

Bacterias tolerantes y resistentes a los metales pesados en el ambiente

Tolerant and Resistant to Heavy Metals Bacteria in the Environment

EPISTEMUS

ISSN: 2007-8196 (electrónico)

Francisca A. Trujillo Peralta ¹

Guadalupe López Avilés ²

Laura Mondragón Camarillo ³

Kadiya Calderón* ⁴

Recibido: 20 / 12 / 2022

Aceptado: 22 / 08 / 2023

Publicado: 27 / 10 / 2023

DOI: <https://doi.org/10.36790/epistemus.v18i35.287>

Autor de Correspondencia:

Kadiya Calderón

Correo: Kadiya.calderon@unison.mx

Resumen

La contaminación ambiental por metales pesados es producto en gran medida de las actividades humanas. Diversos tipos de industrias como las mineras, agroquímicas, textiles y de refinamiento generan grandes cantidades de compuestos tóxicos que afectan la calidad del medio ambiente y la salud de los seres vivos. Durante mucho tiempo, se ha buscado desarrollar estrategias que permitan remover los metales pesados del medio ambiente con el fin de mitigar su toxicidad. Dentro de estas estrategias destacan las que usan organismos, como plantas, hongos, algas y bacterias, ya que estos son más eficientes, no generan residuos secundarios y no son costosas. En este trabajo, se busca divulgar los diferentes mecanismos que utilizan las bacterias para la remoción de metales, así como los metales que pueden llegar a ser eliminados.

Palabras clave: remediación, bacterias, metales pesados.

Abstract

Environmental pollution by heavy metals is caused to a large extent by human activities. Various types of industries, such as mining, agrochemical, textile and refining, generate large amounts of toxic compounds that affect the quality of the environment and the health of living beings. For a long time, it has been sought develop strategies that allow removing heavy metals from the environment to mitigate their toxicity. Among these strategies, those using organisms such as plants, fungi, algae, and bacteria stand out, since they are more efficient, do not generate secondary waste and are not expensive. This work aims to show the different mechanisms that use the bacteria for the removal of metals, as well as the metals that can be eliminated.

Keywords: remediation, bacteria, heavy metals.

¹ Departamento de Investigaciones científicas y Tecnológicas de la Universidad de Sonora, Universidad de Sonora, Hermosillo, Sonora, México, a214205632@unison.mx, <https://orcid.org/0000-0003-4167-0767>.

² Dra. En Ciencias de la Ingeniería. Departamento de Ingeniería Química y Metalúrgica, Universidad de Sonora, Hermosillo, Sonora, México, guadalupe.aviles@unison.mx, Orcid. <https://orcid.org/0000-0003-2240-6792>

³ Dra. En Ciencias, Laboratorio, Ecología microbiana, UBIPRO FES-Iztacala, UNAM, México. Zombo_7@yahoo.com.mx.

⁴ Dra. En Ciencias, Departamento de Investigaciones científicas y Tecnológicas de la Universidad de Sonora, Universidad de Sonora, Hermosillo, Sonora, México, kadiya.calderon@unison.mx Orcid. 0000-0003-3502-6449

INTRODUCCIÓN

La contaminación ambiental ha ido en aumento en las últimas décadas debido al incremento de las actividades humanas en la producción de energía, las prácticas agrícolas intensivas y la rápida industrialización. Dentro de los contaminantes que son de preocupación ambiental y de salud pública, debido a su toxicidad, encontramos a los metales pesados, desechos nucleares, pesticidas, gases de efecto invernadero e hidrocarburos [1, 2].

El aumento en la presencia de metales pesados en el medio ambiente se debe a los fenómenos naturales y a las actividades antropogénicas como, la industria minera, la fundición, las plantas de energía, las industrias textiles, las industrias agroquímicas, el refinamiento de petróleo y los combustibles fósiles [2]. La industria minera proporciona los materiales clave para la fabricación de múltiples productos, en los que se incluyen artículos tecnológicos, joyas y monedas. Sin embargo, los procesos de extracción de estos materiales generan grandes cantidades de desechos; ya que, para extraer un mineral se deben procesar varias toneladas de roca, de la cual solo se utiliza entre el 1% y el 40%, el resto se convierte en material de residuo, sin ningún valor económico [3, 4]. Estos desechos son depositados en los jales mineros, que contienen grandes concentraciones de sustancias tóxicas que son potencialmente dañinas para el medio ambiente [5].

Los residuos mineros pueden contener altos niveles de metales que no son sencillos de manejar, ya que pueden presentar problemas para la estabilización de los tóxicos, la dispersión de material particulado, derrames, generación de drenaje ácido y fallas estructurales [6, 7]. Estas problemáticas aumentan conforme los jales son abandonados, dado que estos reducen su capacidad de contener compuestos tóxicos, permitiendo la dispersión de estos por agua y aire [4].

