

Tecnologías descentralizadas para el tratamiento de aguas residuales en zonas rurales de países en desarrollo: revisión sistemática de su eficiencia y sostenibilidad

Decentralized Technologies for Wastewater Treatment in Rural Areas of Developing Countries: A Systematic Review of Their Efficiency and Sustainability

Abelardo Melanio Barboza Mejia¹

Universidad Nacional de Cajamarca, Cajamarca – Perú,
(Xbameal02@gmail.com) <https://orcid.org/0000-0002-7521-632X>

Carlos Alberto Benites Castañeda²

Universidad Nacional Ciro Alegría, Huamanchuco – Perú,
(cbenites@unca.edu.pe) <https://orcid.org/0009-0004-0791-0477>

Cynthia Medali Castillo Fernández³

Universidad Nacional Ciro Alegría, Huamanchuco – Perú,
(medalcf@gmail.com) <https://orcid.org/0009-0008-4172-9574>

Fredy Julio Flores Moscol⁴

Universidad Nacional Ciro Alegría, Huamanchuco – Perú,
(fflores@unca.edu.pe) <https://orcid.org/0000-0002-1735-0854>

Luis Ángel Mozo Cruz⁵

Universidad Nacional Autónoma de Chota, Chota – Perú,
(ing.angelangel@gmail.com) <https://orcid.org/0009-0004-6497-9200>

Cómo citar:

Barboza Mejia , A. M., Benites Castañeda , C. A., Castillo Fernández, C. M., Flores Moscol, F. J., & Mozo Cruz , L. Ángel. (2026). Tecnologías descentralizadas para el tratamiento de aguas residuales en zonas rurales de países en desarrollo: revisión sistemática de su eficiencia y sostenibilidad. *Saber Estratégico Internacional*, 4(3), 403–425. <https://doi.org/10.70577/s.e.v4i3.56>

RESUMEN

El crecimiento poblacional y la expansión de actividades antropogénicas ejercen una presión creciente sobre los recursos hídricos globales, afectando la disponibilidad y calidad del agua, especialmente en zonas rurales de países en desarrollo donde la infraestructura sanitaria resulta insuficiente y el 80% de las aguas residuales se vierten al ambiente sin depuración previa. La presente revisión sistemática se planteó como objetivo general evaluar la eficiencia y la sostenibilidad de las tecnologías descentralizadas para el tratamiento de aguas residuales en zonas rurales de países en desarrollo, y como objetivos específicos: 1) identificar las principales tipologías reportadas; 2) analizar los rangos de eficiencia de remoción de contaminantes; y 3) determinar los factores críticos de sostenibilidad que inciden en la continuidad operativa de estos sistemas. La metodología aplicó el protocolo PRISMA con búsqueda en Scopus, Google Académico, SciELO y Redalyc entre 2020-2026, que permitió seleccionar 23 documentos para el análisis cualitativo. Los resultados evidencian cinco tipologías, donde los sistemas basados en vegetación y los anaeróbicos son los más documentados; las eficiencias de remoción alcanzan hasta el 99% para coliformes y materia orgánica, mientras que la sostenibilidad depende de factores como la disponibilidad de materiales locales, la capacidad de mantenimiento comunitario y la participación social. Se concluye que las tecnologías descentralizadas constituyen una alternativa viable para el saneamiento rural, aunque su selección e implementación requieren un enfoque multidimensional que considere las condiciones climáticas, la capacidad técnica local y los marcos institucionales, para garantizar su continuidad operativa a largo plazo.

Palabras clave: aguas residuales, zonas rurales, tecnologías descentralizadas, humedales construidos, reactores anaeróbicos, saneamiento, sostenibilidad.

ABSTRACT

Population growth and the expansion of anthropogenic activities exert increasing pressure on global water resources, affecting water availability and quality, especially in rural areas of developing countries where sanitary infrastructure is insufficient and 80% of wastewater is discharged into the environment without prior treatment. This systematic review aimed to evaluate the efficiency and sustainability of decentralized technologies for wastewater treatment in rural areas of developing countries, with the following specific objectives: 1) to identify the main typologies reported; 2) to analyze the ranges of pollutant removal efficiency; and 3) to determine the critical sustainability factors affecting the operational continuity of these systems. The methodology applied the PRISMA protocol with a search in Scopus, Google Scholar, SciELO, and Redalyc between 2020-2026, which allowed the selection of 23 documents for qualitative analysis. The results evidenced five typologies, where vegetation-based and anaerobic systems are the most documented; removal efficiencies reach up to 99% for coliforms and organic matter, while sustainability depends on factors such as the availability of local materials, community maintenance capacity, and social participation. It is concluded that decentralized technologies constitute a viable alternative for rural sanitation, although their selection and implementation require a multidimensional approach that considers climatic conditions, local technical capacity, and institutional frameworks to guarantee their long-term operational continuity.

Keywords: wastewater, rural areas, decentralized technologies, constructed wetlands, anaerobic reactors, sanitation, sustainability.

INTRODUCCIÓN

El crecimiento poblacional y la expansión de las actividades antropogénicas ejercen una presión creciente sobre los recursos hídricos globales, afectando tanto la disponibilidad como la calidad del agua. La contaminación de las fuentes superficiales y subterráneas se intensifica por el vertido de aguas residuales sin tratamiento, especialmente en regiones donde la infraestructura sanitaria resulta insuficiente (Acosta, 2024; Jiménez et al., 2024). La problemática adquiere particular gravedad en zonas rurales de países en desarrollo, donde cerca del 41% de la población carece de acceso a servicios básicos de saneamiento y más del 80% de las aguas residuales se vierten al ambiente sin depuración previa (Montúfar, 2025).

Las comunidades rurales enfrentan desafíos específicos para el saneamiento debido a la baja densidad poblacional, la dispersión geográfica de las viviendas y la limitada disponibilidad de recursos económicos y técnicos. Los sistemas centralizados de tratamiento de aguas residuales resultan inviables en estos contextos, ya que requieren extensas redes de alcantarillado, elevada inversión inicial y personal altamente calificado para su operación y mantenimiento (Bisschops et al., 2025; Centeno et al., 2024). La situación se agrava por la falta de cobertura de alcantarillado en áreas rurales, que en países como Colombia apenas alcanza el 26.5% de la población, mientras que en zonas urbanas supera el 86.6% (Albornoz et al., 2025).

La ausencia de sistemas adecuados de tratamiento genera impactos negativos sobre la salud pública y los ecosistemas acuáticos, con consecuencias directas en la calidad de vida de las poblaciones rurales. Las enfermedades diarreicas, la parasitosis y la hepatitis A se asocian directamente al consumo de agua contaminada por descargas de aguas residuales domésticas sin tratamiento previo (Bustos et al., 2023; Humanante et al., 2022). La contaminación de cuerpos de agua superficiales y subterráneos limita además los usos productivos del recurso, afectando actividades agrícolas y pecuarias fundamentales para el sustento de las comunidades rurales.

