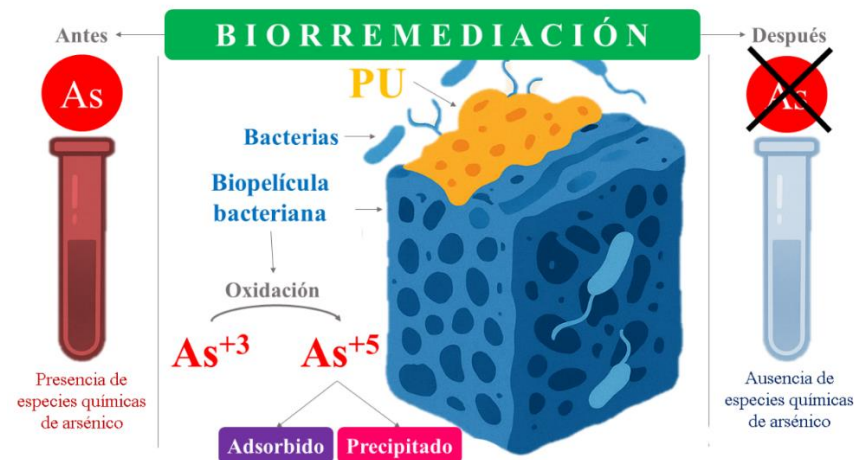


COMPÓSITOS DE MATRIZ DE PU: COMO SOPORTES DE BIOPELÍCULAS BACTERIANAS PARA EL TRATAMIENTO DE ARSÉNICO EN AGUA

PU MATRIX COMPOSITES: AS BACTERIAL BIOFILM SUPPORTS FOR ARSENIC TREATMENT IN WATER



RESUMEN

El arsénico (As) es un metal pesado de alta toxicidad, considerado un grave problema de contaminación del agua. Los tratamientos físico químicos existentes son costosos y poco sostenibles, por lo tanto, se han impulsado alternativas que se basan en la biorremediación. En este contexto, microorganismos como las bacterias han demostrado tolerancia a altas concentraciones de arsénico, principalmente cuando se encuentran en forma de biopelículas estables. Para que se formen dichas biopelículas, es esencial que los soportes tengan propiedades físicas y químicas específicas que, gracias al desarrollo de materiales compuestos (compósitos), son posibles. El objetivo del presente trabajo es mostrar los avances en compósitos formados por matrices de poliuretano (PU), reportados con éxito como soportes para la autoformación de biopelículas bacterianas, así como las principales cepas con más casos de estudio. La metodología seguida consistió en realizar una búsqueda bibliográfica en la base de datos ScienceDirect,

Reyna Orsua-Gaona¹,
Rosa Idalia Narro-
Céspedes¹, Brenda
Rogelina Cruz-Ortiz¹,
Erika Yanneth Acosta-
Cruz¹, Carlos Andrés
Covarrubias-Gordillo¹,
Gustavo Soria-Arguello²

¹ Universidad Autónoma
de Coahuila, Facultad
de Ciencias Químicas,
Ing. J. Cárdenas Valdez
S/N, República, C.P.
25280, Saltillo, Coahuila,
México.

² Centro de Investigación
en Química Aplicada.
Boulevard Enrique Reyna
Hermosillo 140, C.P. 25253
Saltillo, Coahuila, México.

Correspondencia: Rosa
Idalia Narro-Céspedes,
Correo:
rinarro@uadec.edu.mx;
ORCID: 0000-0002-3559-
1520



desde 2000 hasta 2025, utilizando las palabras clave descritas al final de este manuscrito. Tras la búsqueda, se seleccionaron los trabajos correspondientes y se extrajo la información de interés. Principalmente se observó el desarrollo de compósitos de PU con cargas/refuerzos de nanopartículas de naturaleza inorgánica, tales como óxidos metálicos, con un enfoque de síntesis responsable ambientalmente, orientado al cumplimiento de los principios de la química verde; a la par, también se identificaron a las cepas *Bacillus*, como las más investigadas para tal aplicación. Los avances de los sistemas compósitos/bacterias se han adaptado a las actuales vertientes de investigación eco-amigables, actuando a su vez, como excelentes opciones para la biorremediación de arsénico en agua.