Muchas de estas minas son sitios históricos frecuentemente visitados o se encuentran cerca de tierras agrícolas o comunidades, llegando a afectar la salud de las personas [7]. Las vías de exposición a estos contaminantes pueden ser variadas, tales como la ingestión directa, el contacto

dérmico y la inhalación [8]. A pesar del impacto ambiental negativo de la industria minera, esta sigue siendo un importante sector industrial de la economía en todo el mundo [9].

Los metales pesados se transfieren en fase líquida o sólida a través del agua o aire, por lo que durante mucho tiempo se han implementado diversas técnicas para remover estos residuos tóxicos con el fin de mitigar su daño [3]. Entre estas técnicas destacan aquellas que utilizan organismos como plantas, hongos, algas o bacterias para removerlos.

METALES PESADOS

El término elementos potencialmente tóxicos (EPT) o metales pesados es empleado para el grupo de metales y metaloides con una densidad atómica superior a los 4 g/cm³. En este grupo, encontramos metales como el arsénico (As), cadmio (Cd), cromo (Cr), cobre (Cu), mercurio (Hg), níquel (Ni), plomo (Pb) y zinc (Zn), hierro (Fe), manganeso (Mn) y selenio (Se) [10]. Algunos metales pesados (Cu⁺², Cr³⁺, Fe²⁺/Fe³⁺, Mn, Ni, Se, Zn²⁺) son tóxicos para los organismos solo si superan ciertos límites, mientras que se consideran esenciales en concentraciones mínimas debido a sus funciones biológicas [11 - 13].

Los metales no esenciales como As, Cd, Hg y Pb son extremadamente tóxicos para los seres vivos incluso en concentraciones muy bajas, por lo que la NOM-127-SSA-2021 [14] decretó como límite máximo 0.025 mg/L, 0.005 mg/L, 0.006 mg/L y 0.01 mg/L, respectivamente, para el agua de uso y consumo. Una vez que estos ingresan al organismo, pueden provocar una acción dañina. Por lo tanto, el efecto tóxico de los metales está determinado por su concentración y tiempo de exposición, y no en la acción de estos en el organismo. La toxicidad de los metales vuelve al ambiente en un medio ácido, deficiente de nutrientes y cambia las condiciones físicas naturales [15].

El Noroeste de México es conocido por ser rico en minerales, sobre todo en el estado de Sonora, en donde se extraen principalmente Cu, oro (Au) y plata (Ag) [4]. Los registros sobre las áreas afectadas en México y Sonora son escasas [16]. Se reportaron concentraciones de elementos potencialmente tóxicos (EPT) como el As, Cd, Cu y Pb que sobrepasan los límites nacionales e internacionales [17].

EFFECTOS DE LAS ALTAS CONCENTRACIONES DE METALES PESADOS EN LOS ORGANISMOS

Diferentes iones de metales pesados tienen distintos efectos en los seres vivos. Las altas concentraciones de Cd en el ser humano causan problemas nefrotóxicos y si es expuesto por tiempo prolongado, puede causar daño óseo [10]. Mientras que, en plantas el contacto continuo con este metal provoca una disminución en la fotosíntesis, la absorción de nutrientes y de agua, además de provocar aclaramiento en las hojas, inhibición del crecimiento e incluso la muerte [18].





El Cu puede causar debilidad, letargo y anorexia, así como daños en el tracto intestinal [10]. Puede también causar daño cerebral y renal, cirrosis hepática y anemia persistente, así como inflamación estomacal e intestinal [19]. Los niveles por encima de ciertos valores también causan oxidación celular [11, 20].

El Hg puede acumularse en los animales [15] y en altas concentraciones puede provocar trastornos neuroconductuales y discapacidades del desarrollo, como dislexia, trastorno de déficit de atención y retraso intelectual [10]. En plantas, los niveles altos de Hg entorpecen las funciones mitocondriales iniciando la presión oxidativa y desencadenando la generación de especies reactivas de oxígeno. El Pb provoca en el ser humano encefalopatía, deterioro cognitivo, alteraciones del comportamiento, daño renal, anemia y toxicidad para el sistema reproductivo [10]. Los altos niveles de Pb causan inhibición enzimática, desequilibrios hídricos, cambios en la porosidad de la membrana, además de generar ERO [18].

TÉCNICAS DE REMEDIACIÓN PARA AMBIENTES

La contaminación ambiental es un problema persistente que afecta a los seres vivos por lo que, se han diseñado diversas técnicas con el fin de abordar este problema [21]. A diferencia de los contaminantes orgánicos, los metales pesados no son biodegradables, se acumulan en los organismos vivos a través de la cadena alimentaria y algunos de ellos son extremadamente tóxicos incluso en concentraciones relativamente bajas. Por lo tanto, los problemas derivados de la contaminación por metales pesados requieren soluciones de eliminación urgentes [22].

