

Aplicaciones de tecnología apropiada en el tratamiento y reutilización de aguas residuales para comunidades rurales

Applications of appropriate technology in wastewater treatment and reuse for rural communities

Gabriel Jesús Montúfar Chiriboga¹ 

¹Universidad Tecnológica de Panamá.

Dirección para recibir correspondencia: gabriel.montufar@up.ac.pa

Recibido: 29/09/2025

Revisión: 10/11/2025

Aceptado: 02/12/2025

Resumen

El tratamiento de aguas residuales en comunidades rurales requiere soluciones descentralizadas, operables localmente y compatibles con restricciones económicas, climáticas y sociales. Este artículo presenta una revisión sistemática de 28 estudios publicados entre 2021 y 2025 sobre tecnologías apropiadas para el tratamiento y la reutilización de aguas residuales rurales. La búsqueda se realizó en PubMed, Scopus, Web of Science y Google Scholar, combinando términos sobre saneamiento rural, tecnologías descentralizadas, humedales construidos, reactores anaeróbicos, biofiltración, lagunas de estabilización, reutilización y sostenibilidad. Los resultados muestran que los humedales construidos reportan remociones típicas de 80-95 % para contaminantes convencionales, los reactores anaeróbicos alcanzan reducciones de DBO cercanas a 70-90 % con bajo requerimiento energético, y los sistemas híbridos ofrecen efluentes de mayor calidad a cambio de mayor complejidad operativa. La evidencia indica que el desempeño no depende solo de la eficiencia técnica, sino también del clima, la disponibilidad de área, la carga hidráulica, el mantenimiento y la participación comunitaria. Se concluye que las tecnologías apropiadas son alternativas viables para el saneamiento rural cuando se seleccionan mediante criterios técnicos y contextuales explícitos.

Palabras claves: aguas residuales; saneamiento rural; tecnologías apropiadas; humedales construidos; reactores anaeróbicos; reutilización; sostenibilidad

Abstract

Wastewater treatment in rural communities requires decentralized solutions that can be operated locally and adapted to economic, climatic, and social constraints. This article presents a systematic review of 28 studies published between 2021 and 2025 on appropriate technologies for rural wastewater treatment and reuse. The search was conducted in PubMed, Scopus, Web of Science, and Google Scholar using terms related to rural sanitation, decentralized technologies, constructed wetlands, anaerobic reactors, biofiltration, waste stabilization ponds, reuse, and sustainability. The findings show that constructed wetlands commonly report 80-95% removal of conventional pollutants, anaerobic reactors achieve approximately 70-90% BOD reduction with low energy demand, and hybrid systems can produce higher-quality effluents at the cost of greater operational complexity. The evidence indicates that performance depends not only on technical efficiency but also on climate, land availability, hydraulic loading, maintenance capacity, and community participation. Appropriate technologies are viable alternatives for rural sanitation when selected through explicit technical and contextual criteria.

Key words: wastewater; rural sanitation; appropriate technology; constructed wetlands; anaerobic reactors; reuse; sustainability



Introducción

El saneamiento rural presenta retos específicos porque las viviendas suelen estar dispersas, la densidad poblacional es baja y la infraestructura centralizada puede resultar técnica o económicamente inviable. En este contexto, los sistemas descentralizados han sido propuestos como una respuesta para reducir descargas sin tratamiento, mejorar la salud pública y facilitar la reutilización segura del agua tratada en actividades compatibles con el entorno local (Li et al., 2024; Subramanian & Suresh, 2024).

Las tecnologías apropiadas se caracterizan por su bajo requerimiento energético, posibilidad de operación local y adaptación a condiciones climáticas y socioculturales. En aguas residuales rurales, las opciones más estudiadas incluyen humedales construidos, reactores anaeróbicos con deflectores, lagunas de estabilización, filtros de biochar, esponjas biológicas y configuraciones híbridas. Estas alternativas pueden conectarse con enfoques de economía circular cuando permiten recuperar agua, nutrientes o energía, aunque su desempeño depende de variables de diseño, mantenimiento y gobernanza (Anang et al., 2024; de Simone Souza et al., 2023; Ribarova et al., 2024).

