



GESTIÓN DE OPERACIONES INDUSTRIALES

Sitio Web: <https://revistas.unitru.edu.pe/index.php/RINGIND>

Facultad de Ingeniería
Ingeniería Industrial



Universidad Nacional de Trujillo

Esta obra está publicada bajo una licencia [CC BY 4.0 DEED](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)



REVISIÓN SISTEMÁTICA

Tecnologías de biorremediación frente a métodos tradicionales para manejar los tratamientos de residuos industriales de países en desarrollo (2005 – 2025)

Bioremediation technologies versus traditional methods for managing industrial waste treatment in developing countries (2005 – 2025)

Marcelo Alexis Fabian Cerna¹ , Esmith Alexander Jimenes Segura¹ , Juan José Motta Fukomoto¹ , Jeshua Sean Manuel Obeso Tantapoma^{1*} , Oviedo Hugo Roldan Quispe¹ 

¹ Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Trujillo. Av. Juan Pablo II s/n – Ciudad Universitaria, Trujillo, Perú.

*Autor de correspondencia: jsobesota@unitru.edu.pe (J. Obeso).

Fecha de recepción: 02/05/2025

Fecha de aceptación: 28/06/2025

RESUMEN

Este análisis se enfoca en cómo las tecnologías de mediación y biorremediación se comparan con las formas habituales de manejar los residuos industriales en países en desarrollo entre 2005 y 2025. Para este estudio, se revisaron a fondo bases de datos científicas importantes como Scopus, Scielo y Google Scholar. Se encontraron 34 estudios que nos enseñaron sobre las tecnologías de biorremediación usadas para manejar los residuos industriales. El estudio se centró en qué tan factibles son estas tecnologías con los problemas técnicos y de dinero que hay, sobre todo en países en desarrollo. Al revisar lo que dice la ciencia más reciente, se encontraron varias formas biológicas, como usar hongos micorrízicos, microalgas, soluciones orgánicas, nanomateriales y catalizadores, que han funcionado bien para evitar contaminantes y mejorar los procesos industriales con menos daño al ambiente. Se comprobó que usar estas tecnologías, aunque se ha avanzado, sigue teniendo problemas de organización y de acceso. Este estudio confirma que los métodos técnicos industriales, como crear y mejorar procesos que no dañen el ambiente, podrían hacer más fácil usar estas tecnologías de forma eficiente y ayudar a que la industria cambie a ser más responsable con el ambiente.

Palabras Clave: Manejo de residuos industriales, Biorremediación, Hongos micorrízicos, Microalgas.

ABSTRACT

This analysis focuses on how bioremediation and bioremediation technologies compare with common methods of managing industrial waste in developing countries between 2005 and 2025. For this study, major scientific databases such as Scopus, Scielo, and Google Scholar were thoroughly reviewed. Thirty-four studies were found that taught us about bioremediation technologies used to manage industrial waste. The study focused on how feasible these technologies are given the technical and financial challenges that exist, especially in developing countries. By reviewing the latest science, several biological methods were identified, such as the use of mycorrhizal fungi, microalgae, organic solutions, nanomaterials, and catalysts, that have worked well to avoid contaminants and improve industrial processes with less harm to the environment. It was found that the use of these technologies, even advanced ones, still presents organizational and access problems. This study confirms that industrial technical methods, such as creating and improving environmentally friendly processes, could make these technologies easier to use efficiently and help the industry become more environmentally responsible.

Keyword: Industrial waste management, Bioremediation, Mycorrhizal fungi, Microalgae.

1. Introducción

La Biorremediación se trata de una técnica que está emergiendo en lo que es el tratamiento ambiental donde se emplean los microorganismos vivos como lo son bacterias, hongos o vegetales para descomponer, modificar o remover sustancias contaminantes que se encuentran en el agua, suelo o residuos industriales emitido por empresas. Esta tecnología sobresale por encima de otras por el bajo impacto ambiental, su eficiencia ecológica y los bajos costos operativos que esta nos proporciona, además que es una opción viable en entornos con recursos técnicos limitados (Khalifa et al., 2025). Debido a estas ventajas, se ha considerado como una gran alternativa sostenibles frente a los métodos tradicionales para la eliminación de residuos, especialmente en los contextos con un avance tecnológico muy limitado.

En los países en desarrollo se tiene un manejo inadecuado de residuos industriales debido al crecimiento descontrolado de la actividad industrial que estos realizan y la falta evidente de normativas más eficaces. En este contexto se ha generado una contaminación excesiva en suelos y cuerpos de agua, afectando tanto al ambiente como a la salud humana (Rodrigues et al., 2024). En base a esta situación, se vuelve imprescindible el desarrollo e implementación de tecnologías más accesibles y sostenibles que permitan un manejo más eficiente de los residuos industriales.

Aquí es donde estos países optan por los métodos tradicionales de gestión de residuos, como la incineración, los vertederos o la neutralización química, han sido ampliamente utilizados por su capacidad de reducir rápidamente el volumen o la toxicidad de los residuos. No obstante, estos procedimientos generan subproductos peligrosos, consumen grandes cantidades de energía y requieren inversiones elevadas (Tian et al., 2025). Esto resalta la importancia que es generar nuevos métodos nuevas tecnologías alternativas para no perder, lograr minimizar el impacto ambiental además de los costos operativos uno de estos métodos que apoyan a lograr esto es el uso de la biorremediación.

Por otro lado, la biorremediación permite abordar esas limitaciones a través del uso de tecnologías naturales que se puedan operar en condiciones ambientales adversas. Se ha logrado demostrar la eficacia en la remoción de contaminantes complejos como hidrocarburos, metales pesados y compuestos orgánicos persistentes, esencialmente mediante el uso de los microorganismos autóctonos adaptados a un medio contaminado (Quan et al., 2024). Los resultados obtenidos han sido claves para impulsar su uso a nivel piloto y en contextos industriales reales.