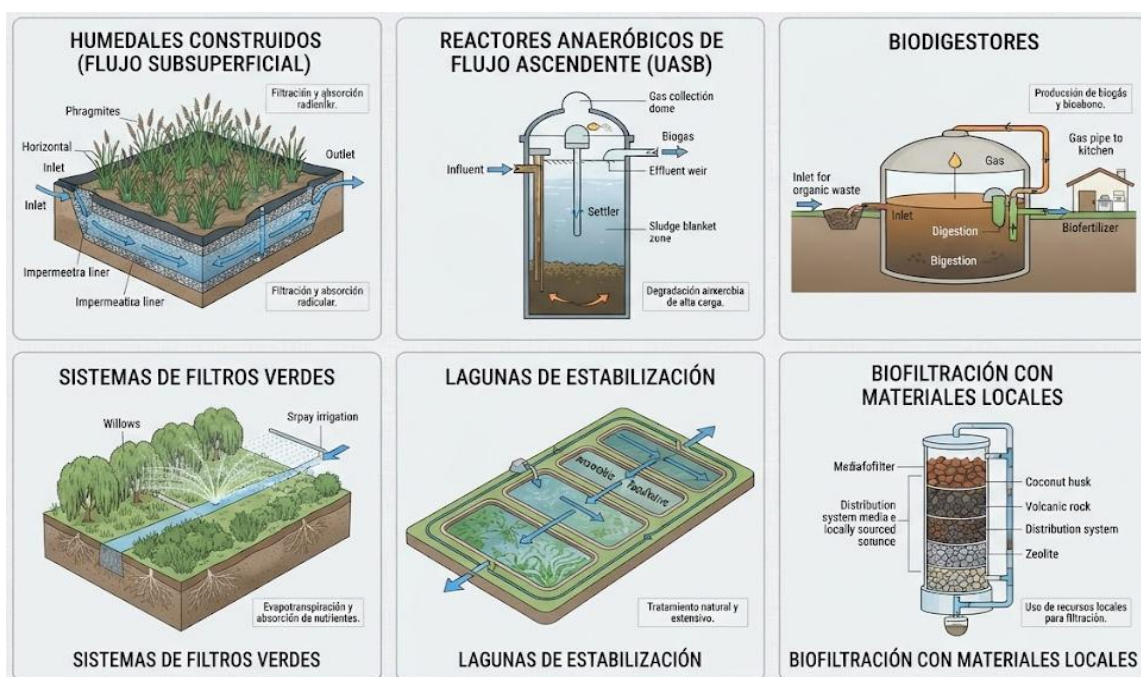
En este contexto, las tecnologías descentralizadas emergen como una alternativa viable y sostenible para el

tratamiento de aguas residuales en zonas rurales, adaptándose a las condiciones particulares de cada localidad (Acosta, 2024). De hecho, estas soluciones, también denominadas sistemas in situ o de saneamiento no convencional, tratan las aguas residuales en el mismo punto de generación o en sus proximidades, por lo que eliminan la necesidad de extensas redes de alcantarillado (Roque et al., 2021). Los sistemas descentralizados ofrecen ventajas significativas en términos de flexibilidad, menor inversión inicial, bajo consumo energético y posibilidad de operación por personal local con capacitación básica (Montúfar, 2025).

Entre las tecnologías descentralizadas más documentadas, se encuentran:

Figura 1

Tecnologías descentralizadas de tratamiento de aguas residuales



Nota. Elaboración propia a partir de Pérez et al. (2022) y Zurita & Sandoval (2024).

Los humedales constructivos se destacan por su capacidad de remover materia orgánica (80-95%), nutrientes (80-90%) y patógenos, con bajos costos de operación y mantenimiento, además de proporcionar servicios ecosistémicos como hábitat para la fauna y mejora del paisaje (Fernández et al., 2025). Los reactores anaeróbicos alcanzan reducciones de DBO entre el 70% y el 90% con mínimo consumo energético, generando biogás como subproducto aprovechable, mientras que los sistemas híbridos logran efluentes de mayor calidad a cambio de una mayor complejidad operativa (Bisschops et al., 2025; Vera et al., 2021).

Los filtros verdes con cero descargas representan una innovación tecnológica que combina el tratamiento biológico con la evapotranspiración controlada, eliminando por completo los vertimientos al ambiente. Las investigaciones realizadas en el contexto cafetero colombiano demuestran que estos sistemas, que incorporan pasto vetiver (*Chrysopogon zizanioides*) en invernaderos impermeabilizados, logran tasas evapotranspirativas de 22 L/m²/día y

remociones de DQO superiores al 77% (Rodríguez et al., 2025). El uso de especies nativas como la cianobacteria *Nostoc commune* en lagunas de estabilización ha mostrado eficiencias adicionales del 13.9% en la remoción de contaminantes para comunidades altoandinas, demostrando el potencial de los recursos biológicos locales (Roque et al., 2021).

La eficiencia de las tecnologías descentralizadas no depende únicamente de los aspectos técnicos, sino también de factores contextuales como el clima, la disponibilidad de terreno, la carga hidráulica, la capacidad de mantenimiento y la participación comunitaria (Montúfar, 2025). La literatura reporta que los sistemas como los humedales construidos y los reactores anaeróbicos obtienen mejores puntuaciones en análisis de sostenibilidad cuando se seleccionan mediante criterios técnicos y contextuales explícitos, considerando aspectos ambientales, económicos, sociales e institucionales (Bisschops et al., 2025). La falta de mantenimiento adecuado constituye una de las principales causas de fracaso de estos sistemas, como se evidencia en evaluaciones realizadas en México, donde la mayoría de los humedales artificiales exceden los límites máximos permisibles para nutrientes y coliformes debido a la ausencia de programas de mantenimiento preventivo (Castañeda, 2022).

Los estudios de caso en América Latina revelan experiencias exitosas, en Costa Rica, los sistemas de lodos activados predominan en el 90% de las plantas de tratamiento, mientras que los sistemas anaeróbicos apenas representan el 4% (Centeno et al., 2024). En Chile, los humedales construidos con plantas ornamentales han demostrado su potencial para el tratamiento de aguas servidas rurales y la reutilización de efluentes en riego, aunque se requiere la incorporación de sistemas de desinfección complementarios para cumplir con las normativas de calidad (Vera et al., 2021). La experiencia peruana con módulos innovadores de tratamiento biológico utilizando *Nostoc commune* en comunidades altoandinas evidencia que las soluciones adaptadas a condiciones climáticas extremas (altitudes superiores a 3400 msnm y temperaturas de 7°C) son viables técnicamente y aceptadas socialmente (Roque et al., 2021).

La evaluación de la sostenibilidad de los sistemas descentralizados requiere un enfoque multidimensional que considere no solo la eficiencia técnica, sino también los costos de inversión y operación, la aceptación social, el cumplimiento normativo y la posibilidad de recuperación de recursos (Bisschops et al., 2025). Los análisis multicriterio aplicados en diferentes contextos muestran que las tecnologías que incorporan tratamiento anaeróbico con postratamiento aeróbico obtienen las mejores puntuaciones en términos de sostenibilidad para países tropicales, debido a su balance entre eficiencia, simplicidad operativa y recuperación de energía y nutrientes (Centeno et al., 2024).

A pesar de los avances documentados, persisten vacíos de conocimiento respecto a la comparación sistemática de tecnologías descentralizadas en términos de eficiencia, sostenibilidad y adaptabilidad a diferentes contextos rurales. La literatura existente presenta resultados fragmentados y heterogéneos, con diferencias en las metodologías empleadas, los indicadores evaluados y las condiciones de operación, lo que dificulta la toma de decisiones informadas por parte de formuladores de políticas y comunidades (Albornoz et al., 2025; Montúfar, 2025). La mayoría de los estudios se centran en el análisis de tecnologías individuales sin ofrecer una perspectiva integradora que permita identificar las opciones más adecuadas según las características específicas de cada localidad.

Por lo tanto, la presente revisión sistemática plantea ¿Cuáles son las tecnologías descentralizadas más eficientes y sostenibles para el tratamiento de aguas residuales en zonas rurales de países en desarrollo? Para responder esta pregunta, el estudio se propone como objetivo general evaluar la eficiencia y la sostenibilidad de las tecnologías descentralizadas para el tratamiento de aguas residuales en zonas rurales de países en desarrollo, y como objetivos específicos: 1) identificar las principales tipologías de tecnologías descentralizadas reportadas en la literatura para contextos rurales; 2) analizar los rangos de eficiencia de remoción de contaminantes de cada tecnología, correlacionándolos con variables operacionales como el clima, la carga hidráulica y el tiempo de retención; y 3) determinar los principales factores críticos de sostenibilidad (costo de inversión/mantenimiento, aceptación comunitaria, complejidad técnica y uso de materiales locales) que inciden en la continuidad operativa de estos sistemas.