Palabras clave: arsénico, agua, bacterias, compósitos, poliuretano

ABSTRACT

*Arsenic (As) is a highly toxic heavy metal regarded as a major contaminant in water sources worldwide. Conventional physicochemical treatments are often expensive and unsustainable, which has driven the search for alternative, eco-friendly methods such as bioremediation. In this context, microorganisms such as bacteria have demonstrated tolerance to high concentrations of arsenic, particularly when organized into stable biofilms. The formation of such biofilms requires support with specific physical and chemical properties, which can be achieved through the development of composite materials. This work summarizes recent advances in polyurethane (PU)-based composites that have been successfully employed as supports for bacterial biofilm formation, along with the main bacterial strains most frequently studied. The methodology consisted of a literature search in the ScienceDirect database from 2000 to 2025, using the keywords listed at the end of this manuscript. Relevant studies were selected and analyzed to extract key findings. The review highlights the development of PU composites reinforced with inorganic nanoparticle -mainly metal oxides- synthesized under responsible approaches aligned with the principles of green chemistry. Among the bacterial strains investigated, *Pseudomonas* and *Bacillus* species are the most frequently used for this application. Overall, advances in composite-bacteria systems are consistent with the bioremediation of arsenic-contaminated water.*

Keywords: arsenic, water, bacteria, composites, polyurethane



INTRODUCCIÓN

El arsénico (As) es un elemento considerado un metal pesado que puede encontrarse en aguas subterráneas y/o superficiales, principalmente en forma de arsenito (As^{+3}) y arseniato (As^{+5}), siendo el As^{+3} la especie química más tóxica y móvil en medios acuosos. Se estima que al menos 140 millones de personas en todo el mundo están expuestas a concentraciones de arsénico superiores al límite recomendado por la Organización Mundial de la Salud, establecido en $10 \mu \text{L}^{-1}$ (William y Magpantay, 2023; Xie y col., 2022).

Los tratamientos convencionales disponibles para la eliminación de arsénico se clasifican como físico-químicos e incluyen procesos como el intercambio iónico, la precipitación química, el uso de óxidos metálicos y la adsorción sobre materiales inorgánicos. No obstante, estos métodos suelen presentar costos de operación y mantenimiento elevados, además de generar subproductos o residuos que requieren tratamientos adicionales, lo que incrementa los costos totales del proceso. En consecuencia, han surgido nuevas alternativas que buscan reducir dichas limitaciones sin comprometer la eficiencia de remoción, entre las cuales destaca la biorremediación (Yang y col., 2024; Zecchin y col., 2021).

La biorremediación emplea organismos vivos -como plantas, hongos o microorganismos bacterianos- capaces de transformar o inmovilizar las especies químicas del As, facilitando su remoción de los sistemas acuosos (Alam y McPhedran, 2019). En particular, las biopelículas bacterianas han despertado gran interés, ya que presentan mayores eficiencias de remoción que las células planctónicas. Sin embargo, uno de los principales retos radica en lograr biopelículas estables, funcionales y con buena adhesión bajo en condiciones acuáticas, lo cual depende en gran medida de las características superficiales físico-químicas del soporte donde se desarrollan (Kumar y col., 2025).

Existe una amplia variedad de materiales utilizados como soportes de biopelículas bacterianas, principalmente polímeros naturales y/o sintéticos. Estos materiales ofrecen propiedades mecánicas y estructurales adecuadas para su aplicación, aunque presentan limitaciones específicas según el tipo de polímero. Por ello, se ha optado por combinarlos con materiales inorgánicos -que actúan como refuerzos- para mejorar sus características funcionales, dando origen a

los denominados materiales compuestos o compósitos (Gong y col., 2022).