Sin embargo, la adopción de la biorremediación en países en vía de desarrollo sigue siendo una limitación. Los principales obstáculos comprenden la poca investigación, la falta de políticas públicas de apoyo y la baja disponibilidad de personal capacitado (Grushevenko et al., 2024a). Estas limitaciones frenan su implantación y generan una dificultad a su integración en los sistemas de tratamiento.

Por estas razones, en el presente artículo de revisión se plantea como objetivo analizar, sintetizar y examinar la investigación científica relacionada con la implementación de la biorremediación en la administración de desechos industriales. Asimismo, se pretende ofrecer un fundamento firme para la elaboración de decisiones, técnicas, regulatorias e investigativas con relevancia en la implementación en contextos con limitaciones tecnológicas y económicas.

2. Metodología

Para la elaboración de esta revisión sistemática, se efectuó una búsqueda que abarcaba artículos de los años 2005 a 2025, con el objetivo de poder identificar las investigaciones más relevantes sobre el uso de la biorremediación en entornos contaminados. Se decidió aplicar ciertos criterios de inclusión y exclusión relacionado a biorremediación frente a los métodos tradicionales de tratamiento de residuos. Se priorizaron estudios revisados en pares y publicados en revista indexadas, también se tomó en cuenta la literatura técnica pertinente al español e inglés. (Martínez-Hernández et al., 2021; Vera et al., 2022).

La revisión siguió la guía metodológica PRISMA 2020 (Page et al., 2021), por lo que permitió garantizar la transparencia, rigurosidad y reproducibilidad del proceso. Este enfoque favorece la sistematización y la comparación de los datos averiguados, resaltando el uso de la biorremediación en contextos donde existen limitaciones económicas, técnicas y normativas, particularmente en países en vía de desarrollo que se inclinan más por el uso de los métodos tradicionales.

Datos

Fuentes de Información

Para la recolección de datos se consultaron bases de datos científicas reconocidas por su rigurosidad y alcance internacional. Se han considerado diversas bases de datos, como Scopus, Scielo y Google Scholar.

Criterios de Elegibilidad

Sobre los criterios se muestran en la tabla 1 donde se han tomado en cuenta artículos publicados entre el 2005 y 2025. Se enfocó en las tecnologías biorremediación y como está, está logrando superar a los métodos tradicionales en el sector de gestión de residuos industriales, en específico, a países en desarrollo. Mientras que hemos excluido estudios con reflexión personal, columna de opinión y estudios que no realicen un análisis comparativo y que no se encuentre entre el rango del 2005 y 2025, además, estudios que no hablen sobre las tecnologías biorremediación y/o métodos tradicionales en el sector ya comentado a países en desarrollo

Tipo, alcance y diseño

Este artículo se encuentra basado en el enfoque mixto por lo que combina los métodos cualitativos y cuantitativos. El de alcance es descriptivo en medida que analiza los aspectos más importantes de los estudios seleccionados. Utiliza un diseño no experimental de tipo revisión sistemática debido que a través de este se puede identificar patrones en las literaturas y así poder lograr una síntesis ordenada y crítica al conocimiento adquirido.

Tabla 1
Criterio de inclusión (CI) y exclusión (CE)

CI - CE	CRITERIO	SUSTENTACIÓN
CI	Tipos de estudio	Investigaciones cuantitativas, cualitativas y mixtas y análisis comparativo.
	Tiempo	Estudios publicados entre el 2005 y 2025
	Intervenciones	Estudios que se enfoquen en la superposición de las tecnologías de biorremediación a los métodos tradicionales dentro de la gestión de residuos industriales.
	Resultados	Estudios que muestran la importancia que está tomando las tecnologías de biorremediación en las gestiones de residuos industriales hacia países en desarrollo.
CE	Tipos de estudio	Estudios con reflexión personal, columna de opinión y estudios no comparativos.
	Tiempo	Estudios publicados fuera del rango de inclusión del 2005 y 2025.
	Intervenciones	Estudios que no aborden la superposición de las tecnologías de biorremediación a los métodos tradicionales dentro de la gestión de residuos industriales.
	Resultados	Estudios que no presentan la importancia que está tomando las tecnologías de biorremediación en las gestiones de residuos industriales hacia países en desarrollo.

Procedimiento

Estrategia de Búsqueda:

Se utilizaron los términos “Bioremediation Technologies”, “Traditional Methods”, “Industrial”, aplicados específicamente en títulos, resúmenes y palabras clave. Para ampliar la búsqueda y abarcar diferentes enfoques del tema, se empleó el operador booleano **OR** entre sinónimos y el operador **AND** para delimitar conceptos clave.

Cabe destacar que, en el contexto de esta revisión, se optó por no restringir la búsqueda únicamente a métodos tradicionales específicos, debido a que en numerosas publicaciones este término no aparece de forma explícita, aunque se alude a prácticas convencionales como la incineración o el vertido. Esta decisión se basó en la observación de que al utilizar el operador booleano **AND** junto al término “Traditional Methods”, se reducía considerablemente la cantidad de resultados pertinentes. (Ver tabla N°02)

Tabla 2

Base de datos y búsqueda sistemática

BASE DE DATOS	BÚSQUEDA SISTEMÁTICA	N°
Scopus	(TITLE-ABS-KEY("bioremediation" AND "technologies")) AND	238
	(TITLE-ABS-KEY("traditional" AND "methods")) AND	
	(TITLE-ABS-KEY("industrial"))	
Scielo	("Bioremediación") AND ("Residuos Industriales") AND ("Países en Desarrollo")	75
Google Scholar	allintitle: ("Bioremediation Technologies" OR "Bioremediation") AND ("Traditional Methods") AND ("Industrial Waste") AND ("Developing Countries")	70

Sin embargo, el examen de los documentos recopilados permitió reconocer y analizar métodos tradicionales en contraste con técnicas de biorremediación, especialmente en sectores como la minería, la industria química, la agricultura intensiva y el tratamiento de aguas residuales. Estos ámbitos ofrecen ejemplos concretos de cómo se abordan los retos relacionados con la gestión de residuos industriales en países en desarrollo y evidencian el creciente protagonismo de la biorremediación como alternativa frente a los enfoques convencionales.

