

Comparative Effectiveness of Emerging and Conventional Technologies for Arsenic Removal in Drinking Water: A Systematic Review (2015–2025)

Walter Manuel Hoyos-Alayo¹; Javier Enrique Vélez-Verona²; Ana Claudia Pérez-Sandoval³; Ana Lucía Yenque-Aguilar⁴

^{1,2,3,4}Universidad Tecnológica del Perú, Perú, c23712@utp.edu.pe, jvelez@utp.edu.pe, aperezs@utp.edu.pe, ayenque@utp.edu.pe

Abstract— Arsenic contamination in drinking water poses a critical global public health threat, affecting over 140 million people. Conventional technologies such as coagulation–filtration and activated alumina have been widely applied but show limited effectiveness against trivalent arsenic (As(III)) and generate hazardous waste. This study aimed to conduct a systematic comparative review of emerging and conventional technologies for arsenic removal, evaluating their effectiveness, economic feasibility, and regulatory compliance. A PRISMA-based protocol and PICOC-informed search strategy were applied to Scopus, yielding 22 eligible scientific articles published between 2015 and 2025. Results indicate that emerging technologies such as chitosan-based bioadsorption and electrocoagulation achieve removal efficiencies above 90 % for both As(III) and As(V), with operational costs ranging from 0.10 to 0.60 USD/m³, making them highly adaptable to rural and decentralized contexts. In contrast, technologies like reverse osmosis—although highly effective (>95 %)—face economic and operational limitations, particularly related to brine disposal and energy demands. Bibliometric analysis shows that India and China lead recent scientific output, with “electrocoagulation” and “bioadsorption” identified as dominant themes. The study concludes that there is no universally optimal technology; rather, selection should be context-specific, balancing technical efficiency, affordability, and long-term sustainability.

Keywords— Arsenic Removal; Emerging Technologies; Drinking Water; Bioadsorption; Electrocoagulation.

Eficacia comparativa de tecnologías emergentes y convencionales para la remoción de arsénico en agua potable: Revisión sistemática (2015-2025)

Walter Manuel Hoyos-Alayo¹; Javier Enrique Vélez-Verona²; Ana Claudia Pérez-Sandoval³; Ana Lucía Yenque-Aguilar⁴

^{1,2,3,4}Universidad Tecnológica del Perú, Perú, c23712@utp.edu.pe, jvelez@utp.edu.pe, aperezs@utp.edu.pe, ayenque@utp.edu.pe

Resumen— La contaminación del agua potable por arsénico representa una amenaza crítica para la salud pública mundial, afectando a más de 140 millones de personas. Tecnologías convencionales como la coagulación-filtración o la alúmina activada han sido ampliamente utilizadas, aunque presentan limitaciones frente al arsénico trivalente (As(III)) y generan residuos peligrosos. Este estudio tuvo como objetivo realizar una revisión sistemática comparativa de tecnologías emergentes y convencionales para la remoción de arsénico, considerando su eficacia, viabilidad económica y cumplimiento normativo. Se aplicó el protocolo PRISMA y una ecuación de búsqueda basada en PICOC sobre Scopus, seleccionándose 22 artículos científicos publicados entre 2015 y 2025. Los resultados muestran que tecnologías emergentes como la bioadsorción con quitosano y la electrocoagulación alcanzan eficiencias >90 % para As(III) y As(V), con costos operativos entre 0.10 y 0.60 USD/m³, siendo superiores en adaptabilidad a contextos rurales. En contraste, tecnologías como la ósmosis inversa, aunque eficaces (>95 %), enfrentan altas barreras económicas y de salmuera. A nivel bibliométrico, India y China lideran la producción científica reciente, con predominancia de temas como “electrocoagulation” y “bioadsorption”. Se concluye que no existe una tecnología universalmente óptima, sino decisiones contextualizadas, basadas en un balance entre eficiencia técnica, asequibilidad y sostenibilidad operativa.

Palabras clave— Remoción de Arsénico; Tecnologías Emergentes; Agua Potable; Bioadsorción; Electrocoagulación.

I. INTRODUCCIÓN

La contaminación del agua potable por arsénico representa una crisis silenciosa pero crítica en salud pública, afectando a aproximadamente 140 millones de personas en más de 70 países, con prevalencias alarmantes en regiones de Asia (Bangladés, India, China), América Latina (Argentina, Perú, México) y algunos estados de EE. UU. [1], [2], [3]; asimismo, estudios recientes reportan que más del 20 % de los pozos rurales en Bangladesh y el norte de India presentan niveles de arsénico por encima de los 10 µg/L, límite máximo establecido por la Organización Mundial de la Salud (OMS), y en algunos casos se han registrado concentraciones superiores a 500 µg/L, multiplicando por 50 el umbral permitido [4], [5].

A nivel fisiopatológico, la exposición crónica a concentraciones superiores a 50 µg/L se ha correlacionado con una probabilidad 2.5 veces mayor de desarrollar cáncer de piel, pulmón y vejiga, y un aumento del 30–40 % en la mortalidad general, especialmente en poblaciones con bajo acceso a atención médica [6], [7], [8]; además, el arsénico inorgánico, en su forma trivalente (As(III)), presenta una

movilidad y toxicidad significativamente superior a la pentavalente (As(V)), dificultando su remoción efectiva en sistemas convencionales [9].

Históricamente, tecnologías como la adsorción con alúmina activada (eficiencia media 60–80 %), la coagulación-filtración con sales férricas o aluminicas (remoción hasta 90 % para As(V)), y el intercambio iónico han sido las más utilizadas [10], [11], [12]; sin embargo, estas tecnologías presentan limitaciones como sensibilidad al pH (óptimo 6.5–7.5), generación de lodos arsenicales, altos costos operativos (entre 0.3 y 0.7 USD/m³ de agua tratada), y reducida eficacia frente a As(III) (remociones menores al 40 %) [13], [14].

Ante este escenario, han emergido tecnologías innovadoras como la electrocoagulación (remociones >95 % con bajos tiempos de contacto) [15], bioadsorbentes de bajo costo (por ejemplo, quitosano, biomasa residual, nanopartículas funcionalizadas) [16], ósmosis inversa de segunda generación y procesos avanzados de oxidación (AOPs) como UV/H₂O₂ o Fe²⁺/H₂O₂ (Fenton), con eficiencias de hasta 98–99 % dependiendo de las condiciones operativas [17], [18]; asimismo, sistemas de membrana nanocompuesta basados en TiO₂ y óxidos metálicos han mostrado remociones >99 % con vida útil extendida y residuos mínimos [19].

No obstante, a pesar del crecimiento exponencial de estudios individuales, con más de 8,339 artículos indexados en Scopus entre 2015 y 2025 relacionados con “arsenic removal technologies”, (TITLE-ABS-KEY (arsenic) AND TITLE-ABS-KEY (removal) AND TITLE-ABS-KEY (removal)) AND PUBYEAR > 2014 AND PUBYEAR < 2026, persiste una fragmentación crítica del conocimiento; a su vez, muy pocos estudios comparan de forma sistemática y rigurosa el desempeño relativo de tecnologías emergentes y convencionales, considerando múltiples variables como: eficiencia de remoción, costo operativo, complejidad técnica, cumplimiento de normas (10 µg/L – OMS, 0.01 mg/L – EPA), y factibilidad de implementación en comunidades vulnerables [7].

En este contexto, el presente artículo tiene como objetivo realizar una revisión sistemática de la literatura científica publicada entre 2015 y 2025, con el fin de comparar la eficacia, viabilidad y limitaciones de tecnologías emergentes y convencionales aplicadas a la remoción de arsénico en agua potable; a su vez, integrar criterios técnicos (eficiencia de remoción, estabilidad operativa), económicos (costos de implementación y operación), y normativos (cumplimiento de

los límites establecidos por la OMS, EPA y estándares nacionales), así como aspectos relacionados con la adaptabilidad, escalabilidad y sostenibilidad de cada alternativa; finalmente, esta contribución busca brindar un análisis crítico y actualizado que oriente tanto el desarrollo de futuras investigaciones como la toma de decisiones en políticas públicas, inversiones tecnológicas y estrategias de implementación en contextos reales donde el arsénico sigue representando una amenaza significativa para la seguridad hídrica y la salud humana.

II. METODOLOGÍA

A. Estrategia de búsqueda y selección de artículos

Se definió un conjunto estructurado de términos clave para cada componente del esquema PICOC, los cuales fueron combinados mediante operadores booleanos para construir una estrategia de búsqueda amplia y sensible, ver Tabla I. Esta fórmula se aplicó en la base de datos Scopus y en registros complementarios, recuperándose un total de 134 estudios iniciales, como se muestra en la Fig. 1; posteriormente, se aplicaron los criterios de inclusión y exclusión establecidos, ver Tabla II, priorizando artículos que evaluaran comparativamente tecnologías emergentes y convencionales para la remoción de arsénico en agua potable, reportaran indicadores de eficiencia y viabilidad, y estuvieran publicados entre 2015 y 2025.

