

Frugal Innovation in Industrial Water Treatment Processes in Emerging Economies (2015–2025): A Systematic Review.

Walter Manuel Hoyos-Alayo¹ 

¹Universidad Tecnológica del Perú, Perú, c23712@utp.edu.pe

Abstract– *The treatment of industrial wastewater in emerging economies remains a structural challenge, particularly in sectors such as textiles, mining, and agro-industry, where access to effective and affordable technologies is still limited. In this context, frugal technologies have gained prominence due to their low cost, operational simplicity, and potential for local adaptation. The objective of this study was to conduct a systematic review of frugal technologies applied to the treatment of industrial wastewater between 2015 and 2025. The PICOC framework and PRISMA guidelines were applied, complemented by a bibliometric analysis using VOSviewer. Following a rigorous selection process, 39 articles meeting specific methodological and geographical criteria were analyzed. The results enabled the classification of seven technological types, with bioadsorption, phytoremediation, and simplified advanced oxidation being the most frequent, achieving removal efficiencies ranging from 60% to 99%, depending on the contaminant. Furthermore, 15 critical success factors were identified, with operational simplicity, the use of locally available materials, and pilot-scale validation emerging as key determinants. Only 20% of the technologies demonstrated high scalability, although 60% showed strong replicability under similar conditions. It is concluded that frugal technologies represent a concrete pathway toward more efficient, inclusive, and sustainable industrial water management aligned with SDGs 6, 9, and 12.*

Keywords– *Frugal technologies; Industrial wastewater treatment; Emerging economies; Integrative analysis; Sustainable water management.*

Innovación frugal en procesos de tratamiento de aguas industriales en economías emergentes (2015 – 2025): una revisión sistemática.

Walter Manuel Hoyos-Alayo¹

¹Universidad Tecnológica del Perú, Perú, c23712@utp.edu.pe

Resumen– El tratamiento de aguas industriales en economías emergentes continúa siendo un desafío estructural, especialmente en sectores como el textil, minero y agroindustrial, donde persiste un acceso limitado a tecnologías efectivas y asequibles; en este contexto, las tecnologías frugales han cobrado relevancia por su bajo costo, simplicidad operativa y potencial de adaptación local. El objetivo de esta investigación fue realizar una revisión sistemática de las tecnologías frugales aplicadas al tratamiento de aguas industriales entre 2015 y 2025. Se aplicó el enfoque PICOC y los lineamientos PRISMA, complementados con análisis bibliométrico mediante VOSviewer; tras un proceso de selección riguroso, se analizaron 39 artículos que cumplen criterios metodológicos y geográficos específicos. Los resultados permitieron clasificar siete tipos tecnológicos, siendo la bioadsorción, fitorremediación y oxidación avanzada simplificada los más frecuentes, con eficiencias de remoción que oscilan entre 60 % y 99 %, dependiendo del contaminante; asimismo, se identificaron 15 factores críticos de éxito, destacando la simplicidad operativa, el uso de materiales locales y la validación piloto como determinantes clave; a su vez, solo el 20 % de las tecnologías mostró niveles altos de escalamiento, aunque el 60 % evidenció alta replicabilidad en condiciones similares. Se concluye que las tecnologías frugales representan una vía concreta para avanzar hacia una gestión del agua industrial más eficiente, inclusiva y alineada con los ODS 6, 9 y 12.

Palabras clave-- Tecnologías frugales; Tratamiento de aguas industriales; Economías emergentes; Análisis integrador; Gestión sostenible del agua.

I. INTRODUCCIÓN

La aceleración del desarrollo industrial en economías emergentes ha incrementado significativamente la demanda de agua, así como la generación de aguas residuales industriales, que en muchos casos no reciben tratamiento adecuado. La Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO) estima que la demanda de agua para la producción industrial aumentará en un 400% hacia 2050, siendo América Latina, África y Asia-Pacífico las regiones de mayor crecimiento [1]. En sectores como el textil, la minería, la agroindustria y la manufactura, el agua es un insumo estratégico, lo que genera retos ambientales, económicos y sociales cuando no se dispone de tecnologías adecuadas de tratamiento y reúso. En particular, muchas plantas industriales de países de ingresos medios y bajos carecen de acceso a tecnologías eficientes, escalables y financieramente viables para el tratamiento de sus efluentes [2].

Ante esta problemática, ha cobrado relevancia el enfoque de innovación frugal, entendido como el diseño de soluciones tecnológicas que, con recursos limitados, logran resultados

efectivos a bajo costo y con funcionalidades esenciales. Este concepto, también referido como “soluciones asequibles de alto impacto”, ha sido aplicado a sectores como la salud y la energía, y más recientemente al tratamiento de aguas [3], [4]. En el contexto hídrico-industrial, la innovación frugal busca desarrollar tecnologías que combinen eficiencia depurativa, simplicidad operativa y viabilidad económica, considerando las restricciones estructurales de las economías emergentes. Esto incluye desde sistemas descentralizados de tratamiento hasta métodos biológicos de bajo consumo energético, que permitan recuperar agua y recursos en la propia fuente de generación.

En la última década (2015–2025), múltiples investigaciones han documentado tecnologías asequibles para tratar aguas residuales industriales con criterios de sostenibilidad. Los humedales artificiales, la fitorremediación, los sistemas de biorreactores anaerobios y el uso de microalgas han demostrado ser opciones viables en entornos con limitada infraestructura [5], [6]; paralelamente, se han evaluado materiales adsorbentes de bajo costo como biochar, zeolitas naturales, residuos agrícolas y nanomateriales funcionalizados, con resultados prometedores para la remoción de contaminantes orgánicos y metales pesados [7], [8].

Asimismo, tecnologías modulares, portátiles y de diseño compacto, como los sistemas containerizados de tratamiento físico-químico o las unidades de oxidación avanzada simplificadas, han emergido como alternativas escalables y adaptables [9]. Estas propuestas no solo reducen costos de implementación, sino que también se alinean con los principios de circularidad, al permitir la reutilización del agua tratada en procesos internos de la industria; a su vez, a pesar de estos avances, la adopción masiva de estas tecnologías enfrenta barreras estructurales: insuficiente financiamiento para escalar proyectos piloto, escasa capacitación técnica, normativas poco claras sobre reúso de agua, y una débil articulación entre investigación y política pública.

Si bien algunas revisiones narrativas han abordado tecnologías específicas (por ejemplo, solo en el sector textil o solo sobre adsorbentes naturales), falta aún una sistematización integral de las tecnologías frugales aplicadas al tratamiento de aguas industriales en múltiples sectores de las economías emergentes.

Pese al creciente cuerpo de literatura sobre soluciones asequibles para el tratamiento de aguas industriales, no existe una revisión sistemática que consolide, analice y categorice

estas tecnologías bajo el enfoque de innovación frugal en contextos industriales de economías emergentes; en particular, se desconoce cuáles han sido las tecnologías más efectivas y replicables en los distintos sectores industriales, qué barreras limitan su escalabilidad, y qué grado de implementación real han alcanzado más allá del laboratorio o de proyectos demostrativos; además, persiste una falta de integración entre la evidencia técnica y los marcos regulatorios, lo que limita la formulación de políticas informadas; por lo tanto, esta laguna de conocimiento justifica la necesidad de una revisión sistemática que permita identificar patrones, contrastar enfoques y orientar decisiones hacia soluciones con mayor impacto potencial en entornos de bajos recursos.

En ese contexto, el objetivo de este estudio es realizar una revisión sistemática de las tecnologías frugales o asequibles aplicadas al tratamiento de aguas industriales en economías emergentes durante el periodo 2015–2025; para ello, se emplea una metodología basada en el enfoque PICOC y los lineamientos PRISMA, a fin de identificar, clasificar y evaluar tecnologías de bajo costo en sectores industriales clave como el textil, minero, agroindustrial y manufacturero, ubicados en regiones de América Latina, África y Asia-Pacífico; asimismo, la revisión busca analizar el rendimiento técnico de las tecnologías, su escalabilidad, barreras de implementación y potencial de adaptación a diferentes contextos geográficos e institucionales.