Selección de Estudios

Durante el proceso se identificaron 387 publicaciones obtenidas de las bases de datos. También se usó el gestor bibliográfico Zotero, a través de este se eliminaron de manera automática las publicaciones que se encontraban duplicadas, quedando solo 332 publicaciones. Posteriormente, se realiza una preselección tomando en cuenta el contenido de los títulos y resúmenes de las publicaciones obtenidas. Durante este proceso se eliminaron alrededor de 265 publicaciones que no abordaban el tema de la biorremediación y los métodos tradicionales para el tratamiento de residuos. Finalmente se aplicaron los criterios de elegibilidad para los artículos que nos quedaron, así nos quedamos solo con 34 artículos que cumplieran con todos los criterios de elegibilidad y fueron analizados en detalle en texto completo para esta revisión sistemática. Todo este proceso se encuentra detallado en la Figura 1

Análisis de Datos

Para esta revisión temática se usó la estadística descriptiva con el apoyo del software Microsoft Excel, con la finalidad de poder organizar y representar de forma gráfica los datos obtenidos de los estudios seleccionados. Además se empleó la herramienta de análisis bibliométrica como VOSviewer para así reconocer los patrones de concurrencia

entre las palabra claves y visualizar clusters temáticos que permita comprender tendencias predominantes en la aplicación de las tecnologías de biorremediación ante los métodos tradicionales.

Extracción de Datos

Se recopilaron 387 registros de bases de datos como Scopus, SciELO y Google Scholar, aplicando diferentes combinaciones de términos con operadores booleanos. Se aplicaron filtros basados en el tipo de estudio, el rango de años (2005–2025) y la comparación entre tecnologías de biorremediación y métodos tradicionales.

Evaluación de riesgo de sesgo

La investigación revela riesgos en su enfoque, como el sesgo en los artículos publicados, una revisión inadecuada de las fuentes y la ausencia de títulos completos en las tablas. Al implementar tecnologías innovadoras, los países en desarrollo enfrentan obstáculos financieros, técnicos y de regulación que limitan la adopción de la biorremediación. Además, sigue existiendo una inclinación hacia métodos convencionales que resultan más sencillos de aplicar, aunque no son tan amigables con el medio ambiente. Estas limitaciones afectan la validez y la importancia de los descubrimientos realizados.