La brecha de conocimiento que motiva esta revisión no es la ausencia de tecnologías individuales, sino la dispersión de la evidencia reciente sobre eficiencia, sostenibilidad y condiciones de implementación en comunidades rurales. Por ello, el objetivo del estudio fue recopilar, sintetizar y comparar la evidencia publicada entre 2021 y 2025 sobre tecnologías apropiadas para el tratamiento y la reutilización de aguas residuales rurales, identificando sus ventajas, limitaciones, criterios de selección y vacíos de investigación.

Materiales y método

Se realizó una revisión sistemática con síntesis narrativa estructurada. La pregunta de investigación fue: ¿qué tecnologías apropiadas se han aplicado de forma eficiente y sostenible para el tratamiento y la reutilización o distribución de aguas residuales en comunidades rurales entre 2021 y 2025? La estructura PICO se definió así: población, comunidades rurales; intervención, tecnologías apropiadas descentralizadas; comparación, tratamientos convencionales, ausencia de

tratamiento u otras tecnologías descentralizadas; y resultados, eficiencia de remoción, reutilización, costos, sostenibilidad, operación y condiciones contextuales.

La búsqueda se ejecutó en PubMed, Scopus, Web of Science y Google Scholar. Para mantener coherencia con el idioma del manuscrito, la estrategia se reporta con términos y conectores en español: (comunidades rurales O saneamiento rural O descentralizado) Y (aguas residuales O aguas residuales domésticas O saneamiento) Y (humedales construidos O reactor anaeróbico con deflectores O filtro de biochar O laguna de estabilización O biofiltración O biorreactor de membrana) Y (reutilización O recuperación de recursos O sostenibilidad O evaluación del ciclo de vida). Los filtros principales fueron periodo 2021-2025, disponibilidad de texto completo y pertinencia con tratamiento, reutilización o gestión de aguas residuales en entornos rurales.

La Tabla 1 muestra las cadenas de búsqueda usadas por base de datos para reforzar la reproducibilidad del proceso.

Los criterios de inclusión fueron: artículos de investigación, revisiones o evaluaciones técnicas con aplicación rural; estudios sobre tratamiento descentralizado, reutilización, recuperación de recursos o sostenibilidad; y reportes con información suficiente sobre tecnología, contexto y desempeño. Se excluyeron estudios centrados exclusivamente en sistemas urbanos centralizados, ensayos sin aplicabilidad práctica, documentos sin texto completo, duplicados, resúmenes de congreso y trabajos fuera del periodo definido. La extracción de datos consideró tecnología, tipo de estudio, región, eficiencia reportada, ventajas, limitaciones, costos o requerimientos operativos, y relación con sostenibilidad.

La calidad metodológica se evaluó mediante una lista de control adaptada al tipo de documento. Para estudios observacionales o de campo se consideraron claridad del diseño, descripción del contexto, métricas de desempeño y periodo de seguimiento; para revisiones se consideraron criterios de búsqueda, transparencia de selección y síntesis; y para análisis ambientales se revisó consistencia de límites del sistema, supuestos y sensibilidad. Esta evaluación no se usó para excluir automáticamente estudios, sino para ponderar la fuerza de la evidencia durante la síntesis.

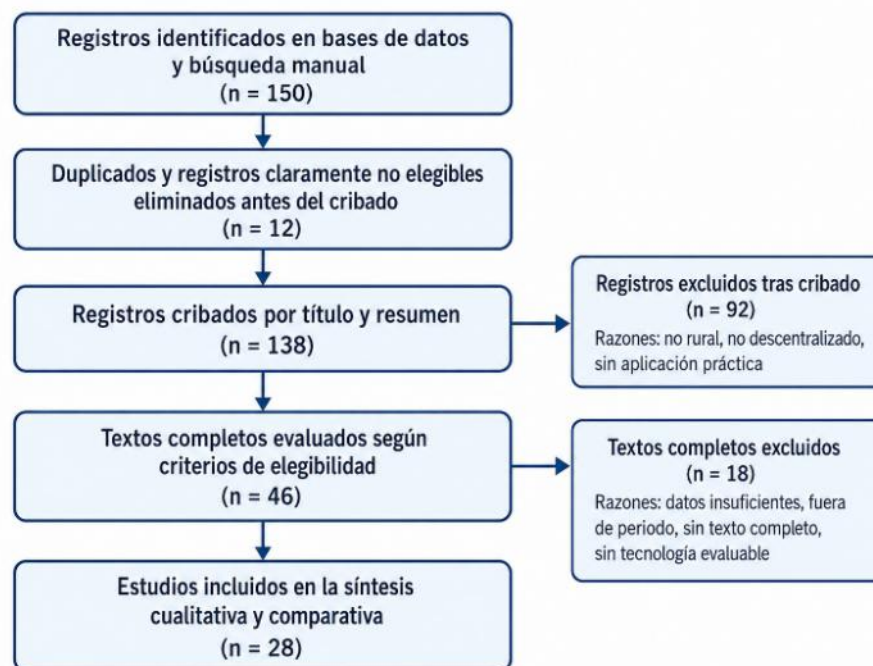
El proceso de selección produjo 150 registros identificados, 12 registros eliminados antes del cribado, 138 registros cribados, 46 textos completos evaluados

