INVESTIGACIÓN & DESARROLLO, Vol. **25**, No. **1**: 5 – 20 (2025)
ISSN 2518-4431

AVANCES Y DESAFÍOS DEL TRATAMIENTO DESCENTRALIZADO DE AGUAS RESIDUALES EN AMÉRICA LATINA: REVISIÓN SISTEMÁTICA 2013–2024

ADVANCES AND CHALLENGES OF DECENTRALIZED WASTEWATER TREATMENT IN LATIN AMERICA: A SYSTEMATIC REVIEW 2013–2024

Cecilia Saldías [1,2, ORCID: 0000-0002-9988-4103,] **y Marian Rodríguez**[2]
[1]*Centro de Investigaciones en Ingeniería Civil y Ambiental* (CIICA)
[2]*Facultad de Ingenierías y Arquitectura (FIA)*
Universidad Privada Boliviana, Cochabamba, Bolivia
ceciliasaldias@upb.edu
(Recibido el 15 de junio 2025, aceptado para publicación el 22 de julio 2025)

RESUMEN

Este estudio presenta una revisión sistemática de 57 investigaciones científicas publicadas entre 2013 y 2024, enfocadas en sistemas descentralizados de tratamiento de aguas residuales (del inglés *Decentralized Wastewater Treatment Systems* - DEWATS) en América Latina. El objetivo es identificar las tecnologías más empleadas y analizar los desafíos y oportunidades que enfrentan estas soluciones en contextos urbanos, periurbanos y rurales. Los resultados evidencian que los sistemas descentralizados constituyen una alternativa efectiva y adaptable frente a los sistemas centralizados, especialmente en comunidades con limitaciones técnicas, económicas o geográficas. Se destacan ventajas clave como el bajo costo de inversión y operación, la simplicidad tecnológica, la eficiencia en la remoción de contaminantes orgánicos y sólidos, así como el potencial de recuperación de recursos valiosos (agua, nutrientes y energía). Sin embargo, también se identifican desafíos importantes, como deficiencias en el diseño e implementación, ausencia de marcos regulatorios específicos y limitada aceptación social en algunos contextos. Las oportunidades se vinculan con su contribución a la sostenibilidad, la seguridad hídrica, la adaptación al cambio climático y el impulso de economías circulares a escala local. Se concluye que los sistemas descentralizados, con énfasis en los humedales construidos, ofrecen un camino viable hacia el acceso universal del saneamiento en la región. Para lograr su escalabilidad, es necesario fortalecer los marcos normativos, la capacitación técnica, la participación comunitaria y el respaldo institucional que facilite su integración en las políticas públicas de gestión del agua y el saneamiento.

Palabras Clave: Tratamiento descentralizado, Aguas residuales, América Latina, Revisión sistemática

ABSTRACT

This study presents a systematic review of 57 scientific publications from 2013 to 2024 focused on Decentralized Wastewater Treatment Systems (DEWATS) in Latin America. The objective is to identify the most commonly used technologies and analyze the challenges and opportunities these solutions face in urban, peri-urban, and rural contexts. The findings show that decentralized systems constitute an effective and adaptable alternative to centralized systems, especially in communities with technical, economic, or geographic limitations. Key advantages include low investment and operation costs, technological simplicity, high efficiency in removing organic matter and suspended solids, and strong potential for valuable resource recovery (water, nutrients, and energy). However, significant challenges were also identified, such as design and implementation deficiencies, lack of specific regulatory frameworks, and limited social acceptance in some contexts. Opportunities are linked to their contribution to sustainability, water security, climate change adaptation, and the promotion of circular economies at the local level. The study concludes that decentralized wastewater treatment systems, particularly constructed wetlands, offer a viable pathway toward universal access to sanitation in the region. To achieve scalability, it is essential to strengthen regulatory frameworks, provide technical training, foster community participation, and ensure institutional support that enables their integration into public water and sanitation policies.

Keywords: Decentralized treatment, Wastewater, Latin America, Systematic review

1. INTRODUCCIÓN

América Latina y el Caribe es una de las regiones más urbanizadas del mundo, con el 81 % de su población residiendo en zonas urbanas en 2018, proporción que podría aumentar al 89 % para el año 2050. Se proyecta un crecimiento de 85 millones de habitantes urbanos entre 2030 y 2050 [1]. Aunque este proceso de urbanización acelerada impulsa la actividad económica, también impone grandes desafíos a la infraestructura básica, particularmente en los servicios de agua potable y alcantarillado.

DOI: 10.23881/idupbo.025.1-1i

De acuerdo con el informe conjunto de UNICEF y la OMS [2], en zonas urbanas, una de cada cinco personas (19 %) aún no tiene acceso a agua para consumo gestionada de forma segura, y dos de cada cinco (40 %) carecen de servicios de saneamiento gestionados de forma segura. Si bien la región está cerca de eliminar la defecación al aire libre (menos del 1 %) y ha logrado niveles superiores al 99 % de cobertura en servicios básicos de agua y saneamiento, alcanzar las metas de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) para 2030 requerirá aumentar 14 veces la tasa actual de progreso en acceso a agua gestionada de forma segura, y multiplicar por siete el ritmo en saneamiento seguro [2].

El tratamiento de aguas residuales continúa siendo una tarea pendiente en América Latina. La cobertura varía considerablemente entre países: Chile lidera con aproximadamente el 70 % de las aguas residuales tratadas, mientras que en Surinam esta cifra es inferior al 10 % [2]. A nivel de la región, se estima que menos del 20 % del volumen total de aguas residuales municipales generadas llega efectivamente a una planta de tratamiento [3].

Este panorama evidencia la necesidad de explorar enfoques alternativos para abordar la limitada cobertura en el tratamiento de aguas residuales. Una opción es complementar los sistemas centralizados, que suelen requerir inversiones elevadas, a menudo inaccesibles para muchos países de la región [4], con sistemas descentralizados que permitan ampliar la cobertura, especialmente en el tratamiento de aguas residuales de origen doméstico. Los sistemas centralizados se caracterizan por su elevado consumo energético y la necesidad de infraestructuras extensas de alcantarillado. Su principal fortaleza radica en la robustez tecnológica comprobada y en la amplia disponibilidad de estrategias de tratamiento estandarizadas [5].

Por su parte, los sistemas descentralizados de tratamiento de aguas residuales (del inglés *Decentralized Wastewater Treatment Systems* - DEWATS) se definen como instalaciones de pequeña escala ubicadas cerca del lugar de generación del agua residual, diseñadas para tratar y disponer las aguas residuales localmente, en contraste con los sistemas centralizados que colectan grandes volúmenes desde áreas extensas para tratarlos en una sola planta [6].

Las principales ventajas de los sistemas descentralizados se resumen en: 1) reducción de los costos de infraestructura, al requerir menos redes de alcantarillado y estaciones de bombeo, lo que reduce significativamente los costos de inversión; 2) instalación rápida y adaptable, estos sistemas pueden instalarse rápidamente y adaptarse a las condiciones locales, incluso para comunidades pequeñas o dispersas; 3) facilitan el reúso del agua tratada, fomentando los principios de economía circular; 4) mayor sostenibilidad ambiental, ya que incorporan procesos naturales y tecnologías que minimizan el uso de energía, reducen emisiones y facilitan la recuperación de nutrientes; 5) flexibilidad tecnológica, dado que pueden emplear tecnologías intensivas o extensivas, según las condiciones del sitio, como sistemas naturales (lagunas, humedales) o compactos con tecnologías mecánicas; 6) gestión localizada, el tratamiento se realiza cerca del punto de generación, lo que mejora la eficiencia operativa y la respuesta ante emergencias o variaciones en la carga; y 7) viabilidad económica y social, su tamaño reducido permite financiamiento parcial por usuarios directos y mayor aceptación social en contextos rurales o periurbanos [6].

Los sistemas descentralizados representan una alternativa viable y sostenible para mejorar la gestión del agua, especialmente en contextos donde los sistemas centralizados resultan costosos, insuficientes y muchas veces ineficientes. Su selección debe basarse en criterios técnicos, económicos y sociales específicos del contexto. Sin embargo, su adopción aún enfrenta barreras institucionales y una limitada transferencia tecnológica, lo que exige un cambio en la planificación tradicional y una mayor promoción de sus beneficios a nivel político y administrativo [7].

Ferreira et al. [8] presentan una revisión sistemática de los últimos 20 años de investigaciones sobre DEWATS domésticas en Brasil. El objetivo principal fue evaluar el estado del arte y el potencial de estos sistemas para reducir el déficit nacional de tratamiento de aguas residuales. Utilizando el método de investigación bibliográfica y la metodología PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses), los autores analizaron estudios extraídos de bases científicas. Por su parte, Muzioreva et al. [9] realizaron, también aplicando la metodología PRISMA, una revisión sistemática de las prácticas actuales de gestión descentralizada de aguas residuales en países en desarrollo, identificando el estado del arte, las áreas temáticas emergentes, las proyecciones para el diseño e implementación de estos sistemas, así como las principales barreras que limitan su adopción, entre ellas la ausencia de marcos normativos e institucionales robustos.