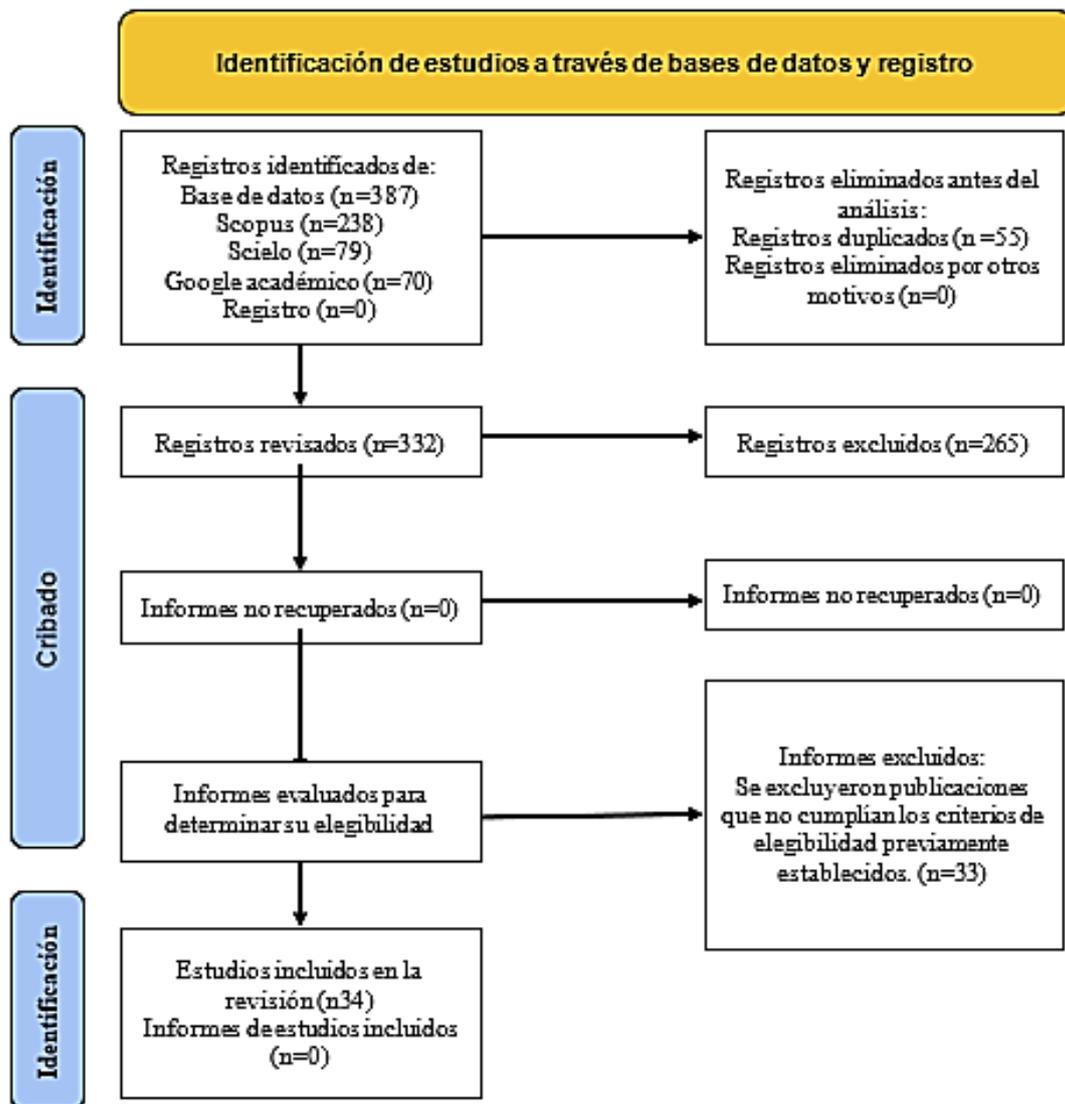


Figura 1. Diagrama de Flujo Prisma (Fuente: Adaptado de Haddaway et al., 2022)

3. Resultados y discusión

Esta revisión sistemática ofreció una perspectiva enfocada en los artículos elegidos, facilitando la detección de tendencias y patrones a través del estudio de palabras clave que podrían no ser evidentes de otra manera. En total, se recopiló un total de 34 estudios que cumplieron con los requisitos de elegibilidad y fueron analizados en su totalidad. Estas investigaciones se extrajeron de tres fuentes de datos: 18 de Scopus, 9 de SciELO y 7 de Google Scholar (Figura 2).

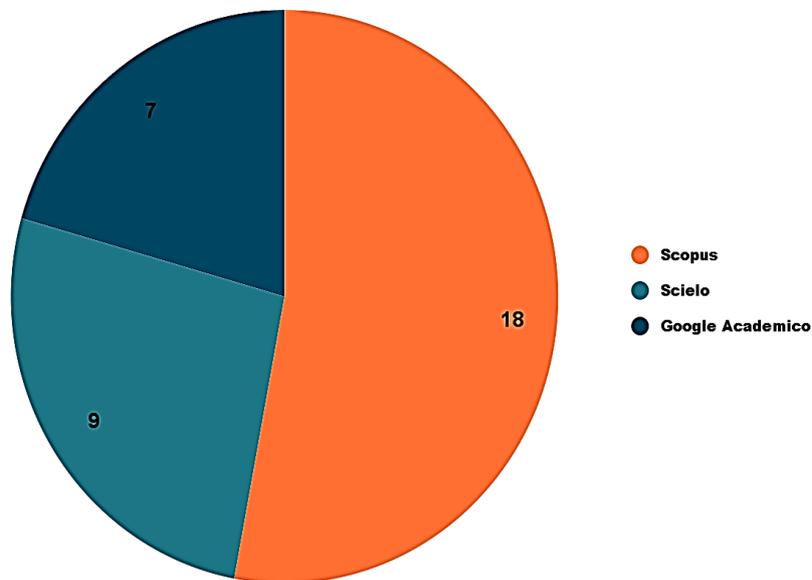


Figura 2. Proporción de publicaciones por repositorio.

El análisis temporal (Figura 3) se puede ver de manera evidente el aumento progresivo en las publicaciones en lo que es el tema de biorremediación en el año 2024, seguido por el año 2023. Este aumento supone el interés por obtener soluciones que sean sostenibles en lugar de la típica solución convencional. La investigación de Khalifa et al. lleva a cabo una comparación entre el tratamiento biológico y el tratamiento tradicional de cuerpos de aguas contaminadas (Khalifa et al., 2025). En esta misma línea de estudios, Rodrigues et al. Desarrollan pretratamientos biológicos de residuos agrícolas para ayudar a su posterior degradación (Rodrigues et al., 2024). Estos estudios son una prueba de que tanto él mismo como su expansión se pueden observar en la literatura científica reciente.

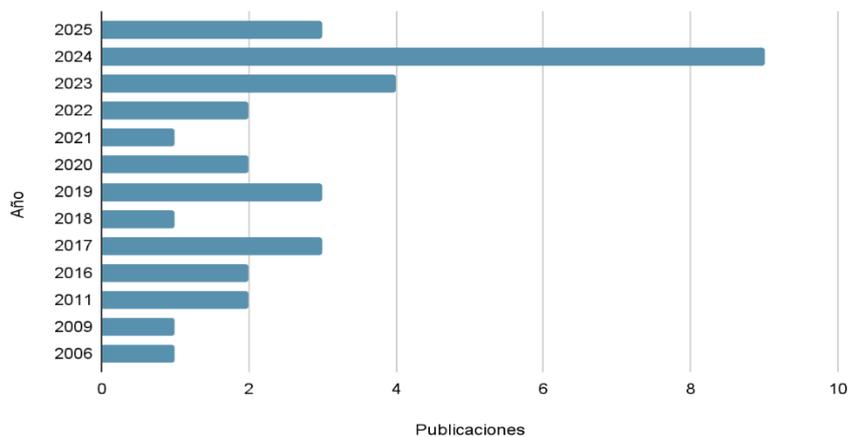


Figura 3. Investigaciones por año.