El poliuretano (PU) es un polímero ampliamente empleado como matriz para la incorporación de refuerzos inorgánicos, tales como nanopartículas de óxidos metálicos (Wang et al., 2022; Xie et al., 2022; Dickson y col., 2017). Este tipo de sistemas híbridos se ha reportado con éxito como soporte para diversas especies bacterianas, destacando los géneros *Pseudomonas* y *Bacillus*. El presente trabajo recopila y analiza los avances reportados en el desarrollo de matrices de PU con diferentes refuerzos inorgánicos, así como las cepas bacterianas evaluadas como soportes de biopelículas. El propósito es difundir las ventajas que ofrece la biorremediación mediante compósitos poliméricos y destacar su potencial para evolucionar hacia aplicaciones reales más allá del ámbito de laboratorio.

METODOLOGÍA

Se llevó a cabo una revisión bibliográfica en la base de datos ScienceDirect, desde 2000 hasta 2025, utilizando las palabras clave: arsénico, agua, bacterias, compósitos, poliuretano y sus equivalentes en inglés. Tras la búsqueda, se seleccionaron los trabajos relacionados y se extrajo la información relevante, la cual se desarrolla y discute a continuación.

DESARROLLO Y DISCUSIÓN

Biorremediación de arsénico

Entre las estrategias de biorremediación se emplean microorganismos, como las bacterias, que presentan diversos mecanismos para procesar el arsénico. Entre estos se incluyen la biosorción pasiva (unión a la superficie celular), la bioacumulación (almacenamiento intracelular), las reacciones redox de reducción y oxidación de especies de arsénico, la metilación-volatilización y el intercambio iónico (Zamora-Ledezma y col., 2021).

Muchos de estos mecanismos están regulados por operones *ars* (asociados a la resistencia al arsénico) y por genes específicos, como *aio* (arsenito oxidasa), *arsC* (arseniato reductasa), *arsM* (metiltransferasa de arsénico), entre otros. En particular, la oxidación de As^{+3} a As^{+5} resulta de gran interés, ya que la especie pentavalente presenta mayor afinidad por los adsorbentes convencionales,



facilitando su eliminación del medio acuoso (Rahman y col., 2024). Las principales ventajas y limitaciones del uso de bacterias —y otros organismos vivos— en la biorremediación de arsénico, en comparación con los tratamientos fisicoquímicos tradicionales, se resumen en la Tabla 1.

Tabla 1. Ventajas y limitaciones de la biorremediación del arsénico frente a los tratamientos convencionales.

Ventajas	Referencias	Limitaciones	Referencias
Menor generación de residuos secundarios químicos.		Sensibilidad de los microorganismos a condiciones ambientales adversas.	
Menor consumo energético y operación más sencilla.	(Bansal y Santhiya, 2023; Mukherjee y col., 2024)	Velocidades de remoción generalmente menores que las de los métodos químicos.	(Malik y col., 2023; Nayak, 2023)
Potencial de regeneración biológica del sistema.		Riesgo de pérdida de actividad y/o de biomasa microbiana.	
Integración con los procesos naturales en entornos hídricos.		Escalamiento desde el laboratorio a la planta piloto.	
		Necesidad de soportes adecuados para inmovilizar y proteger las biopelículas.	

Cepas bacterianas



Diversas bacterias han sido reportadas para el biotratamiento de arsénico debido a su elevada tolerancia a este metaloide. Entre las más estudiadas se encuentran *Proteus alimentourum*, *Lysinibacillus*, *Acinetobacter*, *Rhizopus*, *Pseudomonas sp.* y *Bacillus*, siendo estas últimas las más ampliamente investigadas. Las cepas del género *Bacillus* se han destacado como uno de los sistemas biológicos más empleados en biorremediación de metales debido a su robustez fisiológica, alta tolerancia de arsénico y capacidad de formar esporas (Herrera y col., 2021; Nouri, 2022; Swapnil y col., 2023). La presencia del operón *ars* permite a las bacterias expulsar As^{+5} o reducirlo intracelularmente para su detoxificación. Los genes *aiO* (oxidasa de arsenito) catalizan la oxidación de As^{+3} a As^{+5} , mientras que *arsC* codifica la reductasa responsable de la conversión de As^{+5} a As^{+3} en algunos mecanismos biológicos. Asimismo, *arsM* codifica enzimas metiltransferasas que permiten la metilación y volatilización del arsénico. Estas rutas metabólicas se regulan en respuesta al estrés por arsénico, cuya expresión diferencial de los genes se ha explorado mediante estudios genómicos recientes (Chaput y col., 2025).