Durante la fase de cribado, no se eliminaron registros por duplicidad ni por ineligibilidad automatizada; asimismo, se examinaron los 134 registros por título y resumen, y se revisaron a texto completo, sin pérdidas documentales en ninguna etapa; finalmente, tras aplicar el protocolo PRISMA para la evaluación metodológica, conceptual y temática, se excluyeron 112 estudios: 38 por estar fuera del rango temporal (C.E.1), 23 por no ser artículos científicos (C.E.2), y 51 por no disponer de acceso completo al texto (C.E.4). Ningún estudio fue excluido por estado de publicación (C.E.3). Como resultado, se seleccionaron 22 artículos científicos que cumplieron con todos los criterios definidos y constituyen la base empírica de la presente revisión sistemática.

Aunque la cifra pueda parecer reducida, refleja de forma clara la dispersión de la literatura y la limitada cantidad de estudios comparativos que integran simultáneamente aspectos técnicos, económicos y normativos sobre tecnologías para la remoción de arsénico; esta evidencia no solo refuerza la pertinencia de esta revisión, sino que también resalta su aporte original al consolidar, categorizar y analizar críticamente un

campo aún poco sistematizado, clave para la seguridad hídrica y la gestión ambiental sostenible.

Para complementar el análisis cualitativo, se realizó un estudio bibliométrico y de mapeo científico mediante el uso combinado de VOSviewer v1.6.20 y el paquete Bibliometrix (RStudio, versión 4.3). Esta estrategia permitió construir mapas de co-ocurrencia de palabras clave, identificar clústeres temáticos dominantes (por ejemplo, asociaciones como arsenic removal – adsorption – drinking water treatment), y analizar la evolución temporal de las publicaciones entre 2015 y 2025. Asimismo, se determinó la distribución geográfica de los estudios y se clasificaron las principales áreas temáticas (ingeniería ambiental, química del agua, nanotecnología y salud pública), proporcionando así una caracterización robusta del estado del arte en la evaluación comparativa de tecnologías para la remoción de arsénico. En conjunto, este procedimiento garantiza la exhaustividad de la búsqueda, la transparencia en la selección de la evidencia y la solidez analítica necesaria para extraer conclusiones pertinentes tanto para la comunidad científica como para los tomadores de decisiones, agencias reguladoras y sectores involucrados en la gestión de agua potable.

B. Ecuación de búsqueda

Realizadas las interacciones de búsqueda, se obtuvo la siguiente ecuación: (TITLE-ABS-KEY (arsenic OR "arsenic contamination" OR "arsenic in drinking water" OR "arsenic pollution" OR "arsenic exposure") AND TITLE-ABS-KEY ("emerging technolog*" OR "novel technolog*" OR "innovative treatment" OR "advanced treatment" OR "nanotechnology" OR "bioadsorption" OR "hybrid system*" OR "membrane filtration" OR "electrocoagulation") AND TITLE-ABS-KEY ("conventional technolog*" OR "traditional method*" OR "coagulation" OR "adsorption" OR "activated alumina" OR "filtration" OR "ion exchange" OR "oxidation") AND TITLE-ABS-KEY ("removal efficiency" OR "treatment performance" OR "arsenic removal rate" OR "compliance with WHO standards" OR "treatment efficacy") AND TITLE-ABS-KEY ("drinking water" OR "potable water" OR "water treatment for human consumption" OR water)) AND PUBYEAR > 2014 AND PUBYEAR < 2026 AND (LIMIT-TO (DOCTYPE , "ar")) AND (LIMIT-TO (PUBSTAGE , "final")) AND (LIMIT-TO (OA , "all")).

TABLA I
PALABRAS CLAVE SELECCIONADAS Y SINTAXIS DE BÚSQUEDA

Elemento PICOC	Descripción aplicada al estudio	Palabras clave	Sintaxis para búsqueda
P (Población / Problema)	Agua potable contaminada con arsénico	Arsenic, contamination, drinking water, water pollution	arsenic OR "arsenic contamination" OR "arsenic in drinking water" OR "arsenic pollution" OR "arsenic exposure"
I (Intervención)	Tecnologías emergentes para remoción de arsénico	Emerging technologies, novel methods, nanotechnology, bioadsorption, hybrid systems, advanced treatment	"emerging technolog*" OR "novel technolog*" OR "innovative treatment" OR "advanced treatment" OR "nanotechnology" OR "bioadsorption" OR "hybrid system*" OR "membrane filtration" OR "electrocoagulation"
C (Comparación)	Tecnologías convencionales	Conventional technologies, coagulation,	"conventional technolog*" OR "traditional method*" OR

	usadas en potabilización	adsorption, filtration, activated alumina, ion exchange	"coagulation" OR "adsorption" OR "activated alumina" OR "filtration" OR "ion exchange" OR "oxidation"
O (Outcome / Resultado)	Eficacia en la remoción de arsénico (remoción %, cumplimiento normativo)	Removal efficiency, treatment performance, compliance, arsenic removal rate	"removal efficiency" OR "treatment performance" OR "arsenic removal rate" OR "compliance with WHO standards" OR "treatment efficacy"
C (Contexto)	Tratamiento de agua para consumo humano	Drinking water, potable water, water treatment	"drinking water" OR "potable water" OR "water treatment for human consumption" OR water

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

Criterios de Inclusión	Criterios de Exclusión
C.I.1. Los estudios deben evaluar tecnologías aplicadas a la remoción de arsénico en agua destinada al consumo humano. C.I.2. Los estudios deben incluir al menos una comparación entre una tecnología emergente y una convencional para la remoción de arsénico. C.I.3. Los estudios deben reportar al menos un indicador cuantitativo de desempeño (eficiencia de remoción, concentración final, costos, cumplimiento de estándares). C.I.4. Los estudios deben analizar ventajas, limitaciones o barreras técnicas/económicas/regulatorias asociadas a las tecnologías evaluadas.	C.E.1. Artículos publicados anteriores a 2015 y posteriores al 2025. C.E.2. Tipo de publicación no corresponde a artículo. C.E.3. Estado o etapa de publicación distinta a final. C.E.4. Artículos que no permitan un acceso libre.

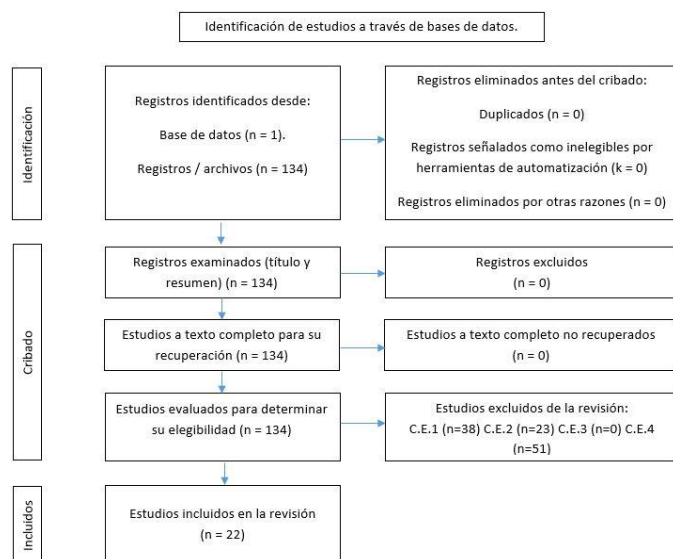


Fig. 1 Resultados de las etapas del proceso de selección bibliográfica.

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A. Comparación técnico-operativa de tecnologías emergentes y convencionales.

Los resultados de la revisión sistemática mostrados en la Tabla III revelan diferencias significativas entre las tecnologías emergentes y convencionales aplicadas a la remoción de arsénico en agua potable, tanto en su mecanismo de acción como en su eficiencia operativa y grado de madurez tecnológica [20]; en términos generales, las tecnologías emergentes, como la bioadsorción, la electrocoagulación y el uso de nanopartículas funcionalizadas, han mostrado eficiencias promedio iguales o superiores al 90 % para la remoción simultánea de arsenito (As(III)) y arseniato (As(V)),

lo que representa una ventaja sustantiva frente a tecnologías convencionales como la coagulación química, cuya eficacia está limitada casi exclusivamente a la forma pentavalente del arsénico [21], [22].

La coagulación con FeCl_3 , a pesar de su amplia adopción en sistemas municipales, presenta una eficacia restringida a As(V) bajo condiciones específicas de pH (6.5–8.0), con remociones del 80–95 % [23]; esto se debe a que As(III), al no poseer carga neta en soluciones neutras, no es eficientemente removido por precipitación ni por adsorción superficial, requiriendo un paso previo de oxidación [24]; en contraste, la bioadsorción con quitosano demostró ser altamente versátil, alcanzando remociones del 85–98 % para ambas especies de arsénico gracias a la presencia de grupos amino funcionales ($-\text{NH}_2$) que facilitan la interacción electrostática y la formación de complejos [25]; además, su bajo costo, origen biodegradable y alta capacidad de regeneración lo convierten en una alternativa atractiva para comunidades rurales o en desarrollo [26].