A diferencia de los estudios previamente mencionados, el presente trabajo se enfoca específicamente en América Latina, una región con características demográficas, territoriales y socioeconómicas que justifican un análisis diferenciado. En contraste con regiones como África, donde el crecimiento poblacional continúa siendo predominantemente rural, América Latina se caracteriza por un alto nivel de urbanización. No obstante, una proporción significativa de sus áreas urbanas presenta condiciones de informalidad, con acceso limitado o inexistente a servicios adecuados de agua y saneamiento [10]. Esta elevada concentración urbana ejerce una presión considerable sobre las infraestructuras centralizadas existentes, especialmente de zonas periurbanas y asentamientos informales [11].

En este contexto, donde los sistemas convencionales (centralizados) no logran responder a la heterogeneidad territorial ni a la expansión acelerada de las periferias urbanas, los enfoques descentralizados emergen como una alternativa

estratégica para avanzar hacia el cumplimiento del derecho humano al saneamiento y la meta de universalización. Sin embargo, la implementación de estos sistemas en América Latina enfrenta desafíos específicos vinculados a debilidades en la planificación urbana, limitadas capacidades institucionales y esquemas de gobernanza fragmentados, factores que la diferencian de otras regiones en desarrollo. Estas particularidades refuerzan la necesidad de un análisis contextualizado que permita comprender las oportunidades y restricciones para el desarrollo de soluciones descentralizadas adaptadas a la realidad latinoamericana.

El presente estudio tiene como objetivo analizar sistemáticamente la literatura científica publicada en la última década sobre el tratamiento descentralizado de aguas residuales en América Latina, con el fin de identificar las tecnologías más empleadas y comprender los factores que inciden en su implementación efectiva. La revisión busca organizar el conocimiento disponible, aportando una visión crítica y actualizada sobre la evolución de estos enfoques en el contexto regional. Además, se propone identificar vacíos de investigación, experiencias replicables y factores clave que orienten el diseño de políticas públicas más pertinentes y contextualizadas. De este modo, el estudio busca contribuir al fortalecimiento de la toma de decisiones en materia de saneamiento descentralizado, en línea con los desafíos de sostenibilidad, equidad y resiliencia climática que enfrenta la región.

2. METODOLOGÍA

La metodología PRISMA [12] ha demostrado ser una herramienta válida y ampliamente reconocida para la realización de revisiones sistemáticas sobre sistemas de tratamiento descentralizado de aguas residuales [8], [9]. Actualizada en 2020, esta metodología proporciona una guía rigurosa y transparente para la identificación, selección y síntesis de estudios, lo cual resulta fundamental en contextos donde la evidencia es fragmentada y heterogénea. Investigaciones como las de Ferreira et al. [8] y Muzioreva et al. [9] han aplicado PRISMA para analizar la evolución, implementación y limitaciones de los sistemas descentralizados en Brasil y en países en desarrollo, respectivamente, evidenciando su utilidad para identificar avances tecnológicos, vacíos normativos y desafíos institucionales. La claridad en los criterios de inclusión, la trazabilidad en el proceso de selección de literatura y la sistematización de hallazgos que proporciona PRISMA fortalecen la calidad de las revisiones y permiten generar conocimiento útil para investigadores, tomadores de decisión y actores locales involucrados en el saneamiento.

En este marco, la metodología PRISMA se considera adecuada para abordar la siguiente pregunta de investigación: ¿Cuáles son las tecnologías empleadas, los desafíos enfrentados y las oportunidades identificadas en la literatura científica sobre el tratamiento descentralizado de aguas residuales en América Latina entre 2013 y 2024?

Los siguientes pasos fueron realizados en el marco de la metodología PRISMA:

1. Definición de la fuente de datos: Se seleccionaron cinco bases de datos científicas con el objetivo de garantizar una cobertura amplia y representativa de la literatura internacional y regional sobre tratamiento descentralizado de aguas residuales en América Latina. Las bases consultadas fueron: Web of Science, Science Direct, SciELO, Google Scholar y EBSCO. Si bien Scopus es una fuente reconocida por su alto impacto y relevancia en revisiones sistemáticas, no fue incluida debido a la falta de acceso institucional. Sin embargo, esta limitación se abordó incorporando otras bases de datos relevantes y complementarias de acceso abierto, como SciELO y Google Scholar, permitiendo recuperar literatura científica y técnica publicada en español, así como documentos académicos no indexados en bases tradicionales.
2. Delimitación del alcance temporal: El periodo de análisis abarcó desde el año 2013 hasta 2024, con el propósito de capturar investigaciones recientes y representativas de los desarrollos tecnológicos, normativos y contextuales en América Latina durante la última década. La búsqueda estructurada de la literatura se llevó a cabo en el mes de junio de 2025.
3. Definición de la unidad de análisis: Inicialmente se consideraron todos los documentos académicos que contenían las combinaciones de palabras clave definidas, redactados en inglés o español, enfocados en países de América Latina. Se excluyeron aquellas publicaciones que no tuvieran un enfoque explícito en la región.
4. Muestreo: Con el objetivo de recuperar un conjunto amplio y pertinente de publicaciones, se aplicaron estrategias de búsqueda en inglés y español, estructuradas en tres bloques temáticos: tipo de tecnología, ubicación geográfica y dimensiones de análisis. Entre los términos utilizados se incluyeron: “tratamiento descentralizado de aguas residuales”, “saneamiento in situ”, “saneamiento ecológico” y “tratamiento de aguas residuales a pequeña escala”, combinados con “América Latina” y términos como “eficiencia”, “gobernanza” y “aceptación”.
5. Aplicación de filtro geográfico: Se incluyeron únicamente estudios contextualizados en América Latina, ya sea porque abordaban casos concretos en países específicos (como Bolivia, Brasil, México, Perú, etc.) o porque el análisis regional era explícito.

6. Compilación general: Los resultados fueron gestionados mediante el software Zotero, lo que permitió una detección eficiente de duplicados mediante revisión manual, reduciendo la muestra inicial de N = 346 registros a N1 = 268 documentos únicos.
7. Primera fase de selección (cribado): Se evaluaron los títulos y resúmenes para descartar artículos fuera del periodo 2013–2024, centrados en tratamiento centralizado o no relevantes al objeto de estudio. Esta fase redujo la muestra a N2 = 158 publicaciones preseleccionadas.
8. Segunda fase de selección (evaluación formal): En esta etapa se aplicaron los criterios de inclusión definidos: idioma (español o inglés), periodo de publicación (2013–2024) y tipo de documento (artículos científicos, revisiones sistemáticas, estudios de caso y reportes técnicos con revisión por pares). Se excluyeron aquellas publicaciones que no cumplían con al menos uno de estos criterios. Como resultado, se conservaron N3 = 84 artículos considerados potencialmente válidos para la revisión.
9. Tercera fase de revisión (lectura completa): Se realizó una lectura íntegra de los textos para verificar el cumplimiento de los criterios metodológicos, técnicos y contextuales. Se eliminaron estudios que no abordaban tecnologías descentralizadas o que no se situaban en el contexto latinoamericano excluyendo así a 27 artículos científicos.
10. Definición de la muestra final: Los artículos seleccionados en la fase final de la revisión sistemática (N5 = 57) fueron organizados en una matriz de extracción de datos que incluyó los siguientes campos: autor(es), año de publicación, país de estudio, tipo de documento, tipo de tecnología utilizada, contexto de aplicación (urbano, periurbano o rural), indicadores evaluados, así como los principales desafíos y oportunidades identificados.

El esquema del proceso seguido en sus distintas etapas se presenta en la Figura 1.

Para la recolección de información, se desarrolló un protocolo estructurado orientado a caracterizar de manera sistemática cada estudio incluido en la revisión. Los datos de interés incluyeron: tipo de tecnología descentralizada analizada, contexto de aplicación (urbano, periurbano o rural), indicadores evaluados, así como los principales desafíos y oportunidades reportados. La información fue organizada y sistematizada en tablas de Microsoft Excel, con el fin de facilitar su análisis comparativo y temático. A diferencia del estudio brasileño, en esta revisión no se aplicaron marcos normativos específicos para contrastar los resultados de tratamiento. No obstante, se prestó atención a los niveles de eficiencia reportados y a la adecuación de cada tecnología frente a las condiciones particulares de América Latina, considerando dimensiones técnicas, institucionales, sociales y ambientales abordadas en la literatura.