Este artículo ofrece una contribución inédita al campo de la ingeniería ambiental e industrial al ser la primera revisión sistemática enfocada específicamente en tecnologías frugales para el tratamiento de aguas industriales en economías emergentes. Su aporte principal radica en (i) desarrollar una taxonomía funcional de las soluciones frugales encontradas, (ii) identificar factores críticos de éxito para su implementación, (iii) analizar su grado de escalamiento y replicabilidad, y (iv) proporcionar recomendaciones prácticas para investigadores, diseñadores de tecnología y responsables de políticas públicas. Publicar este trabajo en 2025 resulta particularmente oportuno, al cierre de una década clave en la agenda de los Objetivos de Desarrollo Sostenible, contribuyendo directamente a los ODS 6 (agua limpia y saneamiento), 9 (industria, innovación e infraestructura) y 12 (producción y consumo responsables). Al sistematizar una década de evidencia científica y técnica, esta revisión permitirá visibilizar oportunidades concretas para transformar la gestión del agua industrial desde un enfoque de equidad, eficiencia y sostenibilidad.

II. MATERIALES Y MÉTODOS

A. Estrategia de búsqueda y selección de artículos.

Se definió un conjunto estructurado de términos clave para cada componente del esquema PICOC, los cuales fueron combinados mediante el operador booleano OR, ver Tabla I. Con estos descriptores, se construyó una fórmula de búsqueda que permitió realizar una exploración bibliográfica sistemática en la base de datos Scopus, lo que permitió recuperar un total

de 260 registros iniciales. Los resultados obtenidos fueron filtrados aplicando los criterios de inclusión y exclusión establecidos en la Tabla II, tras la aplicación del protocolo PRISMA para el proceso de selección y depuración de estudios, ver Fig. 1, se obtuvo una muestra final compuesta por 39 artículos científicos que cumplieron con todos los criterios metodológicos, geográficos, conceptuales y temáticos definidos para esta revisión. Aunque la cifra puede parecer limitada, refleja de manera elocuente la fragmentación temática y la escasa sistematización existente en torno a las tecnologías frugales para el tratamiento de aguas industriales en economías emergentes. Esta situación no solo justifica la necesidad del presente estudio, sino que también resalta su aporte original al consolidar y analizar críticamente un campo aún en construcción.

Para el análisis bibliométrico complementario y la visualización de patrones estructurales en la literatura, se utilizó el software VOSviewer, versión 1.6.20, ampliamente reconocido en estudios de ciencia de datos y bibliometría. Con esta herramienta se construyeron mapas de co-ocurrencia de términos clave, permitiendo identificar las relaciones semánticas más frecuentes entre conceptos como 'low-cost technology', 'wastewater treatment' y 'emerging economies'. Asimismo, se analizaron tendencias temporales de publicación (2015–2025), distribución geográfica de los estudios (por país), áreas temáticas predominantes y evolución en el uso de palabras clave, lo cual permitió caracterizar de forma robusta el estado del arte en innovación frugal aplicada al tratamiento de aguas industriales en economías emergentes.

B. Ecuación de búsqueda

Realizadas las interacciones de búsqueda, se obtuvo la siguiente ecuación: (TITLE-ABS-KEY ("emerging economies" OR "developing countries" OR "Latin America" OR africa OR asia-pacific OR "industrial wastewater" OR textile OR mining OR agroindustrial OR manufacturing OR food OR chemical OR metallurgical) AND TITLE-ABS-KEY ("frugal innovation" OR "low-cost technology" OR "affordable solutions" OR bioremediation OR phytoremediation OR biochar OR "constructed wetlands" OR "modular treatment" OR "low-cost adsorbents" OR nano-adsorbents OR "green technologies" OR "in-situ reuse") AND TITLE-ABS-KEY ("effectiveness" OR "contaminant removal" OR scalability OR implementation OR "cost-benefit" OR barriers OR adoption OR feasibility OR "social acceptance") AND TITLE-ABS-KEY ("activated sludge" OR "traditional treatment" OR "conventional filtration" OR "chemical oxidation" OR "traditional wastewater treatment") AND TITLE-ABS-KEY ("waste water" OR wastewater)) AND PUBYEAR > 2014 AND PUBYEAR < 2026 AND (LIMIT-TO (DOCTYPE , "ar")) AND (LIMIT-TO (PUBSTAGE , "final")) AND (LIMIT-TO (OA , "all")).

TABLA I
PALABRAS CLAVE SELECCIONADAS Y SINTAXIS DE BÚSQUEDA

Componente	Descripción	Palabras Clave	Sintaxis de búsqueda
Problema (P)	Estudios realizados en economías emergentes (específicamente países de América Latina, África, y Asia-Pacífico) en plantas o industrias que generan aguas residuales con alto impacto contaminante (textil, minera, agroindustrial, manufacturera, alimentaria, química, metalúrgica, entre otras).	"emerging economies", "developing countries", "Latin America", "Africa", "Asia-Pacific", "industrial wastewater", "textile", "mining", "agroindustrial", "manufacturing", "food industry"	"emerging economies" OR "developing countries" OR "Latin America" OR africa OR asia-pacific OR "industrial wastewater" OR textile OR mining OR agroindustrial OR manufacturing OR food OR chemical OR metallurgical
Intervención (I)	Innovación frugal o soluciones tecnológicas asequibles para tratamiento de aguas industriales (sistemas modulares, biorremediación, fitorremediación, adsorbentes de bajo costo, nanomateriales económicos, tecnologías verdes, reutilización in situ).	"frugal innovation", "low-cost technology", "affordable solutions", "bioremediation", "phytoremediation", "biochar", "constructed wetlands", "modular treatment", "low-cost adsorbents", "nano-adsorbents", "in-situ reuse"	"frugal innovation" OR "low-cost technology" OR "affordable solutions" OR bioremediation OR phytoremediation OR biochar OR "constructed wetlands" OR "modular treatment" OR "low-cost adsorbents" OR nano-adsorbents OR "green technologies" OR "in-situ reuse"
Comparación (C)	Tratamientos convencionales o tradicionales (lodos activados, filtración convencional, oxidación química tradicional), y estudios sin comparador cuando se enfoquen en la evaluación de tecnologías innovadoras por primera vez en contextos específicos.	"activated sludge", "traditional treatment", "conventional filtration", "chemical oxidation", "traditional wastewater treatment"	"activated sludge" OR "traditional treatment" OR "conventional filtration" OR "chemical oxidation" OR "traditional wastewater treatment"
Resultado - Outcome (O)	Efectividad de remoción de contaminantes, escalabilidad tecnológica, costo-beneficio, grado de implementación real en industrias, aceptación social, barreras tecnológicas e institucionales para implementación.	"effectiveness", "contaminant removal efficiency", "scalability", "implementation level", "cost-benefit analysis", "social acceptance", "barriers", "technology adoption", "economic feasibility"	"effectiveness" OR "contaminant removal" OR scalability OR implementation OR "cost-benefit" OR barriers OR adoption OR feasibility OR "social acceptance"
Contexto (C)	Aguas industriales.	"waste water", wastewater	"waste water" OR wastewater

TABLA II
CRITERIOS DE INCLUSIÓN Y EXCLUSIÓN PARA LA BÚSQUEDA DE LITERATURA CIENTÍFICA RELEVANTE

Criterios de Inclusión	Criterios de Exclusión
C.I.1. Los estudios deben abordar Innovación frugal o soluciones tecnológicas asequibles para tratamiento de aguas industriales. C.I.2. Los estudios deben detallar las eficiencias de las tecnologías aplicadas. C.I.3. Los estudios deben reportar factores críticos de implementación.	C.E.1. Artículos publicados anteriores a 2015 y posteriores al 2025. C.E.2. Tipo de publicación no corresponde a artículo. C.E.3. Estado o etapa de publicación distinta a final. C.E.4. Artículos que no permitan un acceso libre.

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A. Taxonomía funcional de las soluciones frugales

La Tabla III presenta una taxonomía funcional que clasifica las tecnologías frugales identificadas para el tratamiento de aguas industriales, con base en su principio operativo, sector de aplicación predominante y atributos de relevancia técnica; en ese sentido, esta clasificación permite observar patrones tecnológicos comunes, así como su grado de adecuación a las condiciones estructurales de las economías emergentes.

