ISBN: 978-628-96613-1-6. ISSN: 2414-6390. Digital Object Identifier: https://dx.doi.org/10.18687/LACCEI2025.1.1.278

Emerging technologies in industrial wastewater treatment: a systematic review

Walter Manuel Hoyos Alayo[1]; Jorge Luis Leiva Piedra[2]
[1,2]Universidad Tecnológica del Perú, Perú, *c23712@utp.edu.pe, jleiva@utp.edu.pe*

Abstract*– There is a growing interest in the development of highly efficient and sustainable treatments for the removal of pollutants that are difficult to remove by traditional methods. In this sense, the objective was to explore and critically analyze emerging technologies in industrial wastewater treatment, seeking to provide a comprehensive overview of the most recent advances in this field, assessing their efficiency, sustainability, and feasibility of various innovative methodologies, as well as to identify the strengths and limitations of each technology. To this end, a systematic literature review was carried out using the PICOC method and a screening of scientific articles by means of PRISMA, obtaining a sample of 95 publications. The results showed that the efficiency of the emerging technologies is above 90% for most organic, inorganic, and microbiological pollutants, with the adsorption method standing out. Despite the advantages offered by these technologies, there are still challenges, such as high costs and validation at industrial scale. It is concluded that the current industrial wastewater treatment landscape is characterized by a wide range of emerging technologies that seek to address the specific challenges associated with the diversity of pollutants; these innovations focus on advanced adsorption methods, photocatalysis, advanced oxidation, bioremediation, nanofiltration, among others, each under unique approaches, to achieve more effective and sustainable industrial wastewater management.

***Keywords*-- Contamination; industrial wastewater; emerging technologies; evolution; treatments.**

Tecnologías emergentes en el tratamiento de aguas residuales industriales: Una revisión sistemática

Walter Manuel Hoyos Alayo[1]; Jorge Luis Leiva Piedra[2]
[1,2]Universidad Tecnológica del Perú, Perú, *c23712@utp.edu.pe, jleiva@utp.edu.pe*

Resumen– ***Existe un creciente interés en el desarrollo de tratamientos altamente eficientes y sostenibles para la remoción de contaminantes difíciles de remover por métodos tradicionales. En ese sentido se planteó como objetivo explorar y analizar críticamente las tecnologías emergentes en el tratamiento de aguas residuales industriales, buscando proporcionar una visión exhaustiva de los avances más recientes en este campo, evaluando su eficiencia, sostenibilidad y viabilidad de diversas metodologías innovadoras; así también, identificar las fortalezas y limitaciones de cada tecnología. Para ello, se realizó una revisión sistemática de literatura en la que se utilizó el método PICOC y un cribado de artículos científicos mediante el PRISMA, obteniéndose una muestra de 95 publicaciones. Los resultados mostraron que la eficiencia de las tecnologías emergentes es superior al 90% en la gran mayoría de los contaminantes orgánicos, inorgánicos y microbiológicos, resaltando el método de adsorción. A pesar de las ventajas que ofrecen estas tecnologías, aún existen desafíos, tales como costos elevados y su validación a escala industrial. Se concluye que el panorama actual del tratamiento de aguas residuales industriales se caracteriza por una amplia gama de tecnologías emergentes que buscan abordar los desafíos específicos asociados con la diversidad de contaminantes; estas innovaciones se centran en métodos avanzados de adsorción, fotocatálisis, oxidación avanzada, biorremediación, nanofiltración, entre otros, cada uno bajo enfoques únicos, para lograr una gestión más efectiva y sostenible de las aguas residuales industriales.***

Palabras clave-- Contaminación; aguas residuales industriales; tecnologías emergentes; evolución; tratamientos.

I. Introducción

La contaminación del agua debido al crecimiento urbano y desarrollo industrial, es uno de los principales problemas para muchas naciones [1], siendo, los vertimientos industriales, los que mayor impacto ambiental ocasionan [2], ya que estos exhiben variaciones en su composición y concentración de contaminantes [3], influenciados además por su naturaleza de producción y características del sistema de suministro [4]; lo que plantea un desafío para las empresas [5]. La presencia de metales pesados (As, Pb, Cu, Cr, Hg) en las aguas residuales industriales, son una preocupación importante por sus efectos nocivos y peligrosos sobre el medio ambiente [6], [7], ya que, al no degradarse química o biológicamente, se mantienen por largos periodos de tiempo [8]. Asimismo, la presencia de los HAP (HAP), colorantes azoicos y micro plásticos, causan preocupación por sus efectos mutagénicos y cancerígenos [9].

Esta problemática tiene consecuencias a nivel económico y social [10], afectando la calidad de vida de las comunidades locales [11], generando costos significativos para la recuperación y restauración de los ecosistemas afectados [12]. Así mismo, las comunidades que dependen de fuentes de agua contaminadas enfrentan una disminución en su calidad de vida [13], ya sea a través de la escasez de agua potable [14], la pérdida de medios de subsistencia como la pesca [15] y la agricultura [16], aumentando la presencia de enfermedades relacionadas con el agua [9]. La contaminación del agua puede tener efectos negativos en el turismo [4], reduciendo los ingresos locales y socavando el desarrollo económico en las zonas afectadas [12], intensificando las disparidades socioeconómicas y el aumento de la exclusión social [17].

El creciente interés por la protección del medio ambiente y un desarrollo socioeconómico sostenible, condicionan los procesos industriales para que tengan un menor impacto ambiental [12] buscando reducir la emisión de productos químicos y contaminantes tóxicos [18]. Es así que surge la necesidad de adoptar nuevas tecnologías en el tratamiento de aguas residuales industriales, buscando una mayor eficiencia en la eliminación de contaminantes [19], [20], el cumplimiento de regulaciones ambientales y sanitarias cada vez más estrictas [21], la protección del ambiente, la salud pública [22], la diversidad biológica y la conservación de hábitats naturales, la promoción de servicios ecosistémicos [13], la provisión de agua limpia [15], y la innovación y competitividad empresarial [23].

El tratamiento de aguas residuales ha evolucionado desde métodos rudimentarios como la sedimentación [6] y la filtración gruesa [24], especializándose en el tiempo con la introducción de métodos de desinfección como la cloración [25], el desarrollo de sistemas biológicos como los sistemas de lodos activados [26] y los filtros percoladores, que aprovechan microorganismos para degradar compuestos orgánicos [5] y remover nutrientes como N y P para prevenir la eutrofización de los cuerpos de agua [19]; hasta alcanzar tecnologías más sofisticadas como procesos de oxidación avanzada [27], membranas de ultrafiltración [28], ósmosis inversa [29], métodos de adsorción híbridos, entre otros [30]; los cuáles pretenden ser más sostenibles e incluyen enfoques de gestión de recursos como la recuperación de energía, la producción de biogas [4] y la recuperación de nutrientes para su reutilización en la agricultura u otras aplicaciones [31].

El presente estudio, explora y analiza críticamente las tecnologías emergentes en el tratamiento de aguas residuales industriales, proporcionando una visión exhaustiva de los avances más recientes en este campo, evaluando su eficiencia, sostenibilidad y viabilidad; así también, identificar las fortalezas y limitaciones de cada tecnología, destacando su potencial para superar los desafíos actuales.

II. MATERIALES Y MÉTODOS

A. *Pregunta de revisión y preguntas específcas.*

La pregunta principal de revisión fue: ¿Cuál es el nivel de eficiencia alcanzado con las tecnologías emergentes de tratamiento para aguas residuales contaminadas? la cual se elaboró atendiendo a los criterios establecidos en la estrategia de búsqueda PICOC, ver Tabla I. De la pregunta general surgieron cuestiones que nos ayudaron a enfocar y guiar la RSL en un marco claro para analizar y sintetizar la información recopilada; proponiéndose las preguntas específicas que se muestran en los resultados:

TABLA I
PREGUNTA PICOC – COMPONENTES

Acrónimo	Componente	Descripción
P	Problema	¿Cuál es la naturaleza y magnitud de los contaminantes presentes en las aguas residuales industriales que representan un desafío crítico?
I	Intervención	¿Qué tecnologías emergentes están siendo exploradas o implementadas para tratar estos contaminantes de manera eficaz y sostenible?
C	Comparación	¿Cómo se comparan las eficiencias de eliminación de contaminantes?
O	Resultado	¿Qué mejoras en términos de eficiencia, reducción de contaminantes y sostenibilidad se esperan?
C	Contexto	¿Cuáles son las principales limitaciones prácticas, como la viabilidad económica o la escalabilidad en el contexto industrial?

