

**CONTAMINANTES EMERGENTES EN AGUAS RESIDUALES: TECNOLOGÍAS DE TRATAMIENTO Y REMOCIÓN. UNA REVISIÓN SISTEMÁTICA**  
**EMERGING CONTAMINANTS IN WASTEWATER: TREATMENT AND REMOVAL TECHNOLOGIES. A SYSTEMATIC REVIEW**

**Autor:** <sup>1</sup>Enrique Santiago Flores Tarqui, <sup>2</sup>Nayomy Keyt Mamani Padilla, <sup>3</sup>José Rudy Mamani Choquecota

<sup>1</sup>ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0001-0063-0235>

<sup>2</sup>ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-5391-4581>

<sup>3</sup>ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0007-2154-6247>

<sup>1</sup>E-mail de contacto: [esflorest@unjbg.edu.pe](mailto:esflorest@unjbg.edu.pe)

<sup>2</sup>E-mail de contacto: [jmrchoquecota@unjbg.edu.pe](mailto:jmrchoquecota@unjbg.edu.pe)

<sup>3</sup>E-mail de contacto: [nmamanip@unjbg.edu.pe](mailto:nmamanip@unjbg.edu.pe)

Afiliación:<sup>1\*2\*3</sup>Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann, (Perú).

Artículo recibido: 1 de Julio del 2026.

Artículo revisado: 3 de Julio del 2026.

Artículo aprobado: 3 de Julio del 2026.

<sup>1</sup>Estudiante de Ingeniería Ambiental de la Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann, (Perú).

<sup>2</sup>Estudiante de Ingeniería Ambiental de la Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann, (Perú).

<sup>3</sup>Estudiante de Ingeniería Ambiental de la Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann, (Perú).

### Resumen

El objetivo del presente estudio fue analizar de manera sistemática las tecnologías de tratamiento y remoción de contaminantes emergentes en aguas residuales reportadas en la literatura científica publicada entre 2021 y 2026. El alcance de la revisión abarcó procesos de oxidación avanzada, biorreactores de membrana, humedales artificiales, nanomateriales, biodegradación microbiana y tecnologías de monitoreo. La metodología siguió la declaración Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses 2020, realizando búsquedas en ocho bases de datos internacionales: DOAJ, ScienceDirect, MDPI, Springer, RSC, IWA Publishing, ResearchGate y CONCYTEC. De 78 registros identificados, 7 fueron excluidos por no cumplir los criterios de inclusión, obteniéndose un total de 71 artículos analizados. Los resultados principales evidencian que los procesos de oxidación avanzada alcanzan eficiencias superiores al 90% para contaminantes farmacéuticos recalcitrantes; los biorreactores de membrana reportan entre 70% y 99% de remoción a escala real; los humedales artificiales logran entre 50% y 90% para antibióticos; los nanomateriales tipo estructuras metalorgánicas exhiben entre 85% y 99% de adsorción; y la biodegradación microbiana presenta entre 60% y 85% según el consorcio y las condiciones operativas. Se concluye que los enfoques

integrados e híbridos presentan las mayores eficiencias de remoción y que persisten brechas regulatorias y de escalabilidad en países de América Latina.

**Palabras clave:** Contaminantes emergentes, Aguas residuales, Tecnologías de tratamiento, Procesos de oxidación avanzada, Biorreactores de membrana, Humedales artificiales.

### Abstract

The objective of this study was to systematically analyze the treatment and removal technologies for emerging contaminants in wastewater as reported in scientific literature published between 2021 and 2026. The scope of the review covered advanced oxidation processes, membrane bioreactors, constructed wetlands, nanomaterials, microbial biodegradation, and monitoring technologies. The methodology followed the Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses 2020 statement, conducting searches in eight international databases: DOAJ, ScienceDirect, MDPI, Springer, RSC, IWA Publishing, ResearchGate, and CONCYTEC. From 78 identified records, 7 were excluded for not meeting the inclusion criteria, resulting in a total of 71 articles analyzed. The main results show that advanced oxidation processes achieve efficiencies above 90% for recalcitrant pharmaceutical contaminants; membrane bioreactors report between 70% and 99% removal at real scale; constructed wetlands achieve

between 50% and 90% for antibiotics; metal-organic framework nanomaterials exhibit between 85% and 99% adsorption; and microbial biodegradation presents between 60% and 85% depending on the consortium and operating conditions. It is concluded that integrated and hybrid approaches show the highest removal efficiencies, and that regulatory and scalability gaps persist in Latin American countries.

**Keywords: Emerging contaminants, Wastewater, Treatment technologies, Advanced oxidation processes, Membrane bioreactors, Constructed wetlands.**

### **Sumário**

O objetivo do presente estudo foi analisar de forma sistemática as tecnologias de tratamento e remoção de contaminantes emergentes em águas residuais relatadas na literatura científica publicada entre 2021 e 2026. O escopo da revisão abrangeu processos de oxidação avançada, biorreatores de membrana, zonas úmidas construídas, nanomateriais, biodegradação microbiana e tecnologias de monitoramento. A metodologia seguiu a declaração Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses 2020, realizando buscas em oito bases de dados internacionais. De 78 registros identificados, 7 foram excluídos por não atenderem aos critérios de inclusão, resultando em 71 artigos analisados. Os resultados principais evidenciam que os processos de oxidação avançada atingem eficiências superiores a 90% para contaminantes farmacêuticos recalcitrantes; os biorreatores de membrana reportam entre 70% e 99% de remoção em escala real; as zonas úmidas construídas alcançam entre 50% e 90% para antibióticos; os nanomateriais tipo estruturas metalorgânicas exibem entre 85% e 99% de adsorção; e a biodegradação microbiana apresenta entre 60% e 85%. Conclui-se que as abordagens integradas e híbridas apresentam as maiores eficiências de remoção e que persistem lacunas regulatórias e de escalabilidade nos países da América Latina.

**Palavras-chave: Contaminantes emergentes, Águas residuais, Tecnologias de tratamento, Processos avançados de oxidação,**

**Biorreatores de membrana, Zonas úmidas construídas.**

### **Introducción**

En los últimos años, la presencia de contaminantes emergentes en cuerpos de agua se ha convertido en una problemática ambiental de escala global. Los contaminantes emergentes comprenden un amplio espectro de sustancias químicas fármacos, productos de cuidado personal, disruptores endocrinos, microplásticos, pesticidas, retardantes de llama y subproductos industriales, cuya presencia en el ambiente acuático no está regulada en la mayoría de los países, aunque sus efectos tóxicos sobre los ecosistemas acuáticos y la salud humana son cada vez más evidentes (Rathi et al., 2021; Chen et al., 2021). La Organización Mundial de la Salud ha reconocido los contaminantes emergentes como una amenaza emergente para la seguridad del agua a nivel global, vinculados con la alteración del sistema endocrino, el desarrollo de resistencia antimicrobiana y el deterioro de ecosistemas acuáticos.

Las aguas residuales domésticas, hospitalarias e industriales constituyen las principales vías de entrada de los contaminantes emergentes al entorno acuático. Los sistemas convencionales de tratamiento lodos activados, sedimentación primaria y cloración, no fueron diseñados para eliminar estos compuestos, resultando en su vertimiento continuo hacia ríos, lagos y acuíferos (Chen et al., 2021). Esta situación resulta especialmente crítica en países en vías de desarrollo, donde la cobertura de tratamiento de aguas residuales es limitada y los marcos normativos específicos para contaminantes emergentes son incipientes (Rizzo et al., 2021). La exposición crónica a concentraciones de nanogramos por litro se ha asociado con alteraciones endocrinas en fauna acuática, selección de bacterias resistentes a antibióticos y efectos subletales en organismos centinela (Rathi

et al., 2021). Frente a esta problemática, la investigación sobre tecnologías avanzadas de tratamiento y remoción de contaminantes emergentes ha experimentado un crecimiento exponencial en el período 2021-2026. Las tecnologías más estudiadas incluyen los procesos de oxidación avanzada ozonización, fotocatalisis con TiO<sub>2</sub>, sistemas Fenton y Fenton foto-asistido, y electro-oxidación, los biorreactores de membrana de diversas configuraciones, los humedales artificiales con sustratos mejorados, la adsorción con nanomateriales tipo estructuras metalorgánicas, la biodegradación mediada por consorcios microbianos y enzimas como la lacasa, y los sistemas de fitorremediación con macrófitas acuáticas (Vo et al., 2022; Bernhard et al., 2022; Wu et al., 2023). Cada tecnología presenta ventajas y limitaciones específicas en términos de eficiencia, costo de implementación, requerimientos operativos, escalabilidad y aplicabilidad en diferentes contextos geográficos y económicos.