En primer lugar, destacan las soluciones basadas en adsorción de bajo costo, como el biochar y otros residuos lignocelulósicos funcionalizados, los cuales han demostrado ser altamente efectivos en la remoción de metales pesados y compuestos orgánicos persistentes [10]; estas tecnologías se alinean con el principio de circularidad al valorizar subproductos agrícolas locales, y se caracterizan por su simplicidad operativa y bajo requerimiento energético, lo que favorece su adopción en sectores como el textil y la minería.

Por su parte, la fitorremediación y los biorreactores anaerobios representan soluciones biológicas que integran eficiencia depurativa con sostenibilidad ecológica. La primera es especialmente adecuada para efluentes agroindustriales y manufactura ligera, debido a su bajo costo de mantenimiento y su capacidad para integrarse en entornos rurales [11]. Los sistemas anaerobios, en cambio, han demostrado rendimientos sobresalientes en la reducción de carga orgánica (DQO y DBO), además de generar biogás como subproducto útil en la industria alimentaria [12], [13].

Un segundo grupo funcional incluye tecnologías modulares y compactas, diseñadas bajo criterios de

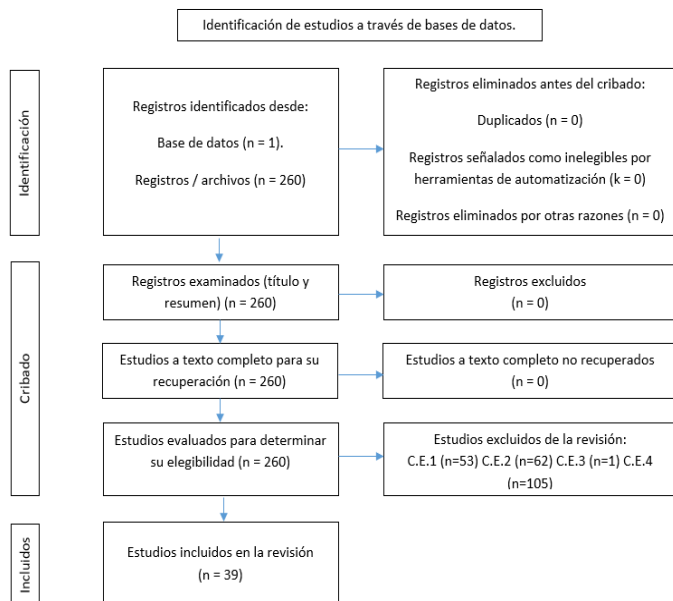


Fig. 1 Resultados de las etapas del proceso de selección bibliográfica.

portabilidad y flexibilidad operativa. Estas soluciones, como las plantas containerizadas con tratamiento físico-químico, permiten una implementación rápida en zonas industriales remotas o de infraestructura limitada [14]; su diseño plug-and-play las convierte en una opción viable para sectores como la minería y la industria química, donde las cargas contaminantes son elevadas y variables.

En cuanto a los procesos de oxidación avanzada simplificada, se observa su uso creciente en aplicaciones textiles y químicas debido a su eficacia frente a compuestos recalcitrantes; sin embargo, su adopción aún enfrenta retos relacionados con el costo de operación y la necesidad de control técnico especializado [15].

En el campo de la nanotecnología frugal, la nanoadsorción económica emerge como un enfoque prometedor para la captura de metales pesados y contaminantes emergentes, aunque su implementación a gran

escala requiere superar barreras asociadas a la regeneración del material y la evaluación de impactos toxicológicos [16].

Finalmente, las estrategias de reúso in situ representan una transición hacia modelos de gestión circular del agua. Estas soluciones, que integran el tratamiento con la reutilización directa en el proceso productivo, reducen la huella hídrica de la industria y mejoran su resiliencia operativa, aunque demandan un monitoreo constante de calidad del efluente tratado [17].

En conjunto, esta taxonomía funcional permite no solo mapear el abanico de tecnologías frugales disponibles, sino también comprender su potencial de implementación en función del tipo de industria, los requisitos técnicos y las restricciones contextuales; por lo tanto, su sistematización constituye un insumo valioso para orientar futuras investigaciones aplicadas y políticas de innovación en gestión hídrica industrial.

TABLA III
 TAXONOMÍA FUNCIONAL DE LAS SOLUCIONES FRUGALES APLICADAS AL TRATAMIENTO DE AGUAS INDUSTRIALES (2015–2025)

Categoría Funcional	Principio Tecnológico	Tipología de Solución Frugal	Sectores Industriales Predominantes	Características Relevantes	Autor
Bioadsorción de bajo costo	Adsorción superficial	Biochar, cenizas volantes, residuos agrícolas funcionalizados (cascarilla, bagazo, cáscaras)	Textil, minería, agroindustria	Alta afinidad por metales pesados; materia prima local; fácil operación	[10]
Fitorremediación	Extracción y acumulación vegetal	Plantas macrófitas en humedales artificiales o flotantes	Agroindustria, alimentos, manufactura	Mantenimiento mínimo; integración paisajística; recuperación parcial de nutrientes	[11]
Biorreactores anaerobios	Biodegradación anaerobia	Digestores UASB, filtros anaerobios horizontales/verticales	Industria alimentaria, textil	Producción de biogás; bajo requerimiento energético; alta remoción de DQO/DBO	[12], [13]
Sistemas modulares compactos	Tratamiento físico-químico	Plantas containerizadas con coagulación/floculación, filtración y desinfección	Minería, química, metalúrgica	Portabilidad; rápida implementación; adaptable a demanda variable	[14]
Oxidación avanzada simplificada	Radicales hidroxilo	Procesos Fenton, ozonización o UV-H ₂ O ₂ en configuración compacta	Textil, química	Alta eficiencia para compuestos recalcitrantes; operación batch o continua	[15]
Nanoadsorción económica	Adsorción química y física	Nanomateriales funcionalizados a partir de residuos (ej. Fe ₃ O ₄ -biochar)	Textil, metalúrgica	Alta capacidad específica; regeneración limitada; potencial de encapsulación de metales	[16]
Reúso in situ	Recirculación localizada	Sistemas cerrados de tratamiento para reutilización en proceso interno	Agroindustria, manufactura	Reduce demanda hídrica externa; mejora eficiencia operativa; requiere control de calidad	[17]

B. Factores críticos en la implementación

La Tabla IV sintetiza los principales factores críticos de éxito (FCE) que condicionan la implementación efectiva de tecnologías frugales en el tratamiento de aguas industriales. Estos factores fueron agrupados en cinco categorías: tecnológica, económica, institucional, social-organizacional y de escalabilidad, reflejando un enfoque integral que reconoce tanto los atributos técnicos de las tecnologías como las condiciones contextuales necesarias para su adopción.

En el ámbito tecnológico, los factores con mayor nivel de incidencia son la simplicidad operativa y la eficiencia depurativa comprobada. La primera permite reducir la dependencia de personal altamente especializado y disminuye los costos de mantenimiento, aspecto crucial en regiones con limitaciones en formación técnica [18]. La segunda asegura el cumplimiento de estándares de calidad del efluente bajo condiciones reales de operación, lo cual es un requisito previo para la aceptación regulatoria e industrial [19]. Aunque con

menor peso relativo, la adaptabilidad a matrices complejas permite la aplicación en sectores diversos, lo cual aumenta su aplicabilidad transversal [20].

Los factores económicos también son determinantes. El bajo costo de implementación y operación obtuvo nivel de incidencia alto, en concordancia con los principios de la innovación frugal, orientados a maximizar el valor funcional con recursos limitados [21]. Por su parte, el uso de insumos locales contribuye a la sostenibilidad logística y al fortalecimiento de economías regionales, aunque su impacto depende de la disponibilidad y calidad de estos materiales [22].

Desde una perspectiva institucional, la alineación con normativas ambientales y la articulación con políticas públicas se identifican como factores de incidencia media. Si bien no garantizan por sí mismos el éxito de la implementación, son facilitadores clave para lograr financiamiento, licenciamiento

y aceptación en programas de reúso o producción limpia [23], [24].