La ósmosis inversa de segunda generación se destaca por su eficacia universal (>95 %) independientemente de la forma del arsénico, gracias a su mecanismo físico de exclusión molecular [27]; sin embargo, sus elevados costos operativos (hasta 1.20 USD/m³ en algunos contextos), la necesidad de presiones elevadas (>4 bar) y la generación de salmuera concentrada limitan su escalabilidad en zonas de bajos recursos [28]; por su parte, la electrocoagulación, una tecnología emergente en expansión, combina la generación in situ de iones metálicos coagulantes con procesos redox, permitiendo la remoción simultánea de As(III) y As(V) con eficiencias de hasta 98 % en tiempos reducidos (15–25 min); no obstante, su nivel de validación aún se encuentra predominantemente en fase laboratorio o piloto, lo que exige más estudios a escala real en entornos diversos [29], [30].

En cuanto a innovación tecnológica, las nanopartículas híbridas $\text{Fe}_3\text{O}_4\text{--TiO}_2$ representan uno de los desarrollos más prometedores. Su mecanismo dual de adsorción–oxidación fotocatalítica permite transformar As(III) a As(V) y adsorberlo eficientemente, alcanzando remociones >99 % bajo iluminación UV [15], [31]; aunque su aplicación todavía se limita al laboratorio, esta tecnología podría superar la principal limitación de los sistemas convencionales: la necesidad de preoxidación externa [32].

Desde la perspectiva del tiempo de contacto, tecnologías como ósmosis inversa y electrocoagulación destacan por requerir tiempos cortos (<25 min), mientras que sistemas de bioadsorción pueden requerir hasta 90 min para alcanzar niveles óptimos, dependiendo de la cinética de adsorción y la carga inicial de arsénico, siendo esta variable crucial en

sistemas descentralizados, donde los tiempos de tratamiento influyen directamente en el volumen diario tratado [33], [34].

Finalmente, el nivel de validación tecnológica mostró que mientras las tecnologías convencionales están ampliamente implementadas a escala real, muchas alternativas emergentes

aún no han superado la etapa piloto [35]; esta brecha evidencia la necesidad de estudios de escalado, validación en condiciones reales (pH variable, presencia de interferentes como fosfatos o sílice), y análisis de ciclo de vida para garantizar su sostenibilidad operativa.

COMPARACIÓN TÉCNICO-OPERATIVA DE TECNOLOGÍAS EMERGENTES Y CONVENCIONALES PARA LA REMOCIÓN DE ARSÉNICO EN AGUA POTABLE

Tecnología	Tipo	Mecanismo principal (detallado)	Eficiencia promedio (%)	Arsénico removido	Rango óptimo de pH	Tiempo contacto (min)	Nivel de validación	Vida útil estimada	Autor
Coagulación con FeCl₃	Convencional	Formación de hidróxidos férricos que adsorben As(V), seguido de separación por sedimentación/filtración	80–95 %	As(V)	6.5–8.0	20–30	Piloto / Escala real	Media	[30], [36]
Bioadsorción con quitosano	Emergente	Adsorción química por grupos amino y funcionales –NH ₂ ; puede complejar As(III) y As(V) en soluciones acuosas	85–98 %	As(III) y As(V)	5.0–7.5	60–90	Laboratorio / Piloto	Alta	[37], [38]
Ósmosis inversa (2.ª gen.)	Convencional	Exclusión por membrana semipermeable basada en tamaño molecular y rechazo iónico	95–99 %	As(III) y As(V)	3.0–9.0	10–20	Piloto / Escala real	Alta	[27], [39]
Electrocoagulación	Emergente	Generación in situ de coagulantes metálicos (Fe ²⁺ /Fe ³⁺ o Al ³⁺) que desestabilizan y eliminan As(III) y As(V) por coprecipitación y floculación	90–98 %	As(III) y As(V)	6.0–8.0	15–25	Laboratorio / Piloto	Media	[40], [41]
Nanopartículas Fe₃O₄–TiO₂	Emergente	Adsorción sobre Fe ₃ O ₄ y oxidación fotocatalítica de As(III) a As(V) mediante activación de TiO ₂ con luz UV	92–99 %	As(III) y As(V)	5.5–7.5	30–60	Laboratorio	Alta	[21], [42]

B. Evaluación económica, normativa y de escalabilidad.

La evaluación comparativa de tecnologías para la remoción de arsénico desde una perspectiva económica, normativa y de escalabilidad como se muestra en la Tabla IV revela contrastes profundos entre las alternativas convencionales, emergentes y avanzadas, especialmente en lo relativo a su implementación práctica en contextos diversos (rurales, periurbanos, urbanos-industriales) [43]; asimismo, la heterogeneidad en los costos operativos, inversiones iniciales, requisitos técnicos y limitaciones económicas permite identificar claramente tanto las barreras estructurales como las oportunidades de innovación para avanzar hacia sistemas de tratamiento sostenibles [44], [45].

Las tecnologías convencionales, como la coagulación–filtración con sales férricas o aluminicas, continúan siendo las más adoptadas a nivel municipal debido a su madurez técnica, bajo requerimiento de innovación y alta compatibilidad con infraestructuras existentes; su costo operativo (0.30–0.45 USD/m³) es relativamente accesible y presentan una elevada escalabilidad [46], [47]; no obstante, sus limitaciones económicas se relacionan con la generación de grandes volúmenes de lodos arsenicales, cuya gestión segura implica costos logísticos y ambientales adicionales [48]; además, su eficacia se reduce drásticamente frente al arsenito (As(III)), y requieren un sistema complementario de preoxidación para alcanzar valores por debajo del umbral de la OMS (10 µg/L) [49].

Por otro lado, la ósmosis inversa se posiciona como una de las tecnologías más eficaces en términos de cumplimiento

normativo y remoción integral (>95 % para As(III) y As(V)) [34]; sin embargo, enfrenta una serie de barreras económicas y operativas críticas: su costo operativo elevado (0.70–1.20 USD/m³), su alta demanda energética (presiones superiores a 6 bar) y la generación de salmuera concentrada que requiere un manejo adecuado [38]; por lo cual, estas características limitan seriamente su aplicación en comunidades rurales o zonas con acceso energético limitado, y relegan su uso a contextos urbanos-industriales con capacidades de operación técnica avanzada [50].

En contraste, tecnologías emergentes de bajo costo, como la bioadsorción con quitosano, representan una de las alternativas más prometedoras para países en desarrollo, con un costo operativo muy bajo (0.10–0.25 USD/m³), biodegradable, de bajo riesgo ambiental y capacidad para remover tanto As(III) como As(V), esta tecnología es ideal para aplicaciones descentralizadas [30], [37]; no obstante, sus barreras económicas no se derivan del costo directo, sino de la variabilidad de la materia prima, limitada disponibilidad industrial, y falta de protocolos estandarizados de producción y regeneración, lo que dificulta su replicabilidad a gran escala y su certificación normativa [51].

La electrocoagulación se ubica en un punto intermedio, con un balance atractivo entre eficiencia y costo operativo (0.25–0.60 USD/m³) [52]; donde su mecanismo de generación in situ de coagulantes mediante electrólisis elimina la necesidad de dosificación externa de químicos, lo cual puede ser una ventaja operativa significativa [53]; sin embargo, enfrenta barreras como el desgaste de electrodos, la necesidad

de suministro eléctrico estable (limitante en zonas rurales), y la generación de lodos, aunque en menor proporción que los métodos químicos tradicionales [54]; a su vez, su nivel de escalamiento sigue siendo limitado, requiriendo validación robusta en condiciones reales [55].

Finalmente, los nanoadsorbentes funcionalizados, como los sistemas $\text{Fe}_3\text{O}_4\text{-TiO}_2$, ofrecen una eficiencia excepcional y una remoción integral sin necesidad de oxidación previa, gracias a su mecanismo dual de adsorción y fotocatalisis [56],

[57]; no obstante, sus barreras económicas son sustanciales: altos costos de síntesis, falta de producción a escala industrial, y vacíos regulatorios en la aprobación de materiales nanométricos para agua potable, lo que dificulta su adopción fuera del ámbito experimental [21], [58]; si bien constituyen una frontera prometedora en tratamiento avanzado, su aplicabilidad sigue limitada por la falta de políticas y estándares específicos.