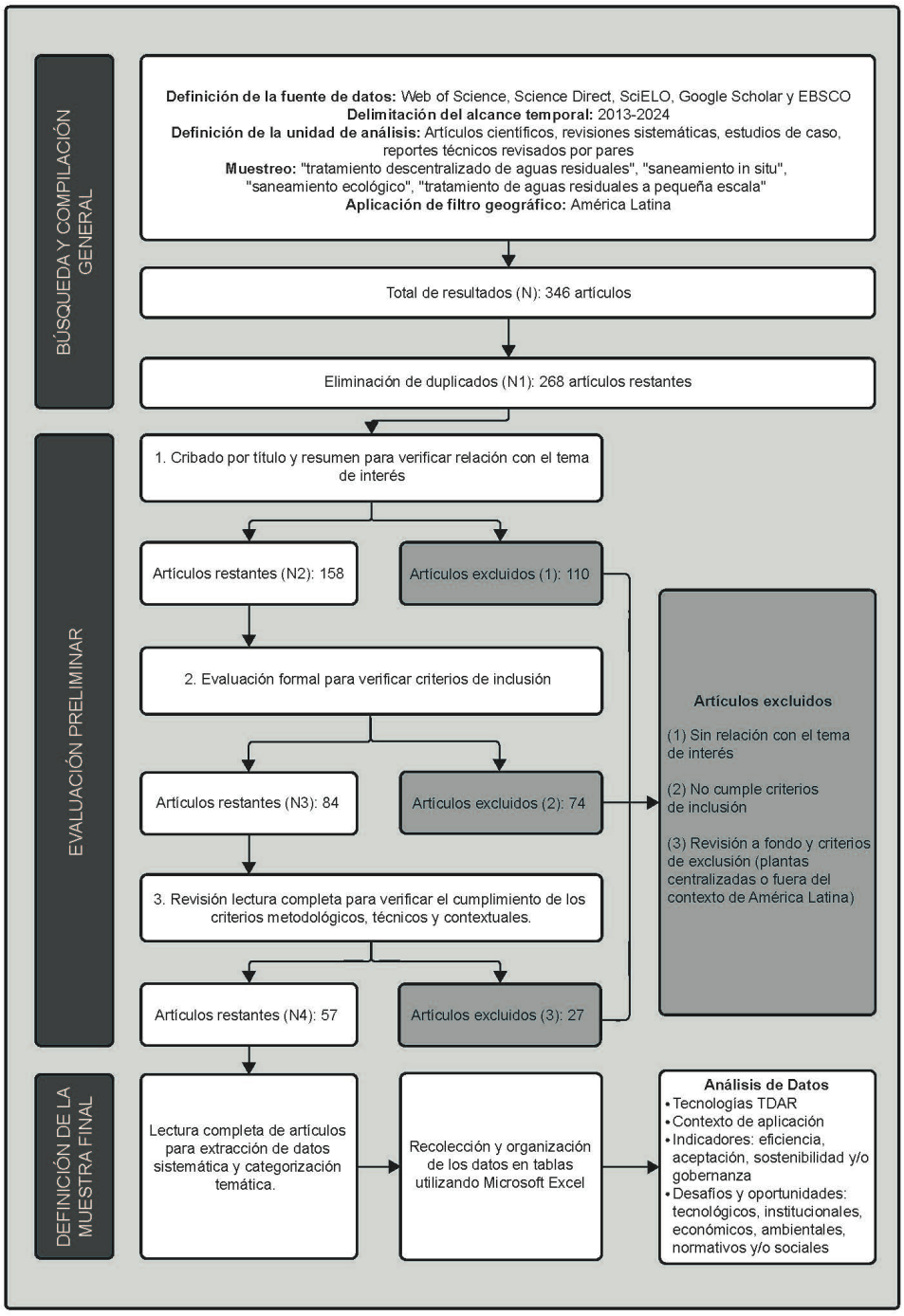

Figura 1: Esquema del proceso de selección de los estudios, según la metodología PRISMA
Fuente: Adaptado de Ferreira et al. [8].

3. PRINCIPALES HALLAZGOS SOBRE SISTEMAS DESCENTRALIZADOS DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES EN AMÉRICA LATINA

3.1 Resultados de la búsqueda sistemática

Como resultado de la aplicación de la metodología PRISMA, se seleccionaron 57 artículos científicos para su revisión detallada. La información extraída fue sistematizada en una hoja de cálculo de Excel, en la cual se registraron los siguientes campos: título, autor(es), año de publicación, tipo de estudio, país donde se realizó el estudio, contexto de aplicación (urbano, periurbano o rural), tipo de tecnología empleada para el tratamiento de aguas residuales, desafíos enfrentados y oportunidades identificadas. Esta información fue posteriormente analizada con un enfoque mixto, que combinó técnicas de análisis cualitativo y cuantitativo.

Del total de artículos revisados, se observa que el mayor número de publicaciones corresponde al año 2024, evidenciando un incremento notable con respecto a los años anteriores. Este aumento en la producción científica refleja el creciente interés en las tecnologías descentralizadas para el tratamiento de aguas residuales, especialmente en el contexto latinoamericano, donde los desafíos relacionados con el saneamiento básico se han agudizado. Entre estos desafíos destacan el acelerado crecimiento urbano que supera la capacidad de los servicios de saneamiento [13, 14], así como los altos costos de los sistemas convencionales centralizados, los cuales dificultan su implementación en áreas urbana, periurbanas y rurales [15]–[19].

La Figura 2 presenta la distribución de los artículos incluidos según el año de publicación para el período de análisis.

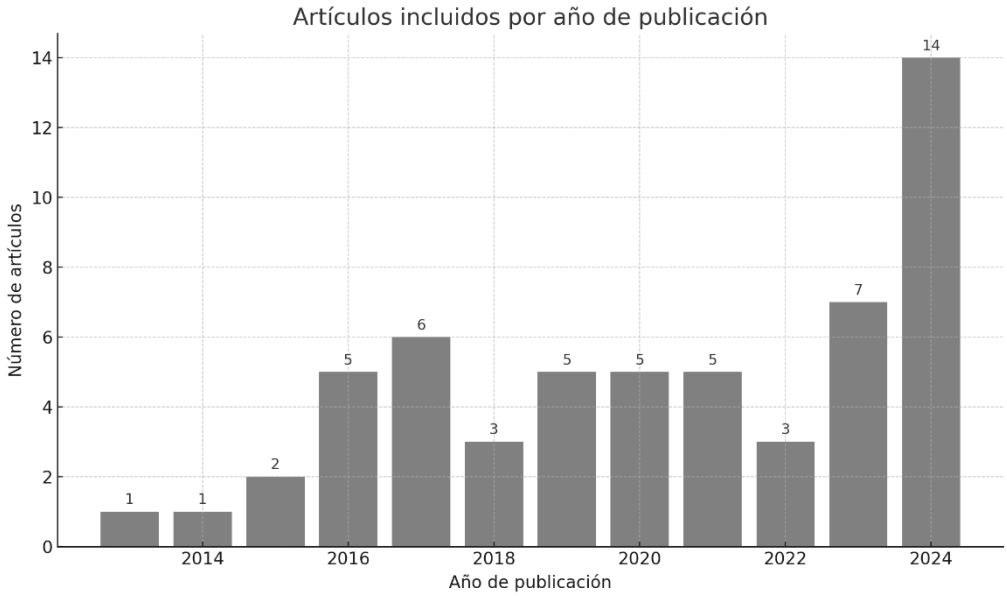

Figura 2: Distribución de estudios incluidos según año de publicación para el período de análisis.

En cuanto a la procedencia geográfica de los estudios, se observa que la mayoría de la producción académica se concentra en Brasil, con un 30% del total de artículos revisados. En este país, se han propuesto diversas tecnologías de tratamiento de aguas residuales y se ha profundizado en el análisis de aquellas consideradas relevantes para contextos descentralizados. Le sigue México con un 18%, donde también se han desarrollado investigaciones significativas en esta temática. Otros países como Ecuador, Colombia y Bolivia están representados con un número de estudios considerablemente menor, lo cual evidencia la necesidad de ampliar la producción científica en otros países de la región latinoamericana. Esto permitiría fortalecer la comprensión del desempeño y la adaptabilidad de los sistemas implementados, basándose en evidencia empírica.

Adicionalmente, algunos estudios tienen un enfoque regional o carácter global, es decir, no se centran exclusivamente en un país, sino que abordan análisis comparativos en varias regiones del mundo, incluyendo países en vías de desarrollo. En estos casos, se incluyen referencias a países latinoamericanos como Cuba y Argentina, entre otros.

La Figura 3 presenta la distribución de los estudios según país o región reportada en los artículos incluidos.

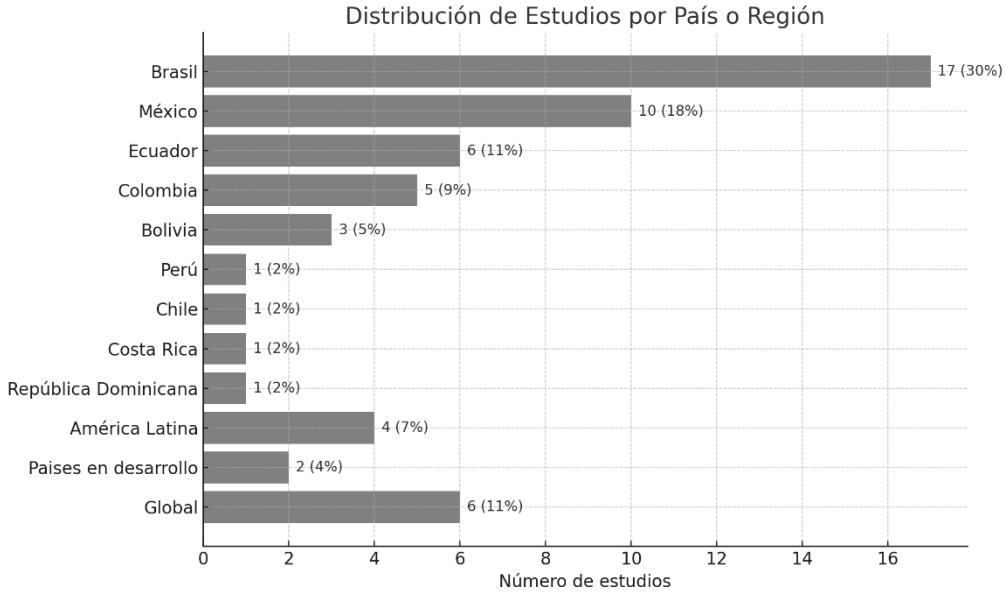

Figura 3: Distribución de estudios incluidos por país o región para el período de análisis

También se consideró pertinente analizar el contexto en el que se desarrollaron o abordaron los estudios revisados, específicamente si se enfocaban en entornos urbanos, periurbanos o rurales. Esta clasificación permite identificar evidencia científica particular relacionada con las características propias y los desafíos específicos de cada contexto. Los resultados revelan que muchos estudios presentan un enfoque combinado, abordando simultáneamente más de un contexto (urbano, periurbano y/o rural). Esto refleja un interés en generar conocimiento aplicable a una variedad de escenarios, dada la transversalidad de los problemas de saneamiento y la necesidad de soluciones adaptables a distintas realidades territoriales. De manera general, se observa que los desafíos en el tratamiento descentralizado de aguas residuales están presentes en todos los contextos, lo cual justifica que gran parte de los estudios adopten un enfoque más amplio e integrador. La Figura 4 presenta la distribución de los estudios incluidos según el contexto de aplicación o abordaje.

