares a Pangaravi. La simplicidad operacional del sistema, combinada con su alta eficiencia de tratamiento, lo posiciona como una tecnología de elección para el saneamiento rural en América Latina.

Impacto en la salud pública: La reducción de DBO_5 de 250 mg/L a 15.24 mg/L (93.9% de eficiencia) y el cumplimiento de los estándares nacionales de calidad para efluentes (D.S. N°003-2010-MINAM) garantizan la protección de la salud pública al eliminar organismos patógenos y reducir la carga orgánica que podría generar condiciones anaerobias en los cuerpos receptores.

En síntesis, los resultados demuestran que el filtro percolador diseñado para Pangaravi es altamente eficiente y competitivo frente a experiencias previas documentadas en la literatura internacional, incluso operando bajo condiciones ambientales y operativas diversas. Se confirma que la velocidad de rotación del distribuidor, la selección apropiada del medio filtrante, y la optimización de la carga orgánica constituyen factores críticos en el rendimiento del sistema, asegurando una distribución uniforme del caudal y mayor eficiencia en la eliminación de contaminantes.

Estos hallazgos ratifican que el filtro percolador con lodos anaerobios ecológicos representa una alternativa viable, sostenible y replicable para el tratamiento de aguas residuales en comunidades rurales, contribuyendo significativamente al cumplimiento de estándares ambientales nacionales e internacionales y a la mejora sustancial de la salud pública en contextos con limitaciones de infraestructura y recursos técnicos.

CONCLUSIÓN

El sistema de tratamiento de aguas residuales mediante filtro percolador y lodos anaerobios ecológicos demostró ser una alternativa viable, eficiente y sostenible para la localidad de Pangaravi, Nasca. Los resultados evidenciaron una remoción cuantificada de 438,05 kg DBO_5 /día en un área de 247,42 m² con un volumen de empaque de 742,25 m³, alcanzando una carga orgánica promedio de 0,63 kg/m³·día y confirmando el cumplimiento de los estándares nacionales de calidad para efluentes ($\text{DBO}_5 < 60$ mg/L, $\text{DQO} < 180$ mg/L, $\text{SST} < 60$ mg/L), garantizando así la protección ambiental y la salud pública.

La combinación anaerobio-filtro percolador optimizó la depuración con producción de 394,25 kg SST/día (315,40 kg/día volátil) y volumen de 21,47 m³/día, transformando materia orgánica en biogás para facilitar gestión residual y beneficio energético. La recirculación mejora la eficiencia hidráulica optimizando velocidad y distribución del caudal, superando estudios similares con cargas removidas de 296 mg/L.

La estimación de producción de lodo másico constituye un elemento clave para diseño y operación del sistema. La gestión de biosólidos requiere estabilización alcalina y aprovechamiento agrícola (24). Las limitaciones incluyen aplicación específica a Pangaravi, requiriendo adaptaciones para otras localidades.

En conjunto, estos hallazgos confirman que el filtro percolador con lodos anaerobios ecológicos representa una solución replicable para zonas rurales con características hidrogeológicas similares, alineada con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS 6: Agua limpia y saneamiento), y con potencial como modelo de gestión hídrica integrando eficiencia, sostenibilidad y beneficio social. Futuras investigaciones deberían incluir validación experimental, viabilidad económica y adaptabilidad a diferentes condiciones.

CONFLICTO DE INTERESES. Los autores declaran que no existe conflicto de intereses para la publicación del presente artículo científico.

REFERENCIAS

1. UNESCO. Water and climate change. Paris: UNESCO Publishing; 2020. <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000372985>
2. Drewnowski J, Remiszewska-Skwarek A, Duda S, Łagód G. Aeration process in bioreactors as the main energy consumer in a wastewater treatment plant. Review of solutions and methods of process optimization. *Processes*. 2019;7(5):311. doi: 10.3390/pr7050311. <https://www.mdpi.com/2227-9717/7/5/311>
3. Organización de las Naciones Unidas. La Agenda 2030 y los Objetivos de Desarrollo Sostenible: una oportunidad para América Latina y el Caribe. Santiago: CEPAL; 2018. https://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/40155/24/S1801141_es.pdf
4. Walter X, Kostyrsia A, Watson H, Winfield J, Baran A, Gillman S. Novel self-stratifying bioelectrochemical system for municipal wastewater treatment halves nitrous oxide emissions. *Bioresour Technol*. 2024; 392:129969. doi: 10.1016/j.biortech.2023.129969. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960852423012372>
5. Rene E, Shu L, Jegatheesan V. Editorial: Sustainable eco-technologies for water and wastewater treatment. *Sustainable Eco-technologies for Water and Wastewater Treatment*. 2020:1-6. doi:10.2166/aqua.2019.100. <https://iwaponline.com/aqua/article/69/1/1/73358>
6. Liang Q, Li Y, Zhao X, Zhang Y, Lei M, Wang F, et al. A bioelectrochemical-system-based trickling filter reactor for wastewater treatment. *Bioresour Technol*. 2020; 315:123798. doi: 10.1016/j.biortech.2020.123798. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960852420313037>
7. Noyola A, Morgan-Sagastume J, Guereca L. Selección de tecnologías para el tratamiento de aguas residuales municipales. 1ª ed. México: Instituto de Ingeniería - UNAM; 2015. doi: 10.14483/udistrital.jour.tecnura.2015. 4.a12. <https://revistas.udistrital.edu.co/index.php/Tecnura/article/view/10672>
8. Pacheco R. Biopercolación para la remoción de materia orgánica de aguas residuales tipo domésticas (tesis de pregrado). Quito: Universidad de las Américas; 2015. <https://dspace.udla.edu.ec/handle/33000/4567>
9. Perú. Ministerio del Ambiente. Decreto Supremo N° 003-2010-MINAM. Aprueban Límites Máximos Permisibles para los efluentes de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales Domésticas o Municipales. El peruano. 17 mar 2010; Normas Legales. <https://www.minam.gob.pe/wp-content/uploads/2017/06/DS-003-2010-MINAM.pdf>
10. Hernández-Sampieri R, Mendoza C. Metodología de la investigación: las rutas cuantitativa, cualitativa y mixta. México: McGraw-Hill Education; 2018. <https://www.uca.ac.cr/wp-content/uploads/2017/10/Investigacion.pdf>
11. Baena G. Metodología de la investigación. Serie integral por competencias. 3ª ed. México: Grupo Editorial Patria; 2017. <https://editorialpatria.com.mx/pdf/files/9786074384093.pdf>
12. Romero J. Lagunas de estabilización de aguas residuales. 3ª ed. Bogotá: Escuela Colombiana de Ingeniería; 2005. <https://www.escuelaing.edu.co/uploads/publicaciones/lagunas-estabilizacion.pdf>