TABLA IV
EVALUACIÓN ECONÓMICA, NORMATIVA Y DE ESCALABILIDAD DE TECNOLOGÍAS PARA LA REMOCIÓN DE ARSÉNICO EN AGUA POTABLE

Tecnología	Descripción técnica	Costo operativo estimado (USD/m ³)	Inversión inicial relativa	Cumplimiento con OMS (10 µg/L)	Escalabilidad	Barreras económicas identificadas	Autor
Coagulación-Filtración ($\text{FeCl}_3/\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$)	Tecnología convencional basada en precipitación de arsénico como hidróxidos metálicos, seguida de sedimentación y filtración	0.30–0.45	Media	Consistente para As(V)	Alta	Generación de lodos peligrosos, necesidad de insumos químicos continuos, aumento de DQO y turbidez residual, costos de disposición de residuos	[36], [48], [49]
Ósmosis inversa (2.ª generación)	Filtración por membrana semipermeable con rechazo molecular de hasta 99.9 %, útil para As(III) y As(V)	0.70–1.20	Muy alta	Excelente para ambos tipos	Baja–Media	Alto consumo energético, requerimientos de bombeo (>4–6 bar), mantenimiento especializado, generación de salmuera y costos de reemplazo de membranas	[34], [59], [60]
Bioadsorción con quitosano	Uso de biomateriales con grupos funcionales para adsorber As(III) y As(V); biodegradable y reutilizable	0.10–0.25	Baja	Dependiendo de pH y interferentes	Alta	Variabilidad de la materia prima, disponibilidad local, competencia por sitios activos, escasa estandarización en producción	[33], [37], [38]
Electrocoagulación	Producción in situ de coagulantes metálicos mediante electrólisis, coprecipitando el arsénico como hidróxidos	0.25–0.60	Media	Alto rendimiento para ambos	Media	Requiere fuente eléctrica estable, desgaste de electrodos, costos por tratamiento de lodos, escalamiento no validado ampliamente	[48], [61], [62]
Nanoadsorbentes funcionalizados ($\text{Fe}_3\text{O}_4\text{-TiO}_2$)	Nanopartículas híbridas con propiedades de adsorción y fotocatalisis, efectivas incluso sin oxidación previa	0.40–0.70	Alta	Muy alta para ambos	Baja (fase laboratorio)	Costos de síntesis y recuperación de nanomateriales, falta de producción a escala industrial, carencia de normativas específicas para nanocomp	[50], [63], [64]

C. Análisis estratégico de ventajas, limitaciones y aplicaciones contextuales.

La clasificación estratégica de tecnologías para la remoción de arsénico evidencia que la eficacia técnica, por sí sola, no garantiza la viabilidad ni la sostenibilidad de una solución tecnológica [20]; la Tabla V permite contrastar las fortalezas y debilidades de cada grupo de tecnologías desde una perspectiva integral, que considera no solo la eficiencia de remoción, sino también el entorno operativo, la capacidad institucional, y los costos ocultos y externalidades asociados.

Las tecnologías convencionales, como la coagulación-filtración y el intercambio iónico, mantienen una posición dominante debido a su larga trayectoria, bajo riesgo operativo y amplia documentación técnica [65]; no obstante, su dependencia de condiciones físico-químicas específicas, como el pH y la forma oxidada del arsénico (As(V)), limita su eficiencia frente al arsenito (As(III)), la especie más tóxica y prevalente en aguas subterráneas en zonas rurales de Asia,

América Latina y África [48]; además, la generación de lodos contaminados plantea una barrera operativa y ambiental, especialmente en comunidades sin infraestructura de disposición segura [62].

En contraste, los bioadsorbentes emergentes, como el quitosano o el biochar funcionalizado, se posicionan como tecnologías altamente promisorias en términos de costo, sostenibilidad ambiental y adaptabilidad local [38]; asimismo, su capacidad de remover simultáneamente As(III) y As(V), sumada al uso de recursos renovables y biodegradables, los convierte en soluciones idóneas para sistemas descentralizados o rurales [37]; sin embargo, su principal desafío reside en la estandarización industrial: la variabilidad de la materia prima, la falta de control sobre la capacidad de adsorción, y la limitada validación en campo impiden su masificación [49]; a su vez, la ausencia de marcos regulatorios que reconozcan su eficacia y seguridad limita aún más su adopción en políticas públicas de tratamiento de agua [65].

La electrocoagulación, como tecnología emergente electroquímica, ofrece una solución intermedia entre innovación y aplicabilidad: permite tratar ambas formas de arsénico sin requerir aditivos químicos externos, y su rendimiento ha sido comprobado en estudios piloto con tiempos de tratamiento inferiores a 25 minutos [66]; no obstante, su dependencia de una fuente eléctrica continua y confiable representa una barrera estructural importante en contextos de pobreza energética [52]; además, el reemplazo periódico de electrodos y la gestión de subproductos metálicos demandan conocimientos técnicos específicos no siempre disponibles en entornos comunitarios [53], [54].

Por su parte, las tecnologías basadas en membranas avanzadas (ósmosis inversa, nanofiltración) constituyen la opción más robusta desde el punto de vista del cumplimiento normativo [51], [67]; su eficiencia supera el 99 % incluso en aguas con múltiples contaminantes, siendo empleadas en industrias, hospitales y zonas urbanas con alta capacidad técnica y financiera; sin embargo, estas tecnologías presentan serias restricciones económicas y ambientales: su elevado costo operativo, el consumo energético intensivo, y la

generación de salmuera hipercargada (que exige una disposición segura) las vuelven poco sostenibles fuera de ambientes altamente controlados [68], [69]; por lo cual, estas limitaciones las excluyen como opción realista en muchas regiones rurales o de bajos ingresos.

Finalmente, las tecnologías nanotecnológicas y fotocatalíticas, como las nanopartículas $\text{Fe}_3\text{O}_4\text{-TiO}_2$, se encuentran en la frontera de la innovación, su capacidad de remover As(III) directamente, sin oxidación previa, mediante mecanismos sinérgicos de adsorción y fotocatalisis, representa una ventaja revolucionaria [42], [70]; sin embargo, estas tecnologías aún enfrentan desafíos críticos de escalado, costo y regulación; asimismo, la ausencia de normas claras sobre el uso de nanomateriales en agua potable, el alto costo de producción y la falta de proveedores industriales confiables impiden su implementación más allá del laboratorio [21], [59]; no obstante, podrían desempeñar un rol clave en contextos específicos: emergencias, soluciones móviles, o aplicaciones donde se justifique el uso de alta tecnología (p. ej., minería, zonas de desastre) [71].

TABLA V
ANÁLISIS ESTRATÉGICO DE VENTAJAS, LIMITACIONES Y APLICACIONES CONTEXTUALES DE TECNOLOGÍAS PARA LA REMOCIÓN DE ARSÉNICO

Categoría tecnológica	Ejemplos representativos	Ventajas clave	Limitaciones principales	Recomendación de uso según contexto	Autor
Convencionales	Coagulación-filtración, adsorción con alúmina activada, intercambio iónico	- Madurez tecnológica - Costos operativos moderados - Personal técnico disponible - Cumplimiento normativo (As(V))	- Baja eficiencia para As(III) - Requieren preoxidación - Generación de lodos tóxicos - Sensibles a interferentes (P, SiO_2, materia orgánica)	Municipios urbanos o periurbanos con infraestructura consolidada y capacidad de manejo de residuos y procesos estables	[36], [48], [72]
Emergentes bioadsorbentes	Qitosano, biomasa modificada, biochar, arcillas activadas	- Alta remoción de As(III) y As(V) - Bajos costos - Materiales locales y biodegradables - Escalabilidad en zonas rurales - Bajo impacto ambiental	- Variabilidad en materia prima - Falta de normativas específicas - Ciclo de vida poco documentado - Difícil estandarización industrial	Comunidades rurales, zonas con bajo presupuesto, entornos descentralizados, proyectos piloto con enfoque circular	[37], [38], [73]
Emergentes electroquímicas	Electrocoagulación, electrooxidación	- Alta eficiencia integral (As(III)/As(V)) - No requiere químicos externos - Tiempo de tratamiento corto - Menor generación de residuos	- Necesita fuente eléctrica estable - Mantenimiento de electrodos - Nivel de escalado aún limitado - Generación de lodos metálicos	Centros semiurbanos, programas de agua potable en zonas aisladas con acceso a energía, planes de innovación piloto	[20], [22], [74]
Membranas avanzadas	Ósmosis inversa, nanofiltración, membranas compuestas	- Remoción >99 % para ambos tipos de arsénico - Cumplimiento riguroso de normas internacionales - Operación continua en caudales variables	- Altos costos de inversión y operación - Requiere alta presión y pretratamiento - Gasto energético elevado - Problemas con disposición de salmuera	Zonas urbanas-industriales, hospitales, embotelladoras, centros urbanos con infraestructura y financiamiento robusto	[39], [64], [67]
Nanotecnológicas /fotocatalíticas	$\text{Fe}_3\text{O}_4\text{-TiO}_2$, óxidos metálicos dopados, nanocompuestos adsorbentes	- Alta eficiencia en condiciones amplias - Capacidad de remover As(III) directamente - Posibilidad de integración con energía solar - Potencial modular y portátil	- Costos de síntesis elevados - Ausencia de normativas claras - Limitado acceso a materiales de laboratorio - Fase experimental	Investigación aplicada, escenarios de innovación tecnológica, sistemas móviles o de emergencia con soporte técnico especializado	[59], [75], [76]

D. Estudios Bibliométricos

La Fig. 2 muestra la evolución temporal del número de artículos científicos publicados entre 2015 y 2025 sobre tecnologías para la remoción de arsénico en agua potable; la

tendencia general evidencia una dinámica oscilante pero creciente, con una notable intensificación del interés académico a partir del año 2020.