B. *Estrategia de búsqueda y selección de artículos.*

Se optó por un conjunto de palabras clave para cada elemento de la pregunta PICOC, aplicando el operador boleano (OR), ver Tabla II. Estos términos clave, estructurados en una fórmula de búsqueda, nos permitieron una exploración bibliográfica lógica en SCOPUS. Los estudios obtenidos como resultado de esta ecuación de búsqueda se revisaron y seleccionaron a partir de los siguientes criterios detallados en la Tabla III. Esto posibilitó la recuperación de 740 publicaciones científicas de Scopus (n = 740), los cuales fueron sometidos a un proceso de selección siguiendo los protocolos establecidos por PRISMA, ver Fig. 1, quedándose con 95 artículos. La representación gráfica y visualización de las redes bibliométricas de los datos obtenidos, se usó el software VOSviewer versión 1.6.20.

C. *Ecuación final de búsqueda.*

Realizadas las interacciones de búsqueda, se obtuvo la siguiente ecuación: (TITLE-ABS-KEY (contamination OR pollution) AND TITLE-ABS-KEY ("Emerging technologies" OR "Emerging technology" OR technology OR treatment) AND TITLE-ABS-KEY ("Variability in the level of efficiency" OR "Efficiency level variability" OR "Variability in the efficiency level" OR "Variability in efficiency level" OR "Efficiency of treatment technologies" OR "Efficiency of the treatment technologies" OR "Treatment technology efficiency" OR "efficiency of technologies" OR "efficiency of the technologies" OR "technology efficiency" OR "efficiency of technology" OR efficiency) AND TITLE-ABS-KEY ("Physicochemical pollutant parameters" OR "Physicochemical parameters pollutants" OR "Physicochemical polluting parameters" OR "Physicochemical parameters contaminants" OR "Pollutant parameters" OR "Contaminant parameters" OR "Polluting parameters" OR "contaminating parameters" OR pollutants OR contaminants) AND TITLE-ABS-KEY ("Industrial wastewater" OR "Industrial waste water")) AND PUBYEAR > 2018 AND PUBYEAR < 2025 AND (LIMIT-TO (LANGUAGE , "English")) AND (LIMIT-TO (DOCTYPE , "ar")) AND (LIMIT-TO (PUBSTAGE , "final")) AND (LIMIT-TO (OA , "all")).

TABLA II
PALABRAS CLAVE SELECCIONADAS Y SINTAXIS DE BÚSQUEDA

Componente	Descripción	Palabras clave	Síntaxis de búsqueda.
Problema	Contaminación	Contamination, Pollution.	Contamination OR Pollution
Intervención	Tecnologías emergentes para el tratamiento aguas residuales Industriales.	Emerging technologies.	"Emerging technologies" OR "Emerging technology" OR Technology OR Treatment
Comparación	Variabilidad en el nivel de eficiencia de las tecnologías de tratamiento.	Variability in the level of efficiency.	"Treatment technology efficiency" OR "efficiency of technologies" OR "technology efficiency" OR "efficiency of technology" OR Efficiency
Resultado	Nivel de eficiencia en la reducción de parámetros fisicoquímicos contaminantes.	Physicochemical pollutant parameters.	"Pollutant parameters" OR "Contaminant parameters" OR "Polluting parameters" OR "contaminating parameters" OR Pollutants OR Contaminants
Contexto	Aguas residuales Industriales.	Industrial wastewater.	"Industrial wastewater" OR "Industrial waste water"

TABLA III
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 el tratamiento de aguas residuales industriales. **C.I.2. Los estudios deben detallar las eficiencias de las tecnologías aplicadas.** **C.I.3. Los estudios deben reportar resultados para cada parámetro contaminante.**	C.E.1. Artículos publicados anteriores a 2019 y posteriores al 2024. C.E.2. Publicaciones en idioma diferente al inglés. C.E.3. Tipo de publicación no corresponde a artículo. C.E.4. Estado o etapa de publicación distinta a final. C.E.5. Artículos que no permitan un acceso libre.

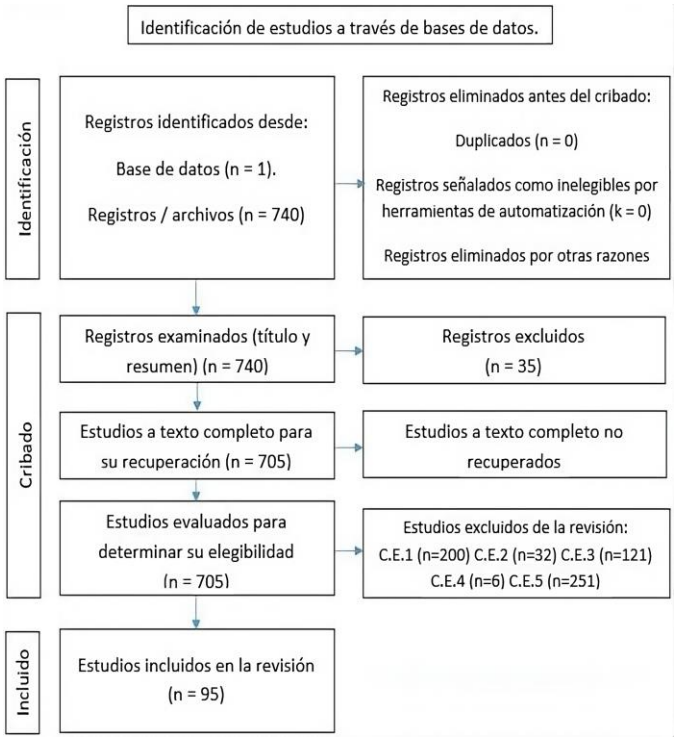


Fig. 1 Resultados de las etapas del proceso de selección de la bibliografía.

III. Resultados y Discusión

A. ¿Qué tecnologías emergentes existen y que eficiencia han alcanzado?

Las tecnologías emergentes, en el tratamiento de aguas residuales industriales, muestran un creciente interés, las cuales además ofrecen ventajas significativas en términos de eficiencia, comparados con los métodos tradicionales [32], ver Tabla IV.

Los resultados muestran que las tecnologías emergentes en el tratamiento de aguas residuales industriales están alcanzando eficiencias notables, superando en muchos casos a los métodos tradicionales [33]. La adsorción, ya sea utilizando materiales poliméricos, nanoestructuras o residuos agrícolas [34], han demostrado eficacias notables en la eliminación de metales pesados, compuestos orgánicos, y colorantes [35]. La fotocatálisis emerge como una técnica versátil, destacando por su capacidad para degradar una amplia variedad de contaminantes [36], incluidos compuestos farmacéuticos, colorantes, y productos químicos orgánicos [37]. La biorremediación, mediante consorcios microbianos, hidrófitas, o en sistemas de humedales [38], ha demostrado eficacia en la eliminación de metales, DBO, y color [39]. Sin embargo, la implementación a gran escala y los costos asociados siguen siendo los principales obstáculos para su adopción masiva [40]; las soluciones híbridas y el enfoque en la recuperación de recursos serán clave para superar estos desafíos y avanzar hacia una gestión de aguas residuales más sostenible y eficaz [41].

B. ¿Qué ventajas y desventajas muestran las tecnologías emergentes?

Las tecnologías emergentes en el tratamiento de aguas residuales industriales ofrecen una serie de ventajas en términos de eficiencia [23] y en la eliminación de una amplia gama de contaminantes [11], incluyendo compuestos orgánicos recalcitrantes [31], microcontaminantes [24], nutrients [19] y microorganismos patógenos [18]; en cuanto a la sostenibilidad [8] como en los procesos electroquímicos [6] o el uso de nanomaterials [10], y los sistemas de membranas avanzadas [42] que pueden reducir la generación de lodos [43] y subproductos no deseados [44] generando una menor carga de residuos para su disposición [45]; adicional, permiten la recuperación de agua [28], nutrientes [46] y metals [47]; convirtiéndolas en opciones atractivas para los desafíos ambientales y sanitarios [45] asociados con la gestión de aguas residuales industrials [21].