Con base en ello, se han desarrollado diversas estrategias tanto fisicoquímicas como biológicas para remover los metales pesados de los sitios contaminados. Las estrate-

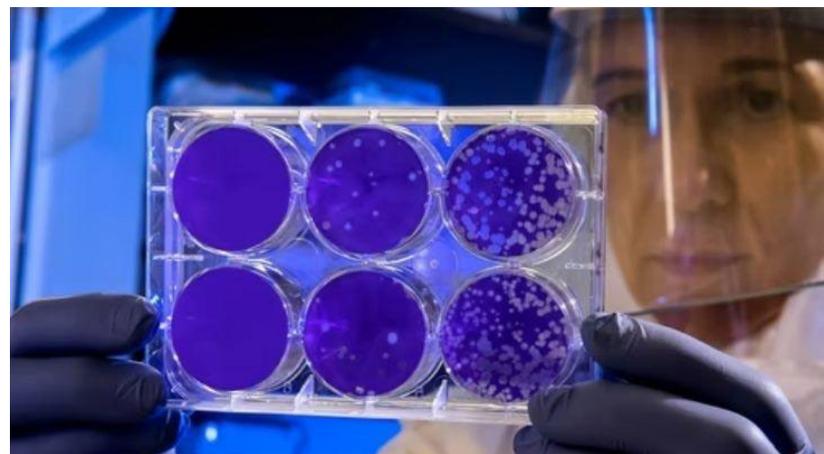
gias convencionales o fisicoquímicas consisten en agregar productos químicos en el área afectada con el fin de reducir la movilidad de los contaminantes o de neutralizar los fluidos ácidos o alcalinos [23]. Los métodos empleados en los tratamientos convencionales incluyen la precipitación química, el intercambio iónico, la recuperación por evaporación, la extracción por medio de disolventes, la flotación, la electrodiálisis, la inmovilización, la floculación, la nanofiltración, la estabilización, la osmosis inversa, el lavado del suelo y la ultrafiltración. Estos métodos tienen ciertas desventajas como contaminantes secundarios, alto costo de operación y mantenimiento, baja eficiencia, complejidad operativa, altos requerimientos de energía y remoción incompleta [12, 19, 24].

La remediación biológica consiste en el uso de organismos como bacterias, hongos, plantas y algas para la remoción de contaminantes. Estos procesos son relativamente económicos y son una herramienta eficaz para contrarrestar los efectos nocivos de la contaminación ambiental [21].

Estas estrategias pueden llevarse a cabo tanto *in situ* como *ex situ*. Las técnicas de remediación *ex situ* involucran la excavación de los sitios contaminados y su trasportación para su posterior tratamiento. Los parámetros que se deben considerar son: el costo del tratamiento, la profundidad de la contaminación, el tipo de contaminante, el grado de contaminación y la geología del sitio contaminado [1]. Por su parte, las técnicas de remediación *in situ* implican el tratamiento de materiales tóxicos en el lugar de la contaminación. Los parámetros o factores que afectan la biorremediación son la disponibilidad de nutrientes, la naturaleza de los contaminantes como el caso de metales pesados, el pH del sitio contaminado, el contenido de humedad, la temperatura, la disponibilidad de oxígeno y sobre todo la diversidad de organismos presentes [15].

REMEDIACIÓN ASISTIDA POR PLANTAS

La fitorremediación es el proceso en el cual se utilizan plantas para eliminar o transformar los metales. Las plantas absorben de manera eficiente los metales del suelo. Estos se vuelven menos tóxicos y se degradan a especies





distintas las cuales se transportan a diferentes partes de la planta donde se acumulan, sobre todo en los brotes y las raíces. Las plantas que realizan estos procesos son clasificadas como acumuladoras o hiperacumuladoras, de las cuales se han reportado hasta el momento 721 especies [18].

Para que una planta acumule metales pesados debe tener una gran tolerancia a los mismos y también capacidad de transportarlos desde la raíz a otras partes de la planta. Si la concentración de metales es alta, éstos competirían con los nutrientes esenciales, afectando así al metabolismo de la planta [18]. En este sentido se considera que la fitorremediación es un proceso simple y rentable.