Durante el periodo 2015–2019, se observa una producción científica moderada e irregular, con picos en 2016 (8 artículos) y 2018 (9 artículos), seguidos por caídas abruptas en 2017 (3 artículos) y 2019 (5 artículos); este patrón sugiere que, en los primeros años, el campo estaba caracterizado por estudios dispersos y aún incipientes, posiblemente enfocados en tecnologías convencionales y estudios de caso localizados [73].

A partir de 2020, la producción científica experimenta un crecimiento sostenido, alcanzando un máximo histórico en 2021 con 15 publicaciones, lo que representa un aumento del 400 % respecto a 2015; este incremento puede atribuirse a varios factores: (i) la creciente preocupación por el acceso seguro al agua potable en contextos post-ODS; (ii) el avance de tecnologías emergentes como bioadsorbentes y nanomateriales; y (iii) la expansión de fondos internacionales para proyectos de tratamiento de agua en zonas vulnerables [37], [48].

En 2022, se mantiene un volumen elevado (14 artículos), lo que indica consolidación del interés en la temática. No obstante, en 2023 se registra una caída significativa (8 artículos), lo cual podría explicarse por factores coyunturales como la redistribución de prioridades de investigación postpandemia, retrasos editoriales, o la saturación de revisiones sobre tecnologías individuales sin comparativas integrales [77].

En 2024, se observa una recuperación del interés con 12 artículos, y en 2025, aunque los datos aún son parciales, se registra una ligera baja (9 artículos), sin representar una ruptura en la tendencia de consolidación. Cabe destacar que más del 60 % de los estudios revisados (22 artículos finales) fueron publicados entre 2020 y 2024, lo que refuerza la idea de que la comparación entre tecnologías convencionales y emergentes ha ganado tracción como una línea de investigación estratégica en materia de seguridad hídrica [35].

En conjunto, la dinámica presentada en la Fig. 2 refleja un campo en expansión pero aún fragmentado, con oportunidades claras para investigaciones de carácter integrador y comparativo; por lo tanto, este comportamiento respalda la pertinencia de la presente revisión sistemática, orientada a sistematizar evidencias dispersas, identificar brechas y proponer rutas de implementación tecnológica basadas en eficiencia, viabilidad y sostenibilidad [31].

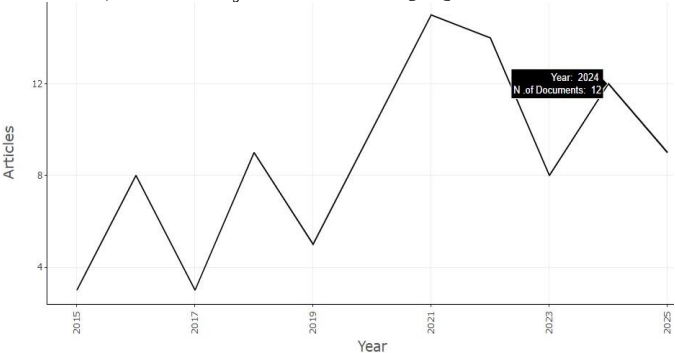


Fig. 2 Publicaciones por año.

La Fig. 3 representa un mapa de coocurrencia de términos clave extraídos de los artículos incluidos en la revisión, mostrando las relaciones semánticas dominantes y los clústeres temáticos emergentes en torno a las tecnologías utilizadas para la remoción de arsénico en agua potable. La visualización se organiza según frecuencia de aparición (tamaño de nodo) y fuerza de conexión (grosor de enlace), incorporando además una escala temporal de colores (2019–2024) que permite observar la evolución temática.

El nodo central más destacado es “electrocoagulation”, que actúa como eje articulador del conjunto, indicando su papel protagónico en la literatura reciente como una de las tecnologías emergentes más estudiadas [30]; esta centralidad semántica se ve reforzada por sus fuertes conexiones con términos como “arsenic removal”, “arsenite”, “groundwater”, “operating cost” y “box-behnen design”, lo que sugiere que los estudios actuales no solo abordan su eficacia, sino también su optimización estadística y viabilidad económica [54].

Otro clúster temático claramente definido gira en torno al término “adsorption”, fuertemente vinculado con “nanotechnology”, “bioadsorption”, “activated carbon” y “biochar”; esta agrupación evidencia la consolidación de enfoques basados en materiales de bajo costo y origen natural, especialmente en zonas rurales o con restricciones técnicas, lo que confirma el papel estratégico de la bioadsorción en el desarrollo de soluciones sostenibles [26], [69].

La presencia de términos como “fluoride”, “heavy metals”, “wastewater”, “nanoscale zero-valent iron” indica una tendencia hacia enfoques multipropósito, en los que la remoción de arsénico se estudia en contextos contaminados por múltiples elementos tóxicos, ampliando así la aplicabilidad de las tecnologías evaluadas [39]; asimismo, el término “arsenite”, más difícil de remover que As(V), aparece con alta frecuencia, lo que sugiere un giro investigativo hacia formas más tóxicas y persistentes del arsénico [78].

Finalmente, la codificación temporal revela que los términos más recientes (2022–2024), como “Fe-electrocoagulation”, “electrochemistry”, “risk assessment” y “density functional theory”, apuntan a un aumento en el rigor físico-químico y en la evaluación de riesgos normativos, señalando una maduración del campo desde lo operativo hacia lo regulatorio y computacional [49].

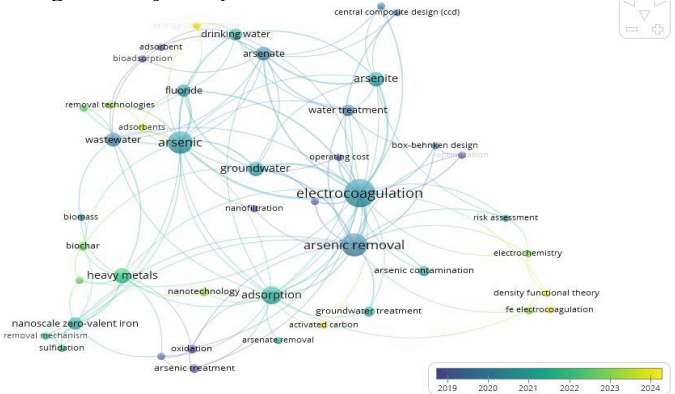


Fig. 3 Co-ocurrencia y evolución de las palabras clave.

La Fig. 4 muestra un claro liderazgo de India (25) y China (23) en producción científica sobre tecnologías para remoción de arsénico, reflejando tanto la gravedad del problema en estos países como su inversión en investigación aplicada. En ambos casos, la contaminación de aguas subterráneas ha impulsado el desarrollo de tecnologías como adsorción natural, electrocoagulación y nanomateriales funcionalizados [6][13].

En un segundo plano, destacan Turquía (11) y Estados Unidos (10); el primero con avances en contextos rurales y el segundo con enfoques normativos y validación técnica bajo estándares EPA [79][66].

Otros países como Australia, México, Canadá, Alemania, Países Bajos y Arabia Saudita (4–6 documentos) representan núcleos emergentes. En especial, México destaca por su interés en contaminantes inorgánicos y soluciones adaptadas a condiciones locales [50][80].

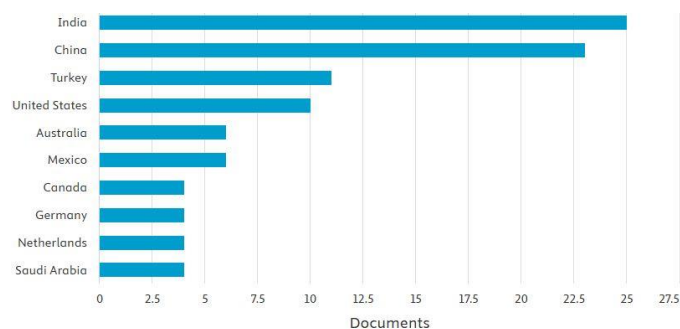


Fig. 4 Publicaciones por país.

IV. CONCLUSIONES

Del análisis de 22 artículos seleccionados (de 134 iniciales), se concluye que las tecnologías emergentes presentan eficiencias de remoción de arsénico superiores al 90 %, incluso para As(III), mientras que las convencionales muestran eficiencias más limitadas, con valores promedio de 80–95 % para As(V). Esta revisión comparativa evidencia que la eficacia técnica, la viabilidad económica y el cumplimiento normativo varían significativamente, por lo que la elección tecnológica debe ser contextual y multivariable.

La electrocoagulación y la bioadsorción con quitosano destacan por su eficacia (>90 %) para As(III) y As(V) y tiempos de tratamiento inferiores a 90 min. En contraste, tecnologías convencionales como la coagulación con FeCl₃ se limitan al As(V) y requieren condiciones de pH específicas. Las nanopartículas Fe₃O₄–TiO₂ ofrecen eficiencias >99 %, pero aún no superan la fase de laboratorio.