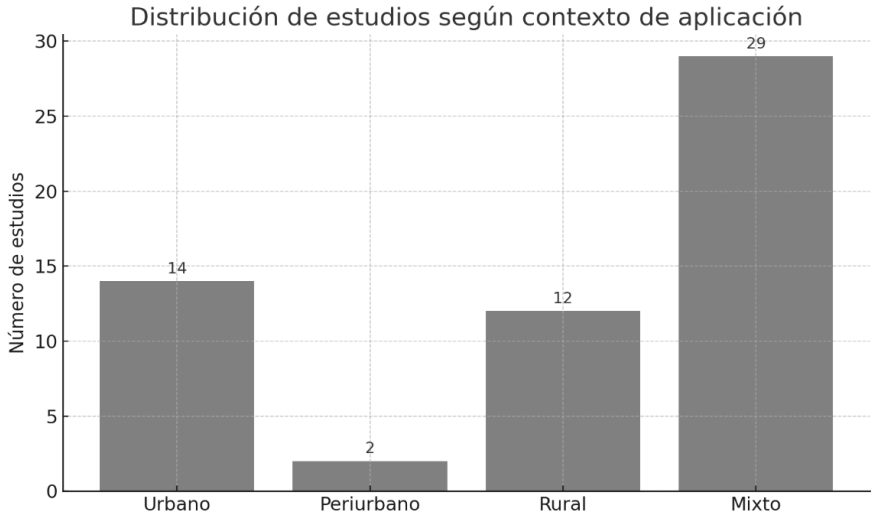

Figura 4: Distribución de estudios incluidos según contexto de aplicación para el período de análisis.

Se analizaron las principales tecnologías empleadas en América Latina para el tratamiento descentralizado de aguas residuales, a partir de los estudios incluidos en esta revisión. Los resultados muestran que los humedales construidos (HC), en sus distintas configuraciones – flujo superficial, subsuperficial, horizontal, vertical e híbridos – son la tecnología más ampliamente implementada en la región. Le siguen en frecuencia los reactores anaerobios, especialmente los UASB (Upflow Anaerobic Sludge Blanket), y los sistemas híbridos que combinan distintos procesos de tratamiento. Asimismo, se identificó el uso de tanques sépticos, incluyendo tanques Imhoff y cámaras sépticas, como tecnologías clave dentro del tratamiento descentralizado. La Figura 5 presenta la frecuencia de uso de las tecnologías reportadas en los estudios analizados.

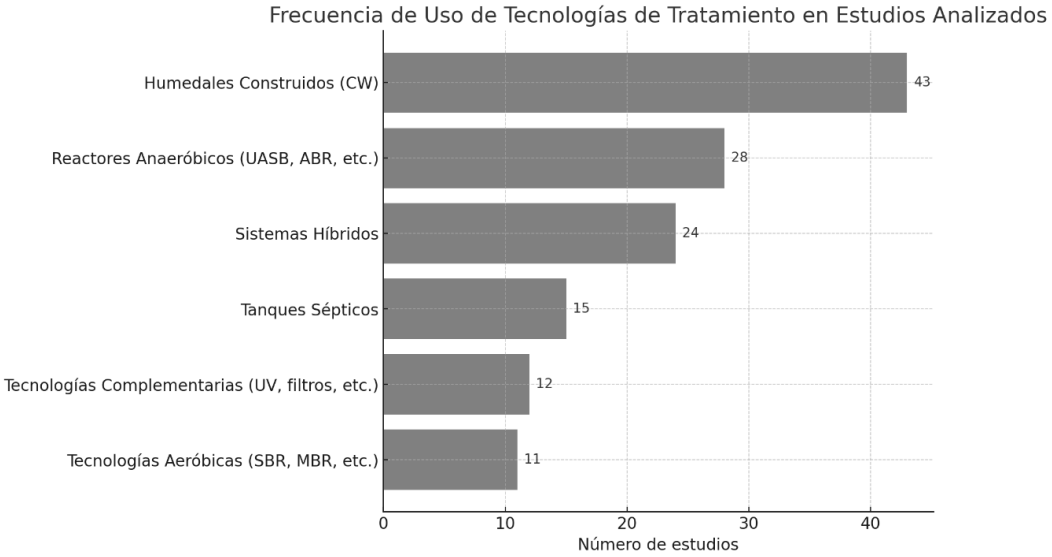

Figura 5: Tecnologías de tratamiento reportadas en los estudios analizados.

3.2 Preferencia por los humedales artificiales en América Latina: ¿a qué se debe?

Si bien los estudios revisados también reportan el uso de otras tecnologías, los humedales construidos (HC), también conocidos como humedales artificiales o constructed wetlands (CW) en inglés, constituyen la alternativa más ampliamente documentada, ocupando el primer lugar en frecuencia de uso en los casos analizados. El predominio de los humedales construidos en los estudios revisados responde a su adecuada adaptación a contextos con limitaciones técnicas y económicas, frecuentes en América Latina. A continuación, se profundiza en las razones que explican esta preferencia.

Los HC presentan diversas ventajas frente a otras tecnologías utilizadas para el tratamiento de aguas residuales en contextos urbanos, periurbanos y rurales de América Latina. Esta tecnología es ampliamente reconocida como una Solución Basada en la Naturaleza (SbN) [20, 26, 27], ya que emula procesos ecológicos naturales para tratar aguas residuales de manera eficiente, resiliente y sostenible. Sus ventajas abarcan dimensiones técnicas, económicas, sociales y ambientales, lo que posiciona a los HC como una solución integral y contextualizada, asequible para diversos contextos con recursos limitados.

Entre las ventajas técnicas reportadas, los HC destacan por su simplicidad operativa y bajo requerimiento tecnológico, lo cual permite su implementación en comunidades con limitada infraestructura o capacidad técnica. En la mayoría de los casos, no requieren energía eléctrica para su funcionamiento, lo que los hace adecuados para zonas rurales o aisladas o con recursos limitados para su operación. Los estudios revisados evidencian una buena eficiencia en la remoción de materia orgánica y sólidos suspendidos, así como mejoras en parámetros físicos del agua (turbidez, pH, oxígeno disuelto). Si bien enfrentan desafíos en la eliminación de nutrientes como nitrógeno (N) y fósforo (P), se ha demostrado que su rendimiento puede optimizarse mediante configuraciones híbridas, ajustes en el tiempo de retención hidráulica (TRH), selección de sustratos reactivos y especies vegetales apropiadas [16, 8, 21, 22].

Ventajas técnicas de los humedales construidos en la remoción de contaminantes

En términos de eficiencia para la eliminación de materia orgánica y sólidos suspendidos, los HC (o CW), particularmente en configuraciones de flujo subsuperficial horizontal (HFCW) y vertical (VFCW), se consolidan como tecnologías importantes en el tratamiento descentralizado de aguas residuales en América Latina debido a su eficiencia en la remoción de materia orgánica y sólidos suspendidos.

Machado et al. [16] presentan evidencia sobre el desempeño de estos sistemas: en una revisión de casos brasileños, se documentó que los HFCW lograron una remoción promedio de demanda química de oxígeno (DQO) del 76,5% y de demanda bioquímica de oxígeno a cinco días (DBO_5) del 81,5%, mientras que los VFCW alcanzaron tasas del 61,0% y 67,6%, respectivamente. Estos resultados subrayan la ventaja de los sistemas horizontales en el tratamiento de aguas

residuales con alta carga orgánica, probablemente debido a tiempos de retención hidráulica más prolongados y una distribución más uniforme del flujo.

Alves da Silva et al. [22] complementan esta evidencia desde estudios piloto en Brasil, donde reportan eficiencias de remoción del 77,9% para DBO_5, 76,3% para DQO y 82% para sólidos suspendidos totales (SST) en un HFCW, destacando la capacidad de estos sistemas para cumplir con estándares ambientales incluso bajo condiciones climáticas tropicales y carga orgánica variable.