REMEDIACIÓN ASISTIDA POR HONGOS

Es el proceso de usar hongos para degradar o secuestrar contaminantes en el medio ambiente, para repararlo o restaurarlo. La micofiltración es el proceso en el que utiliza micelios fúngicos para filtrar desechos tóxicos del agua en el suelo, a través de la estimulación de la actividad microbiana y enzimática. Los hongos saprofitos (se alimentan de materia orgánica en descomposición), endófitos (se encuentran en el interior de las plantas y secretan sustancias que aumentan su tolerancia al estrés) y micorrízicos (hongos asociados a la raíz de las plantas mejorando su absorción de nutrientes y brindando protección) son capaces de recuperar los ecosistemas suelo-agua y equilibrar la población biológica [15].

REMEDIACIÓN ASISTIDA POR ALGAS

Las diferentes clases de algas Chlorophyceae, Phaeophyceae, Xanthophyceae, Rhodophyceae, Bacillariophyceae y Dinophyceae juegan un papel ecológico significativo en el mantenimiento de la calidad del agua. Esto en gran medida a que generan diversos metabolitos bioactivos y mecanismos celulares para poblar una gran cantidad de hábitats, incluidas las aguas residuales [25]. Las algas como biomasa natural renovable exhiben diferentes afinidades hacia metales y, por lo tanto, son candidatas importantes empleadas como materiales biosorbentes. Las macro y microalgas exhiben mecanismos constitutivos para la elimi-

nación de iones metálicos libres de aguas, desintoxicando y remediando así el agua en cuestión [2].

REMEDIACIÓN ASISTIDA POR BACTERIAS

Entre las estrategias de remediación biológica se encuentra el aprovechamiento del metabolismo bacteriano, tanto en presencia de oxígeno (metabolismo aeróbico) como ausencia o en pocas concentraciones de este (metabolismo anaeróbico), para estimular reacciones bióticas y abióticas favorables para transformar compuestos tóxicos en sustancias inocuas [3]. La remediación se puede clasificar en tres tipos con base en la intervención humana. Se le conoce como atenuación natural a las actividades donde los microorganismos realizan los procesos de remediación en los cuales el ser humano no interviene, es un proceso lento, pero sin costo [12]. La bioestimulación es la adición de nutrientes, aire, sustratos orgánicos o compuestos que favorezcan su crecimiento y tasa de remediación [21]. Y finalmente, la bioaumentación es la incorporación de organismos especializados en los sitios contaminados para limpiarlos [21].

La biomasa bacteriana tanto viva como no viva, elimina eficazmente los metales pesados de los efluentes [20]. Algunos estudios han demostrado que, la biomasa de diferentes especies de bacterias, hongos y algas son capaces de concentrar iones metálicos que se encuentran en medios acuáticos. En ambientes mineros se han detectado algunas bacterias del género *Pseudomonas* que presentan resistencia a los metales pesados como Cd, Cu y Pb, entre otros [26].

MECANISMOS DE REMEDIACIÓN EN BACTERIAS

Las bacterias interactúan de diferentes formas con los metales pesados (Figura 1), lo que les permite removerlos de los sitios contaminados. Estas interacciones se pueden clasificar de diferentes maneras y pueden realizar más de un mecanismo en la remoción de un metal. También, pueden presentarse diferentes mecanismos dependiendo de la naturaleza del metal y las características de la bacteria.

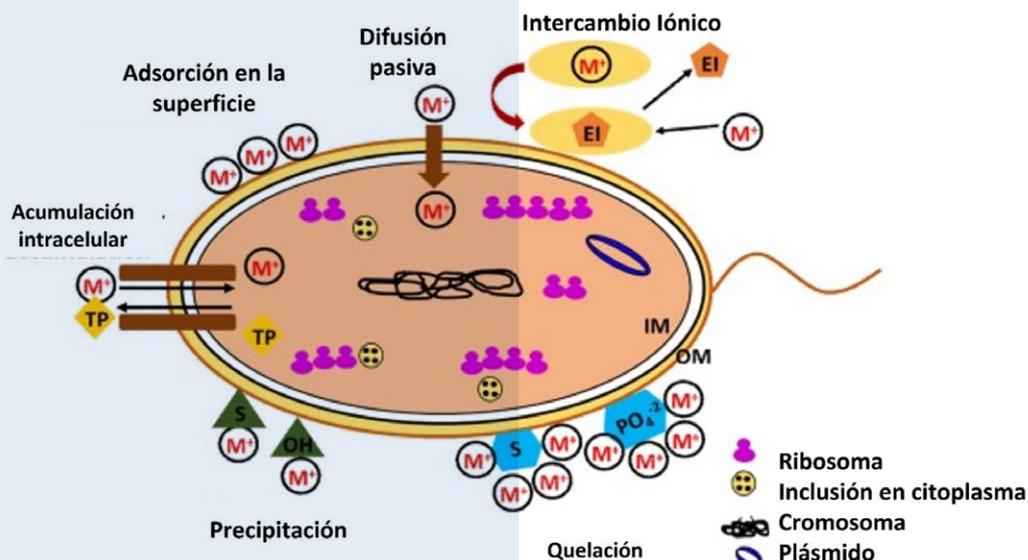


Figura 1. Esquema de mecanismos de remoción de metales por bacterias [12].