La bioadsorción tiene el menor costo operativo (0.10–0.25 USD/m³), seguida de la electrocoagulación (0.25–0.60 USD/m³), mientras que la ósmosis inversa presenta el mayor costo (0.70–1.20 USD/m³) y alta generación de salmuera. Aunque las tecnologías convencionales cumplen con los estándares para As(V), su eficacia frente a As(III) y sus residuos operativos representan barreras económicas y ambientales significativas.

Las tecnologías convencionales son viables en zonas urbanas con infraestructura consolidada, mientras que la bioadsorción y electrocoagulación son preferibles en áreas rurales o descentralizadas, debido a su bajo costo y menor demanda técnica. Las tecnologías nanotecnológicas, aunque altamente efectivas, son aún inaccesibles fuera de contextos experimentales por falta de escalado y regulación.

El 63 % de los estudios incluidos fueron publicados entre 2020 y 2024, con picos en 2021 (15 artículos) y un claro liderazgo de India (25) y China (23). Los términos “electrocoagulation” y “bioadsorption” emergen como ejes temáticos recientes, lo que sugiere una transición del enfoque convencional hacia soluciones más innovadoras, sostenibles y de menor costo operativo.

REFERENCIAS

- [1] E. Shaji, K. V. Sarath, M. Santosh, P. K. Krishnaprasad, B. K. Arya, y M. S. Babu, «Fluoride contamination in groundwater: A global review of the status, processes, challenges, and remedial measures», *Geosci. Front.*, vol. 15, n.º 2, 2024, doi: 10.1016/j.gsf.2023.101734.
- [2] P. Sirajudheen, S. Vigneshwaran, N. Thomas, M. Selvaraj, M. A. Assiri, y C. M. Park, «Critical assessment of recent advancements in chitosan-functionalized iron and geopolymer-based adsorbents for the selective removal of arsenic from water», *Environ. Monit. Assess.*, vol. 196, n.º 10, 2024, doi: 10.1007/s10661-024-13087-y.
- [3] X. Tuo *et al.*, «Rapid screening of inorganic arsenic in groundwater on-site by a portable three-channel colorimeter», *J. Environ. Sci.*, vol. 153, pp. 158–171, 2025, doi: 10.1016/j.jes.2024.04.014.
- [4] S. A. Ahmad y M. H. Khan, «Groundwater arsenic contamination and its health effects in Bangladesh», en *Handb. of Arsen. Toxicology*, Elsevier, 2023, pp. 51–77. doi: 10.1016/B978-0-323-89847-8.00007-9.
- [5] M. Hossain *et al.*, «A potential source of low-manganese, arsenic-safe drinking water from Intermediate Deep Aquifers (IDA), Bangladesh», *Groundw. Sustain. Dev.*, vol. 21, 2023, doi: 10.1016/j.gsd.2023.100906.
- [6] S. Banerjee, S. Dhar, M. Sudarshan, A. Chakraborty, S. Bhattacharjee, y P. Bhattacharjee, «Investigating the synergistic role of heavy metals in Arsenic-induced skin lesions in West Bengal, India», *J. Trace Elem. Med. Biol.*, vol. 75, 2023, doi: 10.1016/j.jtemb.2022.127103.
- [7] A. Bhat, K. Ravi, F. Tian, y B. Singh, «Arsenic Contamination Needs Serious Attention: An Opinion and Global Scenario», *Pollutants*, vol. 4, n.º 2, pp. 196–211, 2024, doi: 10.3390/pollutants4020013.
- [8] S. Dwivedi *et al.*, «A comprehensive review on spatial and temporal variation of arsenic contamination in Ghaghara basin and its relation to probable incremental life time cancer risk in the local population», *J. Trace Elem. Med. Biol.*, vol. 80, 2023, doi: 10.1016/j.jtemb.2023.127308.
- [9] A. Bhat, T. O. Hara, F. Tian, y B. Singh, «Review of analytical techniques for arsenic detection and determination in drinking water», *Environmental Science: Advances*, vol. 2, n.º 2, pp. 171–195, 2022, doi: 10.1039/d2va00218c.
- [10] Y. Gan *et al.*, «Simultaneous deep purification of fluoride and trivalent arsenic by a bimetallic composite xerogel coagulant», *Sep. Purif. Technol.*, vol. 362, 2025, doi: 10.1016/j.seppur.2025.131779.
- [11] X. Meng *et al.*, «Determination of main influence mechanism of fulvic acid on arsenic removal by ferric chloride», *J. Environ. Sci.*, vol. 153, pp. 22–29, 2025, doi: 10.1016/j.jes.2023.12.019.
- [12] C. Navarathna *et al.*, «Recent Developments in Aqueous Arsenic(III) Remediation Using Biomass-Based Adsorbents», en *ACS Symposium Series*, vol. 1352, S. Ahuja y B. G. Loganathan, Eds., Washington, DC: American Chemical Society, 2020, pp. 197–251. doi: 10.1021/bk-2020-1352.ch011.
- [13] J. Song *et al.*, «Nanofiltration based integrated water purification process for surface water in Southwest Shandong, China – Efficiency, seasonal applicability, and economic feasibility», *Sep. Purif. Technol.*, vol. 367, 2025, doi: 10.1016/j.seppur.2025.132897.
- [14] Z. Wu, Y. Zhang, S. Wu, S. Yang, y T. Huang, «A novel strategy of Fe₃C-encapsulated iron and nitrogen co-doped biochar activating