Biopelículas bacterianas

Las biopelículas están compuestas por comunidades microbianas embebidas en una matriz de sustancias poliméricas extracelulares (EPS), conformadas principalmente por polisacáridos, proteínas y ácidos nucleicos. Esta matriz proporciona protección frente al estrés ambiental, agentes tóxicos, gradientes de concentración, difusión limitada y confiere estabilidad estructural (More y col., 2014).

El *quorum sensing* regula la expresión de genes relacionados con la producción de EPS, la adhesión y la organización comunitaria, y se ha identificado como un factor clave que modula la respuesta de las biopelículas frente a ambientes tóxicos o con alta carga de contaminantes (Kambourova y col., 2015)

La arquitectura interna de las biopelículas genera microambientes con gradientes de nutrientes, oxígeno y pH, que determinan la zonificación metabólica y la eficiencia del tratamiento. El arsénico, por su parte, puede inducir estrés oxidativo, inhibir enzimas, dañar membranas celulares y alterar la síntesis de EPS. Se ha demostrado que la exposición a este metal pesado ha favorecido un aumento de la producción de EPS como mecanismo de defensa. En caso contrario, cuando ocurre

artificialmente la remoción de EPS, mediante tratamiento químico, se modifica significativamente la respuesta de las biopelículas frente al arsénico, lo que indica que la matriz extracelular desempeña un papel esencial en la tolerancia (Datta y col., 2022; More y col., 2014).

Algunos factores importantes que influyen la formación de biopelículas y en la tolerancia de arsénico, se describen a continuación (Bhattacharjee y col., 2022):

- pH óptimo: la mayoría de las cepas presentan un mejor desempeño entre pH 5 y 8, aunque algunas toleran condiciones más extremas.
- Alta resistencia a la concentración de arsénico: diversas cepas soportan niveles de varios mg/L^{-1} , e incluso decenas de mg L^{-1} en condiciones controladas.
- Resistencia a la presencia de otros metales o compuestos competidores.
- Capacidad de adherencia al soporte y de producción estimulada de EPS.
- Flexibilidad metabólica para sobrevivir en condiciones ambientales variables.

Asimismo, se ha observado que las biopelículas expuestas a concentraciones elevadas de arsénico modifican su estructura (densidad y porosidad de los canales) para adaptarse al estrés. Por lo tanto, el diseño del material soporte debe promover la síntesis de una matriz EPS robusta y permitir canales de transporte adecuados que eviten la asfixia de la biomasa (Datta y col., 2022).

Materiales de soporte para biopelículas en entornos acuosos

Un soporte adecuado para el crecimiento y estabilidad de biopelículas debe cumplir, idealmente, las siguientes características (Donga y col., 2019):

- Alta superficie específica para favorecer la colonización microbiana.
- Porosidad interconectada y accesible, que facilite la difusión de agua y nutrientes.
- Presencia de grupos funcionales en la superficie que promuevan la adhesión celular (hidroxilo, carboxilo, amino, entre otros).

- Biocompatibilidad y ausencia de toxicidad para los microorganismos.
- Posibilidad de modificación superficial y/o de incorporación de nanopartículas funcionales.
- Compatibilidad con procesos de regeneración o de reutilización.
- Costo razonable y viabilidad técnica para su aplicación a gran escala.

Materiales usados históricamente como soportes de biopelículas

Los materiales tradicionalmente empleados como soportes para biopelículas incluyen carbones activados, biochar, zeolitas, arcillas y nanopartículas de óxidos metálicos, debido a su capacidad de mejorar la adhesión microbiana (Gong y col., 2022). En otros estudios se han inmovilizado células -vivas o muertas- sobre matrices de carbono, sílice o polímeros porosos, con el fin de combinar adsorción química y actividad biológica. También se han utilizado polímeros sintéticos como resinas, fibras y membranas plásticas, que suelen ser modificadas superficialmente para mejorar su biocompatibilidad o funcionalidad, destacando entre ellos, el poliuretano (PU), como soporte prometedor (Hnamte y Pulikkal, 2022).