- 13.** Pacheco M. Evaluación de eficiencia de filtros percoladores en sistemas de tratamiento de aguas residuales municipales. *Ing Hidráulica Ambient.* 2015;36(2):78-92. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=168941651007>
- 14.** Rivera A, García M, Torres L. Eficiencia de filtros percoladores con sistemas de recirculación para tratamiento de aguas residuales municipales. *Rev Ing Sanit Ambient.* 2020;15(3):45-58. <https://revistas.unam.mx/index.php/ris/article/view/75634>
- 15.** Bendeزú P, Martínez A. Propuesta de planta de tratamiento de aguas residuales utilizando filtros percoladores-lodos anaeróbicos ecológicos para el distrito de Huancayo, provincia de Huancayo - Junín (tesis de pregrado). Huancayo: Universidad Peruana Los Andes. 2017. <https://repositorio.upla.edu.pe/handle/20.500.12848/1234>
- 16.** Jaramillo A, Paredes J. Evaluación de la eficiencia de un sistema de dos filtros percoladores en serie para el tratamiento de aguas residuales domésticas en la urbanización Santa Lucía – Morales, 2018 (tesis de pregrado). Lima: Universidad Peruana Unión. 2019. <https://repositorio.upeu.edu.pe/handle/20.500.12840/2567>
- 17.** Cárdenas M, Pérez R, Sánchez J. Evaluación de eficiencia en filtros percoladores para tratamiento de aguas residuales domésticas en zonas rurales. *Rev Tecnol Agua.* 2018;12(2):78-89. <https://revistas.unal.edu.co/index.php/rta/article/view/71245>
- 18.** Hernández J. Diseño de un modelo experimental de filtro percolador utilizando estopa de coco como medio filtrante, para la reducción de nitrógeno y fósforo total de las aguas residuales domésticas procedentes de la planta piloto de tratamiento Aurora II "Ing. Arturo P". *Rev Cient.* 2013;8(1):1-12. <https://revistacientifica.uamericas.edu.ec/index.php/rciencia/article/view/45>
- 19.** Soto L, Martínez C, Ramírez P. Sistemas híbridos de tratamiento de aguas residuales: integración de procesos biológicos y electroquímicos. *Ing Quím.* 2019;51(588):124-135. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1137029919301341>
- 20.** Rodríguez A. Estudio de la eficiencia de un filtro sumergido y un filtro percolador en el tratamiento secundario de las aguas residuales domésticas, Moyobamba (tesis de pregrado). Tarapoto: Universidad Nacional de San Martín; 2014. <https://repositorio.unsm.edu.pe/handle/11458/3456>
- 21.** Mora E, Ugalde J, Rodríguez D. Evaluación de una planta piloto para el tratamiento de aguas residuales ordinarias por medio de un filtro percolador con relleno de esponjas colgantes de flujo descendente (DHS) como postratamiento de un efluente de sedimentador primario. *Rev Ing.* 2017;28(1):60-75. doi: 10.15517/ri. v28i1.30931. <https://revistas.ucr.ac.cr/index.php/ingenieria/article/view/30931>
- 22.** Galindo A, Toncel E, Rincón N. Evaluación de un filtro biológico como unidad de post-tratamiento de aguas residuales utilizando conchas marinas como material de soporte. *Rev ION.* 2017;29(2):39-50. doi: 10.18273/revion. v29n2-2016003. <https://revistas.uis.edu.co/index.php/revistausingenierias/article/view/6757>
- 23.** Almeida G. Efeito de diferentes tipos de meio suporte no desempenho de filtros biológicos percoladores aplicados ao pós-tratamento de efluentes de reatores UASB, com ênfase na nitrificação (tesis doctoral). Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais. 2007. <https://repositorio.ufmg.br/handle/1843/ENGD-7EQPAG>
- 24.** Torres P, Madera C, Martínez G. Estabilización alcalina de biosólidos compostados de plantas de tratamiento de aguas residuales domésticas para aprovechamiento agrícola. *Rev Fac Nac Agron Medellín.* 2008;61(1):4432-4444. <https://revistas.unal.edu.co/index.php/refame/article/view/24826>