Estas ventajas posicionan a las tecnologías emergentes como opciones atractivas para el tratamiento de aguas residuales industrials [33]; a su vez, su eficiencia en la eliminación de diversos contaminantes, incluidos compuestos orgánicos recalcitrantes, microcontaminantes y microorganismos patógenos, destaca su versatilidad [35] y capacidad para abordar la complejidad de las matrices de contaminantes presents [48]; además, la recuperación de agua, nutrientes y metales, le agrega un valor adicional a estas tecnologías [49], alineándolas con objetivos más amplios de economía circular y sostenibilidad [50].

Por otro lado, a pesar de sus numerosas ventajas, estas tecnologías emergentes también presentan algunas desventajas o limitaciones [15] como costo inicial elevado debido al requerimiento de equipos y materiales especializados [16]; complejidad operative [18]; alto consumo de energía [42] y recursos durante la operación [23]; limitaciones en la remoción de ciertos contaminantes específicos como microplásticos [26] y productos químicos persistentes [31]; dado que muchas, están en una etapa temprana de Desarrollo [47], requiriendo investigaciones adicionales [51] y pruebas a escala piloto para validar su eficacia y seguridad [19] antes de su implementación a gran escala [30].

Las desventajas y limitaciones que estas poseen son principalmente, el costo inicial elevado [39], su complejidad operative [52] y el consumo de energía; siendo desafíos económicos y logísticos que deben considerarse cuidadosamente [53]; asimismo, la investigación continua y las pruebas a escala piloto son esenciales para validar su eficacia y seguridad, antes de su implementación a gran escala [54]; además, algunas tecnologías presentan limitaciones en la remoción de contaminantes específicos, como microplásticos y productos químicos persistentes [37], destacando la necesidad de soluciones integradas y enfoques complementarios [55].

TABLA IV
DESCRIPCIÓN DE LAS EFICIENCIAS DE REMOCIÓN DE LAS TECNOLOGÍAS EMERGENTES

Tecnología	Variación	Eficiencia	Tipo de contaminante	Autor
Adsorción	Usando materiales poliméricos	82% - 100%	Cr (IV), Hg (II)	[56]
		90%	Zn	[12]
		90%	Fenoles, Pesticidas y Antibióticos	[57]
		652,3 mg g-1	Colorante Rojo Congo	[11]
		97%	Colorante azoico naranja de metilo	[58]
		99.9%	Separación de aceites.	[59]
	Usando nanoestructuras	80%	Cr (IV), Fe (II)	[47]
		90.9%	Pb (II)	[60]
		87% - 96%	Selenometionina y selenocisteína	[61]
	Usando la pared ceular de bacterias endofíticas	70%	Cr (II)	[13]
	Usando biofilm	96%	Pb (II)	[62]
	Usando escoria de hornos	43,8 mg g-1	Co (II)	[46]
		30,2 mg g-1	Pb (II)	
	Combinado con procesos electroquímicos y técnicas de membrana	100 %	Ni (II)	[29]
	Usando polvos de cáscara de granada	413.22 mg g-1	Cr (VI)	[63]
	Usando cáscara de huevo	100%	Pb (II)	[14]
	Usando cáscara de arroz	94.3%	Zn (II)	[64]
		89.2%	Cr (VI)	
	Usando carbón activado de polietileno y poliestireno	82% - 98%	HAP	[45]
	Carbon activado de ulva lactuca	89%	Azul de metileno	[22]
	Usando biochar de cáscara de almendra de palma	93%	HAP	[9]
	Combinado con un sistema de ultrasonido.	945,8 mg g−1	As (V)	[17]
	Usando humedales	78%	P	[19]
		48%	Cr	
Fotocatálisis	Luz solar	90.4%	Tetraciclina	[65]
	Lámpara UV	57%	Ác. perfluorobutanoico	[66]
		80%	Ác. perfluorooctanoico	
		60%	Sulfonato de perfluorooctano	
		85.5% - 91.2%	Sulfatos, DQO	[27]
	Luz visible	95.7%	Cr (VI)	[2]
	Lampara visible con diodos led.	100%	Colorante Rhodamine B	[32]
		91.3%	Rojo Fenol	[67]
	Luz UV y luz solar.	40%	Metanol	[44]
	Lámpara UVC	100%	Rojo Congo, Naranja de metilo	[68]
	Luz UV – Visible combinada con nanorods de sulfuro de Cd	35%	Azul de metileno	[51]
	Luz UV – Visible combinada con nanopartículas.	92%	Tinte amarillo	[69]
	Luz UV – combinada con nanoestructuras de holmio	67.6%	Colorante violeta de metilo	[70]
	Luz visible, combinada con nanofibras de Ag/Fe3O4/TiO2	90%	Cr (VI)	[71]
Biorremediación	Usando consorcios microbianos	82%	DQO	[5]
		66%	DBO	
		45% - 52.2%	Dureza total, SDT	[7]
		87%	Color	[72]
	Usando hidrófitas	82.2% - 85.1%	Zn, Cr	[3]
	Fitorremediación	59% al 92%	Cd, As, Zn y Cr.	[73]
		96%	Pb	[8]
	Ficorremediación	70%	Metales pesados	[20]
	Humedales híbridos	95%	DQO	[74]
		96%	DBO	[75]
		73.8%	Nitrógeno amoniacal	
Oxidación avanzada	Usando oxígeno atmosférico en presencia de catalizadores	80%	Fenoles	[4]
	Usando descargas eléctricas	93%	Microcontaminantes (Pesticidas)	[76]
	Usando ozonización con peróxido de calcio	70%	DQO	[77]
Coagulación avanzada	Usando taninos modificados	96.4%	Color	[1]
Degradación Electroquímica	Usando catalizador de Co y nitrógeno.	100%	Bisfenol A	[78]
Humidificación y dehumidificación	Combinados	Corrección del pH de aguas ácidas de 3.0 a 5.7		[15]
Foto – fenton	-	35%	Paracetamol, Sulfametazina	[79]
		66%	HAP	[31]
Cavitación hidrodinámica	-	99%	*Escherichia coli*	[80]
		98%	*Staphylococcus aureus*	
Electrorefinación	-	100%	Cu, Fe, Al, Zn, Ni, As y Pb.	[81]

C. ¿Cuáles son los retos y perspectivas futuras de las tecnologías emergentes?

Las tecnologías emergentes vienen experimentando avances significativos, sin embargo, persisten diversos retos que requieren atención [6]. Entre estos desafíos estan la necesidad de mejorar la eficiencia y la rentabilidad [8], así como la variabilidad en las características de las aguas residuales con una visión holística [4]; además, se requiere que estas tecnologías se integren a enfoques de gestión de recursos, como la recuperación de energía [28] y nutrientes, para promover su sostenibilidad [10]. En el futuro, se espera que la continua innovación [56] y colaboración entre la industria, universidad y estado desempeñen un papel crucial en su desarrollo e implementación, generando soluciones más efectivas y sostenibles para abordar estos desafíos [18].

En los últimos años, aunque se ha registrado un aumento significativo en la cantidad de investigaciones, especialmente a partir de 2019, la mayoría de estos estudios se ha desarrollado en entornos de laboratorio o como pruebas piloto [32], lo que genera expectativas sobre su futura aplicación a escala industrial [23]; en este contexto, la Fig. 2 muestra la evolución de las publicaciones relacionadas con tecnologías emergentes para el tratamiento de aguas residuales industriales, destacando un incremento sustancial desde 2019 y alcanzando un notable 73.5% de incremento en el periodo comprendido hasta 2024; este crecimiento refleja no solo una creciente preocupación global por la sostenibilidad en la gestión de aguas residuals [82], sino también el impacto de regulaciones ambientales más estrictas [83] y la necesidad urgente de abordar contaminantes persistentes [84]; además, esta tendencia pone de manifiesto un cambio hacia soluciones innovadoras, tales como la adsorción avanzada y la fotocatálisis, reconocidas por su elevada eficiencia [85], [86], [87], aunque es necesario señalar que la falta de validación a escala industrial sigue siendo un desafío crítico que debe priorizarse en investigaciones futuras [88].