En el contexto ecuatoriano, Zambrano-Aranea et al. [18] documentaron resultados excepcionales en un estudio piloto, alcanzando eficiencias de eliminación cercanas al 100% para DQO y DBO_5, evidenciando el potencial de adaptación de los HC a condiciones locales de pequeña escala y en zonas de limitada infraestructura técnica. Aunque estos resultados deben ser replicados a mayor escala para validar su consistencia, ofrecen un precedente alentador para su implementación comunitaria.

Para el tratamiento de aguas grises, estudios como el de Santos et al. [23] reportan eficiencias superiores al 90% en la remoción de DBO_5 y SST, y superiores al 80% en DQO, ratificando el buen desempeño de los HC en flujos domésticos no industriales. Esta capacidad es central para estrategias de reúso en riego o aplicaciones no potable, particularmente en contextos de escasez hídrica.

Adicionalmente, Marín-Muñiz et al. [24] evaluaron la eficiencia de HC que incorporaban especies ornamentales en condiciones de monocultivo y policultivo. Sus resultados mostraron tasas de remoción de 40-55% para SST y 80-90% para DQO, lo que indica que el diseño ecológico del sistema, incluyendo la selección vegetal, puede influir significativamente en el rendimiento depurativo.

En lo que respecta a sistemas híbridos, Pereira da Silva et al. [25] reportaron un tratamiento combinado que integra un reactor anaerobio seguido de HC de distintos tipos. Este sistema logró remociones del 67% en DQO, 53% en DBO_5 y 98% en turbidez. Esta configuración muestra la sinergia positiva entre etapas anaerobias de pretratamiento y humedales para un tratamiento más completo, incluso con aguas residuales de baja carga.

Por último, en estudios a escala real, como el de Machado et al. [20] en México, se ha evidenciado que los HC de flujo subsuperficial horizontal (HSSFCW) pueden alcanzar eficiencias de remoción que oscilan entre el 50-90% para DQO y el 60-90% para DBO_5, con desempeño sostenido a largo plazo y bajo requerimiento operativo. Esto confirma su idoneidad para comunidades rurales y periurbanas que enfrentan limitaciones técnicas y financieras.

En cuanto a la eliminación de nutrientes, específicamente nitrógeno (N) y fósforo (P), los HC demuestran un desempeño variable pero prometedor, influenciado por el tipo de sistema, las condiciones operativas y la vegetación utilizada. La literatura revisada sugiere que los HC pueden alcanzar eficiencias superiores al 50% en la remoción de P, especialmente cuando se combinan con medios filtrantes adecuados y condiciones de operación optimizadas [23]. Este nivel de eficiencia es significativo considerando que el P, al igual que el N, es uno de los principales responsables de los procesos de eutrofización en cuerpos de agua receptores.

En el estudio piloto desarrollado en Ecuador, Zambrano-Aranea et al. [18] reportaron tasas de remoción importantes para nutrientes inorgánicos: 97% para nitratos (NO_3^-) y 95% para fosfatos (PO_4^{3-}). Estos resultados evidencian el potencial de los HC como barreras efectivas para evitar la dispersión de contaminantes hacia cuerpos de agua superficiales, especialmente en contextos donde las descargas domésticas sin tratamiento contribuyen a la contaminación difusa.

Asimismo, Pereira da Silva et al. [25] evaluaron un sistema híbrido que integraba un reactor anaerobio seguido de HC, logrando una remoción del 94% para nitrógeno total (NT) y del 90% para carbono orgánico disuelto (DOC). Esta combinación tecnológica potencia los mecanismos de eliminación biológica y fisicoquímica, favoreciendo un tratamiento más integral de los nutrientes, especialmente cuando se requieren niveles más estrictos de depuración.

Machado et al. [16], en su revisión sobre experiencias en Brasil, indican que los HC híbridos mostraron las tasas más altas de eliminación de P, con promedios del 83,7%, mientras que los humedales de flujo vertical (VFCW) presentaron mejor rendimiento para la remoción de N, debido a una mayor aireación y favorecimiento de los procesos de nitrificación y desnitrificación. Esta diferenciación funcional entre configuraciones permite seleccionar el tipo de HC más adecuado según la composición del afluente y los objetivos del tratamiento.

El estudio de Marín-Muñiz et al. [24] también aporta evidencia al mostrar que la configuración vegetal influye en la eliminación de nutrientes: el uso de monocultivos de *Dieffenbachia seguine* (planta muda), *Canna hybrids* (achira

ornamental) y sistemas en policultivo incrementaron la eficiencia en la remoción tanto de N como de P. Esto resalta la importancia del diseño ecológico y la elección de especies con alta capacidad de asimilación o facilitadoras de procesos microbiológicos clave.

Por su parte, Ferreira et al. [8] reportaron que, en un HC utilizado como sistema de postratamiento de un biodigestor, las plantas contribuyeron de manera significativa a la absorción de N y P, lo que no solo mejora la calidad del efluente tratado, sino que también representa una oportunidad para el aprovechamiento de los nutrientes contenidos en las aguas residuales.

En conjunto, estos hallazgos subrayan que los HC, en especial cuando se implementan como sistemas híbridos, pueden ofrecer niveles de eliminación de nutrientes comparables a tecnologías más complejas. Además, en esquemas de economía circular, el remanente de nutrientes en el efluente puede convertirse en un recurso valioso cuando el agua tratada se destina a riego agrícola, reduciendo así la necesidad de fertilizantes y cerrando ciclos de materia en áreas rurales o periurbanas, donde se practica la agricultura a pequeña escala. Así, más allá de su eficiencia depurativa, los HC aportan soluciones multifuncionales alineadas con principios de sostenibilidad ambiental y aprovechamiento de recursos.

Ventajas económicas

Comparados con tecnologías convencionales centralizadas o avanzadas (como lodos activados, UASB), los HC presentan bajos costos de inversión, operación y mantenimiento. Esta ventaja es particularmente importante en regiones con recursos financieros limitados, donde los altos costos de ampliación del alcantarillado hacen inviable la cobertura universal mediante sistemas centralizados. Además, la posibilidad de reusar subproductos (biomasa, nutrientes, agua) puede generar ingresos adicionales o reducir costos operativos, fortaleciendo su viabilidad económica a largo plazo [16, 23, 26].

Ventajas sociales

Desde el punto de vista social, los HC pueden integrarse armónicamente al entorno, actuando como infraestructuras verdes multifuncionales [27]. Mejoran el paisaje urbano y rural, ofrecen espacios educativos y recreativos, y favorecen la apropiación comunitaria cuando su diseño e implementación incluye la participación de la comunidad. Su apariencia natural y el uso de especies vegetales ornamentales o nativas ayudan a reducir el estigma asociado a otros sistemas más técnicos o visualmente intrusivos [26, 28].

Ventajas ambientales

Como SbN, los HC aportan beneficios ecosistémicos al actuar como sumideros de carbono, fomentar la biodiversidad y reducir las emisiones de gases de efecto invernadero, especialmente en comparación con sistemas aeróbicos intensivos [29]. Asimismo, el agua tratada puede reusarse en riego agrícola o paisajístico cuando se cumplen los requisitos sanitarios y/o agronómicos, lo que contribuye a la conservación hídrica y a la economía circular. Su diseño modular y adaptable también permite escalar las soluciones sin generar impactos ambientales o constructivos significativos [8, 20, 24, 28].

Recomendaciones respecto a los humedales construidos

Aunque los HC se consolidan como una alternativa viable y sostenible frente a los sistemas convencionales de tratamiento de aguas residuales en América Latina [23], su efectividad y sostenibilidad a largo plazo dependen de diversos factores técnicos e institucionales. Entre los aspectos técnicos más críticos se encuentran un diseño hidráulico adecuado, la selección correcta de sustratos y especies vegetales, y el mantenimiento periódico que aseguren la continuidad operativa del sistema [27], así como su articulación con marcos regulatorios claros e instituciones responsables [30].

La revisión de la literatura también destaca que, para avanzar hacia su adopción masiva y escalamiento, es fundamental el desarrollo de proyectos piloto, el monitoreo técnico continuo y la implementación de políticas públicas favorables que reconozcan a los HC como parte de las SbN aplicables al saneamiento descentralizado [26]. Estos elementos permiten no solo generar evidencia empírica y contextualizada, sino también fortalecer la confianza de los tomadores de decisión y de las comunidades locales en esta tecnología.

Sin embargo, a pesar de ser la tecnología más reportada en los estudios revisados, su implementación sigue siendo limitada en muchos países de la región. Rodríguez - Domínguez et al. [31] advierten que el avance en la adopción de HC ha sido lento y su aplicación aún no se encuentra ampliamente difundida. Las principales barreras identificadas incluyen la falta de documentación sobre experiencias locales exitosas, la escasez de guías de diseño contextualizadas a las condiciones de América Latina y la limitada formación técnica en torno a las SbN en los programas académicos de ingeniería, donde estas soluciones aún no ocupan un lugar central [26, 31].

El desconocimiento sobre este tipo de tecnologías limita su valoración y reduce las oportunidades de que sean consideradas en los procesos de selección. Además, el hecho de que no demanden una infraestructura gris considerable podría, paradójicamente, constituir una desventaja, ya que, al no generar grandes inversiones ni movimientos económicos asociados, suelen recibir menos atención o prioridad por parte de los tomadores de decisión.