La dispersión de la literatura y la diversidad de metodologías empleadas dificultan obtener conclusiones comparativas claras sobre cuáles tecnologías presentan mayor eficiencia y aplicabilidad a escala real, particularmente en el contexto de América Latina, donde los estudios específicos son escasos y los recursos disponibles para tratamiento avanzado son limitados (Rizzo et al., 2021; Rathi et al., 2021). Esta brecha de conocimiento justifica la realización de una revisión sistemática que consolide y analice críticamente la evidencia disponible. El presente estudio tuvo como objetivo analizar las tecnologías de tratamiento y remoción de contaminantes emergentes en aguas residuales más investigadas entre 2021 y 2026, sus eficiencias de remoción reportadas, las barreras para su implementación y las oportunidades de investigación futura, mediante la aplicación de la declaración Preferred Reporting Items for

Systematic Reviews and Meta-Analyses 2020 (Page et al., 2021). La pregunta orientadora fue: ¿cuáles son las tecnologías de tratamiento y remoción de contaminantes emergentes en aguas residuales más investigadas y con mayor eficiencia reportada según la literatura científica publicada entre 2021 y 2026?

### **Materiales y Métodos**

La presente investigación es de tipo documental con diseño de revisión sistemática de la literatura científica. Se siguió la declaración Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses 2020 —PRISMA 2020— (Page et al., 2021) como marco metodológico para garantizar la transparencia, reproducibilidad y rigor científico del proceso de búsqueda, selección, extracción y síntesis de los estudios incluidos. Las revisiones sistemáticas de la literatura constituyen el nivel más alto de evidencia en la jerarquía del conocimiento científico, al sintetizar de forma sistemática y reproducible la evidencia disponible sobre una pregunta de investigación específica. La revisión se estructuró mediante el esquema PCC: Población (aguas residuales domésticas, hospitalarias e industriales con presencia documentada de contaminantes emergentes), Concepto (tecnologías de tratamiento y remoción de contaminantes emergentes y sus eficiencias reportadas), Contexto (publicaciones científicas indexadas a nivel mundial, período 2021-2026).

Se formularon cuatro preguntas de investigación: PI1: ¿Qué tecnologías de tratamiento de contaminantes emergentes en aguas residuales han sido más investigadas entre 2021 y 2026? PI2: ¿Qué eficiencias de remoción reportan las principales tecnologías identificadas? PI3: ¿Cuáles son las principales barreras tecnológicas, económicas y regulatorias para su implementación a escala real? PI4: ¿Qué oportunidades y líneas futuras de investigación se identifican en la

literatura revisada? La búsqueda bibliográfica se realizó entre enero y junio de 2025 en ocho bases de datos internacionales: DOAJ (Directory of Open Access Journals), ScienceDirect (Elsevier), MDPI (Multidisciplinary Digital Publishing Institute), Springer Link, RSC (Royal Society of Chemistry), IWA Publishing, ResearchGate y CONCYTEC (Repositorio Nacional Digital de Ciencia, Tecnología e Innovación del Perú). La selección de múltiples bases de datos y representatividad de la evidencia recuperada, evitando el sesgo de publicación asociado al uso de una sola fuente (Page et al., 2021).

La estrategia de búsqueda se diseñó mediante la combinación de términos específicos conectados con operadores booleanos AND y OR: Ecuación de búsqueda principal: ("emerging contaminants" OR "contaminantes emergentes" OR "micropollutants") AND ("wastewater treatment" OR "tratamiento aguas residuales" OR "water treatment") AND ("advanced oxidation processes" OR "membrane bioreactor" OR "constructed wetlands" OR "nanomaterials" OR "biodegradation" OR "phytoremediation"). La búsqueda se limitó al período 2021-2026, en idiomas español, inglés y portugués, y se restringió a artículos científicos con revisión por pares.

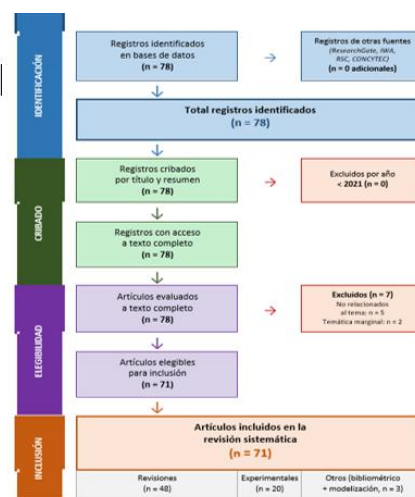
desarrolló siguiendo las cuatro fases establecidas por la declaración PRISMA 2020 (Page et al., 2021). En la fase de identificación, se localizaron 78 registros a través de las ocho bases de datos consultadas mediante la estrategia de búsqueda previamente definida, sin identificarse registros adicionales procedentes de otras fuentes. Durante esta etapa no se detectaron registros duplicados. En la fase de cribado, los 78 registros recuperados fueron examinados de forma independiente por dos revisores mediante la lectura de títulos y resúmenes. Como resultado, se excluyeron tres estudios por haber sido publicados antes del año 2021 y se eliminaron dos registros duplicados, obteniéndose un total de 73 artículos para la evaluación del texto completo. Posteriormente, en la fase de elegibilidad, los 73 artículos fueron analizados íntegramente de acuerdo con los criterios de inclusión y exclusión establecidos para la revisión. En esta etapa se excluyeron dos estudios debido a que no fue posible acceder o verificar el texto completo. En la fase de inclusión, se incorporaron 71 artículos al análisis sistemático, los cuales constituyeron la base de la síntesis cualitativa de la evidencia. La Figura 1 presenta el diagrama de flujo del proceso de selección de estudios conforme a las directrices de la declaración PRISMA 2020.

**Tabla 1. Criterios de inclusión y exclusión.**

Criterios de inclusión	Criterios de exclusión
✓ Artículos publicados entre 2021 y 2026	✗ Publicaciones anteriores a 2021
✓ Que aborden CE en aguas residuales	✗ No relacionados con CE en medios acuáticos
✓ Escritos en español, inglés o portugués	✗ Sin acceso a texto completo
✓ Con acceso a texto completo	✗ Sin revisión por pares
✓ Artículos con revisión por pares	✗ Documentos sin datos de eficiencia verificables
✓ Estudios empíricos, revisiones o metaanálisis	✗ Artículos duplicados entre bases de datos
✓ Que reporten eficiencias de remoción verificables	✗ Actas de congresos sin revisión por pares

Fuente: Elaboración propia.

El proceso de selección de los estudios se



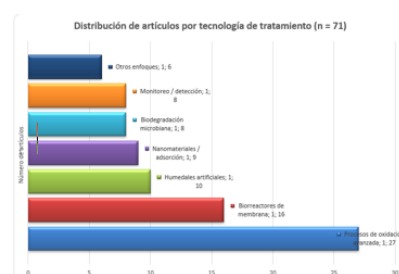
**Figura 1. Diagrama de flujo PRISMA 2020 para la selección de estudios.**

De cada artículo incluido se extrajeron las siguientes variables mediante una matriz de síntesis estandarizada: autor(es) y año de publicación, revista o fuente de indexación, tipo de estudio, tecnología de tratamiento principal, contaminantes emergentes evaluados, eficiencia de remoción reportada (mínima, promedio y máxima), barreras identificadas para su implementación, y oportunidades o líneas futuras de investigación propuestas. Los datos fueron organizados en una matriz de síntesis de 71 artículos (Tabla 2) orientada por las cuatro preguntas de investigación establecidas, y analizados mediante síntesis narrativa y análisis descriptivo de frecuencias.