Compósitos de poliuretano (PU)

El poliuretano (PU) es un material altamente versátil, ya que puede obtenerse en forma de espuma, esponja, membrana o matriz porosa, y puede ser recubierto o modificado químicamente. Su estructura es ajustable en términos de rigidez, elasticidad y porosidad. Este material es preferido por su arquitectura abierta, su alta porosidad y su facilidad para la inmovilización de biomasa. Además, puede emplearse en forma de películas delgadas modificadas o matrices compuestas entrecruzadas con refuerzos o cargas funcionales (Lee y co., 2016; Matsui y Nishino, 2017).

Las matrices de PU permiten la incorporación de nanopartículas u óxidos metálicos para mejorar la adhesión microbiana, la conductividad, la reactividad o la estabilidad del sistema. La inclusión de cargas inorgánicas dentro de la matriz de PU aporta sitios activos para la adsorción de iones, modifica la carga superficial del soporte y aumenta la capacidad de retención de iones metálicos, además de



favorecer el crecimiento de las biopelículas. En muchos casos, estas cargas proporcionan una doble función: soporte físico y la adsorción química, mientras la biopelícula actúa en la transformación o inmovilización del arsénico (Donga y col., 2019).

Métodos de síntesis de química verde de matrices de PU

Algunas rutas de síntesis verde emplean procesos de polimerización o reticulación *in situ* con partículas inorgánicas dispersas, evitando tratamientos agresivos de posmodificación. Es fundamental asegurar la compatibilidad entre la carga y la matriz de PU, garantizando una dispersión homogénea y evitando la formación de agregados, con el fin de mantener una estructura uniforme (Lee y col., 2016).

La funcionalización superficial mediante tratamientos de plasma, oxidación ácida o deposición de capas delgadas puede mejorar significativamente la adhesión bacteriana sin comprometer la biocompatibilidad (Abusrafa y col., 2020).

Aunque aún existen pocos estudios que combinen sistemas *PU + nanopartículas + biopelículas* optimizadas para la eliminación de arsénico, los trabajos disponibles demuestran que la estrategia es factible y de alto potencial. Ejemplo de ellos es el caso de las bacterias *Proteus alimentorum* y *Pseudomonas aeruginosa* inmovilizadas en una espuma de PU dentro de biorreactores de lecho empacado para eliminación de As^{+3} y As^{+5} , alcanzando eficiencias superiores al 65%, incluso para concentraciones de hasta 50 mg/L^{-1} (Kushwaha y col., 2025).

Desafíos y perspectivas

Escalamiento

La transferencia de resultados exitosos en laboratorio a una escala piloto o a planta representa un reto considerable. En estas condiciones, factores como el caudal, las fluctuaciones en la composición y las interferencias del medio pueden reducir significativamente la eficiencia microbiana. Por ello, es fundamental realizar pruebas en condiciones reales de agua contaminada, considerando la presencia de otros iones, variaciones de pH y de temperatura, así como caudales dinámicos que simulen escenarios operativos.

Estabilidad de biopelículas y regeneración del soporte

Con el tiempo, las biopelículas pueden desprenderse, obstruir los canales del sistema o saturar el soporte con metabolitos y productos secundarios. Por lo tanto, los sistemas deben diseñarse con la capacidad de regenerar la actividad microbiana y reactivar el soporte, ya sea mediante procesos de limpieza suave, recirculación del medio o reemplazo parcial del material.

En el caso de los compósitos con matriz de PU, se debe considerar que pueden experimentar degradación química o fatiga física en medios acuosos a largo plazo, por lo que la estabilidad estructural y la funcionalidad del soporte constituyen un parámetro crítico para su implementación práctica.