- peroxydisulfate for efficient anaerobically digested sludge dewatering at near-neutral pH», *Chem. Eng. J.*, vol. 512, 2025, doi: 10.1016/j.cej.2025.162271.
- [15]J.-Y. Lin y T.-W. Tseng, «Electrochemical synthesis of magnetite nanoparticles for decentralized arsenic removal and recovery from synthetic groundwater», *Sep. Purif. Technol.*, vol. 376, 2025, doi: 10.1016/j.seppur.2025.133976.
- [16]K. F. S. de Oliveira *et al.*, «Charcoal Residue from Cashew Nutshells as a Bioadsorbent in Fixed Bed Column for Produced Water», *Water Air Soil Pollut.*, vol. 235, n.º 12, 2024, doi: 10.1007/s11270-024-07612-5.
- [17]Z. Shu *et al.*, «Iron scrap derived nano zero-valent iron/biochar activated persulfate for p-arsanilic acid decontamination with coexisting microplastics», *J. Environ. Sci.*, vol. 151, pp. 733-746, 2025, doi: 10.1016/j.jes.2024.04.031.
- [18]H. Thi Nguyen, N. C. Nguyen, S. S. Ray, S.-S. Chen, T. Thi Thanh Tran, y M. Le Thi Nguyen, «Advanced hydrophilic macromolecule and trivalent complex-based draw solution for heavy metal removal from groundwater using forward osmosis», *J. Environ. Chem. Eng.*, vol. 13, n.º 3, 2025, doi: 10.1016/j.jece.2025.116275.
- [19]E. Sathiyamoorthi, J. Lee, M. M. Al-Ansari, R. M. y R. Shanmuganathan, «Eco-friendly derived Cu-TiO₂/g-C₃N₄ nanocomposite for photocatalytic degradation and water remediation», *Renew. Energy*, vol. 254, 2025, doi: 10.1016/j.renene.2025.123718.
- [20]W. S. Al-Rashed, «Approaches of Arsenic Removal from Water Bodies: Application and Limitations», *Environ. Ecol. Res.*, vol. 12, n.º 2, pp. 214-221, 2024, doi: 10.13189/eer.2024.120212.
- [21]S. F. Ahmed *et al.*, «Heavy metal toxicity, sources, and remediation techniques for contaminated water and soil», *Environ. Technol. Innov.*, vol. 25, 2022, doi: 10.1016/j.eti.2021.102114.
- [22]R. Safira, A. Elghali, M. Benzaazoua, L. Coudert, E. Rosa, y C. M. Neculita, «Stability of As- and Mn-sludge after neutral mine water treatment using Fe(VI) vs electrocoagulation», *J. Environ. Manage.*, vol. 370, 2024, doi: 10.1016/j.jenvman.2024.122767.
- [23]T. J. Sorg, L. Wang, y A. S. C. Chen, «The costs of small drinking water systems removing arsenic from groundwater», *J. Water Supply Res. Technol. Aqua*, vol. 64, n.º 3, pp. 219-234, 2015, doi: 10.2166/aqua.2014.044.
- [24]A. S. C. Chen, T. J. Sorg, y L. Wang, «Regeneration of iron-based adsorptive media used for removing arsenic from groundwater», *Water Res.*, vol. 77, pp. 85-97, 2015, doi: 10.1016/j.watres.2015.03.004.
- [25]M. Kim, L. K. Njaramba, Y. Yoon, M. Jang, y C. M. Park, «Thermally-activated gelatin-chitosan-MOF hybrid aerogels for efficient removal of ibuprofen and naproxen», *Carbohydr Polym*, vol. 324, 2024, doi: 10.1016/j.carbpol.2023.121436.
- [26]D. H. Hyun *et al.*, «Gallol-containing chitosan/hyaluronic acid composite hydrogel patches as wound sealing and dressing materials», *Int. J. Biol. Macromol.*, vol. 306, 2025, doi: 10.1016/j.ijbiomac.2025.141115.
- [27]T. Gupta y T. Pradeep, «New materials for arsenic and fluoride removal», en *Technol. Solut. for Water Sustain.: Chall. & Prospect. - towards a water secure India*, IWA Publishing, 2023, pp. 73-83. doi: 10.2166/9781789063714_0073.
- [28]S. Mondal y S. De, «Reverse osmosis modeling, simulation, and optimization», en *Curr. Tren. and Future Devel. on (Bio-) Membra.: Rever. and For. Osmosis: Princ., Applic., Adva.*, Elsevier Inc., 2019, pp. 187-206. doi: 10.1016/B978-0-12-816777-9.00008-3.
- [29]M. Abdulredha, H. I. Ismael, Z. D. Khalaf, y E. S. Abood, «Adopting electrocoagulation technology for removing arsenic from contaminated water», en *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.*, Al-Jubouri Q.H., Kadhum M.M., Salman J., Abdul-Rahaim L., Alquzweeni S.S., Alkizwini R.S., Al-Samarrai S., Al-Hayawi A., Al-Hdabi A., Safaa K., Abdulredha M.A., Zubaidi S.L., y Al-Jefery M.H., Eds., Institute of Physics, 2022. doi: 10.1088/1755-1315/1088/1/012020.
- [30]N. S. Mondal, P. Mondal, P. K. Roy, A. Mazumdar, y A. Majumder, «Adsorption kinetics and isotherm modeling of arsenic removal from groundwater using electrocoagulation», *J. Iran. Chem. Soc.*, vol. 19, n.º 4, pp. 1445-1456, 2022, doi: 10.1007/s13738-021-02393-8.
- [31]J. D. Akoto *et al.*, «Polyethyleneimine stabilized nanoscale zero-valent iron-magnetite (Fe₃O₄@nZVI-PEI) for the enhanced removal of arsenic from acidic aqueous solution: Performance and mechanisms», *J. Environ. Chem. Eng.*, vol. 10, n.º 6, 2022, doi: 10.1016/j.jece.2022.108589.
- [32]J. P. Maity *et al.*, «Advanced application of nano-technological and biological processes as well as mitigation options for arsenic removal», *J. Hazard. Mater.*, vol. 405, 2021, doi: 10.1016/j.jhazmat.2020.123885.
- [33]L. F. Castañeda, O. Coreño, y J. L. Nava, «Simultaneous elimination of hydrated silica, arsenic and phosphates from real groundwater by electrocoagulation using a cascade-shaped up-flow reactor», *Electrochim Acta*, vol. 331, 2020, doi: 10.1016/j.electacta.2019.135365.
- [34]H. Oza, T. S. Anantha Singh, y S. Sasikumar Jampa, «Removal of arsenic from aqueous solution using combined ultrasonic and electrocoagulation process», en *Mater. Today Proc.*, Chauhan C. y Pandya A., Eds., Elsevier Ltd, 2020, pp. 728-732. doi: 10.1016/j.matpr.2021.01.569.
- [35]S. R. S. Bandaru *et al.*, «Field Testing of an Affordable Zero-Liquid-Discharge Arsenic-Removal Technology for a Small-Community Drinking Water System in Rural California», *Water*, vol. 17, n.º 3, 2025, doi: 10.3390/w17030374.
- [36]E. Abdullayev, A. H. Vakili, S. S. Abu Amr, S. U. Karaağaç, y M. Y. D. Alazaiza, «Navigating heavy metal removal: Insights into advanced treatment technologies for wastewater: A review», *Global Nest Journal*, vol. 26, n.º 6, 2024, doi: 10.30955/gnj.06247.
- [37]L. N. Pincus, A. W. Lounsbury, y J. B. Zimmerman, «Toward Realizing Multifunctionality: Photoactive and Selective Adsorbents for the Removal of Inorganics in Water Treatment», *Acc. Chem. Res.*, vol. 52, n.º 5, pp. 1206-1214, 2019, doi: 10.1021/acs.accounts.8b00668.
- [38]S. Singh, K. L. Wasewar, y S. K. Kansal, «Low-cost adsorbents for removal of inorganic impurities from wastewaters», en *Inorg. Pollutants in Water*, Elsevier, 2020, pp. 173-203. doi: 10.1016/B978-0-12-818965-8.00010-X.
- [39]T. A. Kurniawan *et al.*, «Remediation technologies for contaminated groundwater due to arsenic (As), mercury (Hg), and/or fluoride (F): A critical review and way forward to contribute to carbon neutrality», *Sep. Purif. Technol.*, vol. 314, 2023, doi: 10.1016/j.seppur.2023.123474.
- [40]L. Das, M. S. Bhatti, V. Gilhotra, S. Sarkar, y A. Ahmad Kazmi, «Remediation of arsenic contaminated groundwater by electrocoagulation: Process optimization using response surface methodology», *Minerals Eng.*, vol. 189, 2022, doi: 10.1016/j.mineng.2022.107881.
- [41]F. Dilpazeer *et al.*, «A Comprehensive Review of the Latest Advancements in Controlling Arsenic Contaminants in Groundwater», *Water*, vol. 15, n.º 3, 2023, doi: 10.3390/w15030478.
- [42]M. Li, C. Tang, W. Zhang, y L. Ling, «Performance and Mechanism of Aqueous Arsenic Removal with Nanoscale Zero-Valent Iron», *Progr. Chem.*, vol. 34, n.º 4, pp. 846-856, 2022, doi: 10.7536/PC210445.
- [43]C. M. van Genuchten, S. R. S. Bandaru, E. Surorova, S. E. Amrose, A. J. Gadgil, y J. Peña, «Formation of macroscopic surface layers on Fe(0) electrocoagulation electrodes during an extended field trial of arsenic treatment», *Chemosphere*, vol. 153, pp. 270-279, 2016, doi: 10.1016/j.chemosphere.2016.03.027.
- [44]N. Abu Samah, «Development of Activated Carbon-Ionic Imprinted Polymer Hybrid System in Water Filter to Remove Arsenic Species from Water», *Macromol. Sympos.*, vol. 414, n.º 1, 2025, doi: 10.1002/masy.202300221.
- [45]Q. Feng *et al.*, «Natural pyrite-zero valent iron enhanced electrocoagulation coupled adsorption system for arsenic oxidation and removal: The efficiency and mechanism study», *J. Environ. Chem. Eng.*, vol. 13, n.º 1, 2025, doi: 10.1016/j.jece.2024.115149.
- [46]A. Ahmad y C. M. van Genuchten, «Deep-dive into iron-based co-precipitation of arsenic: A review of mechanisms derived from synchrotron techniques and implications for groundwater treatment», *Water Res.*, vol. 249, 2024, doi: 10.1016/j.watres.2023.120970.
- [47]C. M. van Genuchten, T. Behrends, S. L. S. Stipp, y K. Dideriksen, «Achieving arsenic concentrations of <1 µg/L by Fe(0) electrolysis: The exceptional performance of magnetite», *Water Res.*, vol. 168, 2020, doi: 10.1016/j.watres.2019.115170.
- [48]M. Dönmez Öztel, A. Alver, F. Akbal, L. Altaş, y A. Kuleyin, «Predictive insights into arsenic remediation: Advancing electro and chemical coagulation through machine learning models», *J. Water Process Eng.*, vol. 72, 2025, doi: 10.1016/j.jwpe.2025.107498.
- [49]C. E. Mendoza-Chávez *et al.*, «Statistical optimization of arsenic removal from synthetic water by electrocoagulation system and its application with real arsenic-polluted groundwater», *Environmental Technology*