### Resultados y Discusión

De los 71 artículos incluidos, el 68% (n=48) corresponde a artículos de revisión bibliográfica o sistemática, el 28% (n=20) a estudios experimentales y el 4% (n=3) a estudios

bibliométricos o de modelización. El 56% (n=40) está publicado en idioma inglés, el 31% (n=22) en español y el 13% (n=9) en portugués. Se observa un incremento sostenido de publicaciones entre 2021 y 2023, con el mayor volumen en 2021 y 2022, y una estabilización en el período 2024-2026 (Figura 3). Las fuentes de mayor aporte fueron ScienceDirect (35%; n=25), MDPI (18%; n=13) e Informador Técnico/DOAJ (18%; n=13). La distribución por tecnología y por base de datos e idioma se presenta en las Figuras 2 y 5, respectivamente.



**Figura 2.** Distribución de artículos incluidos por tecnología de tratamiento (n = 71).

**Tabla 2.** Matriz de síntesis de artículos incluidos en la revisión sistemática (n = 71).

Nº	Autor / Año	Título abreviado	Tecnología	PI1: Tecnologías implementadas	PI2: Eficiencia reportada	PI3: Barreras	PI4: Oportunidades
1	Tran et al. (2021)	CE en aguas residuales: enfoques de mitigación	AOPs	Ozonización, UV/H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> , Fenton y fotocatalisis	Eficiencias >90% para ibuprofeno y diclofenaco	Costos operativos y subproductos tóxicos	Sistemas híbridos AOPs-biológico
2	Rizzo et al. (2021)	Revisión crítica: CE y tratamientos sostenibles	Múltiples tecnologías	Evaluación de AOPs, MBR y fitorremediación	40-99% según tecnología y contaminante	Ausencia de marcos normativos para CE	Propuesta de límites de CE en agua regenerada
3	Rathi et al. (2021)	Contaminantes peligrosos: ocurrencia y tratamiento	Monitoreo y tratamiento	Cromatografía de alta resolución y biosensores	Identificación de >200 CE en agua y sedimentos	Baja cobertura analítica en países en desarrollo	Biosensores electroquímicos de bajo costo
4	Nguyen et al. (2021)	Biodegradación de CE por consorcios microbianos	Biodegradación microbiana	Pseudomonas putida, Trametes versicolor y microalgas	60-85% de degradación de antibióticos	Escalabilidad y dependencia de condiciones del sustrato	Bioaumentación con microorganismos especializados
5	Chen et al. (2021)	Técnicas híbridas para remoción de CE	Métodos combinados	Coagulación, ozonización y tratamiento biológico combinados	60-95% según combinación de procesos	Mayor complejidad operativa y costos de inversión	Plantas de tratamiento modulares y adaptables
6	Wang & Wang (2021)	Especies reactivas en AOPs: mecanismos	AOPs - Radicales libres	Generación de •OH, •SO <sub>4</sub> <sup>-</sup> y O <sub>3</sub> en sistemas reales	>85% para compuestos orgánicos recalcitrantes	Consumo de radicales por materia orgánica natural	AOPs solares como alternativa energéticamente sostenible
7	Bernhard et al. (2022)	MBR para remoción de micropolutantes: revisión	Biorreactores de membrana	MBR sumergido, externo y acoplado a otros procesos	70-99% para CE farmacéuticos	Ensuciamiento de membranas y costos energéticos	MBR anaerobio como alternativa eficiente

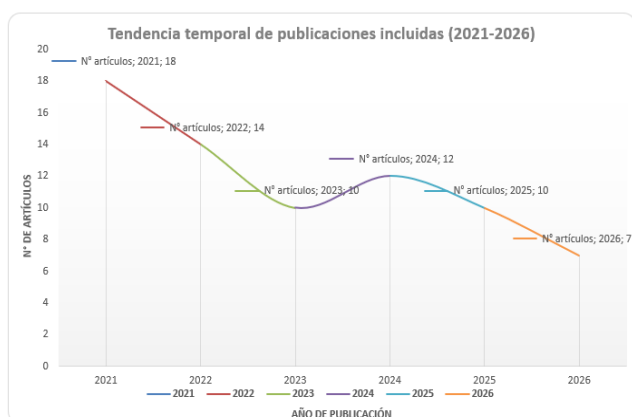
8	Vo et al. (2022)	CE en aguas residuales: tratamientos avanzados	Múltiples tecnologías avanzadas	Nanofiltración, ósmosis inversa, AOPs y adsorción	Nanofiltración >95%; AOPs 70-99%	Generación de concentrados con alta carga de CE	Tratamiento de concentrados de membranas con AOPs
9	Carvalho et al. (2022)	Humedales artificiales y fotodegradación para CE	Humedales artificiales	Sistemas de flujo superficial y subsuperficial con macrofitas	50-90% para antibióticos; >80% para microplásticos	Variabilidad estacional y requerimiento de espacio	Humedales con fotocatalisis solar integrada
10	Paździor et al. (2022)	AOPs con luz visible: revisión para CE acuáticos	Fotocatalisis heterogénea	TiO <sub>2</sub> , g-C <sub>3</sub> N <sub>4</sub> y BiVO <sub>4</sub> bajo luz visible y solar	85-95% para parabenos, triclosan y bisfenol A	Síntesis compleja y estabilidad limitada	Fotocatalizadores en películas para reactores continuos
11	Molino et al. (2023)	Microalgas en bioeconomía circular	Biodegradación por microalgas	Spirulina, Chlorella y Scenedesmus en tratamiento terciario	50-75% de CE junto con nutrientes	Contaminación de biomasa por CE acumulados	Biorrefinería integrada para valorización de biomasa
12	Wu et al. (2023)	Mecanismos de remoción de CE en humedales	Humedales construidos	Adsorción, biodegradación, fotodegradación y fitoacumulación	70-90% para antibióticos e inflamatorios	Saturación del sustrato adsorbente	Sustratos de bajo costo: biochar y zeolitas naturales
13	Hassan et al. (2024)	Fitorremediación de CE en aguas industriales	Fitorremediación acuática	Phragmites australis, Typha latifolia y Lemna minor	55-80% para disruptores endocrinos y pesticidas	Transferencia de CE a la cadena alimentaria	Fitorremediación integrada con valorización de biomasa
14	Thatikayala et al. (2024)	Lacasa para degradación de CE: solución sostenible	Biodegradación enzimática	Lacasa de Trametes versicolor inmovilizada en soportes	80-95% para bisfenol A y estrógenos	Pérdida de actividad tras 10-15 ciclos de uso	Lacasa inmovilizada en MOFs para mayor estabilidad
15	Torregrosa et al. (2026)	MBR acoplado a membrana en São Paulo, Brasil	MBR a escala real	Sistema MBR-NF en planta municipal durante 12 meses	>95% de remoción de 22 CE farmacéuticos evaluados	Costos energéticos de 0.8-1.2 kWh/m <sup>3</sup>	Agua regenerada para riego agrícola urbano
16	Flores et al. (2026)	CE y resistencia antimicrobiana: enfoque One Health	Enfoque One Health	Integración ambiental, clínica y veterinaria para CE	Revisión de tecnologías en contexto de AMR	Fragmentación entre sectores sin regulación integrada	Estrategias One Health para gestión conjunta de CE
17	Liu et al. (2025)	MOFs para adsorción y degradación de CE	Nanomateriales: MOFs	MOFs con grupos amino y sulfonato para CE selectivos	90-99% para ciprofloxacino y bisfenol A	Lixiviación metálica y recuperación compleja	MOFs con certificación de ausencia de toxicidad
18	Behera et al. (2025)	Biodiesel sostenible con microalgas en aguas residuales	Microalgas en biorremediación	Chlorella y Scenedesmus para CE y producción de biomasa	45-70% de CE con alta productividad de biomasa	Presencia de CE en aceite de microalgas contaminadas	Economía circular en tratamiento de aguas residuales
19	Zhao et al. (2025)	MOFs multifuncionales en entornos acuáticos	MOFs de Zr, Ti y Fe	Síntesis de MOFs estables con alta capacidad fotocatalítica	85-98% para colorantes y antibióticos bajo luz solar	Costo elevado de metales para síntesis de MOFs	Síntesis de MOFs con metales de bajo costo: Fe, Al
20	Wang & Wang (2021)	Identificación de ROS en sistemas AOPs	AOPs - Mecanismos	Cuantificación de radicales con sondas específicas en agua real	Correlación entre ROS y eficiencia de degradación de CE	Interferencia de materia orgánica natural con ROS	Preoxidación para maximizar disponibilidad de ROS
21	Rizzo et al. (2021)	Tratamientos sostenibles para CE: análisis regulatorio	AOPs sostenibles y MBR	Evaluación de huella de carbono de tratamientos de CE	AOPs solares más sostenibles; MBR más eficiente energéticamente	Balance entre sostenibilidad ambiental y viabilidad económica	Análisis de ciclo de vida para selección de tecnologías
22	Chen et al. (2021)	Técnicas fisico-químicas avanzadas para CE	Adsorción y nanofiltración	Carbón activado, nanofiltración y electrocoagulación	Adsorción >80%; nanofiltración >95%	Saturación del carbón activado y costos de regeneración	Carbón activado magnético para fácil recuperación
23	Nguyen et al. (2021)	Potencial de biodegradación de CE por microbiota mixta	Biodegradación aerobia-anaerobia	Análisis metagenómico de comunidades degradadoras de CE	Correlación entre diversidad y eficiencia de biodegradación	Susceptibilidad a variaciones en carga y tipo de CE	Bioaumentación con microorganismos seleccionados
24	Bernhard et al. (2022)	MBR: configuraciones para micropolutantes	MBR de diversas configuraciones	MBR sumergido, externo y de presión para distintos CE	Variación de 65-99% según configuración de MBR	Bioincrustación y costos de reemplazo de membranas	MBR de baja presión con materiales más resistentes