Integración con otros métodos

La integración de sistemas biológicos con procesos físico-químicos, como adsorción, filtración, u oxidación química, puede incrementar la eficiencia global de remoción, especialmente en concentraciones residuales de arsénico. Por ejemplo, primero, la oxidación previa de As^{+3} a As^{+5} facilita su posterior adsorción en materiales convencionales. Asimismo, es posible diseñar etapas secuenciales que empleen diferentes biocatalizadores, o incorporar nanopartículas funcionales y catalizadores en la matriz del soporte, para optimizar la actividad biológica y mejorar la eficiencia del proceso.

Mejora genética, consorcios microbianos y monitoreo

El empleo de consorcios microbianos —mezcla de cepas con funciones complementarias— permite aprovechar sinergias metabólicas y aumentar la adaptabilidad frente a condiciones ambientales cambiantes. Paralelamente, la ingeniería genética orientada a la sobreexpresión de genes como *aio*, *ars* u otros relacionados con la tolerancia al arsénico puede potenciar la eficiencia de los sistemas biológicos.

Además, el desarrollo de tecnologías de monitoreo en línea, como sensores electroquímicos y biosensores integrados, facilita el control del desempeño de los sistemas en tiempo real. Finalmente, la modelación reactivo-difusiva y las simulaciones computacionales emergen como herramientas valiosas para optimizar el diseño de los soportes, las condiciones operativas y la estabilidad de las biopelículas.



CONCLUSIONES

Los compósitos de matriz de PU presentan un alto potencial como soportes para biopelículas bacterianas destinadas a la biorremediación de arsénico en agua, gracias a su flexibilidad estructural, estabilidad y posibilidad de funcionalización. Aunque los estudios existentes aún son limitados, los resultados reportados demuestran su factibilidad para lograr remociones significativas de arsénico en condiciones de laboratorio.

Los refuerzos inorgánicos, particularmente los constituidos por óxidos metálicos, aportan propiedades que mejoran la interacción entre la matriz polimérica y las bacterias, favoreciendo la formación estable de EPS, la adhesión microbiana y la reducción de la degradación del material base.

Las cepas de los géneros *Pseudomonas* y *Bacillus*, entre otros, han mostrado niveles notables de tolerancia al arsénico, aunque aún existe la oportunidad de mejorar su desempeño mediante ingeniería genética o el uso de consorcios microbianos.

Para avanzar hacia aplicaciones a escala real, será necesario validar el comportamiento de estos sistemas en conjunto prolongados, evaluar su estabilidad integral y combinar estratégicamente la biorremediación con métodos físico-químicos complementarios que tengan un enfoque ecoamigable, para maximizar la eficiencia global del biotratamiento híbrido.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece a la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI) el apoyo otorgado a través de la beca nacional número 1000741, derivada del programa de Becas Nacionales de posgrado 2024. También se agradece al programa de posgrado de doctorado en Ciencia y Tecnología de Materiales perteneciente a la Facultad de Ciencias Químicas de la Universidad Autónoma de Coahuila y al Centro de Investigación en Química Aplicada (CIQA) por proveer las instalaciones, las herramientas electrónicas y los recursos necesarios para realizar esta revisión bibliográfica.