En cuanto a los factores sociales y organizacionales, la capacitación técnica del personal es crítica (alto nivel de incidencia), especialmente para tecnologías descentralizadas que requieren operación autónoma en plantas de menor escala [25]. La aceptación comunitaria e industrial también es relevante, ya que la resistencia al cambio puede obstaculizar la implementación, incluso en casos con alta efectividad técnica [26].

Finalmente, en la categoría de escalabilidad y replicabilidad, se destacan como factores de alto impacto las pruebas piloto exitosas en condiciones reales y el diseño modular o flexible, ambos necesarios para demostrar la

robustez de las soluciones y facilitar su adaptación a diferentes contextos y capacidades operativas [27], [28].

En cuanto al nivel de incidencia de cada factor fue determinado mediante un análisis cualitativo comparativo, basado en la frecuencia con la que cada uno de estos elementos fue mencionado, discutido o evaluado como determinante en los 39 estudios incluidos en la revisión sistemática; en ese sentido, los niveles (alto, medio) no implican una jerarquía absoluta, sino una valoración relativa de su peso en el éxito de implementación en contextos reales. Así, los factores clasificados como alto son aquellos recurrentemente asociados con implementaciones exitosas, mientras que los de nivel medio representan condiciones facilitadoras importantes, aunque no siempre determinantes por sí solas.

TABLA IV
FACTORES CRÍTICOS DE ÉXITO PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE TECNOLOGÍAS FRUGALES EN EL TRATAMIENTO DE AGUAS INDUSTRIALES

Categoría de Factor	Factor Crítico Específico	Justificación Técnica	Nivel de Incidencia	Autor
Tecnológico	Simplicidad operativa	Reduce dependencia de personal especializado; facilita mantenimiento local	Alto	[18]
	Eficiencia depurativa comprobada	Asegura remoción efectiva de contaminantes clave bajo condiciones reales	Alto	[19]
	Adaptabilidad a matrices complejas	Permite aplicar la tecnología en distintos sectores industriales con cargas contaminantes variables	Medio	[20]
Económico	Bajo costo de implementación y operación	Permite adopción en contextos con restricciones presupuestarias	Alto	[21]
	Acceso a insumos o materiales locales	Minimiza la dependencia de importaciones; favorece el aprovisionamiento sostenible	Medio	[22]
Institucional	Alineación con normativas ambientales	Facilita aprobación regulatoria y evita sanciones	Medio	[24]
	Articulación con políticas públicas de reúso y sostenibilidad	Incrementa la posibilidad de cofinanciamiento y replicabilidad	Medio	[23]
Social y organizacional	Capacitación técnica del personal	Fundamental para la operación segura y eficiente de tecnologías descentralizadas	Alto	[25]
	Aceptación comunitaria e industrial	Mejora la disposición de las partes interesadas para implementar nuevas soluciones	Medio	[26]
Escalabilidad y replicabilidad	Pruebas piloto exitosas en condiciones reales	Incrementa la confianza en la tecnología y su potencial de expansión	Alto	[27]
	Diseño modular o flexible	Permite adaptar el sistema a distintos tamaños de planta o requerimientos específicos	Alto	[28]

C. Grado de escalamiento y replicabilidad

La Tabla V presenta un análisis comparativo del grado de escalamiento y la replicabilidad observada de siete tecnologías frugales identificadas como relevantes durante la revisión sistemática. Estos dos criterios son esenciales para evaluar no solo la efectividad técnica de una innovación, sino también su viabilidad de adopción masiva en contextos industriales reales de economías emergentes.

Las tecnologías de bioadsorción de bajo costo, los biorreactores anaerobios, los sistemas modulares compactos y las soluciones de reúso in situ presentan los niveles más altos de replicabilidad observada. En el caso de la bioadsorción, su replicabilidad se explica por la disponibilidad extendida de materiales residuales agrícolas y la simplicidad del proceso, que no requiere infraestructura compleja ni personal altamente capacitado [10]. Sin embargo, su escalamiento se ve limitado por la necesidad de regeneración de los adsorbentes y la variabilidad en su eficacia dependiendo de la matriz de agua residual.

Los sistemas modulares compactos constituyen la alternativa más cercana a un modelo de “tecnología lista para escalar”, con validación en campo, diseño plug-and-play y portabilidad que facilita su adopción en entornos industriales diversos [14]. Estas características explican su clasificación como de alto escalamiento y alta replicabilidad.

Los biorreactores anaerobios, aunque requieren ciertas condiciones de operación estables, como control de temperatura y carga orgánica, han demostrado una notable escalabilidad debido a su estructura modular y su bajo consumo energético [12]; además, su capacidad para generar biogás como subproducto aporta un valor agregado que favorece su replicación en industrias con residuos orgánicos disponibles.

Por el contrario, tecnologías como la oxidación avanzada simplificada y la nanoadsorción económica aún muestran niveles bajos de escalamiento y replicabilidad. Si bien ofrecen una alta eficiencia depurativa en condiciones de laboratorio, su implementación en condiciones reales es restringida por factores técnicos y económicos. La oxidación avanzada

requiere reactivos y equipos especializados, lo que incrementa los costos operativos y reduce su viabilidad en pequeñas industrias [15]. En el caso de los nanomateriales, la escasa validación a escala piloto y las preocupaciones sobre su impacto ambiental limitan su adopción generalizada [16].

La fitorremediación ocupa un lugar intermedio. Aunque su escalamiento es bajo, principalmente debido al tiempo requerido para la remoción de contaminantes y su sensibilidad a factores climáticos, su replicabilidad es moderada en entornos rurales o de baja carga contaminante, gracias a su bajo costo y su integración con el paisaje [11].

Criterios de evaluación

El nivel de escalamiento fue determinado considerando el grado de validación empírica de cada tecnología, clasificado como: Bajo: limitada a estudios de laboratorio; Medio:

validación en plantas piloto o en condiciones controladas reales; Alto: implementación a escala industrial documentada.

Por su parte, la replicabilidad observada se evaluó a partir del número y diversidad de contextos (geográficos, sectoriales o institucionales) en los cuales se ha aplicado exitosamente una tecnología. Se clasificó como: Baja: limitada a un único caso o sector; Media: replicación en más de un estudio con similares resultados; Alta: replicación documentada en distintos sectores y regiones, con evidencia de sostenibilidad operativa. Ambas dimensiones, analizadas de forma conjunta, permiten identificar tecnologías con un perfil robusto para su despliegue a gran escala en contextos con restricciones técnicas y presupuestarias, lo cual es clave para orientar políticas públicas, inversiones tecnológicas y agendas de investigación aplicada.

TABLA V
 GRADO DE ESCALAMIENTO Y REPLICABILIDAD DE LAS TECNOLOGÍAS FRUGALES APLICADAS AL TRATAMIENTO DE AGUAS INDUSTRIALES

Tecnología Frugal	Nivel de Escalamiento	Replicabilidad Observada	Condiciones que favorecen la replicación	Restricciones Identificadas	Autor
Bioadsorción de bajo costo	Medio	Alta	Disponibilidad local de residuos, simplicidad operativa	Necesidad de regeneración; variabilidad de eficacia por matriz	[10]
Fitorremediación	Bajo	Media	Entornos rurales, clima favorable, bajo costo de mantenimiento	Tiempo de tratamiento prolongado; limitada a metales o nutrientes	[11]
Biorreactores anaerobios	Medio-Alto	Alta	Escalables modularmente; eficiencia energética	Control estricto de temperatura y carga orgánica	[12], [13]
Sistemas modulares compactos	Alto	Alta	Portabilidad; diseño plug-and-play	Costo inicial moderado; requiere mantenimiento periódico especializado	[14]
Oxidación avanzada simplificada	Bajo-Medio	Media	Alta eficiencia para contaminantes específicos	Costos operativos elevados; complejidad técnica	[15]
Nanoadsorción económica	Bajo	Baja-Media	Potencial técnico elevado; buena eficiencia en laboratorio	Escasa validación en campo; toxicidad potencial de nanomateriales	[16]
Reúso in situ	Medio	Alta	Alta integración con procesos internos industriales	Normativa poco clara; requiere monitoreo continuo de calidad	[17]

D. Recomendaciones prácticas

La Tabla VI presenta un conjunto articulado de recomendaciones dirigidas a tres actores clave, investigadores, diseñadores de tecnología y responsables de políticas públicas, cuyo rol es determinante en la implementación exitosa de innovaciones frugales en el tratamiento de aguas industriales. Este enfoque tripartito busca superar las barreras técnicas, económicas e institucionales que históricamente han limitado la adopción y escalamiento de soluciones sostenibles en contextos de recursos restringidos.