La distribución geográfica muestra que la mayor concentración de publicaciones relacionados a la biorremediación se encuentra en China con 114 publicaciones y le sigue la India con 41 publicaciones, mientras que en otras regiones como lo es África tienen una baja producción de publicaciones. Este patrón pone en manifiesto la desigualdad en el avance de este ámbito investigativo, el cual depende de la disponibilidad de mecanismo de tratamiento y políticas de inversión científica y técnica. Europa y América cubren parcialmente este fenómeno, está concentración de países pone en manifiesto la necesidad de fomentar la investigación en países menos representados. Según, Machineni (2019) argumenta que los sistemas de tratamientos biológicos están más desarrollados en los países, en donde la infraestructura y los recursos científicos son mejores.

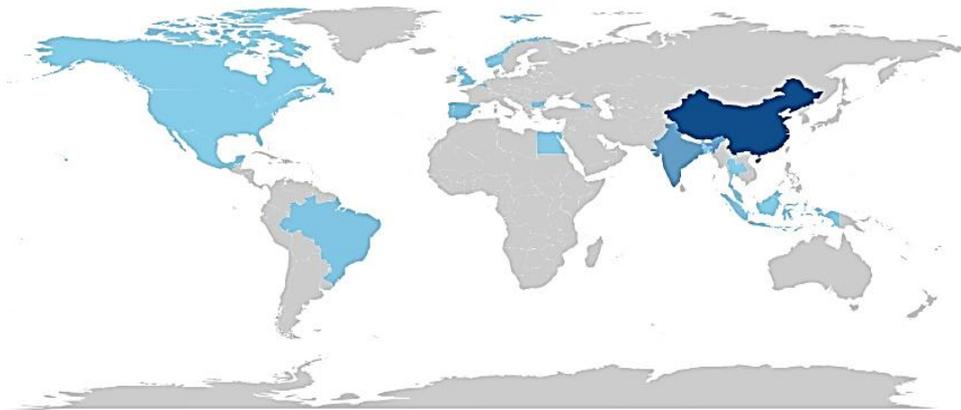


Figura 4. Distribución geográfica.

Posteriormente, en la Figura 5 muestra un análisis bibliométrico de coocurrencia de palabras clave a partir de 34 publicaciones obtenidas de tres bases de datos, utilizando el software VOSviewer. Se identifican tres clústeres temáticos bien definidos, destacando la centralidad del término “bioremediation”, que actúa como eje articulador entre conceptos relacionados como “methods”, “traditional” e “bioremediation”. Esta red de términos evidencia una fuerte interconexión entre la biotecnología ambiental y las tecnologías emergentes, lo que sugiere una tendencia creciente a integrar soluciones sostenibles con herramientas de la cuarta revolución industrial.

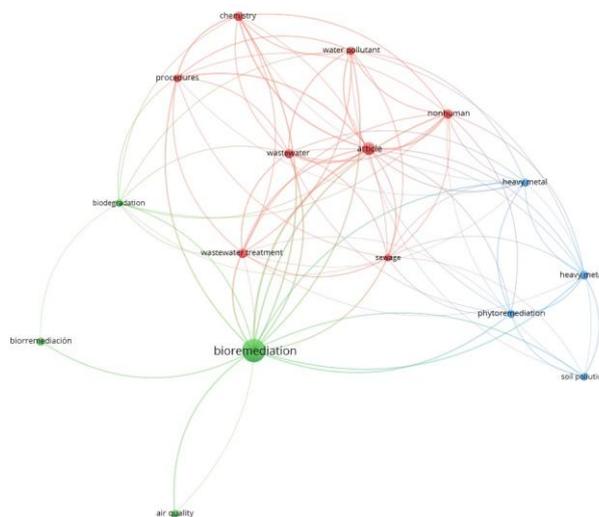


Figura 5. Análisis de concurrencia.

Finalmente se realizó un análisis a los métodos de biorremediación usados en las publicaciones. Según Majumder et al. (2024), la aplicación de tecnologías biológicas depende del tipo de contaminante y las condiciones del entorno. El análisis nos mostró que los procesos de biorremediación permite delimitar que el proceso de fitorremediación puede considerarse como el más citado, el que más se distingue puesto que este resulta muy bajo en el tema de costos y proporciona resultados muy interesantes en el proceso de remoción de contaminantes ; los métodos seguidos son bioaumentación y bioestimulación, que son aplicaciones cíclicas en función de los objetivos a conseguir; ya marcar el camino hacia una práctica de uso complementario entre las diferentes metodologías de biorremediación. Métodos como la rizorremediación y la bioadsorción son los que son menos frecuentes encontrados y además los más limitados en contexto ecológicos concretos, aportando la caracterización de las diversas estrategias. De este modo, se crea un avance en la práctica de los procedimientos como una fusión de los diferentes métodos de biorremediación, entendimiento la existencia de un contexto variable, siendo la solución que adopte la biorremediación el resultado de lo que más desee cada grupo de investigación

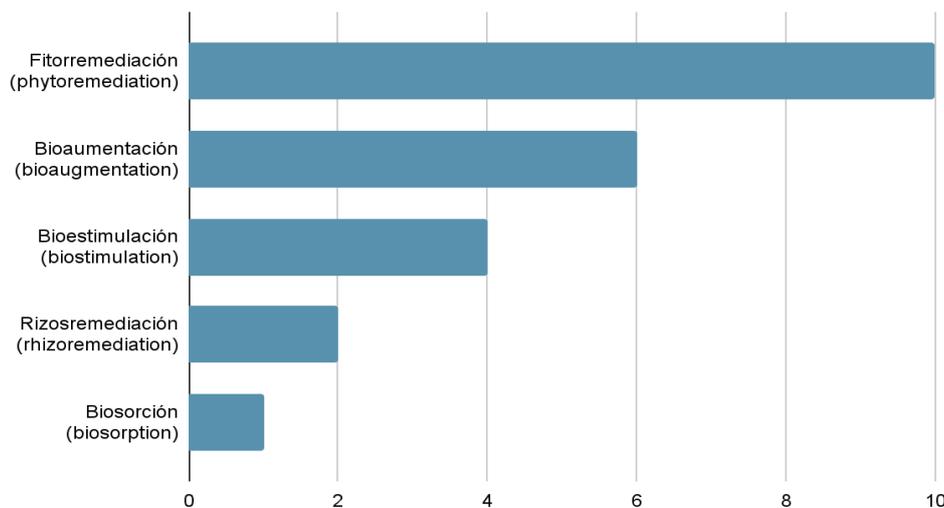


Figura 6. Tipos de métodos.