REFERENCIAS

- Abusrafa, A. E., Habib, S., & Popelka, A. (2020). Surface Functionalization of a Polyurethane Surface via Radio-Frequency Cold Plasma Treatment Using Different Gases. *Coatings* 2020, 10, Page 1067, 10(11): 1067. <https://doi.org/10.3390/COATINGS10111067>
- Alam, R., & McPhedran, K. (2019). Applications of biological sulfate reduction for remediation of arsenic – A review. *Chemosphere*, 222: 932–944. <https://doi.org/10.1016/J.CHEMOSPHERE.2019.01.194>
- Bansal, M., & Santhiya, D. (2023). Novel nanomaterials via microorganisms for bioremediation. *Nanobiotechnology for Bioremediation: Fundamentals and Mechanisms*, 2023: 155–179. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-91767-4.00005-7>
- Bhattacharjee, A., Khadgawat, P., Suresh, A., Thomas, J., Brahmandam, G., Singh, P., & Kumar, A. (2022). Microbial biofilms for waste treatment and sustainable development. *Development in Wastewater Treatment Research and Processes: Microbial Degradation of Xenobiotics through Bacterial and Fungal Approach*, 2022: 451–465. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-85839-7.00005-0>
- Chaput, G., Millerick, K., Boak, E., & Kroeger, M. E. (2025). Microbiological processes in groundwater. *Reference Module in Earth Systems and Environmental Sciences*, 2025: 419–449. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-99762-1.00050-4>
- Datta, S., Nag, S., & Roy, D. N. (2022). Biofilm: Design of experiments and relevant protocols. *A Complete Guidebook on Biofilm Study*, 2022: 1–27. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-88480-8.00004-2>
- Datta, S., Roy, D. N., & Nag, S. (2022). Role of biofilm in waste management system. *A Complete Guidebook on Biofilm Study*, 2022: 177–198. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-88480-8.00002-9>
- Donga, C., Mabape, K. I. S., Mishra, S. B., & Mishra, A. K. (2019). Polymer-based engineering materials for removal of nanowastes from water. *Emerging and Nanomaterial Contaminants in Wastewater: Advanced Treatment Technologies*, 217–243. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814673-6.00008-5>
- Gong, Y. Z., Niu, Q. Y., Liu, Y. G., Dong, J., & Xia, M. M. (2022). Development of multifarious carrier materials and impact conditions of immobilized microbial technology for environmental remediation:



- A review. *Environmental Pollution*, 314: 120232. <https://doi.org/10.1016/J.ENVPOL.2022.120232>
- Herrera, C., Moraga, R., Bustamante, B., Vilo, C., Aguayo, P., Valenzuela, C., Smith, C. T., Yáñez, J., Guzmán-Fierro, V., Roeckel, M., & Campos, V. L. (2021). Characterization of Arsenite-Oxidizing Bacteria Isolated from Arsenic-Rich Sediments, Atacama Desert, Chile. *Microorganisms*, 9(3): 483. <https://doi.org/10.3390/MICROORGANISMS9030483>
- Hnamte, M., & Pulikkal, A. K. (2022). Clay-polymer nanocomposites for water and wastewater treatment: A comprehensive review. *Chemosphere*, 307: 135869. <https://doi.org/10.1016/J.CHEMOSPHERE.2022.135869>
- Kambourova, M., Oner, E. T., & Poli, A. (2015). Exopolysaccharides from Prokaryotic Microorganisms—Promising Sources for White Biotechnology Processes. *Industrial Biorefineries and White Biotechnology*, 2015: 523–554. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-63453-5.00017-3>
- Kumar, V., Singh, V., & Pandit, S. (2025). Advanced omics approach and sustainable strategies for heavy metal microbial remediation in contaminated environments. *Bioresource Technology Reports*, 29: 102040. <https://doi.org/10.1016/J.BITEB.2025.102040>
- Kushwaha, R., Singh, R. S., & Mohan, D. (2025). Arsenic removal using bacteria immobilized on polyurethane foam in a packed bed bioreactor. *Journal of Water Process Engineering*, 72: 107471. <https://doi.org/10.1016/J.JWPE.2025.107471>
- Lee, S. M., Park, I. K., Kim, Y. S., Kim, H. J., Moon, H., Mueller, S., & Jeong, Y. I. L. (2016). Physical, morphological, and wound healing properties of a polyurethane foam-film dressing. *Biomaterials Research*, 20(1): 101186. <https://doi.org/10.1186/S40824-016-0063-5>
- Malik, S., Kishore, S., Kumar, S. A., & Dhasmana, A. (2023). Role of bacteria in biological removal of environmental pollutants. *Emerging Technologies in Applied and Environmental Microbiology: Developments in Applied Microbiology and Biotechnology*, 2023: 205–225. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-99895-6.00012-5>
- Matsui, T., & Nishino, T. (2017). Degradation of Alkane by Bacteria Immobilized on Polyurethane Foam. *Journal of the Japan Petroleum Institute*, 60(3): 154–157. <https://doi.org/10.1627/JPI.60.154>