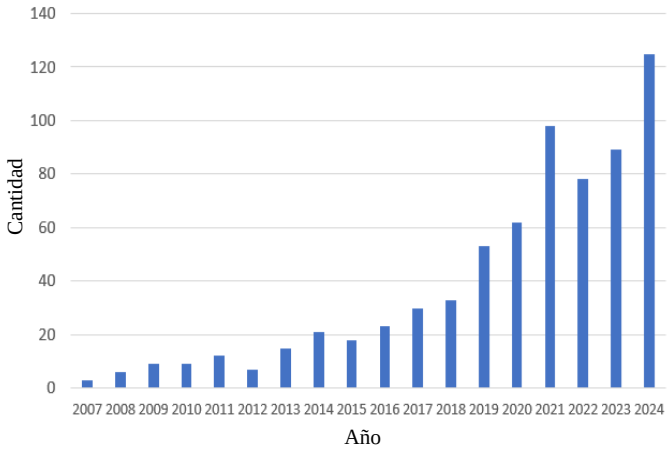


Fig. 2 Publicaciones por año.

A su vez, en la Fig. 3 se evidencia que las palabras clave más relevantes, estrechamente asociadas con las tecnologías emergentes para el tratamiento de aguas residuales industriales, son adsorción, metales pesados, aguas residuales, aguas residuales industriales y tratamiento de aguas residuales; destacándose las tres últimas por su alta frecuencia de co-ocurrencia debido a su carácter general, mientras que adsorción y metales pesados sobresalen en el contexto investigativo, ya que los metales pesados representan los contaminantes de mayor preocupación [89] y la adsorción, en sus distintas modalidades, constituye el método más eficiente para su remoción [90], [91]; este hallazgo resalta la capacidad probada de la adsorción para eliminar eficazmente metales pesados y compuestos orgánicos recalcitrantes [92], [93], lo cual, además de confirmar un enfoque amplio respaldado por palabras clave generales como tratamiento de aguas residuales, muestra una tendencia reciente que prioriza las tecnologías de adsorción debido a su sostenibilidad, versatilidad y menor generación de subproductos tóxicos [94], [95].

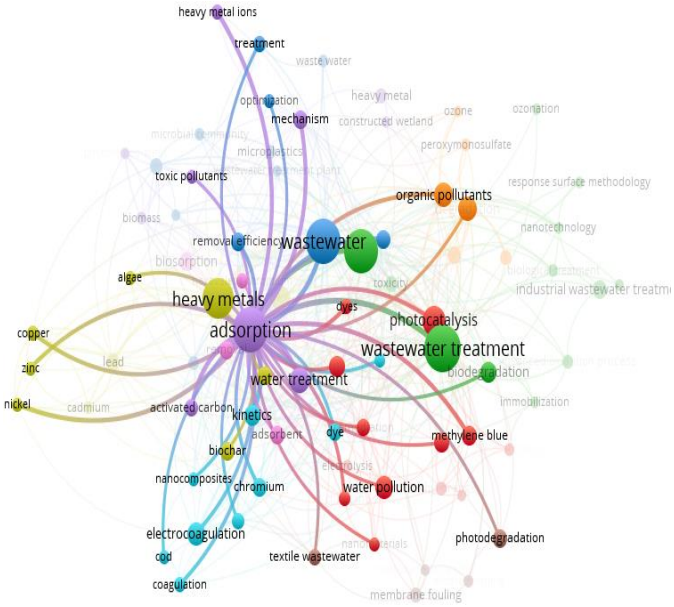


Fig. 3 Co-ocurrencia de palabras clave.

Finalmente, en la Fig. 4, se muestra que la palabra clave que más impulso tiene en relación a la tecnologías de tratamiento es la adsorción, principalmente desde el 2020 en adelante; siendo está la tecnología emergente predominante a investigar [11] y sobre la cual se han desarrollado múltiples variantes para poder dar solución a los distintos tipos de contaminantes [59]; asimismo, su prominencia refleja la diversificación tecnológica para enfrentar contaminantes específicos [96], [97], como el uso de materiales nanoestructurados o biosorbentes de bajo costo [98], [99]; en ese sentido, este enfoque representa un progreso significativo hacia la adopción de la economía circular, alineándose con la recuperación de recursos y la minimización de residuos en aguas residuales industrials; sin embargo, los retos de escalabilidad y costos aún limitan su aplicación en contextos reales [30], [51].

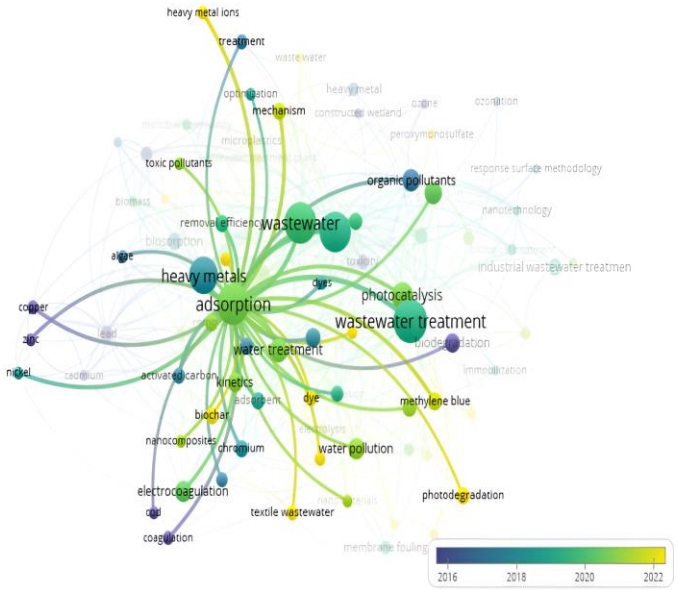


Fig. 4 Evolución de las palabras clave.

El tratamiento de aguas residuales industriales representa un desafío crucial [33] evidenciando una búsqueda continua de soluciones sostenibles para la conservación del medio ambiente y la protección de la salud pública [52]; en ese sentido, uno de los principales desafíos es mejorar la eficiencia y la rentabilidad de estas tecnologías [6] porque a pesar de los avances, muchos sistemas aún enfrentan dificultades para alcanzar niveles óptimos de eficiencia [30] y, mantener costos operativos bajos [65]. Esto resalta la necesidad de desarrollar soluciones más eficaces y económicas para hacer frente a la complejidad de las aguas residuales industrials [79] debido a su variabilidad fisicoquímica y microbiológica [39].

IV. Conclusiones

Las tecnologías emergentes en el tratamiento de aguas residuales industriales, como la adsorción, la fotocatálisis y la biorremediación, han demostrado desempeños notables debido a su capacidad para abordar contaminantes diversos con alta eficiencia; asimismo, la adsorción mediante nanoestructuras y residuos agrícolas permite la eliminación total de metales pesados como Pb (II) y Ni (II), mientras que en el caso de contaminantes orgánicos complejos, el uso de polvos derivados, como la cáscara de granada, alcanza una capacidad destacable de hasta 413.22 $mg.g^{-1}$ para Cr (VI); simultáneamente, la fotocatálisis que combina luz UV-visible y nanopartículas logra degradar entre el 91% y el 100% de tintes y compuestos orgánicos persistentes, superando significativamente a los métodos convencionales tanto en variedad de contaminantes tratables como en eficacia; sin embargo, su implementación a gran escala enfrenta desafíos significativos, entre los cuales destacan los elevados costos asociados a su desarrollo y la limitada validación de su rendimiento en entornos industriales.

Las tecnologías emergentes no solo proporcionan soluciones eficaces para la remoción de contaminantes, sino que también facilitan la recuperación de recursos valiosos, como agua purificada y nutrientes reutilizables, contribuyendo así al paradigma de la economía circular; en ese sentido, los procesos híbridos que integran adsorción con membranas o sistemas electroquímicos han logrado eficiencias del 100%, consolidándose como herramientas prometedoras en la gestión de residuos; no obstante, persisten limitaciones, particularmente en el tratamiento de microplásticos y compuestos persistentes, como los sulfonatos de perfluorooctano, cuya remoción mediante fotocatálisis alcanza apenas el 60%; por lo cual, estos retos ponen de manifiesto la urgencia de combinar enfoques complementarios y multifuncionales que aumenten su versatilidad frente a una gama más amplia de contaminantes emergentes.