MATERIAL Y MÉTODOS

La presente investigación se desarrolló bajo un enfoque cualitativo de tipo descriptivo. El propósito central consistió en identificar, organizar, comparar y sintetizar la evidencia científica disponible sobre la eficiencia y sostenibilidad de las tecnologías descentralizadas para el tratamiento de aguas residuales en zonas rurales de países en desarrollo. Con el fin de garantizar un procedimiento sistemático y transparente en la localización y selección de las fuentes documentales, se aplicó el protocolo PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses) estructurado en cuatro etapas consecutivas: identificación, selección, elegibilidad e inclusión.

Fase de identificación

La etapa inicial consistió en la búsqueda y localización de estudios empíricos, revisiones sistemáticas y documentos académicos relacionados con el objeto de estudio. Para ello, se diseñó una estrategia de búsqueda que combinó términos específicos en español e inglés, así como operadores booleanos (AND, OR). Los términos clave seleccionados incluyeron "tecnologías descentralizadas", "tratamiento de aguas residuales", "zonas rurales", "países en desarrollo", "humedales construidos", "reactores anaeróbicos", "filtros verdes", "saneamiento rural", "eficiencia", "sostenibilidad", así como sus equivalentes en inglés. La Tabla 1 presenta las combinaciones en cada fuente consultada.

Tabla 1
Estrategia de búsqueda de fuentes documentales

Base de datos / Repositorio	Palabras clave y operadores booleanos utilizados
Scopus	"decentralized wastewater treatment" OR "onsite sanitation" AND "rural areas" OR "developing countries" AND "constructed wetlands" OR "anaerobic reactors" OR "green filters" AND "efficiency" OR "sustainability"
Google Académico	"tecnologías descentralizadas" AND "tratamiento de aguas residuales" OR "saneamiento rural" AND "zonas rurales" OR "países en desarrollo" AND "eficiencia" OR "sostenibilidad"

SciELO	"humedales construidos" OR "reactores anaeróbicos" AND "aguas residuales rurales" AND "eficiencia de remoción" AND "América Latina"
Redalyc	"tratamiento de aguas residuales" AND "zonas rurales" AND "tecnologías apropiadas" OR "sistemas descentralizados"

Nota. Elaboración propia. La estrategia de búsqueda se diseñó considerando los tesauros de cada base de datos y la literatura previa sobre el tema.

Fase de selección

Una vez obtenidos los resultados preliminares de la búsqueda, se procedió con la depuración de los registros duplicados. Posteriormente, se revisaron los títulos y los resúmenes para confirmar su pertinencia y relevancia respecto al tema de investigación. Para asegurar la calidad, la coherencia y la reproducibilidad del material analizado, se establecieron los siguientes criterios de inclusión:

- Investigaciones cuantitativas, cualitativas o mixtas, estudios de caso, artículos de revisión o documentos técnicos sobre tecnologías descentralizadas para el tratamiento de aguas residuales en contextos rurales.
- Documentos redactados en español o en inglés, así como aquellos producidos entre los años 2020 y 2025.
- Estudios que aborden tecnologías descentralizadas de baja, media o alta complejidad, siempre que su aplicación se oriente a zonas rurales de países en desarrollo.

De manera complementaria, se definieron criterios de exclusión como:

- Documentos de divulgación periodística, artículos de opinión, editoriales, cartas al editor o informes técnicos sin respaldo de revisión por pares.
- Textos que no estuvieran disponibles en su totalidad (acceso a texto completo) o publicados en idioma diferente al inglés y fuera del rango establecido de 2020 a 2025.
- Estudios enfocados únicamente en aguas residuales industriales sin componente doméstico o rural, así como aquellos que no presentaran datos cuantitativos de eficiencia o análisis de sostenibilidad.

Fase de elegibilidad

Durante esta fase, se realizó un análisis detallado de todos los artículos y documentos que superaron la etapa de selección. Se verificó que cada fuente cumpliera de manera satisfactoria con los objetivos planteados en la investigación. Fueron excluidos aquellos textos que no proporcionaron evidencia sustancial o significativa sobre la eficiencia y sostenibilidad de las tecnologías descentralizadas para el tratamiento de aguas residuales en zonas rurales, así como aquellos que presentaron fallas metodológicas que comprometieron la validez o confiabilidad del análisis.

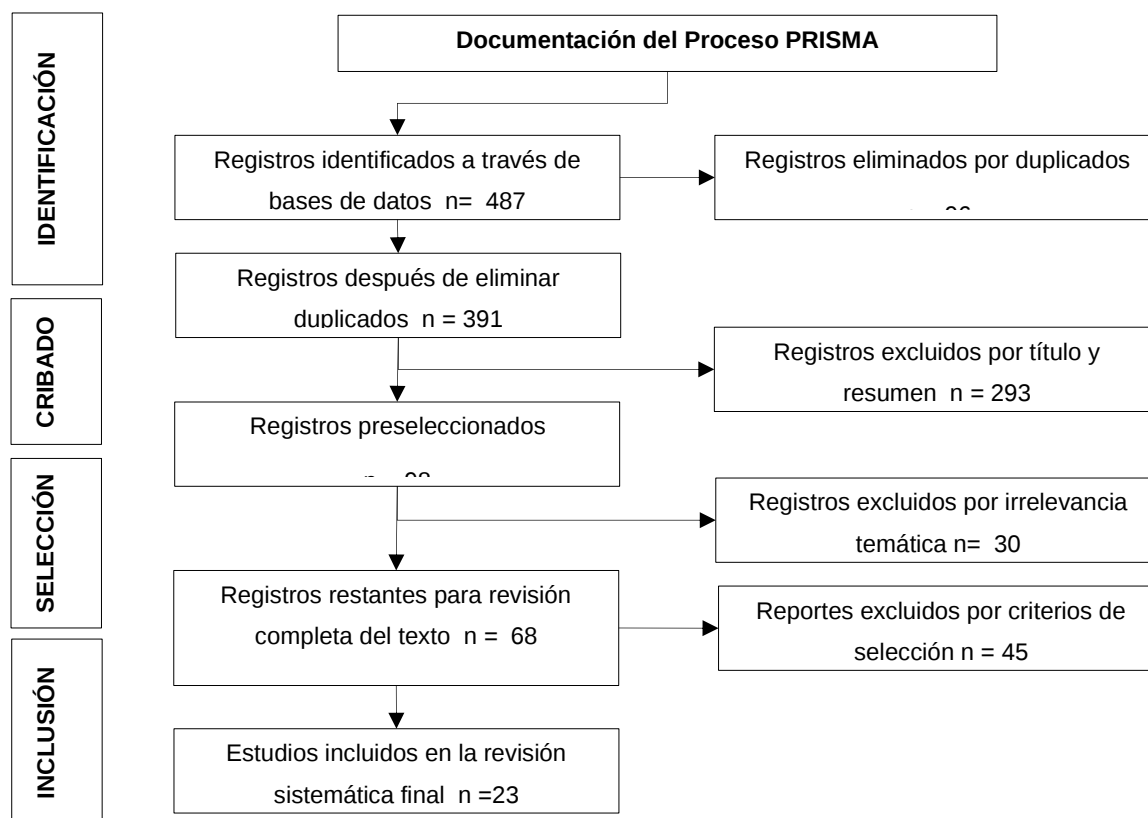
Fase de inclusión

La etapa final incluyó un corpus documental definitivo con un total de 23 documentos únicos para el análisis cualitativo, los cuales incluyeron artículos científicos publicados en revistas indexadas, capítulos de libros académicos, tesis de maestría y actas de congresos científicos. Los documentos provienen principalmente de países de América Latina y de contextos globales, lo que permite una aproximación contextualizada a la realidad del

saneamiento rural en la región. El proceso completo de selección y cribado se representa en la Figura 1, elaborada de acuerdo con las directrices del diagrama de flujo PRISMA.