- More, T. T., Yadav, J. S. S., Yan, S., Tyagi, R. D., & Surampalli, R. Y. (2014). Extracellular polymeric substances of bacteria and their potential environmental applications. *Journal of Environmental Management*, 144: 1–25. <https://doi.org/10.1016/J.JENVMAN.2014.05.010>
- Mukherjee, R., Banerjee, S., & Das, P. (2024). The role of microbial bioremediation and biodegradation in wastewater treatment. *Environmental Approach to Remediate Refractory Pollutants from Industrial Wastewater Treatment Plant*, 2024: 337–352. <https://doi.org/10.1016/B978-0-443-13884-3.00017-2>
- Nayak, N. P. (2023). Microorganisms and their application in mining and allied industries. *Materials Today: Proceedings*, 72: 2886–2891. <https://doi.org/10.1016/J.MATPR.2022.07.392>
- Nouri, M. (2022). Biological transformation as a technique in pollution decontamination. *Microbial Consortium and Biotransformation for Pollution Decontamination*, 123–150. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-91893-0.00011-0>
- Rahman, S. A. A., Priyadharsini, P., Marimuthu, C., Sridhar, S., & Arun, J. (2024). Bioremediation, phytoremediation, and mycoremediation of wastewater. *Environmental Approach to Remediate Refractory Pollutants from Industrial Wastewater Treatment Plant*, 2024: 1–12. <https://doi.org/10.1016/B978-0-443-13884-3.00016-0>
- Swapnil, P., Singh, L. A., Mandal, C., Sahoo, A., Batool, F., Anuradha, Meena, M., Kumari, P., Harish, & Zehra, A. (2023). Functional characterization of microbes and their association with unwanted substance for wastewater treatment processes. *Journal of Water Process Engineering*, 54: 103983. <https://doi.org/10.1016/J.JWPE.2023.103983>
- Wang, Y., Guo, C., Zhang, L., Lu, X., Liu, Y., Li, X., Wang, Y., & Wang, S. (2022). Arsenic Oxidation and Removal from Water via Core–Shell MnO₂@La(OH)₃ Nanocomposite Adsorption. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(17): 10649. <https://doi.org/10.3390/IJERPH191710649/S1>
- William, V. U., & Magpantay, H. D. (2023). Arsenic and Microorganisms: Genes, Molecular Mechanisms, and Recent Advances in Microbial Arsenic Bioremediation. *Microorganisms*, 12(1): 74. <https://doi.org/10.3390/MICROORGANISMS12010074>
- Xie, M., Luo, X., Liu, C., You, S., Rad, S., He, H., Huang, Y., & Tu, Z. (2022). Enhancing mechanism of arsenic (III) adsorption by MnO₂-loaded

- calcined MgFe layered double hydroxide. *RCD Advances*, 12: 25833. <https://doi.org/10.1039/d2ra04805a>
- Yang, W., Wen, J., Zhou, Y., Cheng, W., & Zheng, Y. (2024). Simultaneous removal of cadmium and arsenic co-contamination by iron/sulfur-modified zeolites combined with sulfate-reducing bacteria. *Journal of Water Process Engineering*, 67: 106236. <https://doi.org/10.1016/J.JWPE.2024.106236>
- Zamora-Ledezma, C., Negrete-Bolagay, D., Figueroa, F., Zamora-Ledezma, E., Ni, M., Alexis, F., & Guerrero, V. H. (2021). Heavy metal water pollution: A fresh look about hazards, novel and conventional remediation methods. *Environmental Technology and Innovation*, 22: 101504. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2021.101504>
- Zecchin, S., Crognale, S., Zaccheo, P., Fazi, S., Amalfitano, S., Casentini, B., Callegari, M., Zanchi, R., Sacchi, G. A., Rossetti, S., & Cavalca, L. (2021). Adaptation of Microbial Communities to Environmental Arsenic and Selection of Arsenite-Oxidizing Bacteria From Contaminated Groundwaters. *Frontiers in Microbiology*, 12: 634025. <https://doi.org/10.3389/FMICB.2021.634025/BIBTEX>