3.3 Desafíos y oportunidades en la implementación de sistemas descentralizados de tratamiento de aguas residuales en América Latina

Los sistemas descentralizados de tratamiento de aguas residuales (del inglés *Decentralized Wastewater Treatment Systems* – DEWATS) se perfilan como una alternativa estratégica y sostenible frente a los enfoques convencionales, especialmente en contextos rurales, periurbanos o de baja densidad poblacional en América Latina [8, 22, 32]. Su implementación permite reducir significativamente los costos de inversión y operación [20], al tiempo que facilita el tratamiento y reúso local del agua, y el aprovechamiento de nutrientes y lodos, promoviendo así prácticas de economía circular [33, 34]. Además de su viabilidad económica, estos sistemas destacan por su sencillez operativa, flexibilidad en el diseño y adaptabilidad a condiciones locales diversas [9; 20; 25]. Tecnologías como los humedales construidos y los reactores anaerobios permiten alcanzar altos niveles de eficiencia en la remoción de materia orgánica y nutrientes, incluso en condiciones técnicas limitadas [16, 22, 30]. Los beneficios ambientales son igualmente relevantes, ya que estas soluciones protegen los cuerpos de agua, reducen emisiones de gases de efecto invernadero y fomentan la biodiversidad. Desde una perspectiva social, los sistemas descentralizados favorecen la participación comunitaria, la generación de empleo local y el acceso equitativo al saneamiento, generando impactos positivos en la calidad de vida y la seguridad hídrica [26, 28]. Todo ello convierte a los sistemas descentralizados en una herramienta importante para avanzar hacia la universalización del saneamiento y el cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible en la región [8, 26, 28, 33].

No obstante, los estudios revisados identifican una serie de desafíos centrales que deben ser cuidadosamente considerados al optar por estrategias descentralizadas de saneamiento básico. A partir de la revisión bibliográfica, los desafíos identificados se agruparon en seis categorías principales para facilitar su análisis: i) técnicos y operacionales; ii) institucionales y normativos; iii) sociales y culturales; iv) económicos y financieros; v) ambientales y sanitarios; y vi) de escalabilidad y replicabilidad. A continuación, la Tabla 1 presenta los principales hallazgos en cada una de estas categorías, con base en la evidencia analizada.

TABLA 1 - RESUMEN DE DESAFÍOS EN LA IMPLEMENTACIÓN DE DEWATS EN AMÉRICA LATINA

1. Desafíos técnicos y operacionales • Eficiencia limitada en la remoción de nutrientes y patógenos, en determinadas configuraciones de tratamiento. • Colmatación frecuente en sistemas sin pretratamiento adecuado. • Sub-dimensionamiento, cortocircuitos hidráulicos, vegetación inadecuada. • Sensibilidad a condiciones externas (clima, carga hidráulica, etc.). • Algunos sistemas (ej., UASB) requieren mantenimiento especializado no siempre disponible localmente. • Falta de capacitación técnica en operación, mantenimiento y monitoreo de tecnologías específicas (ej., sistemas híbridos o reactores anaerobios).
2. Desafíos institucionales y normativos • Ausencia de marcos regulatorios específicos. • Fragmentación institucional y baja coordinación. • Preferencia normativa y financiera por sistemas centralizados, dado su mayor reconocimiento institucional. • Escasa evaluación y monitoreo. • Falta de normativas y/o valoración institucional para la implementación de soluciones basadas en la naturaleza (SbN). • Poca inclusión de las SbN en programas de formación técnica y académica.
3. Desafíos sociales y culturales • Baja aceptación social y estigmatización de tecnologías alternativas. • Cambios de comportamiento requeridos en el usuario. • Falta de participación comunitaria temprana. • Desconocimiento sobre los beneficios de estos sistemas, ej. reúso de agua y aprovechamiento de biogás y nutrientes.
4. Desafíos económicos y financieros • Costos iniciales elevados en algunos casos, sujeto al contexto. • Falta de incentivos para reúso de agua, energía y nutrientes.

• Dificultades de acceso a financiamiento en zonas rurales y/o periurbanas. • Tarifas poco estructuradas para la sostenibilidad. • Poca valorización de subproductos tratados.
5. Desafíos ambientales y sanitarios • Riesgos sanitarios por tratamiento incompleto o insuficiente del efluente. • Emisiones de gases de efecto invernadero en sistemas anaerobios mal gestionados. • Manejo inadecuado o inexistente de lodos (muy frecuente). • Falta de evaluación de riesgos ambientales y sanitarios.
6. Desafíos de escalabilidad y replicabilidad • Falta de guías técnicas adaptadas al contexto local. • Dificultades en zonas urbanas densas. • Escasa evidencia a escala real. • Poca articulación entre pilotos y políticas públicas. • Baja documentación de experiencias exitosas.

Fuente: [8, 26, 27, 31, 32, 34]

En términos de oportunidades, los sistemas descentralizados de tratamiento de aguas residuales presentan no solo viabilidad técnica y económica, sino también un alto potencial de integración con políticas de sostenibilidad, inclusión social y economía circular. Estas soluciones permiten el aprovechamiento de recursos, la adaptación a contextos locales diversos y el fortalecimiento de capacidades comunitarias. A continuación, en la Tabla 2 se resumen las principales oportunidades identificadas en los estudios revisados:

TABLA 2: RESUMEN DE LAS OPORTUNIDADES DE LA IMPLEMENTACIÓN DE DEWATS EN AMÉRICA LATINA

1.	Aprovechamiento de recursos y economía circular • Reúso del efluente tratado para riego agrícola, forestación urbana, jardinería y otras actividades productivas, promoviendo el cierre de ciclos y reduciendo la presión sobre fuentes hídricas, lo que contribuye a la seguridad hídrica local. • Recuperación de nutrientes (N y P) presentes en el agua residual y en los lodos, con potencial para reemplazar fertilizantes sintéticos en contextos rurales y/o periurbanos donde se practica la agricultura de pequeña escala. • Producción de biogás en sistemas anaerobios, que puede utilizarse para la propia planta y en ciertos casos para usos domésticos en pequeña escala, aportando a la autonomía energética local.
2.	Flexibilidad, adaptabilidad y escalabilidad • Pueden ser modulares y escalables, lo que permite su implementación por fases y su adaptación al crecimiento de la población o a la demanda futura. • Su flexibilidad tecnológica permite combinar varias soluciones tecnológicas (ej., biodigestores, humedales, filtros anaerobios), adaptándose a condiciones locales como clima, tipo de suelo, topografía y capacidad operativa. • Son viables en territorios rurales, periurbanos y comunidades dispersas, donde los sistemas centralizados son técnica o económicamente inviables.
3.	Inclusión social y apropiación comunitaria • Fomentan la participación comunitaria en el diseño, operación, mantenimiento y monitoreo, fortaleciendo el empoderamiento local y la sostenibilidad del sistema. • Generan empleo local y oportunidades para pequeñas cooperativas, especialmente en el manejo de residuos orgánicos, la operación de sistemas, y la producción de biofertilizantes. • Mejoran las condiciones de vida y de salubridad, reduciendo la dependencia de camiones cisterna, fosas sépticas mal gestionadas y vertidos directos a los cuerpos de agua.
4.	Contribución al cumplimiento de los ODS • Contribuyen directamente al cumplimiento del ODS 6 (Agua limpia y saneamiento), pero también al ODS 11 (Ciudades sostenibles), ODS 12 (Producción y consumo responsables) y ODS 13 (Acción por el clima). • Particularmente los humedales construidos pueden ser considerados Soluciones Basadas en la Naturaleza (SbN), contribuyendo a la resiliencia frente al cambio climático y promoviendo la integración entre infraestructura verde y gris.
5.	Viabilidad económica y descentralización de la inversión • Representan una alternativa de bajo costo, con menores requerimientos de inversión en infraestructura y operación, en comparación con sistemas convencionales centralizados, que por lo general son costosos. • Facilitan una descentralización de la inversión pública, permitiendo atender a más comunidades con presupuestos limitados, especialmente en municipios pequeños o barrios. • Permiten reducir costos a largo plazo en transporte de aguas residuales, tratamiento y disposición de lodos, además de evitar sanciones por contaminación.
6.	Potencial educativo y de investigación • Son plataformas útiles para la educación ambiental, la sensibilización comunitaria y la formación técnica local. • Contribuyen a la investigación aplicada y la innovación, al permitir la validación de tecnologías adaptadas a diferentes contextos socioambientales.

Fuente: [8, 16, 18, 22, 23, 24, 25, 26, 31]

3.4 Brechas de conocimiento y necesidades de investigación en el tratamiento descentralizado

Los sistemas reportados abarcan desde proyectos piloto hasta instalaciones que atienden poblaciones cercanas a las 30.000 personas, sin una base común de diseño ni monitoreo sistemático. Esta falta de estandarización, sumada a la ausencia de guías técnicas contextualizadas y esquemas de seguimiento continuo, representa un obstáculo para la replicabilidad y escalabilidad de estas soluciones en la región.