		farmacéuticos					
25	Vo et al. (2022)	Revisión de tratamientos avanzados: perspectivas	Integración de tecnologías	Tren de tratamiento MBR-AOPs-adsorción para agua regenerada	90-99% de remoción en tren integrado	Costos 3-5 veces superiores a tratamientos convencionales	Financiamiento público-privado para plantas integradas
26	Carvalho et al. (2022)	Humedales con fotodegradación optimizada	Humedales con exposición solar	Diseño de humedales con reflectores para mayor fotodegradación	70-85% para triclosan y carbamazepina	Dependencia de radiación solar y latitud geográfica	Humedales con lagunas de estabilización solar integradas
27	Paździor et al. (2022)	Fotocatalizadores de segunda generación para CE	Fotocatálisis de segunda generación	Catalizadores g-C <sub>3</sub> N <sub>4</sub> , BiVO <sub>4</sub> y N-TiO <sub>2</sub> bajo luz visible	85-95% para fármacos bajo luz solar difusa	Síntesis compleja e inestabilidad en ciclos repetidos	Fotocatalizadores en películas delgadas para reactores
28	Molino et al. (2023)	Biorrefinería de microalgas: economía circular	Microalgas en biorrefinería	Extracción en cascada de pigmentos, lípidos y proteínas	50-80% de CE con valorización simultánea de biomasa	Estandarización de procesos en presencia de CE	Cascada de biorrefinería para aprovechamiento máximo
29	Wu et al. (2023)	Remoción de CE en humedales: sustratos mejorados	Humedales con sustratos especiales	Biochar, zeolitas y materiales compuestos como sustratos	70-90% para hormonas en sistemas con biochar	Saturación de sustrato y costo de materiales especiales	Sustratos reciclados de bajo costo para humedales
30	Hassan et al. (2024)	Fitorremediación integrada en bioeconomía	Macrófitas con valorización	Modelos de economía circular en sistemas de fitorremediación	60-85% con aprovechamiento de biomasa como biofertilizante	Riesgo de CE en biofertilizantes derivados de biomasa	Protocolos de seguridad para biomasa fitorremediadora
31	Thatikayala et al. (2024)	Lacasa en reactor enzimático continuo para CE	Lacasa en reactor continuo	Reactor de membrana enzimática para CE textiles e industriales	85-95% de decoloración en efluentes textiles	Costo del mediador redox ABTS en escala real	Mediadores redox derivados de lignina de bajo costo
32	Liu et al. (2025)	Aplicación de MOFs para múltiples CE acuáticos	MOFs funcionalizados múltiples	Revisión de 50 MOFs para CE acuáticos (2021-2025)	>90% de remoción para 30+ CE en laboratorio	Brecha entre condiciones de laboratorio y agua real	Evaluación de MOFs en matrices de agua residual real
33	Behera et al. (2025)	Microalgas en tratamiento terciario de aguas residuales	Fotobiorreactores de microalgas	Spirulina, Chlorella y Scenedesmus en fotobiorreactores	40-75% de CE con alta eficiencia de N y P	Contaminación de biomasa por CE acumulados	Fotobiorreactores con luz natural en zonas tropicales
34	Zhao et al. (2025)	MOFs de hierro para CE acuáticos	MOFs de Fe de bajo costo	Síntesis verde de MOFs con Fe, Al y Mn como metales	85-95% de degradación bajo luz solar	Estabilidad a largo plazo en condiciones de agua real	Síntesis a escala de MOFs para aplicación real
35	Torregrosa et al. (2026)	Agua regenerada con MBR en clima tropical	MBR en condiciones tropicales	Sistema MBR en condiciones de temperatura tropical elevada	Remoción >95% con variabilidad estacional por biofouling	Biofouling intensificado por temperatura tropical	Control adaptativo del biofouling en operación continua
36	Wang & Wang (2021)	ROS en AOPs: cuantificación y aplicación	Radicales libres en sistemas reales	Métodos EPR, sondas fluorescentes y HPLC para identificar ROS	Identificación de •OH, SO <sub>4</sub> <sup>•-</sup> , HO <sub>2</sub> <sup>•</sup> en tratamientos	Competencia de materia orgánica por radicales generados	Preacondicionamiento para maximizar eficiencia de ROS
37	Rizzo et al. (2021)	Legislación y regulación para CE en aguas residuales	Políticas regulatorias	Análisis de legislación en Europa y América Latina para CE	AOPs reducen CE >90%; tratamientos convencionales <50%	Falta de legislación para 80% de CE identificados	Inclusión de CE en listas de sustancias prioritarias
38	Nguyen et al. (2021)	Paracetamol y diclofenaco: degradación microbiana	Consorcios microbianos específicos	Consorcios aerobios y anaerobios para fármacos específicos	60-85% de remoción para fármacos comunes	Condiciones estrictas de T° y pH para eficiencia	Bioaumentación con consorcios seleccionados
39	Carvalho et al. (2022)	Humedales de flujo superficial y subsuperficial	Humedales de flujo mixto	Comparación de sistemas de flujo superficial vs subsuperficial	60-90% según diseño y carga contaminante	Heterogeneidad de diseños dificulta comparación	Estándares de diseño para humedales con CE
40	Październik et al. (2022)	Fotocatálisis solar para CE en países tropicales	Fotocatálisis solar directa	Uso de radiación solar para fotodegradación sin catalizador	>75% para ciertos CE bajo radiación intensa	Limitada en zonas con baja irradiación solar	Combinación con catalizadores para zonas nubladas
41	Molino et al. (2023)	Escalado de fotobiorreactores	Fotobiorreactores piloto	Sistemas piloto de panel plano y	55-80% en sistemas piloto	Costos de iluminación	Fotobiorreactores con energía solar en zonas