y 28 estudios incluidos. La Figura 1 resume el flujo PRISMA adaptado con los conteos de exclusión en cada etapa.

Tabla 1. Estrategia de búsqueda por base de datos.

Base de datos	Cadena de búsqueda usada	Filtros aplicados
PubMed	(comunidades rurales O saneamiento rural O descentralizado) Y (aguas residuales O aguas residuales domésticas) Y (humedales construidos O reactor anaeróbico con deflectores O filtro de biochar O laguna de estabilización O biofiltración) Y (reutilización O sostenibilidad)	2021-2025; texto completo disponible; estudios o revisiones con aplicación rural
Scopus	Título-resumen-palabras clave: (aguas residuales rurales O saneamiento rural O descentralizado) Y (humedales construidos O reactor anaeróbico con deflectores O biochar O laguna de estabilización O biofiltración) Y (reutilización O sostenibilidad O recuperación de recursos)	2021-2025; artículos y revisiones; áreas de ingeniería ambiental, agua y sostenibilidad
Web of Science	Tema: (aguas residuales rurales O saneamiento rural O descentralizado) Y (humedales construidos O reactores anaeróbicos O biochar O lagunas de estabilización O biofiltración) Y (reutilización O sostenibilidad O evaluación del ciclo de vida)	2021-2025; artículos y revisiones; texto completo localizable
Google Scholar	aguas residuales rurales Y (humedales construidos O reactor anaeróbico con deflectores O biochar) Y reutilización Y sostenibilidad Y 2021-2025	Búsqueda complementaria; revisión manual de títulos, resúmenes y referencias relevantes

Figura 1. Flujo PRISMA adaptado del proceso de selección de estudios.



Resultados

La revisión incluyó 28 estudios. La evaluación de calidad metodológica se usó para interpretar la fuerza de la evidencia y no como criterio automático de exclusión. La Tabla 2 presenta los principales resultados de esa evaluación.

En cuanto a desempeño tecnológico, la evidencia se agrupó en cinco familias: humedales construidos, reactores anaeróbicos, lagunas de estabilización, filtros de biochar o medios biológicos, y sistemas híbridos. La Tabla 3 consolida los resultados de eficiencia y evita la duplicación entre listados descriptivos y comparativos.

Tabla 2. Resultados de la evaluación de calidad metodológica de los estudios incluidos.

Criterio evaluado	Hallazgo principal	Estudios afectados	Implicación para la síntesis
Pertinencia rural y tecnología apropiada	Todos los estudios incluidos presentaron aplicación rural, descentralizada o transferible a comunidades rurales.	28/28 cumplen el criterio	Permite mantener el corpus completo para la síntesis comparativa.
Descripción del contexto	Varios estudios reportaron región y tecnología, pero no siempre detallaron carga afluente, clima, área disponible o condiciones de operación.	9/28 con información contextual parcial	Los resultados se interpretaron como evidencia dependiente del contexto, no como valores universales de diseño.
Métricas de desempeño	Las eficiencias se reportaron con indicadores heterogéneos: DBO, DQO, SST, nutrientes, fósforo o calidad global de efluente.	11/28 con métricas no directamente comparables	Se usaron rangos por familia tecnológica en lugar de promedios combinados.
Costos, operación y mantenimiento	La información sobre costos, fallas, reemplazo de medios, mantenimiento comunitario y requerimiento técnico fue incompleta en parte del corpus.	16/28 con reporte limitado	La discusión enfatiza trade-offs operativos y no solo porcentajes de remoción.
Seguimiento temporal	Algunos estudios evaluaron desempeño puntual o de corto plazo, con poca evidencia longitudinal sobre durabilidad.	13/28 con seguimiento limitado	Se evitó extrapolar sostenibilidad de largo plazo sin evidencia directa.
Transparencia metodológica	Las revisiones y evaluaciones ambientales describieron métodos con distinto nivel de detalle.	7/28 con trazabilidad metodológica parcial	La síntesis ponderó con cautela estudios con menor detalle metodológico.