La biosorción puede ser clasificada con base en el metabolismo, como dependiente o independiente del mismo. El dependiente del metabolismo consiste en la acumulación intracelular de metales a través de la membrana celular y solo es llevada a cabo por células vivas [19]. La bioacumulación es el proceso en el cual los materiales tóxicos atraviesan las membranas celulares y se acumulan en el interior, por lo cual éste es considerado un proceso exclusivo de células vivas [27].

Mientras que, la biosorción independiente del metabolismo, es la adsorción de metales que ocurre por la interacción fisicoquímica entre los grupos funcionales en la superficie de las bacterias y los iones metálicos. La unión de los iones metálicos a la superficie celular de una bacteria implica varios mecanismos, como interacciones físicoquímicas, tipo electrostática o de Van der Waals o interacción química como el desplazamiento de cationes metálicos adheridos por intercambio iónico, formación de complejos, difusión, superficie de adsorción o por precipitación [12].

Los metales se pueden precipitar en el interior de las células, donde se producen partículas sólidas, este es mecanismo de defensa de las bacterias, por lo cual, también es dependiente del metabolismo. Sin embargo, la precipitación ocurre por la interacción química entre la superficie celular y el metal, no requiere gasto energético [28, 29].

La formación de compuestos o quelación ocurre en la superficie celular y consiste en la formación de sustancias complejas una vez que el metal haya interactuado con los grupos activos (carboxilo, tiol, amino) de la pared celular. El intercambio iónico ocurre cuando los polisacáridos de la membrana celular son intercambiados por iones metálicos; dicha unión puede ser física o química [29].

La adsorción, haciendo referencia a los iones metálicos, se define como el fenómeno en el cual el metal se adhiere

a la superficie de la pared celular mediante interacciones no covalentes, como fuerza de dispersión de London, ya que en este no ocurre un intercambio iónico el proceso es reversible [24].

La difusión es cuando entran diferentes cationes hacia la célula a través de la membrana, esto ocurre principalmente por aquellos metales que presentan una misma carga y radio iónico que los metales esenciales (magnesio, sodio, potasio). Sin embargo, este mecanismo no está relacionado al metabolismo [29].

BACTERIAS TOLERANTES A METALES

En la tabla 1, se muestran los mecanismos de remoción de metales más comunes realizados por bacterias. La capacidad de remoción depende en gran medida de la bacteria, la naturaleza del metal, el pH, el tiempo de contacto con el metal y la concentración de este.