Para el ámbito académico, se resalta la necesidad de priorizar estudios aplicados en condiciones reales, como plantas piloto o entornos industriales operativos [29], [30]. Esta recomendación responde a la brecha entre resultados obtenidos en laboratorio y desempeño en campo, lo cual dificulta la validación externa y la toma de decisiones informada por parte de usuarios finales.

Asimismo, se recomienda incorporar metodologías de análisis de ciclo de vida (ACV) y evaluaciones costo-beneficio, herramientas que permiten cuantificar el impacto ambiental y la viabilidad económica de cada alternativa tecnológica [31]. Esto proporciona un marco comparativo robusto frente a soluciones convencionales. Finalmente, se sugiere investigar sinergias entre estas tecnologías y fuentes de energía renovable (como solar o biogás), lo cual resulta

estratégico para sistemas descentralizados con acceso limitado a la red eléctrica [32].

En el campo del diseño tecnológico, la modularidad se perfila como un atributo crítico. Sistemas compactos y escalables permiten responder a demandas variables de caudal y concentración contaminante, además de facilitar el mantenimiento y la replicabilidad [33], [34]. Esta flexibilidad es clave para contextos industriales heterogéneos, especialmente en economías emergentes donde la infraestructura de tratamiento es limitada.

También se destaca el uso estratégico de materiales locales y de bajo costo, no solo por sus beneficios logísticos y económicos, sino por su potencial de promover cadenas de suministro circulares y desarrollo regional [35]. La mantenibilidad con bajo requerimiento técnico constituye otro principio frugal esencial: los sistemas deben poder ser operados y mantenidos por personal no especializado, sin comprometer su desempeño [36].

Desde una perspectiva institucional, se hace hincapié en la necesidad de clarificar y actualizar los marcos regulatorios relacionados con tecnologías descentralizadas y el reúso de aguas residuales tratadas. Esto no solo proporciona certidumbre jurídica, sino que elimina barreras normativas a la innovación sostenible [37].

Asimismo, se recomienda promover políticas activas de cofinanciamiento de pruebas piloto con enfoque territorial. Estas iniciativas permiten generar evidencia local y fomentar ecosistemas de innovación basados en las capacidades

regionales [38]. Finalmente, los incentivos fiscales o subsidios dirigidos a tecnologías frugales pueden ser decisivos para acelerar la adopción inicial, especialmente en sectores con márgenes de inversión limitados [39].

TABLA VI
 RECOMENDACIONES PRÁCTICAS PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE INNOVACIONES FRUGALES EN EL TRATAMIENTO DE AGUAS INDUSTRIALES

Actor Clave	Recomendación Estratégica	Justificación Técnica y Operativa	Autor
Investigadores	Priorizar estudios en condiciones reales (plantas piloto o industriales).	Permite validar el rendimiento bajo variables operativas y contextos complejos, facilitando el escalamiento.	[29], [30]
	Incorporar metodologías de análisis de ciclo de vida y costo-beneficio.	Aporta evidencia cuantitativa sobre la sostenibilidad técnica y económica de la tecnología en el tiempo.	[31]
	Investigar sinergias entre tecnologías frugales y fuentes de energía renovable.	Optimiza el desempeño en regiones con restricciones energéticas, mejorando la autonomía operativa.	[32]
Diseñadores de tecnología	Diseñar sistemas modulares y adaptables a distintas escalas y cargas contaminantes.	Incrementa la flexibilidad de uso y facilita su replicación en sectores con variabilidad en el caudal o composición.	[34], [40]
	Usar materiales locales y de bajo costo como insumos tecnológicos.	Reduce los costos logísticos, promueve la economía circular y aumenta la viabilidad en entornos rurales o aislados.	[35]
	Garantizar mantenibilidad con bajo requerimiento técnico.	Facilita la operación autónoma por personal no especializado y disminuye los costos de mantenimiento correctivo.	[36]
Responsables de políticas públicas	Establecer marcos regulatorios claros para tecnologías descentralizadas y de reúso.	Brinda seguridad jurídica a las industrias e incentiva la adopción de soluciones sostenibles.	[37]
	Financiar pruebas piloto y mecanismos de escalamiento con enfoque territorial.	Acelera la implementación efectiva, articulando actores regionales e incentivando la innovación local.	[38]
	Promover incentivos fiscales o subvenciones para adopción de tecnologías frugales.	Compensa las barreras económicas iniciales y fomenta una transición tecnológica inclusiva.	[39]

E. Comparación técnica de tecnologías frugales

La Tabla VII complementa y fortalece el análisis integral de esta revisión sistemática al ofrecer una comparación técnica detallada del rendimiento de las principales tecnologías frugales aplicadas al tratamiento de aguas industriales. Los resultados muestran que, si bien la eficiencia de remoción varía según la tecnología y el tipo de contaminante tratado, existen múltiples soluciones frugales con capacidades competitivas frente a alternativas convencionales, incluso en contextos de recursos limitados [11], [15], [16].

Tecnologías como la oxidación avanzada simplificada, la nanoadsorción económica y ciertos procesos de bioadsorción basados en residuos agrícolas destacan por alcanzar eficiencias superiores al 90 % para compuestos recalcitrantes, metales pesados y colorantes [10], [28], [41]. Sin embargo, estas opciones suelen requerir condiciones operativas controladas (pH, temperatura, dosis de oxidantes o nanopartículas) y presentan desafíos en cuanto a costos o validación a gran escala [22], [42].

Por el contrario, tecnologías como la fitorremediación y los sistemas de reúso in situ con filtración y desinfección presentan eficiencias más moderadas (40–90 %), pero destacan por su bajo costo de implementación, facilidad de operación y adaptabilidad a regiones rurales o con infraestructura limitada [17], [21], [43]. Estas características las posicionan como soluciones viables para descentralización del tratamiento hídrico.

La inclusión de parámetros operacionales clave en la tabla, como el pH óptimo, dosis, tiempos de retención hidráulica o tipo de contaminante tratado, permite identificar las condiciones que optimizan el rendimiento, aportando una base técnico-comparativa útil para nuevos estudios o diseños tecnológicos [12], [14], [44]. Asimismo, la vinculación explícita con sectores industriales específicos (textil, minero,

agroindustrial, manufacturero) facilita la toma de decisiones para usuarios finales y formuladores de políticas públicas.

En conjunto, esta síntesis técnica evidencia que el tratamiento frugal de aguas industriales no implica comprometer eficacia, sino más bien adaptar soluciones eficientes a limitaciones reales de contexto. Así, la Tabla VI no solo cumple con el objetivo de evaluar el rendimiento técnico de las tecnologías, sino que aporta valor estratégico para orientar futuras investigaciones aplicadas, intervenciones regulatorias e innovación tecnológica con criterios de sostenibilidad y equidad [23], [24], [25].

F. Estudios Bibliométricos

La Fig. 2 evidencia una tendencia creciente en la producción científica sobre tecnologías frugales para el tratamiento de aguas industriales en economías emergentes durante el periodo 2015–2025, con un aumento sostenido a partir de 2018 y un pico significativo en 2024 (n = 37 publicaciones), lo que refleja un interés académico cada vez más estructurado en el tema. Este patrón de crecimiento puede atribuirse a la presión internacional por soluciones sostenibles y asequibles frente a la crisis hídrica global, la necesidad de innovación en contextos de recursos limitados y el impulso generado por los Objetivos de Desarrollo Sostenible, en especial los ODS 6, 9 y 12 [21]. Asimismo, la concentración de estudios recientes coincide con el auge de enfoques como la economía circular, el reúso de aguas y las innovaciones basadas en materiales locales de bajo costo, lo que ha favorecido el desarrollo de tecnologías adaptativas con alta replicabilidad [47]. En este marco, la presente revisión resulta particularmente oportuna al sistematizar la evidencia científica generada durante una década crítica para la transición hacia sistemas de tratamiento más equitativos, eficientes y sostenibles.