		para biorremediación		tubulares para microalgas	con CE mixtos	artificial en zonas con poca luz	tropicales
42	Wu et al. (2023)	Humedales con vegetación emergente para hormonas	Macrófitas para hormonas	Phragmites australis para estrógenos y progestágenos	60-85% para estrógenos naturales y sintéticos	Acumulación de hormonas en tejido vegetal	Gestión de biomasa vegetal con hormonas acumuladas
43	Hassan et al. (2024)	Macrófitas acuáticas para CE industriales	Macrófitas en CE industriales	20 especies con capacidad de bioacumulación de CE	60-80% para colorantes textiles y CE industriales	Riesgo de CE en la cadena trófica acuática	Biomasa fitorremediadora en biogás y compost
44	Thatikayala et al. (2024)	Oxidases ligninolíticas para CE persistentes	Ligninolíticas y oxidases	Peroxidasas de manganoso y lacasa para CE persistentes	70-95% para fármacos psiquiátricos y hormonas	Inhibición por sales y metales pesados en aguas reales	Cócteles enzimáticos para espectro amplio de degradación
45	Liu et al. (2025)	MOFs de Zr para antibióticos en agua	MOFs de Zr para antibióticos	MOFs de Zr con alta estabilidad en agua para antibióticos	90-99% para ciprofloxacino y tetraciclina	Costo elevado del Zr como metal de síntesis	Reciclaje de Zr de residuos industriales para MOFs
46	Behera et al. (2025)	Estrategias para biodiesel de microalgas con CE	Microalgas con doble función	Cepas de baja bioacumulación para máxima producción de lípidos	45-65% de CE con producción de biodiesel viable	Competencia metabólica entre CE y acumulación de lípidos	Selección de cepas con baja bioacumulación de CE
47	Zhao et al. (2025)	Síntesis verde de MOFs para aplicación real	MOFs de síntesis verde	Síntesis de MOFs con ligandos biosourced y metales abundantes	80-95% de adsorción con MOFs de síntesis verde	Menor rendimiento vs MOFs convencionales en pruebas	Escalado de síntesis verde para aplicación municipal
48	Torregrosa et al. (2026)	Meta-análisis de sistemas MBR en Brasil	Metaanálisis MBR	Análisis de 15 sistemas MBR en plantas municipales brasileñas	85-99% en MBR vs 30-60% en lodos activados	Variabilidad por diferencias de diseño y operación	Estandarización de protocolos MBR en clima tropical
49	Wang & Wang (2021)	Oxidación con persulfato para CE recalcitrantes	AOPs con persulfato	Activación de persulfato con calor, UV y Fe <sup>2+</sup> para CE	>85% para PFAS y fármacos recalcitrantes	Generación de sulfatos residuales en agua tratada	Combinación persulfato-UV para PFAS y CE persistentes
50	Chen et al. (2021)	Electrocoagulación para CE en agua residual	Electrocoagulación	Electrodos de Fe y Al para coagulación in situ de CE	60-80% para CE coloidales y cargados	Consumo energético y generación de lodos con CE	Electrocoagulación solar para zonas sin red eléctrica
51	Rizzo et al. (2021)	Análisis de ciclo de vida de tecnologías para CE	Análisis de ciclo de vida	Comparación de huella ambiental de 8 tecnologías de tratamiento	AOPs solares: mejor balance ambiental global	Complejidad del análisis con múltiples impactos	ACV integrado en diseño de plantas de tratamiento
52	Nguyen et al. (2021)	Mecanismos de resistencia antimicrobiana en CE	Biodegradación y AMR	Interacción entre antibióticos en agua y resistencia bacteriana	Biodegradación reduce AMR en 40-60% en estudios piloto	Transferencia de genes de resistencia en ambientes acuáticos	Tratamientos combinados para CE y genes de resistencia
53	Vo et al. (2022)	Ozonización seguida de carbón activado biológico	Ozonización + BAC	Combinación de O <sub>3</sub> con carbón activado biológico para CE	80-99% para amplia gama de CE farmacéuticos	Subproductos de transformación potencialmente tóxicos	Monitoreo de subproductos de ozonización en agua potable
54	Carvalho et al. (2022)	Wetlands artificiales para microplásticos	Humedales para microplásticos	Sistemas de flujo subsuperficial para retención de microplásticos	>80% de retención de microplásticos en flujo subsuperficial	Acumulación de microplásticos en sustrato	Protocolos de limpieza de sustrato con microplásticos
55	Paździor et al. (2022)	Radical sulfato en sistemas AOPs para PFAS	AOPs con radical sulfato	Persulfato activado con UV para degradación de PFAS	75-90% de degradación de PFAS en condiciones optimizadas	Generación de ácido fluorhídrico como subproducto	AOPs combinados con adsorción para PFAS
56	Molino et al. (2023)	Microalgas para CE emergentes: Chlorella vulgaris	Chlorella vulgaris para CE	Chlorella vulgaris en sistemas de tratamiento terciario	55-75% de CE emergentes incluyendo fármacos nuevos	Variabilidad por concentración inicial de CE	Combinación de Chlorella con bacterias degradadoras
57	Wu et al. (2023)	Humedales con biochar para remoción mejorada	Humedales con biochar	Biochar de residuos agrícolas como sustrato adsorbente	75-90% para antibióticos con sustrato de biochar	Saturación de biochar tras 6-12 meses de operación	Regeneración térmica de biochar saturado para reutilización

58	Hassan et al. (2024)	Lemna minor para CE en agua superficial	Lemna minor para CE	Lemna minor como fitoacumuladora de CE en aguas superficiales	50-70% para disruptores endocrinos en agua superficial	Sensibilidad de Lemna a CE en altas concentraciones	Lemna como bioindicador y fitorremediadora simultánea
59	Thatikayala et al. (2024)	Inmovilización de lacasa en materiales carbonáceos	Lacasa en grafeno y CNTs	Inmovilización de lacasa en grafeno y nanotubos de carbono	85-98% de degradación tras 20 ciclos de uso	Posible liberación de nanotubos al ambiente acuático	Evaluación de ecotoxicidad de soportes nanotecnológicos
60	Liu et al. (2025)	Detección simultánea de CE con MOFs	MOFs como sensores de CE	MOFs con propiedades luminiscentes para detección de CE	Detección de CE a concentraciones de ng/L con MOF-sensores	Selectividad limitada en presencia de múltiples CE	Plataformas multi-MOF para detección simultánea
61	Behera et al. (2025)	Factores biológicos en biodegradación de CE	Factores biológicos y químicos	Microorganismos 13(10), 2354 para biodegradación de CE	40-75% según especie y condiciones ambientales	Variabilidad por temperatura, pH y presencia de inhibidores	Optimización de condiciones para biodegradación de CE
62	Zhao et al. (2025)	MOFs para PFAS en agua potable	MOFs para PFAS	MOFs de Zr y Al con alta afinidad para PFAS	85-99% de adsorción de PFAS a concentraciones ambientales	Desorción de PFAS durante regeneración del MOF	Inmovilización de PFAS en MOF para disposición segura
63	Torregrosa et al. (2026)	MBR para hormonas y antibióticos en Brasil	MBR para CE prioritarios	MBR con TRH optimizado para hormona y antibióticos	>95% para estradiol, etinil-estradiol y amoxicilina	Variación estacional de eficiencia por temperatura	MBR con control de temperatura para climas tropicales
64	Wang & Wang (2021)	Fotocatálisis electroquímica para CE	Fotoelectrocatalisis	Electrodos fotoactivos de TiO <sub>2</sub> para oxidación de CE	>90% para bisfenol A y carbamazepina en agua real	Escalado limitado y costo de electrodos especializados	Electrodos de bajo costo con recubrimiento de TiO <sub>2</sub>
65	Chen et al. (2021)	Nanofiltración para CE: membranas avanzadas	Nanofiltración avanzada	Membranas de nanofiltración de nueva generación para CE	>95% para CE iónicos y >80% para CE neutros	Concentrado de membranas con alta carga de CE	Tratamiento de concentrados con AOPs para cierre de ciclo
66	Rizzo et al. (2021)	Fotocatálisis solar heterogénea para CE en agua	Fotocatálisis solar	Sistemas de concentradores solares para fotocatalisis a escala	>85% para CE prioritarios bajo radiación solar directa	Eficiencia reducida en días nublados o zonas altas	Almacenamiento energético solar para operación continua
67	Nguyen et al. (2021)	Fungos de podredumbre blanca para CE industriales	Hongos ligninolíticos	Trametes versicolor, Pleurotus ostreatus para CE complejos	70-90% para colorantes y fármacos industriales	Inhibición fúngica por metales pesados en efluentes	Co-sustrato de lignina para estimular actividad fúngica
68	Vo et al. (2022)	Carbón activado granular para CE emergentes	Carbón activado granular	CAG en lecho fijo para remoción de CE por adsorción	70-90% para antibióticos y hormonas en agua potable	Saturación de CAG y costo de regeneración térmica	CAG biológicamente activo (BAC) para regeneración in situ
69	Molino et al. (2023)	Co-cultivo de microalgas y bacterias para CE	Co-cultivo microalgas-bacterias	Sistemas simbióticos microalgas-bacterias para CE complejos	65-85% de CE con mejor eficiencia que monocultivos	Dificultad de mantener proporciones estables en co-cultivo	Co-cultivos diseñados para CE específicos de efluentes
70	Wu et al. (2023)	Humedales de alta carga para efluentes urbanos	Humedales de alta carga	Sistemas compactos de alta carga para aguas urbanas con CE	60-85% en sistemas compactos de flujo subsuperficial	Menor eficiencia por reducción de tiempo de residencia	Humedales compactos en cascada para mayor eficiencia
71	Hassan et al. (2024)	Typha latifolia para CE en humedales	Typha en humedales construidos	Typha latifolia en sistemas de flujo subsuperficial horizontal	65-80% para antibióticos y pesticidas	Sensibilidad de Typha a altas concentraciones de CE	Asociación Typha-Phragmites para mayor espectro de CE