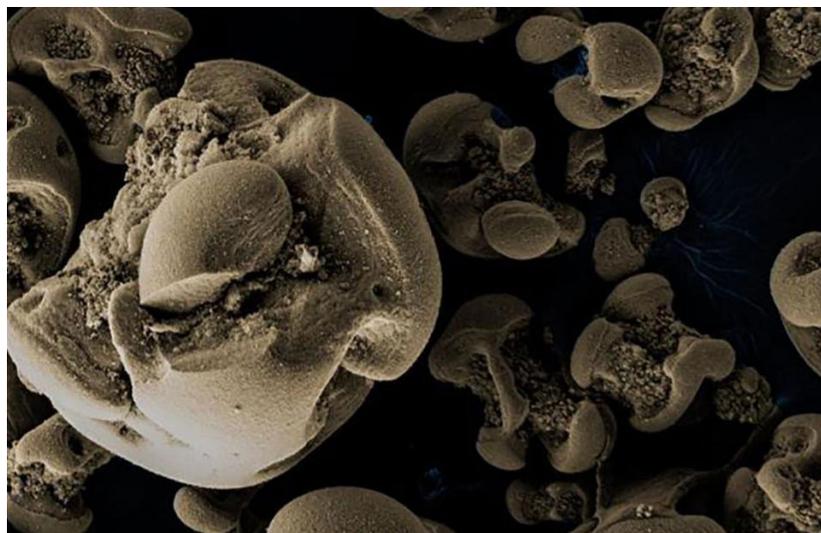
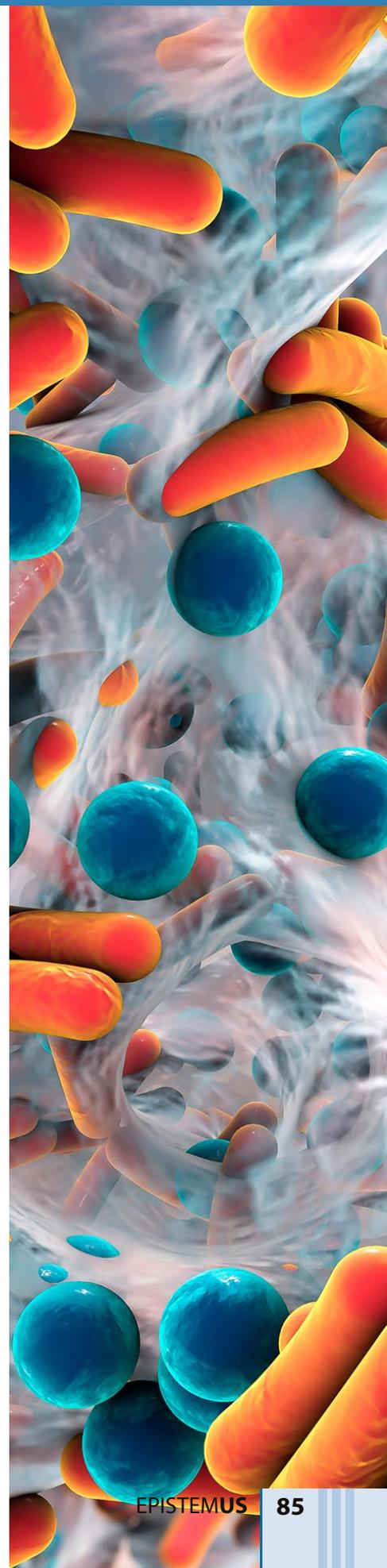
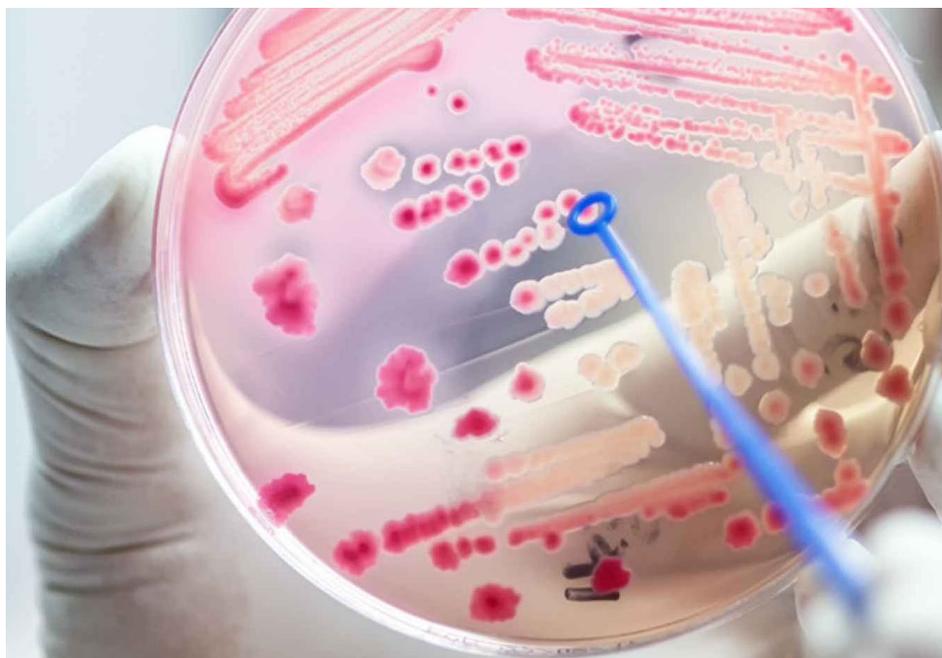


Tabla 1. Mecanismos de remoción de metales pesados por bacterias

BACTERIA	METAL PESADO	MECANISMO	CAPACIDAD DE REMOCIÓN %	REFERENCIA
<i>PSEUDOMONAS AZOTOFORMAS</i>	CD	ADSORCIÓN	98.57	[30]
<i>RHODOCOCCUS ERYTHROPOLIS</i>	CR	ACUMULACIÓN	84	[31]
<i>BACILLUS THURINGIENSIS</i>	CU	INTERCAMBIO IÓNICO	14.6	[22]
<i>BACILLUS THURINGIENSIS OSM29</i>	NI	ADSORCIÓN	94.6	[32]
<i>OCEANOBACILLUS PROFUNDUS</i>	PB	QUELACIÓN	97	[33]
<i>OCHROBACTRUM ANTHROPI</i>	ZN	ACUMULACIÓN	20	[34]