Figura 2

Diagrama de flujo del proceso de selección de estudios



Nota. El presente diagrama sigue la estructura recomendada por PRISMA 2020 y detalla las cuatro fases del proceso de selección de fuentes documentales empleadas en esta investigación.

RESULTADOS

La presentación de los resultados se organiza en función de cada uno de los objetivos específicos previamente planteados.

Tipologías de tecnologías descentralizadas para el tratamiento de aguas residuales en zonas rurales: clasificación y caracterización

La revisión de la literatura facilitó identificar las tecnologías descentralizadas empleadas en el tratamiento de aguas residuales en áreas rurales de naciones en desarrollo. La Tabla 1 ofrece una clasificación detallada de las tecnologías identificadas, organizadas por tipo, junto con sus contextos de uso y referencias bibliográficas correspondientes.

Tabla2

Clasificación de tecnologías descentralizadas identificadas para el tratamiento de aguas residuales en zonas rurales

Tipología	Tecnología específica	Descripción	Contexto de aplicación	Referencias
Sistemas basados en vegetación	Humedales contruidos de flujo subsuperficial horizontal	Sistemas que imitan humedales naturales con flujo horizontal a través de grava y raíces de plantas	Zonas rurales con disponibilidad de terreno; climas templados y tropicales	Albornoz et al. (2025); Castañeda (2022); Fernández et al. (2025); Pérez et al. (2022); Vera et al. (2021); Zurita & Sandoval (2024)
	Humedales contruidos de flujo subsuperficial vertical	Sistemas con flujo vertical intermitente que favorecen la nitrificación y mayor transferencia de oxígeno	Áreas con limitación de espacio; climas templados y tropicales	Pérez et al. (2022); Vera et al. (2021); Zurita & Sandoval (2024)
	Humedales contruidos híbridos (vertical + horizontal)	Combinación de ambos flujos para optimizar remoción de nitrógeno y materia orgánica	Comunidades rurales con exigencia de mayor calidad de efluente	Acosta (2024); Pérez et al. (2022)
	Filtros verdes con cero descargas	Invernadero impermeabilizado con pasto vetiver para evapotranspiración controlada	Fincas cafeteras y zonas rurales con pendiente; enfoque de cero descargas	Rodríguez et al. (2025a); Rodríguez et al. (2025b)
	Módulo biológico con <i>Nostoc commune</i>	Lagunas de estabilización con cianobacteria nativa para depuración en condiciones extremas	Comunidades altoandinas (>3400 msnm) con bajas temperaturas	Roque et al. (2021)
	Reactor UASB (Flujo ascendente)	Tratamiento anaeróbico con manto	Regiones tropicales y subtropicales	Bisschops et al. (2025); Bustos et al.

Sistemas biológicos anaeróbicos		de lodos granular; produce biogás como subproducto	(>20°C); comunidades pequeñas y medianas	(2023); Centeno et al. (2024)
	Reactor ABR (con deflectores)	Reactor anaeróbico con compartimentos en serie que optimiza el contacto sustrato- microorganismo	Climas cálidos; comunidades rurales con limitaciones energéticas	Bisschops et al. (2025); Montúfar (2025)
	Biodigestores prefabricados	Sistemas anaeróbicos compactos para tratamiento de excretas y generación de biogás	Viviendas rurales dispersas en Perú y América Latina	Albornoz et al. (2025)
	Filtro Anaeróbico de Flujo Ascendente (FAFA)	Tanque empacado con material filtrante (plástico, grava) para depuración anaeróbica	Pretratamiento de aguas residuales domésticas en sistemas sépticos	Rodríguez et al. (2025b); Centeno et al. (2024)
	Tanques sépticos con baffles	Sistemas de sedimentación y digestión anaeróbica con cámaras múltiples	Viviendas rurales con limitaciones de recursos y espacio	Albornoz et al. (2025)
	Tanques sépticos convencionales	Sedimentación y digestión anaeróbica en una sola cámara	Zonas rurales con baja carga orgánica y terrenos permeables	Acosta (2024); Bisschops et al. (2025)
Sistemas biológicos aeróbicos	Lodos activados	Proceso aeróbico con aireación y recirculación de biomasa para oxidación de materia orgánica	Zonas rurales con disponibilidad de energía eléctrica y personal capacitado	Bustos et al. (2023); Centeno et al. (2024); Jiménez et al. (2024)
	Biodiscos / Contactores biológicos rotatorios	Sistemas de biopelícula rotatoria para tratamiento	Comunidades rurales con limitaciones de espacio y acceso a energía	Jiménez et al. (2024)

		aeróbico en pequeña escala		
	Reactores SBR (Secuenciales por carga)	Reactores aeróbicos de operación por lotes para remoción de materia orgánica y nutrientes	Pequeñas comunidades con variaciones de caudal	Jiménez et al. (2024)
	Proceso Fenton	Oxidación avanzada con peróxido de hidrógeno y sales de hierro para compuestos recalcitrantes	Pretratamiento de aguas industriales y con baja biodegradabilidad	López et al. (2021); Medina et al. (2020)
	Electrocoagulación	Generación in situ de coagulantes mediante corriente eléctrica para remover metales y sólidos	Tratamiento de aguas con metales pesados y colorantes; industrias rurales	Chuquimbalqui et al. (2025)
Sistemas físico- químicos	Filtración por membrana (NF/UF/RO)	Separación física mediante membranas semipermeables para alta calidad de efluente	Comunidades con requisitos estrictos de calidad; reúso agrícola	Gonzalez (2023); Jiménez et al. (2024)
	Adsorción con carbón activado	Remoción de contaminantes por adsorción física y química en materiales porosos	Tratamiento terciario y pulimento de efluentes	Gomez (2020); Gonzalez (2023); Jiménez et al. (2024)
	Filtros artesanales con materiales locales	Filtros de arena, grava, carbón, viruta y estopa para aguas grises	Comunidades rurales sin acceso a tecnologías convencionales	de León (2023)
Sistemas híbridos	Anaeróbico + Aeróbico (UASB + postratamiento)	Combinación de digestión anaeróbica y oxidación aeróbica	Comunidades con exigencia normativa y disponibilidad de terreno	Centeno et al. (2024); Bisschops et al. (2025)

para efluente de alta calidad			
Coagulación			
Electrocoagulación + Electrooxidación	electroquímica seguida de oxidación avanzada para contaminantes complejos	Aguas residuales textiles e industriales en zonas rurales	Chuquimbalqui et al. (2025)
Tratamiento			
Humedales + Reactores anaeróbicos	combinado para remoción de materia orgánica, nutrientes y patógenos	Comunidades rurales con requerimientos de reúso agrícola	Acosta (2024); Fernández et al. (2025)
Uso de bacterias			
Sistemas Bioelectroquímicos (BES/MFC/MEC)	exoelectrogénicas para generación de electricidad o hidrógeno durante el tratamiento	Comunidades rurales con potencial de recuperación energética	Bustos et al. (2023)

Nota: La categorización se fundamenta en los 23 documentos examinados durante la revisión sistemática. Las tecnologías se clasifican según su mecanismo de funcionamiento más significativo, aunque algunas pueden encajar en varias categorías dependiendo de su configuración.