La Impacto de la Biorremediación frente a los métodos tradicionales:

La biorremediación es un gran paso adelante comparada con las formas típicas de tratar el medio ambiente, ya que usa microbios para quitar la suciedad de manera natural y efectiva. A diferencia de los métodos físicos o químicos, este plan no produce más desechos dañinos y gasta menos energía (Machineni, 2019). Estudios nuevos han resaltado su capacidad para recuperar cosas útiles al tratar aguas sucias (Grushevenko et al., 2024b). Además, usarla en tierras contaminadas ayuda a cuidar el ecosistema, disminuyendo el daño a la vida local (Tamayo-Ortiz & Navia-Antezana, 2018)

En cambio, los métodos de siempre, como quemar, la oxidación mejorada o usar membranas, normalmente usan mucha energía y cuestan mucho dinero para funcionar. Aunque estos sistemas sirven, pueden crear cosas que necesitan más tratamiento, lo cual afecta la sostenibilidad del proceso (Yan et al., 2023). A menudo no eliminan del todo la suciedad que persiste, lo cual significa un peligro continuo para las personas. Por esto, la biorremediación no solo es más amigable con el planeta, sino que también se adapta mejor a distintos lugares (Jing et al., 2024). Por eso, cada vez más estudios impulsan usarla como una solución clave para luchar contra la suciedad ambiental (Machineni, 2019).

Los éxitos de los métodos de limpieza que utilizan organismos vivos están restringidos a naciones más pobres debido a los obstáculos organizacionales y el acceso insuficiente a los materiales. Esto crea una dependencia de las técnicas convencionales, como quemar o descargar residuos, lo que lleva a prácticas insostenibles a largo plazo debido a sus altos costos e impacto ambiental.

En resumen, los métodos de biorremediación ofrecen opciones confiables para gestionar los desechos industriales en las naciones en desarrollo, pero aún no son adecuados para su uso debido a limitaciones técnicas, financieras e infraestructurales. El uso de estas tecnologías todavía está limitado en estas áreas debido a sus habilidades de baja tecnología y recursos escasos. A pesar del progreso en métodos biológicos, como emplear hongos que forman relaciones simbióticas con plantas, algas, materiales ecológicos y sustancias que aceleran las reacciones químicas.

La ingeniería industrial es crucial, ya que ayuda a crear métodos ecológicos, un mejor uso de materiales y el uso de herramientas de análisis para desarrollar tecnologías de biorremediación. Este trabajo en equipo permitirá un mejor manejo de basura y con un daño reducido a la naturaleza, también afectará un cambio más duradero hacia la producción en las naciones en crecimiento.

4. Conclusiones

A partir del análisis sistemático que se llevó a cabo, se descubrió que las tecnologías de biorremediación son una alternativa muy prometedora en comparación con los métodos tradicionales para el tratamiento de residuos industriales, especialmente en países en desarrollo. De 34 estudios elegidos de bases científicas como Scopus, Scielo y Google Scholar, está claro que existe un creciente interés en usar la biología para limpiar el medio ambiente.

Esto es muy relevante cuando se trata de situaciones en las que es difícil encontrar y pagar opciones ecológicas. Los resultados nos mostraron un montón de nuevas tecnologías, como hongos que ayudan a las plantas, algas pequeñas, cosas ecológicas y pequeñas partículas que hacen que las cosas sean más limpias y eficientes en fábricas, todo sin causar muchos problemas.

Impacto ambiental pero incluso con todo el progreso realizado, hay un gran problema cuando se trata de usar estos técnicos en el mundo real, principalmente debido a cosas como no tener suficientes recursos.

La carencia de instalaciones adecuadas y la continua dependencia de métodos tradicionales como la quema o el desecho. Asimismo, el análisis mostró que una gran porción de la literatura revisada se centra en ideas teóricas, lo que pone de manifiesto la urgente necesidad de realizar estudios empíricos que apoyen los beneficios de la biorremediación en situaciones verdaderas. En este sentido, es crucial la participación de la ingeniería industrial en la creación, el análisis y la optimización de procesos sostenibles, así como en la mejora de los recursos y la evaluación de los efectos ambientales.

Por último, aunque las tecnologías de biorremediación tienen un gran potencial para transformar la gestión de residuos industriales en regiones con capacidades limitadas, su adopción efectiva dependerá de superar las barreras técnicas, económicas y políticas que aún persisten.