Tabla 3. Comparación consolidada de tecnologías apropiadas para tratamiento y reutilización de aguas residuales rurales.

Tecnología	Rango de eficiencia reportado	Ventajas rurales	Limitaciones principales	Evidencia representativa
Humedales construidos	80-95 % en contaminantes convencionales; 80-90 % en nutrientes según configuración	Bajo consumo energético, operación simple, integración paisajística y potencial de reutilización	Requieren área disponible; sensibilidad a clima, carga hidráulica y mantenimiento vegetal	Biswal & Balasubramanian (2022); de Campos & Soto (2024); Gabr et al. (2023); Pérez et al. (2024); Sousa et al. (2024)
Reactores anaeróbicos con deflectores o biopelícula	70-90 % de reducción de DBO en condiciones reportadas	Baja demanda energética, posibilidad de recuperación de biogás y aplicación en climas cálidos	Menor remoción de patógenos y necesidad de pos-tratamiento para reutilización segura	Chen et al. (2022); Liu et al. (2023); Mahdi et al. (2022); Ullah et al. (2024)
Lagunas de estabilización	60-85 % de estabilización orgánica	Sencillez constructiva, bajo costo y operación comprensible para comunidades	Alta demanda de terreno, pérdidas por evaporación y variabilidad por temperatura	Desye et al. (2022); dos Santos & van Haandel (2021); Mahapatra et al. (2022)
Filtros de biochar, esponjas y sistemas biológicos	75-92 % en remoción de fósforo o contaminantes específicos	Uso de residuos locales, modularidad y	Reemplazo periódico del medio, saturación y	Anang et al. (2024); Xu et al. (2023a); Xu et al. (2023b); Xu,

Tecnología	Rango de eficiencia reportado	Ventajas rurales	Limitaciones principales	Evidencia representativa
		compatibilidad con pos-tratamientos	necesidad de control de calidad	Du, Xu, et al. (2025); Zakrisson et al. (2024)
Sistemas híbridos y avanzados	85-95 % en tratamiento avanzado según configuración	Mayor calidad de efluente y posibilidad de combinar procesos físicos, químicos y biológicos	Mayor costo, necesidad de personal técnico y dependencia de insumos o energía	Du et al. (2024); Garrido-Baserba et al. (2024); Gholipour & Stefanakis (2021); Mladenov et al. (2024)

La Tabla 3 muestra que los mayores porcentajes de remoción no siempre corresponden a la opción más viable para una comunidad rural. Los humedales construidos y los reactores anaeróbicos concentran la mayor aplicabilidad porque combinan eficiencia, bajo consumo energético y operación relativamente simple. En cambio, las tecnologías híbridas pueden alcanzar mejores calidades de efluente, pero su uso exige evaluar costos, disponibilidad de repuestos, capacitación y continuidad operativa.

La evaluación de calidad indicó tres debilidades frecuentes en la literatura: reportes incompletos de costos de operación y mantenimiento, periodos de seguimiento cortos y escasa estandarización de indicadores. Estas limitaciones reducen la comparabilidad directa entre estudios, por lo que los rangos de eficiencia deben interpretarse como evidencia contextual y no como valores universales de diseño.

Discusión de resultados

La comparación entre tecnologías sugiere un trade-off central: las soluciones más simples suelen ser más apropiadas para operación comunitaria, mientras que las soluciones de mayor eficiencia demandan mayor capacidad técnica. En humedales construidos, la ventaja principal es la estabilidad operativa y la posibilidad de integración ecológica; sin embargo, su desempeño depende de área, clima y mantenimiento (Gabr et al., 2023; Monzón-Reyes et al., 2025). En reactores anaeróbicos, la ventaja es la reducción de carga orgánica con baja energía, pero la reutilización segura requiere pos-tratamiento y control sanitario (Gholipour & Stefanakis, 2021; Li et al., 2024).