TABLA VII
COMPARACIÓN TÉCNICA DE TECNOLOGÍAS FRUGALES SEGÚN TIPO DE CONTAMINANTE, EFICIENCIA DE REMOCIÓN Y APLICACIÓN INDUSTRIAL

Tecnología Frugal	Tipo de Contaminante Principal	Rango de Remoción Reportado (%)	Parámetros Operacionales Clave	Sectores Industriales Aplicados	Observaciones Técnicas Relevantes	Autores
Bioadsorción (residuos agrícolas, biochar)	Metales pesados (Pb, Cd, As, Cr); color	60–98%	pH 5–7; dosis 5–20 g/L; tiempo contacto 30–120 min	Textil, minero, curtiembre	Alta disponibilidad de material; regeneración limitada	[10], [11], [44]
Fitorremediación (plantas acuáticas, macrofitas)	Nutrientes (N, P); metales traza	40–85%	Tiempo: semanas a meses; área requerida alta	Agroindustria, efluentes dispersos	Requiere clima estable y monitoreo biológico continuo	[34], [45], [46]
Biorreactores anaerobios de flujo ascendente	DBOs, DQO, sólidos disueltos, aceites	75–95%	T 30–37°C; HRT: 8–24 h; Carga orgánica moderada	Agroindustria, alimentaria, textil	Genera biogás; sensible a variaciones de carga/pH	[24], [39], [40]
Oxidación avanzada simplificada (Fenton, ozono)	Compuestos recalcitrantes, color, fenoles	70–99%	pH 3–5; [H ₂ O ₂]: 10–100 mg/L; T: 20–50°C	Textil, química, farmacéutica	Alta eficiencia, pero requiere control estricto y energía	[11], [15], [36]
Nanoadsorción económica (Fe₃O₄, ZnO, TiO₂)	Metales pesados; contaminantes emergentes	80–99%	pH 5–8; dosis < 1 g/L; tiempo < 60 min	Electrónica, galvanoplastia	Resultados en laboratorio; limitada validación en campo	[10], [11], [22]
Sistemas modulares compactos (físico-químico mixto)	Turbidez, DBO, metales	70–90%	Automatizados; caudal 0.5–5 m ³ /h	Minería artesanal, industria rural	Versátiles y móviles; alto potencial de escalamiento	[14], [18], [24]
Reúso in situ con filtración + desinfección	Turbidez, coliformes, materia orgánica	60–90%	Filtración + cloración/UV; monitoreo continuo	Textil, manufactura ligera	Reduce uso hídrico total; depende de control de calidad	[17], [19], [21]

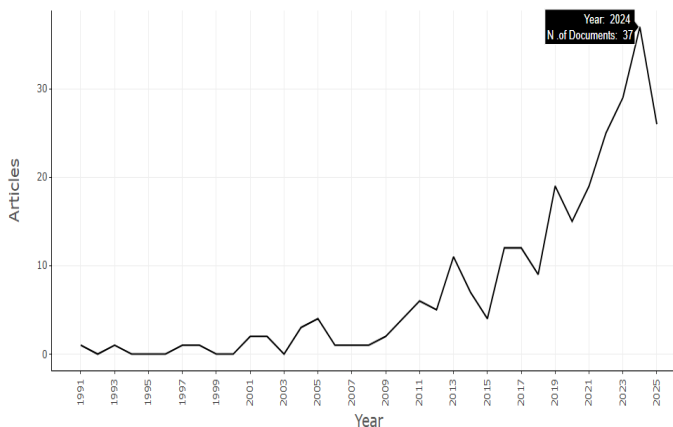


Fig. 2 Publicaciones por año.

La Fig. 3 revela patrones de co-ocurrencia y evolución de palabras clave que reflejan la consolidación del campo de estudio en torno a tecnologías frugales para el tratamiento de aguas industriales. Se observa una convergencia creciente entre términos como bioadsorption, low-cost materials, wastewater reuse y developing countries, lo que indica una orientación marcada hacia soluciones asequibles, sostenibles y adaptadas a contextos con limitaciones estructurales [48]. La emergencia reciente de términos vinculados a escalabilidad, economía circular y sistemas modulares sugiere una transición del enfoque exploratorio hacia propuestas aplicadas con potencial de replicación y validación en campo [49]. Estos hallazgos refuerzan la pertinencia del presente estudio como esfuerzo integrador de una agenda de investigación fragmentada pero en expansión.

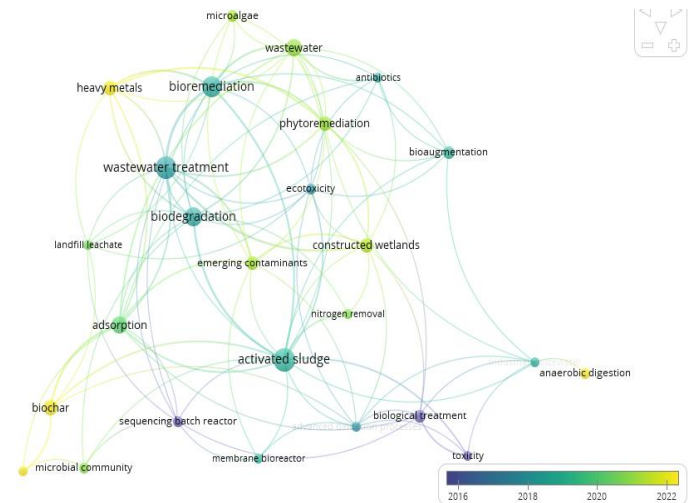


Fig. 3 Co-ocurrencia y evolución de las palabras clave.

La Fig. 4 muestra que los países con mayor producción científica en tecnologías frugales para tratamiento de aguas industriales durante el periodo analizado son China (n = 74) e India (n = 47), seguidos por Estados Unidos y algunas economías desarrolladas. Este patrón sugiere una doble tendencia: por un lado, un creciente liderazgo de países asiáticos en soluciones tecnológicas de bajo costo; y por otro, un interés desde economías consolidadas en el desarrollo de enfoques adaptativos y sostenibles aplicables a contextos emergentes [11]. La presencia significativa de naciones como Polonia, España o Canadá refuerza la idea de un campo de investigación globalizado, aunque aún con déficits notables en publicaciones provenientes directamente de América Latina y

África, regiones foco del presente estudio [23], [24]. Esta asimetría confirma la necesidad de fomentar más investigación contextualizada desde el sur global.

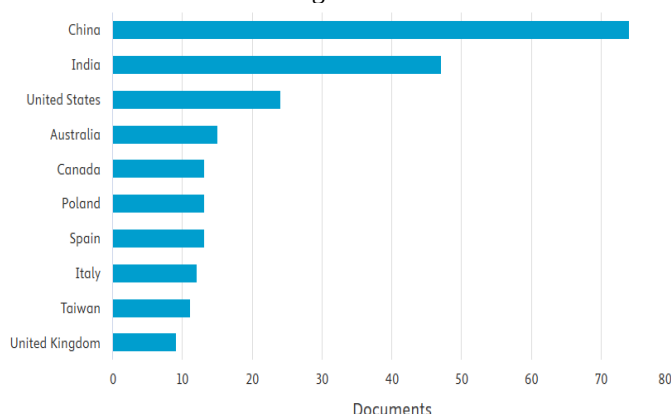


Fig. 4 Publicaciones por país.

IV. CONCLUSIONES

Esta revisión sistemática constituye el primer esfuerzo integral por identificar, clasificar y evaluar tecnologías frugales aplicadas al tratamiento de aguas industriales en economías emergentes, abordando un vacío crítico en la literatura científica del periodo 2015–2025.

Se identificaron 39 tecnologías con aplicación comprobada en sectores como el textil, minero y agroindustrial, clasificadas funcionalmente según su principio operativo. Destacan soluciones como la bioadsorción, fitorremediación y oxidación avanzada, con eficiencias de remoción entre 60 % y 99 %, dependiendo del tipo de contaminante y las condiciones operativas.