5. Referencias Bibliográficas

- Barrios San Martín, Y., Toledo León, H. F., Abalos Rodríguez, A., Acosta Díaz, S., & Sánchez López, M. I. (2022). Aplicación de ramnolípidos de *Pseudomonas* sp. Y3-B1A en la biodegradación de hidrocarburos a diferentes escalas. *Rev. Int. Contam. Ambient*, 38. SciELO México. <https://doi.org/10.20937/rica.54389>
- Beltrán-Pineda, M. E., & Gómez-Rodríguez, A. M. (2016a). Biorremediación de metales pesados cadmio (Cd), cromo (Cr) y mercurio (Hg), mecanismos bioquímicos e ingeniería genética: Una revisión. *Revista Facultad de Ciencias Básicas*, 12(2), 172-197. google academico.
- Beltrán-Pineda, M. E., & Gómez-Rodríguez, A. M. (2016b). Biorremediación de metales pesados cadmio (Cd), cromo (Cr) y mercurio (Hg), mecanismos bioquímicos e ingeniería genética: Una revisión. *Revista Facultad de Ciencias Básicas*, 12(2), 172-197.
- Bhat, S. A., Bashir, O., Ul Haq, S. A., Amin, T., Rafiq, A., Ali, M., Américo-Pinheiro, J. H. P., & Sher, F. (2022). Phytoremediation of heavy metals in soil and water: An eco-friendly, sustainable and multidisciplinary approach. *Chemosphere*, 303. Scopus. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.134788>
- Blanco-Vieites, M., Suárez-Montes, D., Delgado, F., Álvarez-Gil, M., Battez, A. H., & Rodríguez, E. (2022). Removal of heavy metals and hydrocarbons by microalgae from wastewater in the steel industry. *Algal Research*, 64. Scopus. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2022.102700>
- Cartagena David, M. I. (2019a). *Biorremediación en aguas residuales contaminadas con cianuro y mercurio generadas en el proceso de la minería aurífera en Colombia, a partir de una revisión bibliográfica entre los años 2008-2018*. google academico.
- Cartagena David, M. I. (2019b). *Biorremediación en aguas residuales contaminadas con cianuro y mercurio generadas en el proceso de la minería aurífera en Colombia, a partir de una revisión bibliográfica entre los años 2008-2018*.
- Cerrato, R. F., Avelizapa, N. G. R., Varaldo, H. M. P., Alarcón, A., & Villanueva, R. O. C. (2006). Processes of bioremediation of soil and water which were contaminated by oil hydrocarbons and other organic substances. Characterization and bioremediation of places that have been contaminated by perforation residues. Phytoremediation of soils contam. *Revista Latinoamericana de Microbiología*, 48(2), 179-187.
- Escobar Escobar, N. (s. f.). *Revisión Sistemática: Análisis de las técnicas de Biorremediación y Restauración aplicadas a Suelos con vocación Agrícola*.
- Galindo-Barboza, A. J., Domínguez-Araujo, G., Arteaga-Garibay, R. I., & Salazar-Gutiérrez, G. (2020). Mitigación y adaptación al cambio climático mediante la implementación de modelos integrados para el manejo y aprovechamiento de los residuos pecuarios. Revisión. *Revista Mexicana de Ciencias Pecuarias*, 11, 107-125. <https://doi.org/10.22319/rmcp.v11s2.4697>
- Garzón, J. D., Sarria, V. M., & Medina, O. F. S. (s. f.). *Biological and Physical-chemical Approaches for Pollutants Treatment: A Brief Review of the Universidad de los Andes Contribution*. google academico.
- Grushevenko, E. A., Safronov, P. A., Grudkovskaya, V. K., Petrova, I. V., & Bazhenov, S. D. (2024). Methods for Improving the Electromembrane Regeneration Efficiency of Industrial Alkanolamine Absorbents. *Petroleum Chemistry*, 64(11), 1327-1337. Scopus. <https://doi.org/10.1134/S0965544124080206>
- Khalifa, A. M., Elbaghdady, K. Z., El Kafrawy, S. B., & El-Zeiny, A. M. (2025). Bioremediation vs. Traditional Methods: A Comparative Review of Heavy Metal Removal Techniques from Aquatic Environment. *Egyptian Journal of Aquatic Biology and Fisheries*, 29(2), 1307-1335. Scopus. <https://doi.org/10.21608/ejabf.2025.419832>
- Lin, Q., Yang, Q., Zhao, D., Lu, S., & Ma, H. (2024). Research Progress on Source, Limitation and Detection Technology of Per- and Polyfluoroalkyl Substances in Food Contact Paper. *Journal of Food Science and Technology (China)*, 42(6), 25-34and67. Scopus. <https://doi.org/10.12301/spxb202400451>