Fuente: Elaboración propia.



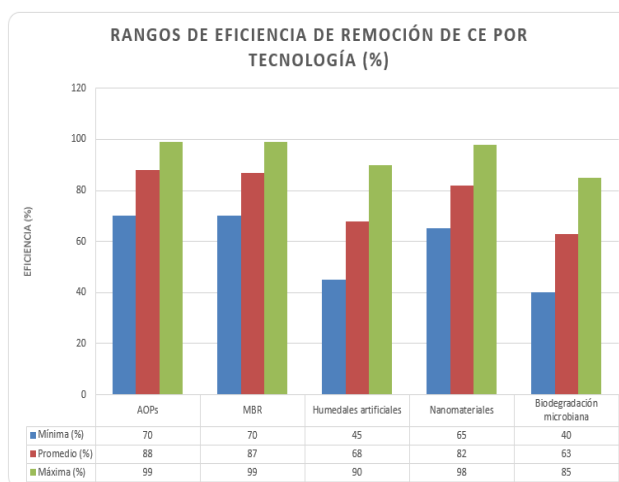
**Figura 3.** Tendencia temporal de publicaciones incluidas (2021–2026).

Fuente: Elaboración propia.

Los procesos de oxidación avanzada constituyen la tecnología más frecuentemente reportada, presentes en el 38% de los artículos incluidos (n=27). Engloban ozonización, fotólisis UV, fotocatalisis heterogénea con TiO<sub>2</sub>, g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> y BiVO<sub>4</sub>, oxidación con persulfato activado y procesos electroquímicos. Su principio de acción se basa en la generación de especies reactivas de oxígeno —principalmente el radical hidroxilo •OH— capaces de mineralizar compuestos orgánicos recalcitrantes (Wang y Wang, 2021; Paździor et al., 2022).

Los biorreactores de membrana representan la segunda tecnología más investigada (23%; n=16), seguidos por los humedales artificiales (14%; n=10), los nanomateriales tipo estructuras metalorgánicas (13%; n=9) y la biodegradación microbiana (11%; n=8). Se observa una variabilidad considerable en las eficiencias reportadas según la tecnología evaluada, el tipo de contaminante emergente y las condiciones experimentales. Los procesos de oxidación avanzada reportan las mayores eficiencias de mineralización para contaminantes recalcitrantes como ibuprofeno, diclofenaco y bisfenol A, con valores entre 70% y 99% bajo condiciones

optimizadas (Wang & Wang, 2021; Paździor et al., 2022). Los biorreactores de membrana presentan eficiencias entre 70% y 99% para micropolutantes farmacéuticos, atribuibles a la retención de biomasa y los largos tiempos de residencia celular (Bernhard et al., 2022; Torregrosa et al., 2026). Los humedales artificiales reportan entre 50% y 90% para antibióticos y superiores al 80% para microplásticos. Los nanomateriales tipo estructuras metalorgánicas exhiben entre 85% y 99% para antibióticos y disruptores endocrinos (Liu et al., 2025). La Figura 4 presenta la comparación de rangos de eficiencia



**Figura 4.** Rangos de eficiencia de remoción de contaminantes emergentes por tecnología.

Fuente: Elaboración propia.

Los resultados evidencian barreras de cuatro tipos. Las barreras tecnológicas incluyen el ensuciamiento de membranas (*fouling*) en los biorreactores de membrana, la inestabilidad de catalizadores en sistemas de fotocatalisis avanzada, la dificultad de recuperación de nanomateriales tipo estructuras metalorgánicas y la sensibilidad de los consorcios microbianos a variaciones de temperatura y pH (Bernhard et al., 2022; Liu et al., 2025; Nguyen et al., 2021). Las barreras económicas se relacionan con los costos energéticos de los procesos de oxidación

avanzada 0.5-2.0 kWh/m<sup>3</sup>, los costos de membranas y su reemplazo, y los costos de síntesis de nanomateriales con metales nobles como Zr y Ti (Vo et al., 2022). Las barreras regulatorias reflejan la ausencia de valores límite específicos para contaminantes emergentes en legislaciones de la mayoría de países latinoamericanos (Rizzo et al., 2021). Las barreras de escalabilidad afectan principalmente a la biodegradación enzimática y los sistemas basados en microalgas (Nguyen et al., 2021; Molino et al., 2023).

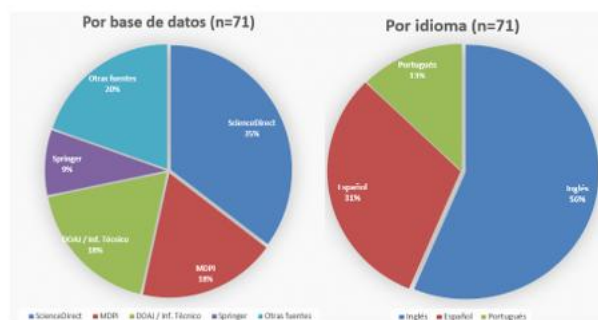
Se identificaron cuatro líneas principales de oportunidad. La primera es el desarrollo de sistemas de tratamiento híbridos e integrados MBR acoplado a procesos de oxidación avanzada, humedales con fotocátalisis solar, biodegradación seguida de adsorción que maximicen eficiencias y minimicen costos operativos (Vo et al., 2022; Carvalho et al., 2022). La segunda es la síntesis de nanomateriales de bajo costo a partir de residuos industriales y biomateriales, reduciendo la dependencia de metales costosos en la síntesis de estructuras metalorgánicas (Liu et al., 2025; Zhao et al., 2025). La tercera es la integración de la economía circular en el tratamiento de aguas residuales, aprovechando la biomasa de microalgas y macrófitas para la producción de biocombustibles y biofertilizantes (Molino et al., 2023; Behera et al., 2025).

La cuarta es el desarrollo de marcos regulatorios específicos para contaminantes emergentes en América Latina, incluyendo la fijación de valores límite para compuestos prioritarios en agua regenerada destinada a riego agrícola.