El análisis de factores críticos de éxito evidenció que la simplicidad operativa, el uso de materiales locales y la validación técnica son determinantes para la adopción de estas tecnologías. Sin embargo, persisten barreras como la escasa articulación regulatoria, limitaciones presupuestales y ausencia de mecanismos de monitoreo post-implementación.

Aunque muchas de las tecnologías analizadas muestran un alto potencial de replicabilidad, su grado de escalamiento aún es limitado. Aquellas soluciones con mayor madurez comparten atributos como diseño modular, bajo consumo energético y adaptabilidad normativa.

El análisis bibliométrico evidencia una expansión reciente del campo, con mayor intensidad desde 2018 y concentración temática en tecnologías de bajo costo y reúso de aguas. China e India lideran la producción científica, mientras que América Latina y África muestran una participación limitada, lo que subraya la necesidad de fortalecer capacidades locales en innovación frugal.

Finalmente, se presentan recomendaciones prácticas diferenciadas para investigadores, diseñadores tecnológicos y responsables de políticas públicas, orientadas a viabilizar la adopción de tecnologías frugales alineadas con los ODS 6, 9 y

12, desde una perspectiva de equidad, eficiencia y sostenibilidad.

REFERENCIAS

- [1] UNESCO, «The United Nations world water development report 2020: water and climate change.» Accedido: 18 de junio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000372985.locale=en>
- [2] UNESCO, «The United Nations World Water Development Report 2023: partnerships and cooperation for water.» Accedido: 18 de junio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000384655>
- [3] N. Radjou, J. Prabhu, y T. Economist, *Frugal Innovation: How to do more with less*. PublicAffairs, 2015.
- [4] G. G. Reis, M. S. Heidemann, H. A. A. Goes, y C. F. M. Molento, «Can radical innovation mitigate environmental and animal welfare misconduct in global value chains? The case of cell-based tuna», *Technol. Forecast. Soc. Change*, vol. 169, 2021, doi: 10.1016/j.techfore.2021.120845.
- [5] A. Sala, S. Vittone, R. Barrena, A. Sánchez, y A. Artola, «Scanning agro-industrial wastes as substrates for fungal biopesticide production: Use of *Beauveria bassiana* and *Trichoderma harzianum* in solid-state fermentation», *J. Environ. Manage.*, vol. 295, 2021, doi: 10.1016/j.jenvman.2021.113113.
- [6] R. Yang *et al.*, «Feasibility analysis of treating recycled rock dust as an environmentally friendly alternative material in Ultra-High Performance Concrete (UHPC)», *J. Clean. Prod.*, vol. 258, 2020, doi: 10.1016/j.jclepro.2020.120673.
- [7] S. Khan, M. T. Zeyad, y A. Malik, «Genotoxicity assessment of textile waste contaminated soil and characterization of textile dye degradation by a novel indigenous bacterium *Ochrobactrum intermedium* BS39», *Chemosphere*, vol. 299, 2022, doi: 10.1016/j.chemosphere.2022.134082.
- [8] M. M. Sabzehmeidani, S. Mahnaee, M. Ghaedi, H. Heidari, y V. A. L. Roy, «Carbon based materials: A review of adsorbents for inorganic and organic compounds», *Mater. Adv.*, vol. 2, n.º 2, pp. 598-627, 2021, doi: 10.1039/d0ma00087f.
- [9] X. Wang, J. Jiang, y W. Gao, «Reviewing textile wastewater produced by industries: characteristics, environmental impacts, and treatment strategies», *Water Sci. Technol.*, vol. 85, n.º 7, pp. 2076-2096, 2022, doi: 10.2166/wst.2022.088.
- [10] S.-W. C. Chien, Y.-P. Li, y C.-C. Liu, «Permeable reactive barrier of waste sludge from wine processing utilized to block a metallic mixture plume in a simulated aquifer», *Water Sci. Technol.*, vol. 84, n.º 9, pp. 2472-2485, 2021, doi: 10.2166/wst.2021.440.
- [11] S. Kamble, A. Singh, A. Kazmi, y M. Starkl, «Environmental and economic performance evaluation of municipal wastewater treatment plants in India: A life cycle approach», *Water Sci. Technol.*, vol. 79, n.º 6, pp. 1102-1112, 2019, doi: 10.2166/wst.2019.110.
- [12] Z. Kong *et al.*, «Carbon-neutral treatment of N, N-dimethylformamide-containing industrial wastewater by anaerobic membrane bioreactor (AnMBR): Bio-energy recovery and CO₂ emission reduction», *Bioresour. Technol.*, vol. 358, 2022, doi: 10.1016/j.biortech.2022.127396.
- [13] J. Michalska, I. Greń, J. Zur, D. Wasilkowski, y A. Mroziak, «Impact of the biological cotreatment of the Kalina pond leachate on laboratory sequencing batch reactor operation and activated sludge quality», *Water*, vol. 11, n.º 8, 2019, doi: 10.3390/w11081539.
- [14] P. Mahamallik y R. Swain, «A mini-review on arsenic remediation techniques from water and future trends», *Water Sci. Technol.*, vol. 87, n.º 12, pp. 3108-3123, 2023, doi: 10.2166/wst.2023.190.
- [15] D. Li *et al.*, «Customizable Three-Dimensional Printed Zerovalent Iron: An Efficient and Reusable Fenton-like Reagent for Florfenicol Degradation», *Environ. Sci. Technol.*, vol. 58, n.º 43, pp. 19501-19513, 2024, doi: 10.1021/acs.est.4c06536.
- [16] A. H. Jagaba *et al.*, «Biochar-based geopolymer nanocomposite for COD and phenol removal from agro-industrial biorefinery wastewater: Kinetic modelling, microbial community, and optimization by response surface methodology», *Chemosphere*, vol. 339, 2023, doi: 10.1016/j.chemosphere.2023.139620.
- [17] L. Rendón-Castrillón, M. Ramírez-Carmona, C. Ocampo-López, F. González-López, B. Cuatras-Urbe, y J. A. Mendoza-Roca, «Treatment of