PROPUESTAS FUTURAS

La limpieza de ambientes contaminados es un desafío tanto por las implicaciones técnicas como las financieras requeridas en los procesos de remediación. Siendo las técnicas de remediación biológicas las más efectivas al no generar residuos secundarios y no ser de costos elevados en comparación con las técnicas fisicoquímicas. El uso de bacterias para remover metales pesados ha ido ganando peso en los últimos años, dado que las bacterias pueden interactuar de múltiples maneras con los metales y al ser de rápido crecimiento aumentan la tasa de remoción de estos. Lo que permite que las bacterias sean utilizadas para remediar sitios contaminados de manera in situ o ex situ, al fabricarse biomateriales con ellas con la capacidad de realizar estas tareas, como la fabricación de materiales capaces de filtrar el agua, reteniendo los EPT presentes, haciendo esta agua segura para su consumo. Otro punto es hacer uso de la biología molecular para poder identificar y comprender metabólicamente a los microorganismos involucrados en el beneficio del tratamiento, que bajen los costos de mantenimiento y tener resultados más certeros en menos tiempo. Sin embargo, para realizar esto es necesario más investigación antes de aplicarlos en la vida cotidiana.





CONCLUSIONES

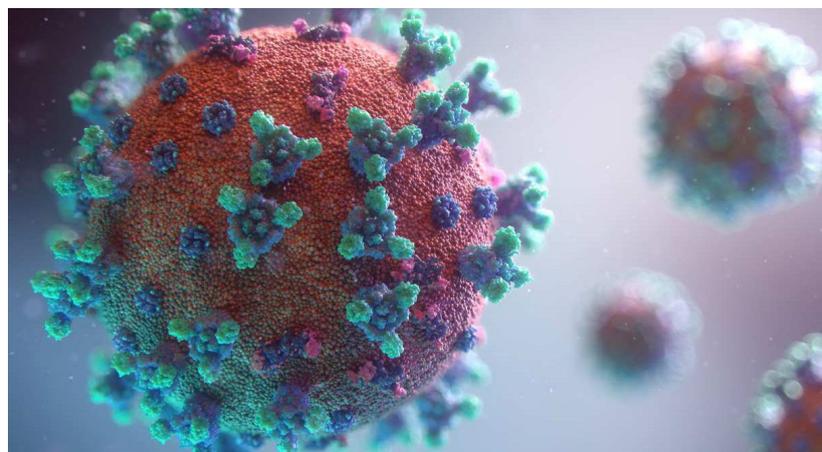
La capacidad de remoción de metales pesados mediante el uso de organismos, sobre todo bacterias, presenta grandes posibilidades en la recuperación de ambientes contaminados, permitiendo así mejorar la calidad del medio ambiente y por consiguiente la salud de los seres vivos. Una de las grandes ventajas en el uso de bacterias para la remediación es su bajo costo en producción y su reproducción, esto último a diferencia de las plantas las cuales tardan más en crecer y por consiguiente en usarse para la eliminación de sustancias tóxicas. Poco a poco se ha ido exigiendo que las industrias sean socialmente responsables, sobre todo hablando de los desechos que estas generan, sin embargo, aún falta mucho por hacer. Desde la sensibilización hasta la estandarización de técnicas y herramientas que permitan biorremediar los daños ocasionados por las mismas, por lo que es importante divulgar los avances y perspectivas que surjan en este aspecto.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] C. C. Azubuike, C. B. Chikere, and G. C. Okpokwasili, "Bioremediation techniques-classification based on site of application: principles, advantages, limitations and prospects," *World Journal of Microbiology & Biotechnology*, vol. 32, no. 11, Nov 2016, Art no. 180, doi: 10.1007/s11274-016-2137-x.
- [2] K. S. Kumar, H. U. Dahms, E. J. Won, J. S. Lee, and K. H. Shin, "Microalgae - A promising tool for heavy metal remediation," *Ecotoxicology and Environmental Safety*, vol. 113, pp. 329-352, Mar 2015, doi: 10.1016/j.ecoenv.2014.12.019.
- [3] E. I. Valenzuela, A. C. Garcia-Figueroa, L. E. Amabilis-Sosa, F. E. Molina-Freaner, and A. M. Pat-Espadas, "Stabilization of potentially toxic elements contained in mine waste: A microbiological approach for the environmental management of mine tailings," *Journal of Environmental Management*, vol. 270, Sep 2020, Art no. 110873, doi: 10.1016/j.jenvman.2020.110873.
- [4] R. Loredó-Portales et al., "Mobility and accessibility of Zn, Pb, and As in abandoned mine tailings of northwestern Mexico," *Environmental Science and Pollution Research*, vol. 27, no. 21, pp. 26605-26620, Jul 2020, doi: 10.1007/s11356-020-09051-1.
- [5] X. F. Gao, L. Jiang, Y. L. Mao, B. Yao, and P. H. Jiang, "Progress, Challenges, and Perspectives of Bioleaching for Recovering Heavy Metals from Mine Tailings," *Adsorption Science &*

Technology, vol. 2021, May 2021, Art no. 9941979, doi: 10.1155/2021/9941979.