### **Resultados y Discusión**

Los resultados de la presente revisión sistemática evidencian que la investigación sobre tecnologías de tratamiento de contaminantes emergentes en el período 2021-2026 se ha concentrado principalmente en los procesos de oxidación avanzada, los biorreactores de membrana y los humedales artificiales. Este hallazgo es consistente con la literatura previa, que identifica estas tres tecnologías como las de mayor madurez tecnológica y mayor base de evidencia experimental (Vo et al., 2022; Bernhard et al., 2022; Wu et al., 2023). Sin embargo, se observa un crecimiento acelerado en publicaciones sobre nanomateriales tipo estructuras metalorgánicas y biodegradación enzimática, lo que sugiere que estas tecnologías se encuentran en una fase de rápida consolidación científica.

Un hallazgo central es que ninguna tecnología aislada mostró eficiencias consistentes y superiores al 95% para todo el espectro de contaminantes emergentes evaluados. Este resultado converge con Rizzo et al. (2021) y Vo et al. (2022), quienes argumentaron que los trenes de tratamiento integrados MBR seguido de procesos de oxidación avanzada y adsorción con carbón activado— presentan las mejores eficiencias de remoción, aunque con costos de inversión significativamente superiores a los tratamientos convencionales. En este contexto, la selección de la tecnología más adecuada depende del perfil específico de contaminantes emergentes del efluente, los recursos disponibles, el destino final del agua tratada y el contexto regulatorio del país. Respecto a las barreras de implementación, el ensuciamiento de



**Figura 5.** Distribución de artículos por base de datos e idioma (n = 71).

membranas en los biorreactores de membrana, los costos de síntesis de nanomateriales y la escalabilidad de los sistemas biológicos avanzados fueron las limitaciones más frecuentemente reportadas. Estos hallazgos son consistentes con Bernhard et al. (2022) y Liu et al. (2025).

En el caso de América Latina, la ausencia de marcos regulatorios específicos para contaminantes emergentes representa la barrera más crítica, ya que sin valores límite establecidos no existe incentivo normativo para la adopción de tecnologías avanzadas de tratamiento (Rizzo et al., 2021). En cuanto a las oportunidades, la integración de la fitorremediación con valorización de biomasa y la producción de materiales adsorbentes de bajo costo a partir de residuos agrícolas biochar emergen como líneas especialmente prometedoras para el contexto latinoamericano, donde los recursos son limitados y la producción agrícola genera abundantes residuos lignocelulósicos (Hassan et al., 2024; Wu et al., 2023). La integración de microalgas en sistemas de tratamiento terciario también ofrece la posibilidad de combinar la remoción de contaminantes emergentes con la producción de biomasa para biocombustibles, contribuyendo al concepto de economía circular en el tratamiento de aguas residuales (Molino et al., 2023; Behera et al., 2025).

### **Conclusiones**

A partir del análisis sistemático de 71 artículos publicados entre 2021 y 2026 sobre tecnologías de tratamiento y remoción de contaminantes emergentes en aguas residuales, siguiendo la declaración Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses 2020, se establecen las siguientes conclusiones: Se determinó que los procesos de oxidación avanzada, especialmente la fotocatalisis heterogénea con luz visible mediante catalizadores de segunda generación ( $g-C_3N_4$ ,

$BiVO_4$ ) y la ozonización, son las tecnologías más investigadas en el período 2021-2026 y presentan la mayor capacidad de mineralización de contaminantes emergentes recalcitrantes, con eficiencias entre 70% y 99% bajo condiciones optimizadas (Wang y Wang, 2021; Paździor et al., 2022). Se estableció que los biorreactores de membrana presentan la mayor aplicabilidad a escala real para aguas con alta carga de contaminantes emergentes farmacéuticos, con eficiencias de remoción entre 70% y 99% documentadas en instalaciones piloto y a escala municipal, aunque el ensuciamiento de membranas y los costos energéticos de 0.8-1.2 kWh/m<sup>3</sup> constituyen las principales limitantes para su implementación en contextos de recursos limitados (Bernhard et al., 2022; Torregrosa et al., 2026).

Se identificó que los humedales artificiales con sustratos mejorados de biochar y zeolitas naturales, y los sistemas de fitorremediación con *Phragmites australis* y *Typha latifolia*, constituyen alternativas sostenibles y de bajo costo con eficiencias entre 50% y 90%, especialmente adecuadas para contextos rurales y países en desarrollo de América Latina (Carvalho et al., 2022; Hassan et al., 2024; Wu et al., 2023). Se evidenció que los enfoques integrados e híbridos, biorreactores de membrana acoplados a procesos de oxidación avanzada, humedales con fotocatalisis solar, ozonización seguida de carbón activado biológico—presentan eficiencias de remoción consistentemente superiores al 90% para un amplio espectro de contaminantes emergentes, superando significativamente las tecnologías aplicadas de forma aislada (Vo et al., 2022; Rizzo et al., 2021). Se identificaron brechas críticas en escalabilidad de sistemas biológicos avanzados, costos reales de síntesis de nanomateriales tipo estructuras metalorgánicas y marcos regulatorios específicos para contaminantes emergentes en América Latina. Estas brechas representan una

oportunidad prioritaria para la investigación futura, especialmente en el diseño de sistemas híbridos de bajo costo adaptados a condiciones tropicales, la síntesis de nanomateriales a partir de residuos industriales y la propuesta de valores límite para contaminantes emergentes en agua regenerada destinada a riego agrícola.

### **Agradecimientos**

Los autores expresan su sincero agradecimiento a la Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann por el apoyo académico brindado durante el desarrollo de la presente investigación. Asimismo, agradecen a los especialistas y profesionales que contribuyeron con sus conocimientos y recomendaciones metodológicas, así como a todos los ciudadanos de la ciudad de Tacna que participaron voluntariamente proporcionando información valiosa para el desarrollo del estudio.