La Tabla 2 muestra que los sistemas que utilizan vegetación (humedales construidos y filtros verdes) constituyen la categoría más documentada, con cinco tecnologías reconocidas y una extensa dispersión geográfica en América Latina. Los sistemas biológicos anaeróbicos forman el segundo grupo más abundante, destacándose por su poco consumo de energía y su habilidad para recuperar recursos (biogás y nutrientes). Por último, los sistemas híbridos surgen como una tendencia en crecimiento que combina las ventajas de distintos procesos para obtener efluentes de calidad superior; sin embargo, su aplicación requiere una inversión mayor y una operación más compleja.

Eficiencia de remoción de contaminantes en tecnologías descentralizadas: influencia del clima, la carga hidráulica y el tiempo de retención

El análisis de la eficiencia de remoción de contaminantes es un aspecto fundamental para evaluar el desempeño de las tecnologías descentralizadas en contextos rurales. La revisión sistemática permitió recopilar datos de cinco tipologías, considerando parámetros clave como demanda bioquímica de oxígeno (DBO₅), demanda química de oxígeno (DQO), sólidos suspendidos totales (SST), nutrientes (nitrógeno y fósforo) y coliformes fecales. La Tabla 3 presenta los rangos de eficiencia reportados para cada tecnología, junto con las condiciones operacionales que

influyen en su desempeño, incluyendo la temperatura ambiente (clima), la carga hidráulica aplicada y el tiempo de retención hidráulica.

Tabla 3

Eficiencia de remoción de contaminantes y variables operacionales asociadas en tecnologías descentralizadas para zonas rurales

Tipología	Tecnología específica	Eficiencia (%)	Clima (°C)	Carga hidráulica (m ³ /m ² ·d)	TRH (días)	Referencias
Sistemas basados en vegetación	Humedales construidos de flujo subsuperficial horizontal	DBOs: 80-95; DQO: 70-98; SST: 85-95; N: 26-78; P: 11-96; CF: 94-99	10-35	0.02-0.10	1-7	Acosta (2024); Albornoz et al. (2025); Castañeda (2022); Pérez et al. (2022); Vera et al. (2021)
	Humedales construidos de flujo subsuperficial vertical	DBOs: 75-88; DQO: 65-82; SST: 63-95; N: 70-99; P: 38-50; CF: 94-96	10-35	0.04-0.20	1-3	Pérez et al. (2022); Vera et al. (2021); Zurita & Sandoval (2024)
	Humedales construidos híbridos	DBOs: 85-98; DQO: 90-98; SST: 95-99; N: 69-99; P: 50-96; CF: 94-99	10-35	0.02-0.15	2-7	Acosta (2024); Pérez et al. (2022)
	Filtros verdes con cero descargas	DBOs: 70-80; DQO: 77-80; SST: 72-97; N: 55-70; P: 50-65; CF: 95-99	15-28	0.08-0.15	9-15 (ET)	Rodríguez et al. (2025a); Rodríguez et al. (2025b)
	Módulo biológico con Nostoc commune	DBOs: 70-81; DQO: 78-81;	7-15	0.005-0.01	9-15	Roque et al. (2021)

Sistemas biológicos anaeróbicos		SST: 77-82; N: 60-70; P: 55-65; CF: 90-93				
	Reactor UASB	DBOs: 70-90; DQO: 65-85; SST: 80-95; N: 15-30; P: 10-20; CF: 60-90	20-35	0.5-2.0	0.3- 1.5	Bisschops et al. (2025); Bustos et al. (2023); Centeno et al. (2024)
	Reactor ABR (con deflectores)	DBOs: 70-90; DQO: 70-85; SST: 85-95; N: 20-35; P: 10-15; CF: 70-90	20-35	0.5-1.5	0.5- 2.0	Bisschops et al. (2025); Montúfar (2025)
	Biodigestores prefabricados	DBOs: 84-91; DQO: 82-90; SST: 89-95; N: 60-70; P: 40-50; CF: 97-98	15-30	0.02-0.05	1-3	Albornoz et al. (2025)
	Filtro Anaeróbico de Flujo Ascendente (FAFA)	DBOs: 60-80; DQO: 60-80; SST: 65-85; N: 20-40; P: 10-20; CF: 70-85	15-30	0.1-0.5	0.5- 2.0	Centeno et al. (2024); Rodríguez et al. (2025b)
	Tanques sépticos con bafles	DBOs: 60-75; DQO: 55-70; SST: 70-85; N: 20-35; P: 15-25; CF: 60-80	15-30	0.05-0.20	1-5	Albornoz et al. (2025)

Sistemas biológicos aeróbicos	Tanques sépticos convencionales	DBO ₅ : 50-70; DQO: 45-65; SST: 60-80; N: 15-25; P: 10-20; CF: 50-75	10-35	0.02-0.10	1-5	Acosta (2024); Bisschops et al. (2025)
	Lodos activados	DBO ₅ : 85-95; DQO: 80-95; SST: 85-95; N: 60-80; P: 40-60; CF: 90-99	10-35	0.3-1.0	0.2-1.0	Bustos et al. (2023); Centeno et al. (2024); Jiménez et al. (2024)
	Biodiscos / Contactores biológicos rotatorios	DBO ₅ : 80-90; DQO: 75-88; SST: 80-90; N: 50-70; P: 35-50; CF: 85-95	10-35	0.1-0.5	0.5-2.0	Jiménez et al. (2024)
	Reactores SBR	DBO ₅ : 85-92; DQO: 80-90; SST: 85-95; N: 60-75; P: 40-55; CF: 90-98	10-35	0.2-0.8	0.3-1.5	Jiménez et al. (2024)
Sistemas físico-químicos	Proceso Fenton	DBO ₅ : 75-85; DQO: 80-95; SST: 80-90; N: 60-75; P: 50-65; CF: 70-90	15-30	0.1-0.5	0.1-0.5	López et al. (2021); Medina et al. (2020)
	Electrocoagulación	DBO ₅ : 80-95; DQO: 85-97; SST: 90-99; N: 60-80; P:	15-35	0.05-0.20	0.1-2.0	Chuquimbalqui et al. (2025)

Sistemas híbridos		70-99; CF: 85-99				
	Filtración por membrana (NF/UF/RO)	DBOs: 90-99; DQO: 90-99; SST: 95-99; N: 80-95; P: 85-98; CF: 95-99	15-35	0.02-0.10	0.1- 1.0	Gonzalez (2023); Jiménez et al. (2024)
	Adsorción con carbón activado	DBOs: 70-85; DQO: 70-90; SST: 80-95; N: 50-70; P: 60-80; CF: 70-90	15-35	0.02-0.10	0.5- 2.0	Gomez (2020); Gonzalez (2023); Jiménez et al. (2024)
	Filtros artesanales con materiales locales	DBOs: 50-75; DQO: 40-75; SST: 60-90; N: 20-60; P: 30-60; CF: 85-99	15-30	0.01-0.05	0.5- 3.0	de León (2023)
	Anaeróbico + Aeróbico (UASB + postratamiento)	DBOs: 85-95; DQO: 80-95; SST: 85-95; N: 70-85; P: 50-70; CF: 90-99	20-35	0.3-1.5	0.5- 2.0	Centeno et al. (2024); Bisschops et al. (2025)
	Electrocoagulación + Electrooxidación	DBOs: 85-92; DQO: 90-97; SST: 90-99; N: 70-85; P: 75-90; CF: 90-99	15-35	0.05-0.20	0.1- 1.5	Chuquimbalqui et al. (2025)

Humedales + Reactores anaeróbicos	DBO ₅ : 80-95; DQO: 80-95; SST: 85-99; N: 70-90; P: 60-85; CF: 94-99	15-35	0.02-0.15	2-7	Acosta (2024); Fernández et al. (2025)
Sistemas Bioelectroquímicos (BES/MFC/MEC)	DBO ₅ : 80-95; DQO: 80-95; SST: 85-95; N: 60-80; P: 50-70; CF: 85-95	20-35	0.1-0.5	0.5- 3.0	Bustos et al. (2023)

Nota: TRH = Tiempo de Retención Hidráulica; ET = Evapotranspiración (días de retención en el sistema para evaporación); CF = Coliformes Fecales; N = Nitrógeno total; P = Fósforo total. Los rangos de eficiencia se expresan como porcentaje de remoción. Los valores de carga hidráulica y TRH corresponden a las condiciones reportadas en los estudios originales. Los rangos climáticos se refieren a la temperatura ambiente promedio en la cual las tecnologías han sido evaluadas.