Las lagunas de estabilización siguen siendo útiles por su bajo costo, aunque su rendimiento puede verse limitado por evaporación, olores, disponibilidad de terreno y variabilidad climática. Los filtros de biochar

y adsorbentes modificados ofrecen una vía complementaria para remover nutrientes y valorizar residuos agrícolas, pero requieren protocolos de reemplazo y disposición del medio agotado (Xu et al., 2023a; Xu et al., 2023b; Zakrisson et al., 2024). Por su parte, los sistemas híbridos son pertinentes cuando la calidad exigida del efluente es alta, aunque pueden ser menos apropiados en comunidades sin soporte técnico continuo (Du et al., 2024).

Desde una perspectiva de sostenibilidad, la tecnología no debe seleccionarse solo por porcentaje de remoción. También deben considerarse la aceptación comunitaria, la gobernanza local, la disponibilidad de mantenimiento, los costos durante el ciclo de vida y la posibilidad de reutilizar el efluente sin aumentar riesgos sanitarios. La descentralización puede fortalecer la resiliencia del servicio, pero solo si se acompaña de monitoreo, capacitación y responsabilidades institucionales claras (Garrido-Baserba et al., 2024; Mladenov et al., 2024; Wang et al., 2022).

Limitaciones

Esta revisión está limitada por la heterogeneidad de los estudios incluidos, la diversidad de indicadores reportados y la ausencia de datos completos sobre costos, fallas y desempeño a largo plazo. El periodo 2021-2025 permite concentrarse en evidencia reciente, pero puede excluir experiencias locales no publicadas o documentos técnicos fuera de revistas indexadas. Por ello, los resultados deben usarse como guía comparativa y no como sustituto de diseños específicos basados en caracterización local del agua residual, clima, suelos, capacidad operativa y requisitos normativos.

Conclusiones

La evidencia revisada confirma que las tecnologías apropiadas descentralizadas son alternativas válidas para el tratamiento de aguas residuales en comunidades

rurales cuando se seleccionan según condiciones locales. Los humedales construidos, reactores anaeróbicos y sistemas de biofiltración aparecen como las opciones de mayor aplicabilidad general por su balance entre eficiencia, simplicidad y sostenibilidad.

Los resultados muestran que la eficiencia técnica, por sí sola, no garantiza la continuidad del sistema. La sostenibilidad depende de mantenimiento, aceptación comunitaria, disponibilidad de área, clima, costos de operación y posibilidad de reutilización segura del efluente.

La principal implicación científica es la necesidad de reportes más estandarizados sobre eficiencia, costos, operación y seguimiento longitudinal. Esta mejora permitiría comparar tecnologías con mayor rigor y diseñar intervenciones rurales más robustas, replicables y alineadas con el ODS 6.

Recomendaciones prácticas

Para municipios, juntas de acueducto, organizaciones no gubernamentales y entidades ambientales, se recomienda priorizar tecnologías de baja complejidad cuando la capacidad de mantenimiento sea limitada. Para diseñadores y operadores, la selección debe basarse en calidad requerida del efluente, carga afluente, disponibilidad de terreno, clima, materiales locales y plan de mantenimiento; cuando exista información suficiente, las herramientas computacionales de apoyo a la decisión pueden complementar la priorización de alternativas hidráulicas y operativas (Anvari et al., 2025). Para investigadores, se recomienda reportar de forma homogénea las métricas de desempeño, costos, fallas, frecuencia de mantenimiento y condiciones de operación, de modo que futuras revisiones puedan realizar comparaciones cuantitativas más sólidas.

Conflicto de interés

El autor declara no tener ningún conflicto de interés que pudiera haber influido en esta investigación.

Como citar este documento

Montúfar Chiriboga, G.J. (2025). Aplicaciones de tecnología apropiada en el tratamiento reutilización de aguas residuales para comunidades rurales. *Agua, Saneamiento & Ambiente.*, 20(1), 1–8. <https://doi.org/10.36829/08ASA.v20i1.2087>

Consentimiento informado

No aplica, debido a que el estudio corresponde a una revisión sistemática de literatura publicada.

Contribuciones de autor

El autor leyó y aprobó la versión final del artículo. Según la taxonomía CRediT, la contribución fue: conceptualización, metodología, análisis formal, investigación, redacción del borrador original, revisión y edición, y supervisión. El porcentaje total de contribución fue G.M.: 100 %.