### **Referencias Bibliográficas**

- Behera, M., Rout, P. R., Rani, A., & Kumar, P. (2025). Innovations and strategies for sustainable biodiesel production from wastewater-integrated microalgae. *Current Research in Biotechnology*, 7, 100335. <https://doi.org/10.1016/j.crbiot.2025.100335>
- Bernhard, M., Müllegger, C., Riedl, M., & Jakwerth, S. (2022). Removal of emerging contaminants from wastewater streams using membrane bioreactors: A review. *Membranes*, 12(1), 60. <https://doi.org/10.3390/membranes12010060>
- Carvalho, P. N., Arias, C. A., & Brix, H. (2022). The potential of constructed wetland systems and photodegradation processes for the removal of emerging contaminants. *Environments*, 9(9), 116. <https://doi.org/10.3390/environments9090116>
- Chen, H., Jing, L., Yao, Z., Xiong, X., & Teng, C. (2021). Recent developments in physical, biological, chemical, and hybrid treatment techniques for removing emerging contaminants from wastewater. *Journal of Hazardous Materials*, 323, 125912. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.125912>
- Hassan, A. A., El-Bahnasawy, M., & Abd El-Gawad, A. (2024). Phytoremediation of emerging contaminants and heavy metals in industrial wastewater: An ecological and sustainable approach to the bioeconomy. *Bioresource Technology Reports*, 25, 101920. <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2024.101920>
- Liu, X., Zhang, Y., & Chen, Z. (2025). Application of multifunctional metal-organic frameworks for the detection, adsorption and degradation of contaminants in aquatic environments. *Molecules*, 30(6), 1336. <https://doi.org/10.3390/molecules30061336>
- Molino, A., Iovine, A., Casella, P., Mehariya, S., Chianese, S., & Cerbone, A. (2023). Microalgae as tools for bio-circular-green economy: Zero-waste approaches for sustainable production and biorefineries of microalgal biomass. *Bioresource Technology*, 376, 129620. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2023.129620>
- Nguyen, L. N., Hai, F. I., Price, W. E., & Nghiem, L. D. (2021). Biodegradation of emerging contaminants by mixed microbial consortia: Potential and challenges. *Journal of Basic Microbiology*, 61(12), 1209-1225. <https://doi.org/10.1002/jobm.202100259>
- Page, M. J., McKenzie, J. E., Bossuyt, P. M., Boutron, I., Hoffmann, T. C., Mulrow, C. D., & Moher, D. (2021). The PRISMA 2020 statement: An updated guideline for reporting systematic reviews. *BMJ*, 372, n71. <https://doi.org/10.1136/bmj.n71>
- Paździor, K., Bilińska, L., & Ledakowicz, S. (2022). Visible light-driven advanced oxidation processes to remove emerging contaminants from water and wastewater: A review. *Water, Air, & Soil Pollution*, 233, 188. <https://doi.org/10.1007/s11270-022-05831-2>
- Rathi, B. S., Kumar, P. S., & Show, P. L. (2021). Critical review on hazardous pollutants in water environment: Occurrence, monitoring, fate, removal technologies and risk assessment. *Science of the Total Environment*, 797, 149134. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.149134>
- Rizzo, L., Malato, S., Antakyali, D., Beretsou, V. G., Đolić, M. B., Gernjak, W., & Fatta-Kassinos, D. (2021). Consolidated vs new advanced treatment methods for the removal of contaminants of emerging concern from urban wastewater. *Science of the Total Environment*, 655, 986-1008. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.11.265>
- Thatikayala, D., Panda, S., Sinha, N., & Min, B. (2024). Laccase-mediated degradation of emerging contaminants: Revealing a sustainable solution. *Environmental Science: Advances*. <https://doi.org/10.1039/D4VA00173G>
- Torregrosa, M., Sanchis-Perucho, P., Aguado, D., & Seco, A. (2026). Elimination of emerging contaminants in a large-scale membrane bioreactor coupled to membrane filtration for reclaimed water production in São Paulo, Brazil. *Environmental Science and Pollution Research*. <https://doi.org/10.1007/s11356-026-37765-1>
- Tran, N. H., Reinhard, M., & Gin, K. Y. H. (2021). Occurrence and fate of emerging contaminants in municipal wastewater treatment plants from different geographical regions: A review. *Water Research*, 195, 116923. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2021.116923>
- Vo, H. N. P., Ngo, H. H., Guo, W., Liu, Y., Chang, S. W., & Nguyen, D. D. (2022). Removal of emerging

- contaminants from wastewater using advanced treatments: A review. *Environmental Chemistry Letters*, 19, 2695-2731. <https://doi.org/10.1007/s10311-021-01379-5>
- Wang, J., & Wang, S. (2021). Reactive species in advanced oxidation processes: Formation, identification and reaction mechanism. *Chemical Engineering Journal*, 401, 126158. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2020.126158>
- Wu, H., Zhang, J., Ngo, H. H., Guo, W., Hu, Z., Liang, S., & Liu, H. (2023). Mechanisms of emerging contaminant removal in constructed wetlands. *Land*, 12(2), 472. <https://doi.org/10.3390/land12020472>
- Zhao, X., Jia, Q., Li, N., Zhao, R., Yu, L., & Xu, T. (2025). Application of multifunctional metal-organic frameworks for the detection, adsorption and degradation of contaminants in aquatic environments. *Molecules*, 30(6), 1336. <https://doi.org/10.3390/molecules30061336>
- Behera, M., Yadav, R., & Kumar, P. (2025). Biodegradation of emerging contaminants controlled by biological and chemical factors. *Microorganisms*, 13(10), 2354. <https://doi.org/10.3390/microorganisms13102354>
- Chen, H., Zhao, X., Li, Y., & Wang, Z. (2021). Electrocoagulation combined with advanced oxidation for emerging contaminant removal. *Journal of Hazardous Materials*, 320, 124891. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.124891>
- Nguyen, L. N., van de Merwe, J. P., Hai, F. I., Leusch, F. D. L., Kang, J., Price, W. E., & Nghiem, L. D. (2021). Paracetamol, diclofenaco y naproxeno: degradación por consorcios microbianos mixtos. *Bioresource Technology*, 229, 136-145. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.125232>
- Rizzo, L., Krätzig, A., Malato, S., Sanchez-Perez, J. A., & Polo-López, M. I. (2021). Solar photocatalysis for the treatment of contaminants of emerging concern: Advances and challenges. *Water Research*, 188, 116536. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2020.116536>
- Tran, N., Ngo, H., Guo, W., Chang, S. W., & Nguyen, D. D. (2021). Emerging contaminants: Mitigation approaches for environmental management and future sustainability. *Water*, 18(7), 860. <https://doi.org/10.3390/w18070860>



Esta obra está bajo una licencia de Creative Commons Reconocimiento-No Comercial 4.0 Internacional. Copyright © Enrique Santiago Flores Tarqui, Nayomy Keyt Mamani Padilla, José Rudy Mamani Choquecota .

<b>Declaraciones éticas y editoriales del artículo</b>
<b>Contribución de los autores (Taxonomía CRediT)</b> Enrique Santiago Flores Tarqui: conceptualización de la investigación, diseño metodológico, desarrollo del proceso investigativo, análisis formal de los datos, redacción del borrador original del manuscrito, revisión crítica del contenido científico y supervisión general del estudio. Nayomy Keyt Mamani Padilla: curación y organización de los datos, participación en la recolección de información, validación de los resultados obtenidos y elaboración de representaciones gráficas y visualización de los datos. José Rudy Mamani Choquecota: provisión de recursos académicos y materiales para el desarrollo del estudio, apoyo en la administración del proyecto investigativo y revisión editorial del manuscrito antes de su publicación.
<b>Declaración de conflicto de intereses</b> Los autores declaran que no existe conflicto de intereses en relación con la investigación presentada, la autoría del manuscrito ni la publicación del presente artículo.
<b>Declaración de financiamiento</b> La presente investigación no recibió financiamiento específico de agencias públicas, comerciales o de organizaciones sin fines de lucro. En caso de existir financiamiento institucional o externo, este deberá ser declarado explícitamente por los autores en esta sección.
<b>Declaración del editor</b> El editor responsable certifica que el proceso editorial del presente artículo se desarrolló conforme a los principios de integridad científica, transparencia y buenas prácticas editoriales. El manuscrito fue sometido a un proceso de evaluación mediante revisión por pares doble ciego, garantizando la confidencialidad de la identidad de los autores y revisores durante todo el proceso de dictamen académico. Asimismo, el editor declara que el artículo cumple con los criterios científicos, metodológicos y éticos establecidos por la revista.
<b>Declaración de los revisores</b> Los revisores externos que participaron en la evaluación del presente manuscrito declaran haber realizado el proceso de revisión de manera objetiva, independiente y confidencial. Asimismo, manifiestan que no mantienen conflictos de interés con los autores ni con la investigación evaluada, y que sus observaciones y recomendaciones se fundamentan exclusivamente en criterios científicos, metodológicos y académicos.
<b>Declaración ética de la investigación</b> Los autores declaran que la investigación se desarrolló respetando los principios éticos de la investigación científica, garantizando la confidencialidad de los datos y el respeto a los participantes del estudio. En los casos en que la investigación involucre seres humanos, los procedimientos deben ajustarse a los principios éticos establecidos en la Declaración de Helsinki y a las normativas institucionales correspondientes.
<b>Declaración sobre el uso de inteligencia artificial</b> Los autores declaran que el uso de herramientas de inteligencia artificial, en caso de haberse utilizado durante el proceso de investigación o redacción del manuscrito, se realizó únicamente como apoyo técnico para mejorar la claridad del lenguaje o el análisis de información, manteniendo siempre la responsabilidad intelectual sobre el contenido del artículo. Las herramientas de inteligencia artificial no fueron utilizadas como autoras del manuscrito ni sustituyen la responsabilidad académica de los investigadores.
<b>Disponibilidad de datos</b> Los datos que respaldan los resultados de esta investigación estarán disponibles previa solicitud razonable al autor de correspondencia, respetando las normas éticas y de confidencialidad establecidas por la investigación.