- Liu, H., Zou, Q., Yang, Y., Song, Y., Xu, Y., & Li, G. (2024). One-step Preparation and Anti-icing Performance of Superhydrophobic Surface. *Surface Technology*, 53(16), 190-197. Scopus. <https://doi.org/10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2024.16.016>
- Machineni, L. (2019). Review on biological wastewater treatment and resources recovery: Attached and suspended growth systems. *Water Science and Technology*, 80(11), 2013-2026. Scopus. <https://doi.org/10.2166/wst.2020.034>
- Majumder, D., Dey, A., Ray, S., Bhattacharya, D., Nag, M., & Lahiri, D. (2024). Use of genomics & proteomics in studying lipase producing microorganisms & its application. *Food Chemistry: Molecular Sciences*, 9. Scopus. <https://doi.org/10.1016/j.fochms.2024.100218>
- Mondal, R., Chakraborty, T., Yadav, D., Bellare, J., Saxena, S., & Shukla, S. (2024). Poly(vinylidene fluoride)/Nickel Oxide-Montmorillonite Mixed-Matrix Membranes for Oil Separation from Emulsified Oily Wastewater. *ACS Applied Nano Materials*, 7(19), 22752-22765. Scopus. <https://doi.org/10.1021/acsanm.4c03745>
- Núñez, W. E., Sotomayor, D. A., Ballardo, C. V., & Herrera, E. (2023). Potencial de la biomasa fúngica: Producción y mecanismos de biorremediación de metales pesados del compost de residuos sólidos orgánicos municipales. *Scientia Agropecuaria*, 14(1), 79-91. SciELO Peru. <https://doi.org/10.17268/sci.agropecu.2023.008>
- Orejuela, R., & Zahyr, J. (2019). Biorremediación de suelos y aguas contaminadas por la minería, en el municipio de Istmina (chocó): Una revisión documental. *No objeto asociado*.
- Otero Méndez-Benegassi, S. (2024). *Revisión bibliográfica: Biorremediación para la degradación de plásticos de polietileno por microorganismos*.
- Quan, H., Jia, Y., Zhang, H., Ji, F., Shi, Y., Deng, Q., Hao, T., Khanal, S. K., Sun, L., & Lu, H. (2024). Insights into the role of electrochemical stimulation on sulfur-driven biodegradation of antibiotics in wastewater treatment. *Water Research*, 266. Scopus. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2024.122385>
- Rodrigues, B. G., José, Á. H. M., Prado, C. A., Rodrigues, D., & Rodrigues, R. C. L. B. (2024). Optimizing corncob pretreatment with eco-friendly deep eutectic solvents to enhance lignin extraction and cellulose-to-glucose conversion. *International Journal of Biological Macromolecules*, 283. Scopus. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.137432>
- Rodríguez Martínez, R., & Suescún Otero, G. (2013). Aplicaciones e inconvenientes de la técnica Hibridación in situ Fluorescente (FISH) en la identificación de microorganismos. *Revista Salud Uninorte*, 29(2), 327-340. google academico.
- San José Sierra, A. S., & Ribón Daza, L. P. (2023). *Biorremediación en el tratamiento de aguas, una revisión narrativa*.
- Tamayo-Ortiz, M., & Navia-Antezana, J. (2018). Reduced lead exposure following a sensitization program in rural family homes producing traditional mexican ceramics. *Annals of Global Health*, 84(2), 285-291. Scopus. <https://doi.org/10.29024/aogh.916>
- Tian, P., Gao, P., Wang, M., Li, Y., & Han, Y. (2025). Pilot-scale recovery of iron from refractory specularite ore using hydrogen-based mineral phase transformation technology: Process optimization, mineral characterization, and green production. *Journal of Cleaner Production*, 491. Scopus. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2025.144836>
- Torres, A., Rodríguez, H. A., & Ayala, M. (2023). Contaminantes emergentes en México: Panorama actual, retos y una posible solución biotecnológica. *TIP*, 26. SciELO México. <https://doi.org/10.22201/fesz.23958723e.2023.590>
- Vásquez-Montes, S., Villarreal-Guerrero, F., Amaya-Olivas, N. I., & Hernández-Ochoa, L. R. (2020). Producción y composición química del aceite esencial de *Dalea bicolor* en diferentes regiones de Chihuahua, México. *Bot. sci*, 98(4), 486-498. SciELO México. <https://doi.org/10.17129/botsci.2602>
- Wu, J., Zhang, J., Tan, Y., Zhang, S., Li, W., Ming, H., & Wang, C. (2024). Mechanical Properties and Microscopic Mechanism of Phosphogypsum-Slag-Lime Solidified Sediment. *Yingyong Jichu yu Gongcheng Kexue Xuebao/Journal of Basic Science and Engineering*, 32(5), 1360-1373. Scopus. <https://doi.org/10.16058/j.issn.1005-0930.2024.05.012>

- Xiong, X., Zhang, Y., Li, L., Zhang, J., & Tan, H. (2025). Pollutants generation characteristics from retired wind turbine blades treated with thermochemical methods. *Meitan Xuebao/Journal of the China Coal Society*, 50(2), 1331-1338. Scopus. <https://doi.org/10.13225/j.cnki.jccs.2024.0231>
- Yadav, K., & Rai, M. P. (2024). Green innovation unites biodiesel production with bioremediation of waste metal cutting fluid using *Chlorella sorokiniana*. *Biomass Conversion and Biorefinery*. Scopus. <https://doi.org/10.1007/s13399-024-05316-8>
- Yan, X., Wang, J., Zhang, M., Hu, X., & Liu, X. (2023). Research Progress of Bioremediation Technology for Chromium Contamination in Soil. *Xiyou Jinshu/Chinese Journal of Rare Metals*, 47(9), 1302-1315. Scopus. <https://doi.org/10.13373/j.cnki.cjrm.XY20080025>
- Zakharov, G. V., Tavadze, G. F., Oniashvili, G. S., Aslamazashvili, Z. G., Chirakadze, A. A., Mikaberidze, G. V., Kvashvadze, D. L., & Urushadze, G. G. (2021). Obtaining of Ligatures from Manganese Production Wastes by Self-Propagating High-Temperature Synthesis. *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*, 60(7-8), 513-518. Scopus. <https://doi.org/10.1007/s11106-021-00263-9>
- Martínez-Hernández, J. L., Ángeles, J. G., & Martínez, G. R. (2021). *Uso de microorganismos en la biorremediación de suelos contaminados con hidrocarburos*. *Revista Bio Ciencias*, 8(3), 1–18. <https://doi.org/10.15741/revbio.08.e1035>
- Vera, R., Romero, E., & Herrera, R. (2022). *Avances en técnicas de biorremediación para suelos contaminados: una revisión sistemática*. *Revista Colombiana de Biotecnología*, 24(2), 59–75. <https://doi.org/10.15446/rev.colomb.biote.v24n2.101155>
- Page, M. J., McKenzie, J. E., Bossuyt, P. M., Boutron, I., Hoffmann, T. C., Mulrow, C. D., ... & Moher, D. (2021). *The PRISMA 2020 statement: an updated guideline for reporting systematic reviews*. *BMJ*, 372:n71. <https://doi.org/10.1136/bmj.n71>