Referencias

- Anang, S., Nasr, M., Fujii, M., & Ibrahim, M. G. (2024). Synergism of Life Cycle Assessment and Sustainable Development Goals Techniques to Evaluate Downflow Hanging Sponge System Treating Low-Carbon Wastewater. *Sustainability*, 16(5), 2035. <https://doi.org/10.3390/su16052035>
- Anvari, S., Moghaddasi, M., Rashedi, E., & El-Shafie, A. (2025). Comparative analysis of three soft computing techniques for optimizing reservoir rule curves. *Water Practice and Technology*, 20(3), 714–731. <https://doi.org/10.2166/wpt.2025.029>
- Biswal, B. K., & Balasubramanian, R. (2022). Constructed wetlands for reclamation and reuse of wastewater and urban stormwater: A review. *Frontiers in Environmental Science*, 10, 836289. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.836289>
- Chen, P., Zhao, W., Chen, D., Huang, Z., Zhang, C., & Zheng, X. (2022). Research Progress on Integrated Treatment Technologies of Rural Domestic Sewage: A Review. *Water*, 14(15), 2439. <https://doi.org/10.3390/w14152439>
- de Campos, S. X., & Soto, M. (2024). The Use of Constructed Wetlands to Treat Effluents for Water Reuse. *Environments*, 11(2), 35. <https://doi.org/10.3390/environments11020035>
- de Simone Souza, H. H., de Moraes Lima, P., Medeiros, D. L., Vieira, J., Magalhães Filho, F. J. C., Paulo, P. L., Fullana-i-Palmer, P., & Boncz, M. Á. (2023). Environmental assessment of on-site source-separated wastewater treatment and reuse systems for resource recovery in a sustainable sanitation view. *Science of the Total Environment*, 895, 165122. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.165122>

- Desye, B., Belete, B., Alemseged, E. A., Angaw, Y., & Gebrezgi, Z. A. (2022). Evaluation of waste stabilization pond efficiency and its effluent water quality: A case study of Kito Furdisa Campus, Jimma University, Southwest Ethiopia. *The Scientific World Journal*, 2022, Article 2800034. <https://doi.org/10.1155/2022/2800034>
- dos Santos, S. L., & van Haandel, A. (2021). Transformation of Waste Stabilization Ponds: Reengineering of an Obsolete Sewage Treatment System. *Water*, 13(9), 1193. <https://doi.org/10.3390/w13091193>
- Du, X., Liang, Z., Li, J., Qiu, Y., Song, W., Wang, Z., Zhao, Z., & Zhang, W. (2024). Electrocoagulation enhanced gravity driven membrane bioreactor for advanced treatment of rural sewage. *Journal of Environmental Management*, 353, 120191. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.120191>
- Gabr, M. E., El-Rawy, M., Al-Arifi, N., Zijl, W., & Abdalla, F. (2023). A Subsurface Horizontal Constructed Wetland Design Approach for Wastewater Treatment: Application in Ar Riyadh, Saudi Arabia. *Sustainability*, 15(22), 15927. <https://doi.org/10.3390/su152215927>
- Garrido-Baserba, M., Sedlak, D.L., Molinos-Senante, M. et al. Using water and wastewater decentralization to enhance the resilience and sustainability of cities. *Nat Water* 2, 953–974 (2024). <https://doi.org/10.1038/s44221-024-00303-9>
- Gholipour, A., & Stefanakis, A. I. (2021). A full-scale anaerobic baffled reactor and hybrid constructed wetland for university dormitory wastewater treatment and reuse in an arid and warm climate. *Ecological Engineering*, 170, 106360. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2021.106360>
- Li, X., Zhang, X., Zhao, M., Zheng, X., Wang, Z., & Fan, C. (2024). Application of Decentralized Wastewater Treatment Technology in Rural Domestic Wastewater Treatment. *Sustainability*, 16(19), 8635. <https://doi.org/10.3390/su16198635>
- Liu, L., Wang, J., Gao, J., Wang, Q., & Lao, T. (2023). Research on Rural Wastewater Treatment Technology in Northwest China Based on Anaerobic Biofilm Coupled with Anaerobic Baffle Plate Reactor (ABR) Technology. *Sustainability*, 15(11), 8957. <https://doi.org/10.3390/su15118957>
- Mahapatra, S., Samal, K., & Dash, R. R. (2022). Waste stabilization pond (WSP) for wastewater treatment: A review on factors, modelling and cost analysis. *Journal of Environmental Management*, 308, 114668. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.114668>
- Mahdi, Fatimah K., Abu-Alhail, Saad and Dawood, Ammar Salman. "Performance of the anaerobic baffled reactor for primary treatment of rural domestic wastewater in Iraq" *Open Engineering*, vol. 12, no. 1, 2022, pp. 859-865. <https://doi.org/10.1515/eng-2022-0346>
- Mladenov, N., Sanfilippo, S., Panduro, L., Pascua, C., Arteaga, A., & Pietruschka, B. (2024). Tracking performance and disturbance in decentralized wastewater treatment systems with fluorescence spectroscopy. *Environmental Science: Water Research & Technology*, 10(6), 1506–1516. <https://doi.org/10.1039/D3EW00671A>
- Monzón-Reyes, B. L., González-Moreno, H. R., Month, A. E. Á., Peralta Vega, A. J., Ballut-Dajud, G., & Sandoval Herazo, L. C. (2025). Wastewater Management Strategies in Rural Communities Using Constructed Wetlands: The Role of Community Participation. *Earth*, 6(2), 18. <https://doi.org/10.3390/earth6020018>
- Pérez, Y., Vargas, E., García-Cortés, D., Hernández, W., Checo, H., & Jáuregui-Haza, U. (2024). Efficiency and effectiveness of systems for the treatment of domestic wastewater based on subsurface flow constructed wetlands in Jarabacoa, Dominican Republic. *Water Science and Engineering*, 17(2), 118–128. <https://doi.org/10.1016/j.wse.2023.08.004>
- Ribarova, I., Vasilaki, V., & Katsou, E. (2024). Review of linear and circular approaches to on-site domestic wastewater treatment: Analysis of research achievements, trends and distance to target. *Journal of Environmental Management*, 367, 121951. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.121951>
- Sousa, A. da R., Pelissari, C., Laureano, A. T., & Sezerino, P. H. (2024). Effluent quality and reuse potential of wastewater treated in constructed wetlands in Southern Brazil. *Journal of Water, Sanitation and Hygiene for Development*, 14(5), 377–388. <https://doi.org/10.2166/washdev.2024.306>
- Subramanian, K., & Suresh, K. (2024). Decentralized wastewater treatment enhancing sustainability in