La evolución observada en la literatura reciente sugiere un interés creciente hacia soluciones innovadoras como tecnologías híbridas; a su vez, el avance de enfoques como la fotocatálisis y la biotecnología para la remediación plantea un horizonte promisorio, donde la colaboración multisectorial y la investigación piloto serán clave para su consolidación; en este contexto, el desarrollo de soluciones que integren altos niveles de eficiencia con menores costos será determinante para garantizar su adopción masiva; además, la colaboración estratégica entre el sector industrial, la academia y las entidades públicas resultará esencial para acelerar la validación en condiciones reales y fomentar su implementación a gran escala; asimismo, este esfuerzo conjunto debería enfocarse en optimizar tecnologías dirigidas a contaminantes de difícil tratamiento, como el rojo fenol y los microcontaminantes farmacéuticos, cuyo manejo continúa siendo un desafío crítico en los sistemas actuales.

Referencias

[1] D. E. Uez, E. Hansen, D. M. Osório, y P. M. de Aquim, «Reducing the pollution load of tannery wastewater and the atmospheric emission of hydrogen sulfide using modified tannin», *Water Sci. Technol.*, vol. 87, n.º 6, pp. 1542-1551, 2023, doi: 10.2166/wst.2023.075.

[2] L. Wu, D. Qin, F. Fang, W. Wang, y W. Zhao, «Development of Efficient Photocatalyst MIL-68(Ga)_NH2 Metal-Organic Framework for the Removal of Cr(VI) and Cr(VI)/RhB from Wastewater under Visible Light», *Materials*, vol. 15, n.º 11, 2022, doi: 10.3390/ma15113761.

[3] N. Farid *et al.*, «Algae and Hydrophytes as Potential Plants for Bioremediation of Heavy Metals from Industrial Wastewater», *Water Switz.*, vol. 15, n.º 12, 2023, doi: 10.3390/w15122142.

[4] B. T. Dossumova *et al.*, «NATURAL WATERS AND INDUSTRIAL WASTEWATER, WASTEWATER WITH PHENOL-CONTAINING COMPOUNDS, METHODS OF WATER PURIFICATION», *Rasayan J. Chem.*, vol. 16, n.º 3, pp. 1591-1598, 2023, doi: 10.31788/RJC.2023.1638403.

[5] K. Bashir *et al.*, «Bioremediation of Metal-Polluted Industrial Wastewater with Algal-Bacterial Consortia: A Sustainable Strategy», *Sustain. Switz.*, vol. 15, n.º 19, 2023, doi: 10.3390/su151914056.

[6] S. A. Razzak *et al.*, «A comprehensive review on conventional and biological-driven heavy metals removal from industrial wastewater», *Environ. Adv.*, vol. 7, 2022, doi: 10.1016/j.envadv.2022.100168.

[7] R. Ali *et al.*, «Bioremediation of Heavy Metals from Industrial Effluents Using Bacillus pakistanensis and Lysinibacillus composti», *Sustain. Switz.*, vol. 15, n.º 9, 2023, doi: 10.3390/su15097591.

[8] J. Emiliani, W. G. L. Oyarce, C. D. Bergara, L. M. Salvatierra, L. A. B. Novo, y L. M. Pérez, «Variations in the phytoremediation efficiency of metal-pollutedwater with salvinia biloba: Prospects and toxicological impacts», *Water Switz.*, vol. 12, n.º 6, 2020, doi: 10.3390/W12061737.

[9] A. Alhothali *et al.*, «Optimization of micro-pollutants' removal from wastewater using agricultural waste-derived sustainable adsorbent», *Int. J. Environ. Res. Public. Health*, vol. 18, n.º 21, 2021, doi: 10.3390/ijerph182111506.

[10] M. Kamali, K. M. Persson, M. E. Costa, y I. Capela, «Sustainability criteria for assessing nanotechnology applicability in industrial wastewater treatment: Current status and future outlook», *Environ. Int.*, vol. 125, pp. 261-276, 2019, doi: 10.1016/j.envint.2019.01.055.

[11] S. Wang *et al.*, «Potassium citrate-derived porous carbon with high CO2 capture and Congo red adsorption performance», *Environ. Sci. Eur.*, vol. 35, n.º 1, 2023, doi: 10.1186/s12302-023-00712-9.

[12] D. A. S. Alves, A. B. Botelho Junior, D. C. R. Espinosa, J. A. S. Tenório, y M. D. P. G. Baltazar, «Copper and zinc adsorption from bacterial biomass - possibility of low-cost industrial wastewater treatment», *Environ. Technol. U. K.*, vol. 44, n.º 16, pp. 2441-2450, 2023, doi: 10.1080/09593330.2022.2031312.

[13] H. Luo *et al.*, «Efficient removal of heavy metals by endophytic bacteria Staphylococcus succinus H3», *J. Appl. Microbiol.*, vol. 134, n.º 1, 2023, doi: 10.1093/jambio/lxac040.

[14] H. Çelebi, T. Bahadır, İ. Şimşek, y Ş. Tulun, «An Environmental and Green Process for Pb2+ Pollution: An Experimental Research from the Perspective of Adsorption †», *Eng. Proc.*, vol. 19, n.º 1, 2022, doi: 10.3390/ECP2022-12658.

[15] Y. Zeng, L. Ma, y P. Bai, «Study of Organic Acid Pollutant Removal Efficient in Treatment of Industrial Wastewater with HDH Process Using ASPEN Modelling», *Water Switz.*, vol. 14, n.º 22, 2022, doi: 10.3390/w14223681.

[16] A. S. Smolyanichenko y E. V. Yakovleva, «OPTIMIZATION OF THE PROCESS OF INDUSTRIAL WASTEWATER TREATMENT BY DISAGGREGATION OF PHASE-DISPERSED CONTAMINANTS», *Sib. J. Life Sci. Agric.*, vol. 14, n.º 6, pp. 34-50, 2022, doi: 10.12731/2658-6649-2022-14-6-34-50.

[17] Q. Lin, W. Chen, F. Lin, H. Zhu, y X. Wang, «Exaggerated arsenic removal efficiency and pH adaptability by adsorption using monodispersed porous pinecone-like magnesium hydroxide», *Aqua Water Infrastruct. Ecosyst. Soc.*, vol. 72, n.º 6, pp. 969-982, 2023, doi: 10.2166/aqua.2023.012.

[18] Q. Li *et al.*, «Construction of hybrid constructed wetlands for phosphorus chemical industry tailwater treatment in the middle Yangtze river basin: Responses of plant growth and root-associated microbial communities», *Water Biol. Secur.*, vol. 2, n.º 3, 2023, doi: 10.1016/j.watbs.2023.100144.

[19] A. García-Valero *et al.*, «Treatment of wastewater from the tannery industry in a constructed wetland planted with phragmites australis», *Agronomy*, vol. 10, n.º 2, 2020, doi: 10.3390/agronomy10020176.

[20] D. I. Atoku, O. Z. Ojekunle, A. M. Taiwo, y O. B. Shittu, «Evaluating the efficiency of Nostoc commune, Oscillatoria limosa and Chlorella vulgaris in a phycoremediation of heavy metals contaminated industrial wastewater», *Sci. Afr.*, vol. 12, 2021, doi: 10.1016/j.sciaf.2021.e00817.

[21] O. T. Opafola, A. O. David, F. O. Ajibade, H. O. Adeyemi, O. I. Solana, y B. D. Odugbose, «The utilization of bentonite enhanced termite mound soil mixture as filter for the treatment of paint industrial effluent», *SN Appl. Sci.*, vol. 3, n.º 4, 2021, doi: 10.1007/s42452-021-04405-x.

[22] N. H. M'sakni y T. Alsufyani, «Removal of cationic organic dye from aqueous solution by chemical and pyrolysis activated ulva lactuca», *Water Switz.*, vol. 13, n.º 9, 2021, doi: 10.3390/w13091154.

[23] H. He, B. M. Wagner, A. L. Carlson, C. Yang, y G. T. Daigger, «Recent progress using membrane aerated biofilm reactors for wastewater treatment», *Water Sci. Technol.*, vol. 84, n.º 9, pp. 2131-2157, 2021, doi: 10.2166/wst.2021.443.