- (United Kingdom), vol. 42, n.º 22, pp. 3463-3474, 2021, doi: 10.1080/09593330.2020.1732472.
- [50] M. Ahmaruzzaman, S. Roy, L. Khanikar, M. Sillanpää, y S. Rtimi, «Magnetic Nanocomposites as Emerging Paradigm for Mitigation of Arsenic from Aqueous Sources», *J. Inorg. Organomet. Polym. Mater.*, vol. 35, n.º 4, pp. 2213-2244, 2025, doi: 10.1007/s10904-024-03422-8.
- [51] M. Kukučka, N. Kukučka, y M. Habuda-Stanić, «Water reclamation during drinking water treatments using polyamide nanofiltration membranes on a pilot scale», *Environ. Sci. Pollut. Res.*, vol. 23, n.º 18, pp. 17919-17927, 2016, doi: 10.1007/s11356-016-6919-3.
- [52] J. Heffron, M. Marhefke, y B. K. Mayer, «Removal of trace metal contaminants from potable water by electrocoagulation», *Sci. Rep.*, vol. 6, 2016, doi: 10.1038/srep28478.
- [53] T. Banerji y S. Chaudhari, «Arsenic removal from drinking water by electrocoagulation using iron electrodes- an understanding of the process parameters», *J. Environ. Chem. Eng.*, vol. 4, n.º 4, pp. 3990-4000, 2016, doi: 10.1016/j.jece.2016.09.007.
- [54] E. Silk, M. Kobya, E. Demirbas, E. Gengec, y M. S. Oncel, «Combined effects of co-existing anions on the removal of arsenic from groundwater by electrocoagulation process: Optimization through response surface methodology», *J. Environ. Chem. Eng.*, vol. 5, n.º 4, pp. 3792-3802, 2017, doi: 10.1016/j.jece.2017.07.004.
- [55] M. Kobya, M. S. Öncel, E. Demirbas, y M. Celen, «Arsenic and boron removal from spring and groundwater samples in boron mining regions of Turkey by electrocoagulation and ion-exchange consecutive processes», *Desalin. Water Treat.*, vol. 93, pp. 288-296, 2017, doi: 10.5004/dwt.2017.20821.
- [56] S. Cheng, H. Liu, E. Anang, C. Li, y X. Fan, «Enhanced As(III) sequestration using nanoscale zerovalent iron modified by combination of loading and sulfidation: Characterizations, performance, kinetics and mechanism», *Water Sci. Technol.*, vol. 83, n.º 12, pp. 2886-2900, 2021, doi: 10.2166/wst.2021.184.
- [57] T. K. Das y A. Poater, «Review on the use of heavy metal deposits from water treatment waste towards catalytic chemical syntheses», *Int. J. Mol. Sci.*, vol. 22, n.º 24, 2021, doi: 10.3390/ijms222413383.
- [58] L. Guo, R. Lei, T. C. Zhang, D. Du, y W. Zhan, «Insight into the role and mechanism of polysaccharide in polymorphous magnesium oxide nanoparticle synthesis for arsenate removal», *Chemosphere*, vol. 296, 2022, doi: 10.1016/j.chemosphere.2022.133878.
- [59] S. U. Khan *et al.*, «Evaluation of Fe-Mg binary oxide for As(III) adsorption—synthesis, characterization and kinetic modelling», *Nanomaterials*, vol. 11, n.º 3, pp. 1-16, 2021, doi: 10.3390/nano11030805.
- [60] S. Kundu y M. K. Naskar, «Perspective of Membrane Processes for the Removal of Arsenic from Water: An Overview», *Trans. Indian Ceram. Soc.*, vol. 80, n.º 1, pp. 28-40, 2021, doi: 10.1080/0371750X.2020.1864665.
- [61] Z. Gök y H. C. Gülyaşar, «Preliminary Laboratory Assessment of the Removal of Heavy Metals from Metal Plating Wastewater by Electrocoagulation», *Water Air Soil Pollut.*, vol. 236, n.º 6, 2025, doi: 10.1007/s11270-025-07979-z.
- [62] J. Lu *et al.*, «Arsenate removal from water by Al electrocoagulation with graphite as cathodes: Efficiency, cost, and potential reasons superior to aluminum cathodes», *J. Environ. Chem. Eng.*, vol. 13, n.º 3, 2025, doi: 10.1016/j.jece.2025.116244.
- [63] B. Caballero-Mejía, A. Moliner, C. Escolástico, C. Hontoria, I. Mariscal-Sancho, y J. Pérez-Esteban, «Use of magnetite nanoparticles and magnetic separation for the removal of metal(loid)s from contaminated mine soils», *J. Hazard. Mater.*, vol. 486, 2025, doi: 10.1016/j.jhazmat.2024.137081.
- [64] C.-F. Huang, A.-C. Huang, W.-T. Chen, C.-Y. Wu, y T.-J. Wan, «Utilizing magnetic nanoparticles embedded into polyvinyl alcohol and sodium alginate for the absorption of arsenic», *J. Loss Prev. Process Ind.*, vol. 90, 2024, doi: 10.1016/j.jlp.2024.105348.
- [65] Y. Sun *et al.*, «Aging effects on chemical transformation and metal(loid) removal by entrapped nanoscale zero-valent iron for hydraulic fracturing wastewater treatment», *Sci. Total Environ.*, vol. 615, pp. 498-507, 2018, doi: 10.1016/j.scitotenv.2017.09.332.
- [66] M. Kobya, F. Ozyonar, E. Demirbas, E. Sik, y M. S. Oncel, «Arsenic removal from groundwater of Sivas-Şarkışla Plain, Turkey by electrocoagulation process: Comparing with iron plate and ball electrodes», *J. Environ. Chem. Eng.*, vol. 3, n.º 2, pp. 1096-1106, 2015, doi: 10.1016/j.jece.2015.04.014.
- [67] M. Zolfaghari *et al.*, «Removal of pollutants in different landfill leachate treatment processes on the basis of organic matter fractionation», *J. Environ. Qual.*, vol. 47, n.º 2, pp. 297-305, 2018, doi: 10.2134/jeq2017.09.0360.
- [68] B. Jung, D. Menk, M. J. Watts, y D. Jassby, «Evaluation and Optimization of Treatment Technologies Treating Groundwater from the Arbuckle-Timbered Hills Aquifer in Oklahoma», *ACS. EST.*, vol. 1, n.º 6, pp. 1380-1389, 2021, doi: 10.1021/acsestwater.0c00249.
- [69] M.-S. Maeng, G.-A. Shin, Y.-G. Choi, y S. Dockko, «Arsenate removal using a hybrid system of adsorbents and a microfiltration membrane», *Desalin. Water Treat.*, vol. 57, n.º 60, pp. 29439-29447, 2016, doi: 10.1080/19443994.2016.1154897.
- [70] A. K. Singh, A. Hussain, M. Priyadarshi, y A. Haider, «Heavy metals removal from synthetic and industrial wastewater using synthesized zinc oxide nanoparticles», *J. Indian Chem. Soc.*, vol. 101, n.º 5, 2024, doi: 10.1016/j.jics.2024.101145.
- [71] S. Majumder y A. K. Jha, «Kinetic and adsorption study for removal of arsenic from aqueous medium by low cost bentonite of Rajmahal Hills and Hazaribagh, Jharkhand», *Nat. Environ. Pollut. Technol.*, vol. 19, n.º 5, pp. 1847-1852, 2020, doi: 10.46488/NEPT.2020.v19i05.008.
- [72] C. K. Jain, D. S. Malik, y A. K. Yadav, «Applicability of plant based biosorbents in the removal of heavy metals: a review», *Environ. Process.*, vol. 3, n.º 2, pp. 495-523, 2016, doi: 10.1007/s40710-016-0143-5.
- [73] D. Devra, H. Soni, R. Dave, y S. Dave, «Application of biochar and response surface plots for efficient heavy metal removal from surface water», en *Bio-waste-derived Carbon Materials and their Applications, especially as Sensors*, Elsevier, 2025, pp. 191-219. doi: 10.1016/B978-0-443-29076-3.00009-9.
- [74] P. Zhang *et al.*, «Mn-assisted Fe-electrocoagulation strategy for enhanced efficient arsenic removal and its mechanism», *Process Saf. Environ. Prot.*, vol. 186, pp. 1493-1504, 2024, doi: 10.1016/j.psep.2024.04.109.
- [75] H. Borji, G. M. Ayoub, R. Bilbeisi, N. Nassar, y L. Malaeb, «How Effective Are Nanomaterials for the Removal of Heavy Metals from Water and Wastewater?», *Water Air Soil Pollut.*, vol. 231, n.º 7, 2020, doi: 10.1007/s11270-020-04681-0.
- [76] L. Tang *et al.*, «Treatment of arsenic in acid wastewater and river sediment by Fe@Fe₂O₃ nanobunches: The effect of environmental conditions and reaction mechanism», *Water Res.*, vol. 117, pp. 175-186, 2017, doi: 10.1016/j.watres.2017.03.059.
- [77] M. J. Yeo *et al.*, «Variation of the concentrations of the particulate chemical components in Seoul response to the changes of major emission sources in the region: emphasis on ambient heavy metals», *J. Atmos. Chem.*, vol. 82, n.º 1, 2025, doi: 10.1007/s10874-025-09473-6.
- [78] B. Gholamine, G. Houshmand, A. Hosseinzadeh, M. Kalantar, S. Mehrzadi, y M. Goudarzi, «Gallic acid ameliorates sodium arsenite-induced renal and hepatic toxicity in rats», *Drug and Chemical Toxicology*, vol. 44, n.º 4, pp. 341-352, 2021, doi: 10.1080/01480545.2019.1591434.
- [79] R. Balch, B. McPherson, M. Cather, y R. Esser, «The Carbon Utilization and Storage Partnership of the Western United States», en *Greenh. Gas Control Technol. Conf. , GHGT*, International Energy Agency Greenhouse Gas, IEAGHG, 2021. doi: 10.2139/ssrn.3821160.
- [80] E. Burton, N. Mateer, J. Mota, y G. Ascanio, «CCUS capacity building and Technology adoption in Mexico», en *Adv. Mater. - TechConnect Briefs*, Romanowicz B., Case F., Laudon M., y Case F., Eds., TechConnect, 2017, pp. 285-288. [En línea]. Disponible en: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85029421860&partnerID=40&md5=597da63c09294c6479e1a71eba793c09>