- rural communities. *Chemical Engineering Transactions*, 113, 625–630.
<https://doi.org/10.3303/CET24113105>
- Ullah, N., Sheikh, Z., Ahmad, O., & Khan, S. J. (2024). Performance Evaluation of Sponge Anaerobic Baffled Reactor for Municipal Wastewater Treatment. *Sustainability*, 16(21), 9398.
<https://doi.org/10.3390/su16219398>
- Wang, F., Yao, K., Liu, B., & Zhang, D. (2022). Risk Analysis of Reservoir Resettlers with Different Livelihood Strategies. *Water*, 14(21), 3530.
<https://doi.org/10.3390/w14213530>
- Xu, C., Liu, R., & Chen, L. (2023a). Removal of Phosphorus from Domestic Sewage in Rural Areas Using Oyster Shell-Modified Agricultural Waste–Rice Husk Biochar. *Processes*, 11(9), 2577. <https://doi.org/10.3390/pr11092577>
- Xu, C., Liu, R., Tang, Q., Hou, Y., Chen, L., & Wang, Q. (2023b). Adsorption Removal of Phosphate from Rural Domestic Sewage by Ca-Modified Biochar Derived from Waste Eggshell and Sawdust. *Water*, 15(17), 3087.
<https://doi.org/10.3390/w15173087>
- Xu, J., Du, Y., Xu, Y., Chen, F., Zhou, L., Sun, J., & Qiu, T. (2025). Review of the application of bacterial–algae symbiotic systems in nitrogen removal from aquaculture effluent: Principles, performance enhancement, resource utilization, and challenges. *Water Reuse*, 15(2), 230–254.
<https://doi.org/10.2166/wrd.2025.009>
- Zakrisson, L., Sundberg, C., Larsson, G., Azzi, E. S., & Dalahmeh, S. S. (2024). Life cycle assessment of biochar filters for on-site wastewater treatment. *Journal of Environmental Management*, 371, 123265.
<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.123265>