La Tabla 3 evidencia que los sistemas híbridos y los sistemas basados en vegetación alcanzan las mayores eficiencias de remoción (>90% para DBO₅, DQO, SST y coliformes), dependiendo su desempeño de un TRH superior a 2 días y climas templados a cálidos (10-35°C). Los sistemas anaeróbicos muestran eficiencias moderadas para materia orgánica (70-90%) pero limitadas para nutrientes (<30% N y P), mientras que los sistemas físico-químicos logran eficiencias excepcionales (>95% para metales y SST) a costa de mayor consumo energético. En general, las tecnologías con mayor TRH (>5 días) y climas cálidos (>20°C) presentan el mejor desempeño global, aunque la selección final depende del balance entre eficiencia, costo y capacidad operativa local.

Factores críticos de sostenibilidad en tecnologías descentralizadas para el tratamiento de aguas residuales en zonas rurales

La sostenibilidad de las tecnologías descentralizadas en contextos rurales no depende exclusivamente de su eficiencia técnica, sino de un conjunto de factores que determinan su continuidad operativa a largo plazo. La literatura revisada identifica cuatro dimensiones clave de sostenibilidad: económica (costos de inversión, operación y mantenimiento), técnica (complejidad operativa, disponibilidad de repuestos y materiales locales), social (aceptación comunitaria, participación y capacitación) e institucional (marco normativo, gobernanza y políticas públicas). La Tabla 4 presenta la síntesis de los principales factores críticos reportados en los estudios analizados, clasificados por tipología tecnológica y dimensión de sostenibilidad.

Tabla 4

Factores críticos de sostenibilidad para tecnologías descentralizadas en zonas rurales

Tipología	Tecnologías específicas	Costo	Complejidad técnica y materiales	Factores críticos de sostenibilidad	Referencias
Sistemas basados en vegetación	HC-FH, HC-FV, híbridos, filtros verdes, módulo con Nostoc	Inversión: Bajo a moderado (S/ 48-417/viv.)	Baja a moderada; alta disponibilidad de materiales locales	Requieren área considerable; mantenimiento vegetal periódico; riesgo de colmatación; sensibilidad climática; con PUEAA se reduce área hasta 50%	Acosta (2024); Albornoz et al. (2025); Castañeda (2022); Fernández et al. (2025); Pérez et al. (2022); Rodríguez et al. (2025a; 2025b); Roque et al. (2021); Vera et al. (2021); Zurita & Sandoval (2024)
Sistemas biológicos anaeróbicos	UASB, ABR, biodigestores, FAFA, tanques sépticos	Inversión: Bajo a alto (S/ 417-4,384/viv.)	Moderada; materiales locales disponibles	Temperatura >20°C; requiere postratamiento para nutrientes; extracción periódica de lodos; riesgo de contaminación de aguas subterráneas; el biogás es un beneficio adicional	Albornoz et al. (2025); Bisschops et al. (2025); Bustos et al. (2023); Centeno et al. (2024); Montúfar (2025); Rodríguez et al. (2025b)
Sistemas biológicos aeróbicos	Lodos activados, biodiscos, SBR	Inversión y operación: Altos (>0.5 kWh/m ³)	Alta; requiere equipos y repuestos especializados	Alto consumo energético; requiere personal capacitado; mayor	Bustos et al. (2023); Centeno et al. (2024);

				producción de lodos; costos operativos elevados; limitada aplicabilidad en zonas rurales sin energía confiable	Jiménez et al. (2024)
Sistemas físico-químicos	Fenton, electrocoagulación, membranas, adsorción, filtros artesanales	Inversión: Muy bajo a alto	Baja a alta; materiales locales disponibles para filtros artesanales	Alto costo operativo (reactivos y energía); generación de lodos; requiere ajuste de pH; alta variabilidad en filtros artesanales; eficiencia limitada para nutrientes	Chuquimbalqui et al. (2025); de León (2023); Gomez (2020); Gonzalez (2023); Jiménez et al. (2024); López et al. (2021); Medina et al. (2020)
Sistemas híbridos	Anaeróbico+aeróbico; electrocoagulación+ oxidación; HC+anaeróbico; BES/MFC/MEC	Inversión y operación: Altos	Alta; requiere personal calificado	Mayor complejidad operativa; requiere mayor inversión; necesidad de personal capacitado; mayor mantenimiento; pero ofrece mejor calidad de efluente y recuperación de recursos (energía, nutrientes)	Acosta (2024); Bisschops et al. (2025); Bustos et al. (2023); Centeno et al. (2024); Chuquimbalqui et al. (2025); Fernández et al. (2025)

Nota: HC-FH = Humedal Construido de Flujo Horizontal; HC-FV = Humedal Construido de Flujo Vertical; PUEAA = Programa de Uso Eficiente y Ahorro de Agua. Costo de inversión: Bajo (< \$500 USD/viv.), Moderado (\$500-2,000 USD/viv.), Alto (> \$2,000 USD/viv.). S/ = Soles peruanos. La complejidad técnica se refiere al nivel

de capacitación requerido para operación y mantenimiento.

La Tabla 4 evidencia que los sistemas basados en vegetación y los sistemas anaeróbicos presentan el mejor perfil de sostenibilidad para contextos rurales, combinando bajos costos de inversión y operación con baja complejidad técnica y alta aceptación social. Los sistemas aeróbicos y físico-químicos, aunque técnicamente eficientes, presentan limitaciones significativas debido a sus altos costos operativos, consumo energético y requerimientos de personal capacitado. La disponibilidad de materiales locales constituye un factor determinante para la sostenibilidad, ya que reduce la dependencia de insumos externos y facilita el mantenimiento comunitario. Los factores críticos más recurrentes incluyen la necesidad de mantenimiento periódico, la capacitación de operadores locales y el diseño adecuado según las condiciones climáticas y topográficas del sitio.

DISCUSIÓN

La clasificación de las tecnologías descentralizadas en cinco tipologías evidencia una diversidad de soluciones que coincide con Acosta (2024), quien mediante análisis bibliométrico identificó a los humedales construidos y los sistemas anaeróbicos como las tecnologías más documentadas para el saneamiento rural. No obstante, la literatura revisada muestra que los sistemas biológicos aeróbicos como los lodos activados, a pesar de su alta eficiencia, presentan limitaciones significativas en contextos rurales por su elevado consumo energético y requerimientos de personal capacitado, lo que contradice su amplia adopción reportada por Centeno et al. (2024) en Costa Rica.