[24] M. Umar, C. Singdahl-Larsen, y S. B. Ranneklev, «Microplastics Removal from a Plastic Recycling Industrial Wastewater Using Sand Filtration», *Water Switz.*, vol. 15, n.º 5, 2023, doi: 10.3390/w15050896.

[25] L. Wang, H. Liang, K. Zhang, H. Huang, y Q. Wang, «The research on the control of chlorinated by-products by the combined process of three-dimensional electrode system and ultraviolet-photocatalytic oxidation», *Water Sci. Technol.*, vol. 84, n.º 12, pp. 3586-3598, 2021, doi: 10.2166/wst.2021.476.

[26] I. Uogintė, S. Pleskytė, J. Pauraitė, y G. Lujanienė, «Seasonal variation and complex analysis of microplastic distribution in different WWTP treatment stages in Lithuania», *Environ. Monit. Assess.*, vol. 194, n.º 11, 2022, doi: 10.1007/s10661-022-10478-x.

[27] E. K. Tetteh, E. O. Ezugbe, S. Rathilal, y D. Asante-Sackey, «Removal of COD and SO42-from oil refinery wastewater using a photo-catalytic system-comparing TiO2 and zeolite efficiencies», *Water Switz.*, vol. 12, n.º 1, 2020, doi: 10.3390/w12010214.

[28] A. Yfantis *et al.*, «Industrial Pilot for Assessment of Polymeric and Ceramic Membrane Efficiency in Treatment of Liquid Digestate from Biogas Power Plant», *Energies*, vol. 15, n.º 18, 2022, doi: 10.3390/en15186574.

[29] I. Kruszelnicka *et al.*, «Removal of nickel(II) from industrial wastewater using selected methods: a review», *Chem. Process Eng. - Inzynieria Chem. Proces.*, vol. 43, n.º 4, pp. 437-448, 2022, doi: 10.24425/cpe.2022.142284.

[30] K. Witt, M. A. Kaczorowska, y D. Bożejewicz, «Efficient, fast, simple, and eco-friendly methods for separation of toxic chromium(VI) ions based on ion exchangers and polymer materials impregnated with Cyphos IL 101, Cyphos IL 104, or D2EHPA», *Environ. Sci. Pollut. Res.*, vol. 31, n.º 5, pp. 7977-7993, 2024, doi: 10.1007/s11356-023-31648-5.

[31] A. N. Saber, R. Djellabi, I. Fellah, N. Abderrahim, y C. L. Bianchi, «Synergistic sorption/photo-Fenton removal of typical substituted and parent polycyclic aromatic hydrocarbons from coking wastewater over CuO-Montmorillonite», *J. Water Process Eng.*, vol. 44, 2021, doi: 10.1016/j.jwpe.2021.102377.

[32] L. Faccani, S. Ortelli, M. Blosi, y A. L. Costa, «Ceramized fabrics and their integration in a semi-pilot plant for the photodegradation of water pollutants», *Catalysts*, vol. 11, n.º 11, 2021, doi: 10.3390/catal11111418.

[33] P. Gour, J. Kumar, S. E. Arland, L. D. Roy, y N. Rahman, «Green synthesis of DL-homocysteine decorated magnetic nanoparticles for selective and efficient mercury remediation from simulated wastewater: Kinetics, isotherm, and mechanism studies», *Environ. Eng. Res.*, vol. 29, n.º 5, 2024, doi: 10.4491/eer.2023.584.

[34] B. Kulmedov y A. Mohammed, «Utilizing Modified Maize Cobs as an Agricultural Waste Adsorbent for Removing Zinc (II) and Chromium (VI) Ions from Wastewater», *Water Conserv. Sci. Eng.*, vol. 8, n.º 1, 2023, doi: 10.1007/s41101-023-00204-0.

[35] Y. Yue *et al.*, «Activated carbon derived from highland barley straw for removing heavy metals and organic pollutants», *Int. J. Low-Carbon Technol.*, vol. 19, pp. 135-141, 2024, doi: 10.1093/ijlct/ctad042.

[36] M. C. Zapata-Zúñiga, M. Á. Parra-Pérez, J. A. Álvarez-Berrio, y N. I. Molina-Gómez, «Technologies in wastewater treatment plants for the removal of antibiotics, resistant bacteria and antibiotic resistance genes: A review of the current literature*», *Ing. Univ.*, vol. 26, 2022, doi: 10.11144/Javeriana.iyu26.twtp.

[37] N. Venkatesh *et al.*, «Solar light-driven photocatalysis by Co doped SnS nanoparticles towards degradation of noxious organic pollutant: Mechanism and toxicity assessment», *J. Alloys Compd.*, vol. 970, 2024, doi: 10.1016/j.jallcom.2023.172624.

[38] J. Fletcher, N. Willby, D. Oliver, y R. S. Quilliam, «Engineering aquatic plant community composition on floating treatment wetlands can increase ecosystem multifunctionality», *Environ. Res.*, vol. 243, 2024, doi: 10.1016/j.envres.2023.117818.

[39] S. A. Khilji *et al.*, «Application of Algal Nanotechnology for Leather Wastewater Treatment and Heavy Metal Removal Efficiency», *Sustain. Switz.*, vol. 14, n.º 21, 2022, doi: 10.3390/su142113940.

[40] M. A. Aboulhassan, S. Harif, S. Souabi, y A. Yaacoubi, «Efficient and sustainable treatment of industrial wastewater using a tannin-based polymer», *Int. J. Sustain. Eng.*, vol. 14, n.º 6, pp. 1943-1949, 2021, doi: 10.1080/19397038.2021.1972181.

[41] A. K. Tolkou, E. K. Tsoutsa, G. Z. Kyzas, y I. A. Katsoyiannis, «Sustainable use of low-cost adsorbents prepared from waste fruit peels for the removal of selected reactive and basic dyes found in wastewaters», *Environ. Sci. Pollut. Res. Int.*, vol. 31, n.º 10, pp. 14662-14689, 2024, doi: 10.1007/s11356-024-31868-3.

[42] A. Alkhudhiri, M. Hakami, M.-P. Zacharof, H. A. Homod, y A. Alsadun, «Mercury, arsenic and lead removal by air gap membrane distillation:

Experimental study», *Water Switz.*, vol. 12, n.º 6, 2020, doi: 10.3390/W12061574.
[43] N. Nippatlapalli y L. Philip, «Assessment of novel rotating bipolar multiple disc electrode electrocoagulation-flotation and pulsed plasma corona discharge for the treatment of textile dyes», *Water Sci. Technol.*, vol. 81, n.º 3, pp. 564-570, 2020, doi: 10.2166/WST.2020.137.
[44] C. V. Montoya-Bautista, P. Acevedo-Peña, R. Zanella, y R.-M. Ramírez-Zamora, «Characterization and Evaluation of Copper Slag as a Bifunctional Photocatalyst for Alcohols Degradation and Hydrogen Production», *Top. Catal.*, vol. 64, n.º 1-2, pp. 131-141, 2021, doi: 10.1007/s11244-020-01362-4.
[45] M. Ilyas, W. Ahmad, y H. Khan, «Utilization of activated carbon derived from waste plastic for decontamination of polycyclic aromatic hydrocarbons laden wastewater», *Water Sci. Technol.*, vol. 84, n.º 3, pp. 609-631, 2021, doi: 10.2166/wst.2021.252.
[46] S. M. Abdelbasir y M. A. A. Khalek, «From waste to waste: iron blast furnace slag for heavy metal ions removal from aqueous system», *Environ. Sci. Pollut. Res.*, vol. 29, n.º 38, pp. 57964-57979, 2022, doi: 10.1007/s11356-022-19834-3.
[47] T. C. Egbosiuba *et al.*, «Adsorption of Cr(VI), Ni(II), Fe(II) and Cd(II) ions by KIAgNPs decorated MWCNTs in a batch and fixed bed process», *Sci. Rep.*, vol. 11, n.º 1, 2021, doi: 10.1038/s41598-020-79857-z.
[48] J. Meijide, G. Lama, M. Pazos, M. A. Sanromán, y P. S. M. Dunlop, «Ultraviolet-based heterogeneous advanced oxidation processes as technologies to remove pharmaceuticals from wastewater: An overview», *J. Environ. Chem. Eng.*, vol. 10, n.º 3, 2022, doi: 10.1016/j.jece.2022.107630.
[49] J. C. Czarnecki, B. Manoli, N. Fuad, y T. M. Vadas, «Disinfection byproduct formation from chlorination of agricultural reuse water sources», *Environ. Adv.*, vol. 15, 2024, doi: 10.1016/j.envadv.2024.100488.
[50] V. Hernández-Chover, Á. Bellver-Domingo, L. Castellet-Viciano, y F. Hernández-Sancho, «AI Applied to the Circular Economy: An Approach in the Wastewater Sector», *Sustain. Switz.*, vol. 16, n.º 4, 2024, doi: 10.3390/su16041365.
[51] S.-K. Chang *et al.*, «Rapid pH-dependent Photocatalytic Degradation of Methylene Blue by CdS Nanorods Synthesized through Hydrothermal Process», *Arab. J. Chem.*, vol. 17, n.º 1, 2024, doi: 10.1016/j.arabjc.2023.105422.
[52] M. Wilschnack, B. Homer, E. Cartmell, K. Yates, y B. Petrie, «Targeted multi-analyte UHPLC-MS/MS methodology for emerging contaminants in septic tank wastewater, sludge and receiving surface water», *Anal. Methods*, vol. 16, n.º 5, pp. 709-720, 2024, doi: 10.1039/d3ay01201h.
[53] M. Adeel, G. Maniakova, y L. Rizzo, «Tertiary/quaternary treatment of urban wastewater by UV/H2O2 or ozonation: Microplastics may affect removal of E. coli and contaminants of emerging concern», *Sci. Total Environ.*, vol. 907, 2024, doi: 10.1016/j.scitotenv.2023.167940.
[54] S. Mehariya *et al.*, «Microalgae: A potential bioagent for treatment of emerging contaminants from domestic wastewater», *Chemosphere*, vol. 351, 2024, doi: 10.1016/j.chemosphere.2024.141245.
[55] S. Murgolo *et al.*, «Multi-target assessment of advanced oxidation processes-based strategies for indirect potable reuse of tertiary wastewater: Fate of compounds of emerging concerns, microbial and ecotoxicological parameters», *Environ. Res.*, vol. 241, 2024, doi: 10.1016/j.envres.2023.117661.
[56] B. Wang *et al.*, «Feasible synthesis of bifunctional polysilsesquioxane microspheres for robust adsorption of Hg(II) and Ag(I): Behavior and mechanism», *J. Hazard. Mater.*, vol. 442, 2023, doi: 10.1016/j.jhazmat.2022.130121.
[57] J. S. Paneysar, S. Jain, N. Ahmed, S. Barton, P. Ambre, y E. Coutinho, «Novel smart composite materials for industrial wastewater treatment and reuse», *SN Appl. Sci.*, vol. 2, n.º 6, 2020, doi: 10.1007/s42452-020-2778-0.
[58] S. Alfei, F. Grasso, V. Orlandi, E. Russo, R. Boggia, y G. Zuccari, «Cationic Polystyrene-Based Hydrogels as Efficient Adsorbents to Remove Methyl Orange and Fluorescein Dye Pollutants from Industrial Wastewater», *Int. J. Mol. Sci.*, vol. 24, n.º 3, 2023, doi: 10.3390/ijms24032948.
[59] S. Hailan, P. Sobolciak, A. Popelka, P. Kasak, S. Adham, y I. Krupa, «Complex treatment of oily polluted waters by modified melamine foams: from colloidal emulsions to a free oil removal», *Environ. Sci. Pollut. Res.*, vol. 30, n.º 43, pp. 97872-97887, 2023, doi: 10.1007/s11356-023-29055-x.
[60] M. Bhaumik, A. Maity, y H. G. Brink, «Zero valent nickel nanoparticles decorated polyaniline nanotubes for the efficient removal of Pb(II) from aqueous solution: Synthesis, characterization and mechanism investigation», *Chem. Eng. J.*, vol. 417, 2021, doi: 10.1016/j.cej.2020.127910.
[61] S. O. Okonji, L. Yu, J. A. Dominic, D. Pernitsky, y G. Achari, «Adsorption by granular activated carbon and nano zerovalent iron from wastewater: A study on removal of selenomethionine and selenocysteine», *Water Switz.*, vol. 13, n.º 1, 2021, doi: 10.3390/w13010023.
[62] S.-W. Jeong, H. K. Kim, J. E. Yang, y Y. J. Choi, «Removal of Pb(II) by pellicle-like biofilm-producing Methylobacterium hispanicum EM2 strain from aqueous media», *Water Switz.*, vol. 11, n.º 10, 2019, doi: 10.3390/w11102081.
[63] L. Abed y N. Belattar, «Assessing the Dual Use of Red and Yellow Algerian Pomegranate Husks: Natural Antiradical Agents and Low-Cost Biosorbents for Chromium (VI) Removal from Contaminated Waters», *Water Switz.*, vol. 15, n.º 16, 2023, doi: 10.3390/w15162869.
[64] M. E. H. El Nadi y M. A. F. Abd Alla, «Removing heavy metals from wastewater by using rice husk wastes fiber», *Int. J. Eng. Adv. Technol.*, vol. 8, n.º 6, pp. 3929-3933, 2019, doi: 10.35940/ijeat.F9055.088619.
[65] S. Singla, P. Devi, y S. Basu, «Revolutionizing the Role of Solar Light Responsive BiVO4/BiOBr Heterojunction Photocatalyst for the Photocatalytic Deterioration of Tetracycline and Photoelectrocatalytic Water Splitting», *Materials*, vol. 16, n.º 16, 2023, doi: 10.3390/ma16165661.
[66] J. N. Uwayezu, I. Carabante, P. van Hees, P. Karlsson, y J. Kumpiene, «Validation of UV/persulfate as a PFAS treatment of industrial wastewater and environmental samples», *J. Water Process Eng.*, vol. 53, 2023, doi: 10.1016/j.jwpe.2023.103614.
[67] M. Gopi, S. Harikaranahalli Puttaiah, B. Shahmoradi, y A. Maleki, «Preparation and characterization of cost-effective AC/CeO2 nanocomposites for the degradation of selected industrial dyes», *Appl. Water Sci.*, vol. 10, n.º 1, 2020, doi: 10.1007/s13201-019-1105-7.
[68] T. Krishnan y W. S. W. Mansor, «Photocatalytic Degradation of Dyes by TiO2 Process in Batch Photoreactor», *Lett. Appl. NanoBioScience*, vol. 9, n.º 4, pp. 1502-1512, 2020, doi: 10.33263/LIANBS94.15021512.
[69] M. Faheem, H. M. Siddiqi, A. Habib, M. Shahid, y A. Afzal, «ZnO/Zn(OH)2 nanoparticles and self-cleaning coatings for the photocatalytic degradation of organic pollutants», *Front. Environ. Sci.*, vol. 10, 2022, doi: 10.3389/fenvs.2022.965925.
[70] M. H. Khorasanizadeh, R. Monsef, O. Amiri, M. Amiri, y M. Salavati-Niasari, «Sonochemical-assisted route for synthesis of spherical shaped holmium vanadate nanocatalyst for polluted waste water treatment», *Ultrason. Sonochem.*, vol. 58, 2019, doi: 10.1016/j.ultsonch.2019.104686.
[71] Y.-H. Chang y M.-C. Wu, «Enhanced photocatalytic reduction of Cr(VI) by combined magnetic TiO2-based NFs and ammonium oxalate hole scavengers», *Catalysts*, vol. 9, n.º 1, 2019, doi: 10.3390/catal9010072.
[72] M. Sadeghi *et al.*, «/+//Biodecolorization of Reactive Black5 and Reactive Red120 azo dyes using bacterial strains isolated from dairy effluents», *Int. J. Environ. Sci. Technol.*, vol. 16, n.º 7, pp. 3615-3624, 2019, doi: 10.1007/s13762-018-1750-7.
[73] A. T. Huynh, Y.-C. Chen, y B. N. T. Tran, «A small-scale study on removal of heavy metals from contaminated water using water hyacinth», *Processes*, vol. 9, n.º 10, 2021, doi: 10.3390/pr9101802.
[74] E. Kiflay, J. Selemani, y K. Njau, «Integrated constructed wetlands treating industrial wastewater from seed production», *Water Pract. Technol.*, vol. 16, n.º 2, pp. 504-515, 2021, doi: 10.2166/wpt.2021.008.
[75] W. Dabrowski, B. Karolinczak, P. Malinowski, y D. Boruszko, «Modeling of pollutants removal in subsurface vertical flow and horizontal flow constructed wetlands», *Water Switz.*, vol. 11, n.º 1, 2019, doi: 10.3390/w11010180.
[76] N. Wardenier, P. Vanraes, A. Nikiforov, S. W. H. Van Hulle, y C. Leys, «Removal of micropollutants from water in a continuous-flow electrical discharge reactor», *J. Hazard. Mater.*, vol. 362, pp. 238-245, 2019, doi: 10.1016/j.jhazmat.2018.08.095.