Asimismo, a partir de la revisión se identificaron varios aspectos que requieren mayor investigación para mejorar la aplicación y sostenibilidad de las tecnologías analizadas:

- La limitada eficiencia de los HC en la remoción de fósforo y la necesidad de incorporar medios adsorbentes (como zeolita) o sistemas de aireación.
- El desconocimiento de los mecanismos de depuración asociados al uso de plantas ornamentales en HC.
- La escasa atención a la gestión de lodos y al potencial de recuperación energética mediante biogás.
- La carencia de datos consistentes sobre nutrientes e indicadores microbiológicos.
- La influencia aún poco estudiada de factores como temperatura, tiempo de retención y cargas elevadas.
- El impacto ambiental de los HC, incluyendo la captura de carbono y las emisiones de gases de efecto invernadero.
- La ausencia de regulaciones específicas, criterios de diseño, incentivos para el reúso y definiciones claras de roles operativos y financieros.

A esto se suman barreras sociales como la baja difusión del conocimiento técnico y la percepción pública limitada.

4. LIMITACIONES DEL ESTUDIO

Este estudio presenta algunas limitaciones que deben tenerse en cuenta al interpretar sus resultados. En primer lugar, la búsqueda bibliográfica se restringió a publicaciones en inglés y español, lo que pudo haber excluido estudios relevantes disponibles en otros idiomas. En segundo lugar, aunque se incluyeron estudios de caso, revisiones sistemáticas y análisis regionales, el análisis no se enfocó exclusivamente en ensayos piloto o investigaciones experimentales controladas, lo que limita la posibilidad de evaluar con precisión la eficacia operativa de tecnologías específicas en condiciones controladas. Además, si bien se aplicó la metodología PRISMA para asegurar un proceso estructurado y transparente en la selección de estudios, no se realizó una evaluación estadística formal del sesgo de publicación. Es decir, no se examinó si los estudios con resultados positivos tienden a publicarse con mayor frecuencia que aquellos con hallazgos negativos o inconclusos, lo cual podría afectar la representación equilibrada de la evidencia recopilada. Finalmente, el enfoque general se orientó a identificar tendencias tecnológicas, desafíos estructurales y oportunidades de aplicación regional, más que a una caracterización técnico-operativa detallada de cada sistema analizado.

Por otra parte, la ausencia de la base de datos Scopus por razones institucionales representa una limitación metodológica que es importante reconocer, dado su reconocimiento como una fuente clave en revisiones sistemáticas. Esto pudo haber limitado la inclusión de estudios relevantes, particularmente aquellos publicados en revistas de alto impacto no indexadas en las bases consultadas. En consecuencia, es posible que esta limitación haya influido en la diversidad de la muestra analizada y, por tanto, también en el alcance de algunas conclusiones derivadas del estudio. No obstante, la inclusión de fuentes complementarias como SciELO y Google Scholar permitió recuperar literatura contextualizada en América Latina, lo que contribuye a garantizar una base suficientemente representativa para el análisis realizado.

5. CONCLUSIONES

A pesar del creciente interés técnico y académico en los sistemas descentralizados de tratamiento de aguas residuales (del inglés *Decentralized Wastewater Treatment Systems* - DEWATS), la documentación sobre su desempeño a largo plazo en América Latina continúa siendo limitada. Es prioritario fomentar estudios que documenten experiencias reales de implementación, operación y mantenimiento en diversos contextos socioeconómicos y territoriales de la región. La generación de evidencia empírica local permitirá validar su eficacia operativa y sostenibilidad, además de identificar modelos replicables, factores de éxito y barreras persistentes. Cabe destacar que, según los estudios revisados, Brasil lidera tanto la producción científica como la implementación de sistemas descentralizados en la región, lo que representa una oportunidad para fomentar la cooperación regional y adaptar las lecciones aprendidas a otros contextos latinoamericanos.

La revisión sistemática incluyó 57 artículos que abordan distintos aspectos del tratamiento descentralizado de aguas residuales a pequeña escala en América Latina, aplicando la metodología PRISMA. De esta revisión emergen diversas

tecnologías utilizadas en la región, entre las que destacan los humedales construidos (HC), seguidos por los reactores anaerobios tipo UASB, los sistemas híbridos, los tanques sépticos y otras tecnologías complementarias.

Los HC son la tecnología más reportada en los estudios analizados. Son valorados debido a su sostenibilidad, bajo costo, fiabilidad operativa y facilidad de construcción. Las configuraciones más comunes corresponden a humedales de flujo subsuperficial horizontal, aunque también se identifican variantes de flujo vertical. Destacan, además, los sistemas híbridos, que muestran un alto potencial de aplicación en zonas andinas. Los HC presentan elevadas eficiencias en la remoción de materia orgánica y un consumo energético muy reducido, lo que los hace adecuados para contextos con infraestructura sanitaria limitada, como áreas rurales y periurbanas. Su diseño modular y adaptable permite su implementación también en entornos urbanos. Sin embargo, la mayoría de las experiencias documentadas provienen de estudios en condiciones controladas o experimentales, por lo que persiste una escasa evidencia sobre su desempeño sostenido en comunidades con baja capacidad técnica e institucional.

Los tanques sépticos, especialmente cuando se combinan con sistemas de postratamiento como humedales, y los reactores anaerobios tipo UASB, ya sea utilizados de manera individual o en combinación, muestran buena aceptación social y resultados técnicos satisfactorios en estudios de campo. Por otra parte, aunque los sistemas aerobios, como los lodos activados, son típicos de soluciones centralizadas, algunos estudios han evaluado su aplicación en contextos descentralizados, reportando resultados prometedores en cuanto a eficiencia y adaptabilidad operativa, como se documenta en tres de los artículos revisados.

Aunque las tecnologías descentralizadas evaluadas muestran un desempeño técnico favorable, se identifica una limitación clave: la escasez de datos cuantitativos consolidados sobre su eficiencia real de tratamiento y la población beneficiaria en cada caso. Las eficiencias más reportadas corresponden a la remoción de DQO y DBO_5 (50 % a 100 %), SST (40 % a 82 %), fósforo (50 % a 95 %) y nitrógeno (superior al 90 % en algunos estudios). Sin embargo, estos valores presentan una alta variabilidad, atribuida a factores como la carga hidráulica, condiciones climáticas, estado de mantenimiento y, en el caso de los HC, el tipo de vegetación utilizada. Esta heterogeneidad metodológica limita la comparabilidad entre estudios y dificulta el establecimiento de criterios técnicos estandarizados.

A pesar de estos desafíos, los sistemas descentralizados, y sus tecnologías asociadas, representan una oportunidad estratégica. Se alinean con los principios de la economía circular y las soluciones basadas en la naturaleza, y ofrecen respuestas viables a comunidades sin acceso a redes convencionales de saneamiento. Su flexibilidad, bajo costo y potencial de gestión comunitaria los posicionan como herramientas clave para reducir la contaminación hídrica y avanzar hacia el cumplimiento del ODS 6 (agua limpia y saneamiento para todos).

Para maximizar su impacto, es necesario fortalecer los marcos normativos e institucionales, promover la formación técnica, sistematizar y divulgar experiencias exitosas, y vincular estas tecnologías con estrategias nacionales y locales de saneamiento. Bajo un enfoque territorializado, flexible y participativo que articule ciencia, políticas públicas y comunidades, los sistemas descentralizados pueden dejar de ser considerados soluciones complementarias y consolidarse como pilares fundamentales de una gestión del saneamiento resiliente, equitativo y sostenible en América Latina. Esto demanda voluntad política, financiamiento sostenido y marcos regulatorios claros que aseguren su adopción a largo plazo, especialmente en beneficio de las poblaciones más vulnerables.

REFERENCIAS

[1] United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division, World Urbanization Prospects: The 2018 Revision (ST/ESA/SER.A/420). New York: United Nations, 2019.

[2] UNICEF – OMS, Progresos en materia de agua para consumo, saneamiento e higiene en América Latina y el Caribe 2000–2020: Cinco años después de la adopción de los ODS. Nueva York: UNICEF y Organización Mundial de la Salud, 2020.

[3] A. Noyola, J. M. Morgan-Sagastume, and L. P. Güereca, Selección de tecnologías para el tratamiento de aguas residuales municipales: Guía de apoyo para ciudades pequeñas y medianas. México: Instituto de Ingeniería, UNAM, 2013.

[4] J. De Anda Sánchez, "Saneamiento descentralizado y reutilización sustentable de las aguas residuales municipales en México," Sociedad y Ambiente, no. 14, pp. 119–143, 2017. [Online]. Available: https://doi.org/10.31840/sya.v0i14.1770

[5] S. Estévez, S. González-García, G. Feijoo, and M. T. Moreira, “How decentralized treatment can contribute to the symbiosis between environmental protection and resource recovery,” Science of the Total Environment, vol. 812, p. 152446, 2022. doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.152446.

[6] D. Milićević, M. Milićević, and R. Trajković, “Decentralized wastewater treatment – A sustainable solution for protecting water resources from pollution,” Journal of the Faculty of Civil Engineering and Architecture, vol. 39, pp. 35–46, 2024. doi: 10.62683/ZRGAF39.35-46.

[7] A. G. Capodaglio, A. Callegari, D. Cecconet, and D. Molognoni, “Sustainability of decentralized wastewater treatment technologies,” Water Practice and Technology, vol. 12, no. 2, pp. 463–477, 2017. doi: 10.2166/wpt.2017.055.