- water from the textile industry contaminated with indigo dye: A hybrid approach combining bioremediation and nanofiltration for sustainable reuse», *Case. Stud. Chem. Environ. Eng.*, vol. 8, 2023, doi: 10.1016/j.csee.2023.100498.
- [18] V. Tigrini *et al.*, «Tannery mixed liquors from an ecotoxicological and mycological point of view: Risks vs potential biodegradation application», *Sci. Total Environ.*, vol. 627, pp. 835-843, 2018, doi: 10.1016/j.scitotenv.2018.01.240.
- [19] M. L. Barrios-Hernández *et al.*, «Removal of bacterial and viral indicator organisms in full-scale aerobic granular sludge and conventional activated sludge systems», *Water. Res.*, vol. 6, 2020, doi: 10.1016/j.wroa.2019.100040.
- [20] A. H. Jagaba *et al.*, «Waste Derived Biocomposite for Simultaneous Biosorption of Organic Matter and Nutrients from Green Straw Biorefinery Effluent in Continuous Mode Activated Sludge Systems», *Process.*, vol. 10, n.º 11, 2022, doi: 10.3390/pr10112262.
- [21] T. Lam, X. Yang, S. J. Ergas, y M. E. Arias, «Feasibility of landfill leachate reuse through adsorbent-enhanced constructed wetlands and ultrafiltration-reverse osmosis», *Desalination*, vol. 545, 2023, doi: 10.1016/j.desal.2022.116163.
- [22] A. Hota, S. Gopal Krishna Patro, A. J. Obaid, S. Khatak, y R. Kumar, «Constructed wetland challenges for the treatment of industrial wastewater in smart cities: A sensitive solution», *Sustainable Energy Technol. Assess.*, vol. 55, 2023, doi: 10.1016/j.seta.2022.102967.
- [23] A. Anders, H. Cakir, F. Ohnemüller, H. Platen, U. Kornhaas, y H. Weigand, «Phosphorus recovery from municipal sewage sludge using bio-based re-dissolution with acetate and precipitation as calcium phosphate on dolomite seed grains – A pilot-scale study under real-world conditions», *Process Saf. Environ. Prot.*, vol. 195, 2025, doi: 10.1016/j.psep.2024.12.088.
- [24] A. Grosser, E. Neczaj, M. Madela, y P. Celary, «Ultrasound-assisted treatment of landfill leachate in a sequencing batch reactor», *Water*, vol. 11, n.º 3, 2019, doi: 10.3390/w11030516.
- [25] A. Dzionek *et al.*, «The Influence of Activated Sludge Augmentation on Its Ability to Degrade Paracetamol», *Molecules*, vol. 29, n.º 19, 2024, doi: 10.3390/molecules29194520.
- [26] W. V. Macêdo *et al.*, «Aerobic biological treatment of hydrothermal liquefaction process water of sewage sludge: Nitrification inhibition and removal of hazardous pollutants», *Water Res.*, vol. 277, 2025, doi: 10.1016/j.watres.2025.123351.
- [27] F. Meinel, A. Sperlich, y M. Jekel, «Pilot-scale study of powdered activated carbon recirculation for micropollutant removal», *Water Sci. Technol.*, vol. 74, n.º 4, pp. 927-934, 2016, doi: 10.2166/wst.2016.273.
- [28] S. Minaei, K. Zoroufchi Benis, K. N. McPhedran, y J. Soltan, «Adsorption of sulfamethoxazole and lincomycin from single and binary aqueous systems using acid-modified biochar from activated sludge biomass», *J. Environ. Manage.*, vol. 358, 2024, doi: 10.1016/j.jenvman.2024.120742.
- [29] T. Blach y M. Engelhart, «Limitations of treating hydrothermal carbonization process water in a membrane bioreactor and a sequencing batch reactor on pilot scale», *J. Environ. Chem. Eng.*, vol. 13, n.º 1, 2025, doi: 10.1016/j.jece.2024.115304.
- [30] M. De Carluccio, J. Isidro, J. Fernández-Cascán, C. Saez, M. A. Rodrigo, y L. Rizzo, «Combination of electro-oxidation and biological processes for lindane landfill leachate treatment: simultaneous degradation of contaminants and biological reduction of electro-generated chloride-derived by-products», *J. Hazard. Mater.*, vol. 479, 2024, doi: 10.1016/j.jhazmat.2024.135765.
- [31] J. Nivala, S. Kahl, J. Boog, M. van Afferden, T. Reemtsma, y R. A. Müller, «Dynamics of emerging organic contaminant removal in conventional and intensified subsurface flow treatment wetlands», *Sci. Total Environ.*, vol. 649, pp. 1144-1156, 2019, doi: 10.1016/j.scitotenv.2018.08.339.
- [32] C. Niu *et al.*, «Bioreduction of chromate in a syngas-based membrane biofilm reactor», *J. Hazard. Mater.*, vol. 470, 2024, doi: 10.1016/j.jhazmat.2024.134195.
- [33] W. Dabrowski, B. Karolinczak, P. Malinowski, y D. Boruszko, «Modeling of pollutants removal in subsurface vertical flow and horizontal flow constructed wetlands», *Water*, vol. 11, n.º 1, 2019, doi: 10.3390/w11010180.
- [34] I. B. Paśmionka *et al.*, «Toxic effect of ammonium nitrogen on the nitrification process and acclimatisation of nitrifying bacteria to high concentrations of $\text{NH}_4\text{-N}$ in wastewater», *Energies*, vol. 14, n.º 17, 2021, doi: 10.3390/en14175329.
- [35] D. Pinelli *et al.*, «Comparative Preliminary Evaluation of 2 In-stream Water Treatment Technologies for the Agricultural Reuse of Drainage Water in the Nile Delta», *Integr. Environ. assess. manage.*, vol. 16, n.º 6, pp. 920-933, 2020, doi: 10.1002/ieam.4277.
- [36] A. Pistocchi *et al.*, «European scale assessment of the potential of ozonation and activated carbon treatment to reduce micropollutant emissions with wastewater», *Sci. Total Environ.*, vol. 848, 2022, doi: 10.1016/j.scitotenv.2022.157124.
- [37] A. N. Stiegler, A. R. Cecchetti, R. C. Scholes, y D. L. Sedlak, «Persistent Trace Organic Contaminants Are Transformed Rapidly under Sulfate- and Fe(III)-Reducing Conditions in a Nature-Based Subsurface Water Treatment System», *Environ. Sci. Technol.*, vol. 57, n.º 43, pp. 16616-16627, 2023, doi: 10.1021/acs.est.3c03719.
- [38] A. L. Tasca y A. Fletcher, «State of the art of the environmental behaviour and removal techniques of the endocrine disruptor 3,4-dichloroaniline», *J. Environ. Sci. Health Part A Toxic Hazard. Subst. Environ. Eng.*, vol. 53, n.º 3, pp. 260-270, 2018, doi: 10.1080/10934529.2017.1394701.
- [39] M. Zaghdoudi *et al.*, «Direct and indirect electrochemical reduction prior to a biological treatment for dimetridazole removal», *J. Hazard. Mater.*, vol. 335, pp. 10-17, 2017, doi: 10.1016/j.jhazmat.2017.04.028.
- [40] W. Dabrowski, B. Karolinczak, P. Malinowski, y D. Boruszko, «Modeling of pollutants removal in subsurface vertical flow and horizontal flow constructed wetlands», *Water*, vol. 11, n.º 1, 2019, doi: 10.3390/w11010180.
- [41] A. Iliná, J. L. Martínez-Hernández, E. P. Segura-Ceniceros, J. A. Villarreal-Sánchez, y K. M. Gregorio-Jáuregui, «Biosorción of arsenic in material derived from maracuya», *Revista Internacional de Contaminacion Ambiental*, vol. 25, n.º 4, pp. 201-216, 2009.
- [42] L. P. Romero, L. M. M. M. Mamani, y K. E. F. Choquemoroco, «Evaluación de cáscaras de maracuyá y semillas de guayaba como bioadsorbentes para la remoción de Arsénico (III) en aguas superficiales», *Scienceevolution*, vol. 4, n.º 12, Art. n.º 12, dic. 2024, doi: 10.61325/ser.v4i12.139.
- [43] K. R. Saldaña López, «Evaluación del porcentaje de bioadsorción del arsénico en agua potable de Sama Inlán -Tacna utilizando cáscara de maracuyá (*Passiflora edulis*) en polvo», *Universidad Privada de Tacna*, 2020, Accedido: 20 de junio de 2025. [En línea]. Disponible en: <http://repositorio.upd.edu.pe/handle/20.500.12969/1708>
- [44] L. L. Cabral *et al.*, «Food dye adsorption in single and ternary systems by the novel passion fruit peel biochar adsorbent», *Food Chemistry*, vol. 464, 2025, doi: 10.1016/j.foodchem.2024.141592.
- [45] Q. C. Bui, N. N. M. Phan, T. V. Nguyen, C.-C. Yang, K.-F. Chen, y Y.-P. Tsai, «Integrating Suspended Sludge and Fixed Film into a Biological Wastewater Treatment System to Enhance Nitrogen Removal», *Process.*, vol. 12, n.º 10, 2024, doi: 10.3390/pr12102131.
- [46] A. Mojiri *et al.*, «Contaminant Removal from Wastewater by Microalgal Photobioreactors and Modeling by Artificial Neural Network», *Water*, vol. 14, n.º 24, 2022, doi: 10.3390/w14244046.
- [47] J. Fdil, X. Zhou, A. Ahmali, A. El Alaoui El Fels, L. Mandi, y N. Ouazzani, «Effect of Alternating Well Water with Treated Wastewater Irrigation on Soil and Koroneiki Olive Trees», *Water*, vol. 15, n.º 16, 2023, doi: 10.3390/w15162988.
- [48] M. Kamaz, S. M. Jones, X. Qian, M. J. Watts, W. Zhang, y S. R. Wickramasinghe, «Atrazine removal from municipal wastewater using a membrane bioreactor», *Int. J. Environ. Res. Public Health*, vol. 17, n.º 7, 2020, doi: 10.3390/ijerph17072567.
- [49] D. Inoue, K. Hisada, y M. Ike, «Effectiveness of tetrahydrofuran at enhancing the 1,4-dioxane degradation ability of activated sludge lacking prior exposure to 1,4-dioxane», *Water Sci. Technol.*, vol. 86, n.º 7, pp. 1707-1718, 2022, doi: 10.2166/wst.2022.296.