[77] Z. Honarmandrad, N. Javid, y M. Malakootian, «Efficiency of ozonation process with calcium peroxide in removing heavy metals (Pb, Cu, Zn, Ni, Cd) from aqueous solutions», *SN Appl. Sci.*, vol. 2, n.º 4, 2020, doi: 10.1007/s42452-020-2392-1.

[78] X. Yuan *et al.*, «Cobalt and nitrogen co-doped monolithic carbon foam for ultrafast degradation of emerging organic pollutants via peroxymonosulfate activation», *Ecotoxicol. Environ. Saf.*, vol. 249, 2023, doi: 10.1016/j.ecoenv.2022.114455.

[79] X. Yu, A. Cabrera-Reina, M. Graells, S. Miralles-Cuevas, y M. Pérez-Moya, «Towards an efficient generalization of the online dosage of hydrogen peroxide in photo-fenton process to treat industrial wastewater», *Int. J. Environ. Res. Public. Health*, vol. 18, n.º 24, 2021, doi: 10.3390/ijerph182413313.

[80] P. Jain, V. M. Bhandari, K. Balapure, J. Jena, V. V. Ranade, y D. J. Killedar, «Hydrodynamic cavitation using vortex diode: An efficient approach for elimination of pathogenic bacteria from water», *J. Environ. Manage.*, vol. 242, pp. 210-219, 2019, doi: 10.1016/j.jenvman.2019.04.057.

[81] P.-M. Hannula, M. K. Khalid, D. Janas, K. Yliniemi, y M. Lundström, «Energy efficient copper electrowinning and direct deposition on carbon nanotube film from industrial wastewaters», *J. Clean. Prod.*, vol. 207, pp. 1033-1039, 2019, doi: 10.1016/j.jclepro.2018.10.097.

[82] V. Pratap Singh, P. Godara, y A. Srivastava, «Sustainable microalgal bioremediation of heavy metals and dyes from synthetic wastewater: Progressing towards United Nations Sustainable Development Goals», *Waste Manag. Bull.*, vol. 2, n.º 4, pp. 123-135, 2024, doi: 10.1016/j.wmb.2024.10.005.

[83] H. E. Debela, F. Bidira, Z. A. Samuel, D. Geleta, y P. Asaithambi, «Industrial park wastewater treatment using a combined sono-pulsed electrochemical-coagulation process», *Sci. Afr.*, vol. 26, 2024, doi: 10.1016/j.sciaf.2024.e02385.

[84] H. H. Nawaz *et al.*, «Photo responsive single layer MoS2 nanochannel membranes for photocatalytic degradation of contaminants in water», *Npj Clean Water*, vol. 7, n.º 1, 2024, doi: 10.1038/s41545-024-00366-x.

[85] W. A. Hammad, M. A. Darweesh, N. Zouli, S. M. Osman, B. Eweida, y M. H. A. Amr, «Adsorption of cationic dye onto Raphanus seeds: optimization, adsorption kinetics, thermodynamic studies», *Sci. Rep.*, vol. 14, n.º 1, 2024, doi: 10.1038/s41598-024-66761-z.

[86] M. T. M. H. Hamad y S. Ibrahim, «Effective fabrication and characterization of eco-friendly nano particles composite for adsorption Cd (II) and Cu (II) ions from aqueous solutions using modelling studies», *Sci. Rep.*, vol. 14, n.º 1, 2024, doi: 10.1038/s41598-024-61050-1.

[87] E. S. Tecirli, K. Akgün, A. Çaglak, H. Sari Erkan, y G. Onkal Engin, «Treatment of textile wastewater in combined granular activated carbonmembrane bioreactor (GAC-MBR)», *Sigma J. Eng. Nat. Sci.*, vol. 42, n.º 5, pp. 1490-1499, 2024, doi: 10.14744/sigma.2024.00115.

[88] T. Geng *et al.*, «Efficient degradation of methylene blue at near neutral pH based on heterogeneous Fenton-like system catalyzed by Fe2O3/MnO2», *Results Chem.*, vol. 11, 2024, doi: 10.1016/j.rechem.2024.101795.

[89] H. Ashebir, J. F. Nure, A. Worku, y T. A. M. Msagati, «Prosopis juliflora biochar for adsorption of sulfamethoxazole and ciprofloxacin from pharmaceutical wastewater», *Desalination Water Treat.*, vol. 320, 2024, doi: 10.1016/j.dwt.2024.100691.

[90] U. F. C. Sayago, V. B. Ballesteros, y A. M. L. Aguilar, «Designing, Modeling and Developing Scale Models for the Treatment of Water Contaminated with Cr (VI) through Bacterial Cellulose Biomass», *Water Switz.*, vol. 16, n.º 17, 2024, doi: 10.3390/w16172524.

[91] Y. Zhao, M. A. Naeth, S. R. Wilkinson, y A. Dhar, «Phytoremediation of metals in oil sands process affected water by native wetland species», *Ecotoxicol. Environ. Saf.*, vol. 282, 2024, doi: 10.1016/j.ecoenv.2024.116732.

[92] A. Bahjat Kareem *et al.*, «Functionalised graphene oxide dual nanocomposites for treatment of hazardous environmental contaminants», *Sep. Purif. Technol.*, vol. 342, 2024, doi: 10.1016/j.seppur.2024.126959.

[93] M. A. Irshad *et al.*, «Efficient chromium removal from leather industrial wastewater in batch experimental study: Green synthesis and characterization of zinc oxide nanoparticles using Ficus benghalensis extracts», *Ecotoxicol. Environ. Saf.*, vol. 281, 2024, doi: 10.1016/j.ecoenv.2024.116616.

[94] S. Vaidh *et al.*, «Amyloid fibril–bacterial cellulose nanohybrid membrane cartridge for efficient removal of heavy metal from industrial wastewater», *Water Qual. Res. J.*, vol. 59, n.º 2, pp. 73-88, 2024, doi: 10.2166/wqrj.2024.001.

[95] M. A. Hossen, G. S. Sattar, y M. G. Mostafa, «Factors affecting the performance of a pharmaceutical wastewater treatment plant: Characterization of effluent and environmental risk», *Heliyon*, vol. 10, n.º 7, 2024, doi: 10.1016/j.heliyon.2024.e29165.

[96] M. Ben Amar *et al.*, «Competitive heavy metal adsorption on pinecone shells: Mathematical modelling of fixed-bed column and surface interaction insights», *Sci. Total Environ.*, vol. 917, 2024, doi: 10.1016/j.scitotenv.2024.170398.

[97] F. Keshavarzi, M. R. Samaei, H. Hashemi, A. Azhdarpoor, y A. Mohammadpour, «Application of montmorillonite/octadecylamine nanoparticles in the removal of textile dye from aqueous solutions: Modeling, kinetic, and equilibrium studies», *Heliyon*, vol. 10, n.º 4, 2024, doi: 10.1016/j.heliyon.2024.e25919.

[98] M. Nasir *et al.*, «Regenerable chitosan-embedded magnetic iron oxide beads for nitrate removal from industrial wastewater», *Environ. Sci. Adv.*, vol. 3, n.º 4, pp. 572-584, 2024, doi: 10.1039/d3va00351e.

[99] E. H. Khader *et al.*, «Evaluation of adsorption treatment method for removal of phenol and acetone from industrial wastewater», *Desalination Water Treat.*, vol. 317, 2024, doi: 10.1016/j.dwt.2024.100091.