Por el contrario, los sistemas híbridos emergen como una tendencia creciente que permite combinar las ventajas de diferentes procesos, aunque su implementación requiere mayor inversión y complejidad operativa, tal como lo señalan Bisschops et al. (2025) en su análisis de sostenibilidad para países tropicales. La presencia de tecnologías basadas en recursos locales, como los filtros verdes con *Nostoc commune* reportados por Roque et al. (2021) y los filtros artesanales documentados por de León (2023), sugiere que las soluciones adaptadas a condiciones climáticas extremas y recursos disponibles son viables y aceptadas socialmente en comunidades altoandinas y rurales de Guatemala. La revisión refuerza la idea de Montúfar (2025) de que no existe una tecnología única aplicable a todos los contextos rurales, sino que la selección debe basarse en criterios técnicos, económicos y socioculturales explícitos que consideren las particularidades de cada localidad.

En cuanto a la eficiencia de remoción, los rangos reportados confirman que los sistemas híbridos y los sistemas basados en vegetación alcanzan las mayores remociones de materia orgánica y nutrientes, coincidiendo con los resultados de Pérez et al. (2022) y Fernández et al. (2025), quienes documentaron eficiencias superiores al 90% para DBO₅, DQO y coliformes en humedales construidos. Sin embargo, los sistemas anaeróbicos presentan eficiencias moderadas para materia orgánica (70-90%) pero limitadas para nutrientes (<30% para N y P), lo que contradice la expectativa de que estos sistemas puedan lograr una depuración completa sin postratamiento, tal como lo advierten Bisschops et al. (2025) al señalar la necesidad de combinar reactores UASB con etapas aeróbicas para cumplir con estándares de calidad más exigentes.

En contraste, los sistemas físico-químicos como la electrocoagulación y la filtración por membrana logran eficiencias excepcionales (>95% para metales y SST), pero su alto consumo energético y costo operativo limitan

su aplicabilidad en zonas rurales sin infraestructura energética confiable, situación que concuerda con lo expuesto por Chuquimbalqui et al. (2025) y Gonzalez (2023). De igual forma, las variables operacionales como el tiempo de retención hidráulica y el clima emergen como factores determinantes del desempeño; las tecnologías con TRH superior a 5 días y climas cálidos ($>20^{\circ}\text{C}$) presentan el mejor rendimiento global, lo que respalda las recomendaciones de Bisschops et al. (2025) y Vera et al. (2021) sobre la importancia de considerar estos factores en el diseño de sistemas descentralizados para zonas rurales.

Por otra parte, los factores críticos de sostenibilidad identificados revelan que los sistemas basados en vegetación y los sistemas anaeróbicos presentan el mejor perfil para contextos rurales, combinando bajos costos con baja complejidad técnica y alta disponibilidad de materiales locales, lo que coincide con Albornoz et al. (2025) y Castañeda (2022) en sus evaluaciones comparativas en Perú y México. En cambio, los sistemas aeróbicos y físico-químicos, aunque técnicamente eficientes, presentan limitaciones significativas debido a sus altos costos operativos y requerimientos de personal capacitado, lo que cuestiona su viabilidad en comunidades con recursos limitados, tal como lo señalan Bustos et al. (2023) y Centeno et al. (2024) en sus análisis para Colombia y Costa Rica.

Asimismo, la disponibilidad de materiales locales constituye un factor determinante para la sostenibilidad, ya que reduce la dependencia de insumos externos y facilita el mantenimiento comunitario, coincidiendo con los planteamientos de Rodríguez et al. (2025a; 2025b) sobre los filtros verdes y de Roque et al. (2021) sobre el uso de *Nostoc commune* como recurso biológico local. No obstante, la falta de mantenimiento periódico emerge como la principal causa de fracaso de los sistemas, como se evidencia en el estudio de Humanante et al. (2022) en Ecuador, donde los sistemas lagunares incumplen sistemáticamente los límites máximos permisibles para coliformes fecales y nutrientes.

El análisis integrado de los resultados confirma que las tecnologías descentralizadas constituyen una alternativa viable y sostenible para el tratamiento de aguas residuales en zonas rurales de países en desarrollo, siempre que su selección e implementación se basen en criterios técnicos, económicos y contextuales explícitos, tal como lo postulan Bisschops et al. (2025) y Montúfar (2025). En este sentido, los sistemas basados en vegetación y los sistemas anaeróbicos emergen como las opciones más equilibradas, combinando eficiencias de remoción del 70-95% para materia orgánica con bajos costos de inversión y operación, mientras que los sistemas híbridos ofrecen la mejor calidad de efluente a cambio de una mayor complejidad operativa.

Finalmente, y a pesar de la evidencia revisada, se demuestra que la sostenibilidad de estos sistemas depende más de factores no técnicos, que de la eficiencia tecnológica en sí misma. Por lo tanto, la presente revisión contribuye a llenar el vacío de conocimiento identificado por Acosta (2024) y Albornoz et al. (2025) respecto a la comparación sistemática de tecnologías descentralizadas, ofreciendo una síntesis que puede orientar la toma de decisiones de formuladores de políticas, comunidades rurales y organismos de cooperación internacional. No obstante, la concentración geográfica de los estudios en América Latina y la heterogeneidad metodológica limitan la generalización de las conclusiones.

CONCLUSIONES

El análisis de la literatura permitió identificar cinco tipologías de tecnologías descentralizadas, donde los sistemas basados en vegetación y los anaeróbicos son los más documentados y aplicados en América Latina. Los sistemas híbridos emergen como una tendencia creciente que combina procesos para lograr efluentes de mayor calidad, aunque su implementación requiere mayor inversión y complejidad operativa. La clasificación evidencia que no existe una tecnología única aplicable a todos los contextos rurales, sino que la selección depende de las condiciones particulares de cada localidad.

En cuanto a la eficiencia de remoción, los sistemas híbridos y los basados en vegetación alcanzan las mayores remociones (>90% para DBO₅, DQO, SST y coliformes) cuando operan con tiempos de retención superiores a 2 días y climas templados a cálidos (10-35°C). Los sistemas anaeróbicos muestran eficiencias moderadas para materia orgánica (70-90%) pero limitadas para nutrientes (<30% para N y P), mientras que los sistemas físico-químicos logran eficiencias excepcionales (>95% para metales y SST) a costa de un mayor consumo energético. El desempeño global mejora significativamente con tiempos de retención superiores a 5 días y temperaturas superiores a 20°C.

Respecto a los factores de sostenibilidad, los sistemas basados en vegetación y los anaeróbicos presentan el mejor perfil para contextos rurales al combinar bajos costos con baja complejidad técnica y alta disponibilidad de materiales locales. Los sistemas aeróbicos y físico-químicos, aunque técnicamente eficientes, presentan limitaciones significativas por sus altos costos operativos, consumo energético y requerimientos de personal capacitado. La disponibilidad de materiales locales y la capacidad de mantenimiento comunitario emergen como factores determinantes para la continuidad operativa de los sistemas en el largo plazo.

La evaluación integrada confirma que las tecnologías descentralizadas son viables para el tratamiento de aguas residuales en zonas rurales, siempre que su selección considere las condiciones climáticas, la disponibilidad de terreno y la capacidad de mantenimiento local. Los sistemas basados en vegetación y los anaeróbicos ofrecen el mejor equilibrio entre eficiencia, costo y simplicidad operativa. La sostenibilidad de estos sistemas depende más de factores no técnicos, como la participación comunitaria y el marco institucional, que de la eficiencia tecnológica en sí misma.

Por último, es importante dejar claro que la presente revisión presenta limitaciones como la concentración geográfica de los estudios en América Latina y la heterogeneidad metodológica que dificulta la comparación directa entre tecnologías. Por ello, se sugiere realizar estudios longitudinales que evalúen el desempeño de los sistemas en periodos superiores a cinco años y ampliar la investigación a contextos diversos en África y Asia. Además, se recomienda estandarizar indicadores de eficiencia y sostenibilidad, así como diseñar programas de capacitación para operadores locales que garanticen la continuidad operativa de los sistemas en el largo plazo.