[8] M. M. Ferreira, F. A. Fiore, A. Saron, y G. H. R. da Silva, "Systematic review of the last 20 years of research on decentralized domestic wastewater treatment in Brazil: state of the art and potentials," Water Science & Technology, vol. 84, no. 12, pp. 3469–3483, 2021, doi: 10.2166/wst.2021.487.

[9] H. Muzioreva, T. Gumbo, N. Kavishe, T. Moyo, and I. Musonda, “Decentralized wastewater system practices in developing countries: A systematic review,” Utilities Policy, vol. 79, p. 101442, 2022. doi: 10.1016/j.jup.2022.101442.

[10] CEPAL, Panorama urbano de América Latina y el Caribe, Comisión Económica para América Latina y el Caribe, 2021.

[11] UN-Habitat, World Cities Report 2022: Envisaging the Future of Cities, United Nations Human Settlements Programme, 2022.

[12] M. J. Page, J. E. McKenzie, P. M. Bossuyt, I. Boutron, T. C. Hoffmann, C. D. Mulrow, L. Shamseer, J. M. Tetzlaff, E. A. Akl, S. E. Brennan, R. Chou, J. Glanville, J. M. Grimshaw, A. Hróbjartsson, M. M. Lalu, T. Li, E. W. Loder, E. Mayo Wilson, S. McDonald, L. A. McGuinness, L. A. Stewart, J. Thomas, A. C. Tricco, V. A. Welch, P. Whiting y D. Moher, “The PRISMA 2020 statement: an updated guideline for reporting systematic reviews,” BMJ, vol. 372, p. n71, 29 mar. 2021, doi: 10.1136/bmj.n71

[13] M. Starkl, I. Bisschops, L. Essl, E. López, J. L. Martínez, D. Murillo, and T. A. Nanninga, "Opportunities and constraints for resource efficient environmental management in rapidly developing urban areas: The example of Mexico City," Environmental Impact Assessment Review, vol. 45, pp. 66–77, 2014. doi: 10.1016/j.eiar.2013.12.004

[14] R. Russell, "Waste not, want not? Evaluating the urban sustainability implications of centralized versus decentralized wastewater treatment in Tijuana, Mexico," Journal of Environmental Management, vol. 86, no. 1, pp. 142–152, 2008. doi: 10.1016/j.jenvman.2006.12.031

[15] A. S. Méndez-Mendoza, R. Bello-Mendoza, D. Herrera-López, G. Mejía-González, and A. Calixto-Romo, “Performance of constructed wetlands with ornamental plants in the treatment of domestic wastewater under the tropical climate of South Mexico,” Water Science and Technology, vol. 79, no. 2, pp. 309–319, 2019. doi: 10.2166/wst.2019.016

[16] A. I. Machado, M. Beretta, R. Fragoso, and E. Duarte, “Overview of the state of the art of constructed wetlands for decentralized wastewater management in Brazil,” Journal of Environmental Management, vol. 187, pp. 560–570, 2017. doi: 10.1016/j.jenvman.2016.11.015

[17] H. A. Casierra-Martínez, J. C. Charris-Olmos, A. Caselles-Osorio, and A. E. Parody-Muñoz, “Organic matter and nutrients removal in tropical constructed wetlands using Cyperus ligularis (Cyperaceae) and Echinocloa colona (Poaceae),” Ecological Engineering, vol. 133, pp. 10–19, 2019. doi: 10.1016/j.ecoleng.2019.04.009

[18] C. Matovelle, M. Quinteros y S. A. Ochoa-García, “Performance of Equisetum spp and Zantedeschia aethiopica on the evaluation of artificial wetlands as an alternative for wastewater treatment in rural areas of the Ecuadorian Andes,” Current Research in Environmental Sustainability, vol. 7, no. 1, p. 100243, 2025, doi: 10.1016/j.crsust.2024.100243.

[19] N. DelaPaz-Ruíz, A. Ellen-Wien, M. Farnaghi, y R. Zurita-Milla, “Modeling spatiotemporal domestic wastewater variability: Implications for measuring treatment efficiency,” J. Environ. Manage., vol. 351, p. 119680, 2024, doi:10.1016/j.jenvman.2023.119680.

[20] J. L. Marín-Muñiz, L. C. Sandoval Herazo, M. C. López-Méndez, M. Sandoval-Herazo, R. A. Meléndez-Armenta, H. R. González-Moreno y S. Zamora, “Treatment wetlands in Mexico for control of wastewater contaminants: A review of experiences during the last twenty-two years,”, Processes, vol. 11, no. 359, pp. 2-18, 2023, doi.org/10.3390/pr11020359.

[21] S. Varma Sinha, E. P. Argyilan y M. P. S. Krekeler, “An environmental investigation of the mineralogical, geotechnical, hydrogeologic and botanical properties of subsurface flow constructed wetlands in Akumal Mexico,” Environ. Earth Sci., vol. 73, no. 5, pp. 2299–2317, 2014, doi: 10.1007/s12665 014 3577 y.

[22] J. A. da Silva, A. Sarti, y G. H. R. da Silva, “Performances of two pilot decentralized wastewater treatment plants used to treat low-strength wastewater,” Desalination and Water Treatment, vol. 91, pp. 93–100, Oct. 2017. doi: 10.5004/dwt.2017.21526.

[23] H. H. de S. Souza, P. L. Paulo, y M. A. Boncz, “A constructed wetland system for residential greywater reuse: economic feasibility of, and willingness to pay for,” Desalination and Water Treatment, vol. 91, pp. 336–348, Oct. 2017. doi: 10.5004/dwt.2017.21398.

[24] J. L. Marín-Muñiz, I. Zitácuaro-Contreras, G. Ortega-Pineda, A. López-Roldán, M. Vidal-Álvarez, K. E. Martínez-Aguilar, L. M. Álvarez-Hernández, y S. Zamora-Castro, “Phytoremediation performance with ornamental plants in monocultures and polycultures conditions using constructed wetlands technology,” Plants (Basel), vol. 13, no. 7, p. 1051, Apr. 2024. doi: 10.3390/plants13071051.

[25] F. P. da Silva, C. A. Lutterbeck, G. S. Colares, G. A. Oliveira, L. R. Rodrigues, N. Dell’Osbel, A. L. Rodriguez, D. A. Rodriguez López, G. Gehlen, y Ê. L. Machado, “Treatment of university campus wastewaters by anaerobic reactor and multi-stage constructed wetlands,” J. Water Process Eng., vol. 42, p. 102119, Oct. 2021, doi: 10.1016/j.jwpe.2021.102119.

[26] M. Perez Rubi, C. Schiffmann, y J. Hack, “Multidimensional assessment of a Nature-based Solution for decentralized greywater treatment in Costa Rica,” Nature-Based Solutions, vol. 2, 2024, Art. no. 100156. doi: 10.1016/j.nbsj.2024.100156.

[27] J. Santos, S. Rodrigues, M. Magalhães, K. Rodrigues, L. Pereira, y G. Marinho, “A state-of-the-art review (2019–2023) on constructed wetlands for greywater treatment and reuse,” Environmental Challenges, vol. 16, Art. no. 100973, 2024. doi: 10.1016/j.envc.2024.100973.

[28] M. F. Prescott, M. F. Dobbie, and D. Ramirez-Lovering, “Green infrastructure for sanitation in settlements in the Global South: A narrative review of socio-technical systems,” Sustainability, vol. 13, no. 4, p. 2071, Feb. 2021, doi: 10.3390/su13042071.

[29] J. P. Silva, “Greenhouse gas emissions from a pilot-scale small decentralized sewage treatment: anaerobic filter + constructed wetland,” Ingeniería y Competitividad, vol. 18, no. 2, pp. 101–112, 2016.

[30] T. Bisognin Immich, R. C. Medeiros, and S. T. Decezaro, “Feasibility study for the implementation and operation of different types of constructed wetlands for a decentralized wastewater treatment system,” Revista Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental, vol. 29, no. 5, 2024. doi: 10.1590/S1413-415220240005.

[31] Rodriguez Domínguez, M. A.; Konnerup, D.; Brix, H.; Arias, C. A., “Constructed Wetlands in Latin America and the Caribbean: A Review of Experiences during the Last Decade,” Water, vol. 12, no. 6, art. 1744, Jun. 2020.

[32] M. Arias-Henao, D. Paredes-Cuervo, and P. Torres-Lozada, "Influence of conventional and hybrid septic tank-anaerobic filter configurations on the hydrodynamics and performance of wastewater treatment," Ingeniería e Investigación, vol. 43, no. 2, Art. no. e94617, 2023. doi.org/10.15446/ing.investig.94617

[33] B. de Oliveira Freitas, L. de S. Leite, and L. A. Daniela, "Chlorine and peracetic acid in decentralized wastewater treatment: Disinfection, oxidation and odor control," Process Safety and Environmental Protection, vol. 146, pp. 620–628, 2021. https://doi.org/10.1016/j.psep.2020.11.047

[34] J. A. Cardona, O. C. Segovia, S. Böttger, N. A. Medellin Castillo, L. Cavallo, I. E. Ribeiro, and S. Schlüter, "Reuse-oriented decentralized wastewater and sewage sludge treatment for rural settlements in Brazil: a cost–benefit analysis," Desalination and Water Treatment, vol. 91, pp. 82–92, Oct. 2017, doi: 10.5004/dwt.2017.21421.