RESUMEN BIBLIOGRAFICO

- Acosta, R. D. (2024). *Tecnologías de tratamiento de aguas residuales aplicables al sector rural: análisis bibliométrico*. Tesis de maestría, Universidad Nacional de Colombia sede Manizales. Repositorio Institucional UNAL. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/87895>
- Albornoz, J., Aliaga, A. I., Caico, B. G., & Encarnación, Y. (2025). Análisis comparativo de métodos de tratamiento de aguas residuales domésticas en zonas rurales del Perú. *Revista Peruana de Ingeniería, Arquitectura y Medio Ambiente*, 2(2), 118-127. <https://doi.org/10.37711/repiana.2025.2.2.5>
- Bisschops, I., Kragić, D., Seghezzi, L., & Zeeman, G. (2025). *El tratamiento anaeróbico como tecnología central para un saneamiento más sostenible*. En *Anaerobic Reactors for Wastewater Treatment* (Capítulo 2). IWA Publishing. https://doi.org/10.2166/9781789064261_0009
- Bustos, F. A., Pulido, Á. E., & Rivera, H. M. (2023). Tratamiento de aguas residuales en Colombia y sistemas bioelectroquímicos: usos y perspectivas. *Tecnura*, 27(76), 111-143. <https://doi.org/10.14483/22487638.19390>
- Castañeda, A. A. (2022). Experiencias en la utilización de humedales artificiales para el saneamiento de aguas residuales domésticas en poblaciones rurales. *Revista Ambiens Techné et Scientia México*, 10(2), 207-220. <https://atsmexico.org/atsm/article/view/125>
- Centeno, E., Cruz, N., & Vidal, P. (2024). Tratamiento de aguas residuales ordinarias en Costa Rica: perfil tecnológico y perspectivas de sostenibilidad. *Ingeniería*, 34(1), 7-22. <https://doi.org/10.15517/ri.v34i1.55222>
- Chuquimbalqui, D., Bardalez, C. M., Azabache, Y. D., & Ordóñez, K. M. (2025). Tratamiento de aguas residuales mediante electrocoagulación: Análisis bibliométrico de publicaciones científicas y revisión de resultados. *Revista Amazónica de Ciencias Ambientales y Ecológicas*, 4(1), e802. <https://doi.org/10.51252/reacae.v4i1.802>
- De León, J. E. (2023). Análisis comparativo de filtros artesanales para tratamiento de aguas grises en áreas rurales. *Agua, Saneamiento & Ambiente*, 18(2), e1613. <https://doi.org/10.36829/08ASA.v18i2.1613>
- Fernández, J. A., Adame, J., Rivera, S., Murillo, F. D., & Sandoval, M. (2025). Los humedales construidos como estrategia de reúso de aguas residuales de cooperativas escolares rurales en agricultura. *Tendencias en Energías Renovables y Sustentabilidad*, 4(3), 140-145. <https://doi.org/10.56845/terys.v4i3.654>
- Gómez, D. L., Esteban, J. A., & Baracaldo, D. (2020). Tecnologías no convencionales para la remoción de plomo presente en aguas residuales: una revisión bibliográfica 2010-2019. *Tecnura*, 24(64), 97-116. <https://doi.org/10.14483/22487638.15849>
- Gonzalez, J. W. (2023). *Tecnologías avanzadas del tratamiento de agua, una revisión bibliográfica*. Trabajo de grado, Universidad de La Guajira. Repositorio Institucional UNIGUAJIRA. https://www.researchgate.net/publication/372744275_Tecnologias_avanzadas_del_tratamiento_de_agua
- Humanante, J. J., Moreno, L. C., Grijalva, A., Saldoya, R. W., & Suárez, J. A. (2022). Eficiencia de remoción e impacto del sistema de tratamiento de aguas residuales del sector urbano y rural de la Provincia de Santa Elena. *Manglar*, 19(2), 177-187. <https://doi.org/10.17268/manglar.2022.022>
- Jiménez, F. M., Moreno, J. A., Encalada, M. C., & Vargas, E. A. (2024). Análisis de las tecnologías para el tratamiento de aguas residuales: una revisión bibliográfica. *La Técnica: Revista de las Agrociencias*, 14(2), 103-117. <https://doi.org/10.33936/latecnica.v14i2.6467>

- López, M. Á., Castellanos, O. P., Lango, F., Castañeda, M. d., Montoya, J., Sosa, C. A., & Ortiz, B. (2021). Oxidación avanzada como tratamiento alternativo para las aguas residuales. Una revisión. *Enfoque UTE*, 12(4), 76-87. <https://doi.org/10.29019/enfoqueute.769>
- Medina, C., Uriarte, W., Cardenas, E., & Orrego, S. (2020). Tratamiento de aguas residuales de camales mediante tecnologías avanzadas de oxidación: proceso Fenton. *Revista Ingeniería UC*, 27(2), 165-174. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=70764230005>
- Montúfar, G. J. (2025). Aplicaciones de tecnología apropiada en el tratamiento y reutilización de aguas residuales para comunidades rurales. *Agua, Saneamiento & Ambiente*, 20(1), e2087. <https://doi.org/10.36829/08ASA.v20i1.2087>
- Mora, M. d. (2024). Aspectos generales para el tratamiento de aguas residuales en comunidades rurales. *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*, 8(4), 12011-12024. https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v8i4.13378
- Pérez, Y. A., García, D., & Jauregui, U. J. (2022). Humedales construidos como alternativa de tratamiento de aguas residuales en zonas urbanas: una revisión. *Ecosistemas*, 31(1), 2279. <https://doi.org/10.7818/ECOS.2279>
- Rodríguez, N., Arboleda, C. C., & Castañeda, S. A. (2025). Tecnología de filtros verdes con cero descargas para el tratamiento de aguas residuales. *Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín*, 78(Suplemento1), S435-S437. <https://publicaciones.cenicafe.org/index.php/pex/article/view/4973>
- Rodríguez, N., Castañeda, S. A., Arboleda, C. C., Ariza, C. R., Álvarez, H. F., Cañón, M., . . . Peña, J. R. (2025). Tratamiento de las aguas residuales de las viviendas cafeteras utilizando filtros verdes con cero descargas. *Cenicafé*. <https://doi.org/10.38141/cenbook-0084>
- Roque, F. J., Huanca, R. M., Chirinos, B. M., Delgado, D., Álvarez, E. M., & Medina, R. J. (2021). Diseño sostenible de un módulo innovador de tratamiento biológico de aguas residuales en comunidades rurales andinas vulnerables utilizando Nostoc commune. Caso: Coporaque-Caylloma (Perú). *19th LACCEI International Multi-Conference for Engineering, Education, and Technology*. <https://doi.org/10.18687/LACCEI2021.1.1.582>
- Vera, I. L., Rojas, L., Contreras, C., Zuñiga, F., López, J., Sangüesa, C., . . . Valenzuela, M. (2021). Evaluación de humedales construidos con plantas ornamentales para el tratamiento de aguas residuales rurales en la Región del Maule: análisis del potencial de reutilización de sus efluentes en riego. *Aqua-LAC*, 13(2), 25-40. <https://doi.org/10.29104/phi-aqualac/2021-v13-2-03>
- Zurita, F., & Sandoval, L. C. (2024). La tecnología de los humedales construidos para el tratamiento de aguas residuales. *Tendencias en Energías Renovables y Sustentabilidad*, 3(1), 6-10. <https://doi.org/10.56845/terys.v3i1.186>