- [6] M. Gutierrez-Ruiz et al., "Acid spill impact on Sonora River basin. Part I. sediments: Affected area, pollutant geochemistry and health aspects," *Journal of Environmental Management*, vol. 314, Jul 2022, Art no. 115032, doi: 10.1016/j.jenvman.2022.115032.
- [7] J. Helsler, E. Vassilieva, and V. Cappuyns, "Environmental and human health risk assessment of sulfidic mine waste: Bioaccessibility, leaching and mineralogy," *Journal of Hazardous Materials*, vol. 424, Feb 2022, Art no. 127313, doi: 10.1016/j.jhazmat.2021.127313.
- [8] M. J. Zhang et al., "Geographical distribution and risk assessment of heavy metals: a case study of mine tailings pond," *Chemistry and Ecology*, vol. 36, no. 1, pp. 1-15, Jan 2020, doi: 10.1080/02757540.2019.1676420.
- [9] M. D. G. Baltazar et al., "Copper biosorption by *Rhodococcus erythropolis* isolated from the Sossego Mine - PA - Brazil," *Journal of Materials Research and Technology-Jmr&T*, vol. 8, no. 1, pp. 475-483, Jan-Mar 2019, doi: 10.1016/j.jmrt.2018.04.006.
- [10] D. W. O'Connell, C. Birkinshaw, and T. F. O'Dwyer, "Heavy metal adsorbents prepared from the modification of cellulose: A review," *Bioresource Technology*, vol. 99, no. 15, pp. 6709-6724, Oct 2008, doi: 10.1016/j.biortech.2008.01.036.
- [11] E. Cavalletti et al., "Copper Effect on Microalgae: Toxicity and Bioremediation Strategies," (in eng), *Toxics*, vol. 10, no. 9, Sep 06 2022, doi: 10.3390/toxics10090527.
- [12] M. Priyadarshane and S. Das, "Biosorption and removal of toxic heavy metals by metal tolerating bacteria for bioremediation of metal contamination: A comprehensive review," *Journal of Environmental Chemical Engineering*, vol. 9, no. 1, Feb 2021, Art no. 104686, doi: 10.1016/j.jece.2020.104686.
- [13] Agency for Toxic Substances and Disease Registry (ATSDR). 2012. Toxicological Profile for Chromium. Atlanta, GA: U.S. Department of Health and Human Services, Public Health Service..
- [14] NORMA OFICIAL MEXICANA NOM-127-SSA1-2021, AGUA PARA USO Y CONSUMO HUMANO. LÍMITES PERMISIBLES DE LA CALIDAD DEL AGUA PREFACIO.
- [15] D. Mani and C. Kumar, "Biotechnological advances in bioremediation of heavy metals contaminated ecosystems: an overview with special reference to phytoremediation," *International Journal of Environmental Science and Technology*, vol. 11, no. 3, pp. 843-872, Apr 2014, doi: 10.1007/s13762-013-0299-8.
- [16] B. Gonzalez-Mendez, R. Webster, R. Loredó-Portales, F. Molina-Freaner, and R. Djellouli, "Distribution of heavy metals polluting the soil near an abandoned mine in Northwestern





- Mexico," *Environmental Earth Sciences*, vol. 81, no. 6, Mar 2022, Art no. 176, doi: 10.1007/s12665-022-10285-0.
- [17] R. Del Rio-Salas et al., "Mineralogy and Geochemistry of Rural Road Dust and Nearby Mine Tailings: A Case of Ignored Pollution Hazard from an Abandoned Mining Site in Semi-arid Zone," *Natural Resources Research*, vol. 28, no. 4, pp. 1485-1503, Oct 2019, doi: 10.1007/s11053-019-09472-x.
- [18] P. R. Yaashikaa, P. S. Kumar, S. Jeevanantham, and R. Saravanan, "A review on bioremediation approach for heavy metal detoxification and accumulation in plants," *Environmental Pollution*, vol. 301, May 2022, Art no. 119035, doi: 10.1016/j.envpol.2022.119035.
- [19] N. Vaid, J. Sudan, S. Dave, H. Mangla, and H. Pathak, "Insight Into Microbes and Plants Ability for Bioremediation of Heavy Metals," *Current Microbiology*, vol. 79, no. 5, May 2022, Art no. 141, doi: 10.1007/s00284-022-02829-1.
- [20] K. Mathivanan, J. U. Chandirika, A. Vinothkanna, H. Yin, X. Liu, and D. Meng, "Bacterial adaptive strategies to cope with metal toxicity in the contaminated environment - A review," (in eng), *Ecotoxicol Environ Saf*, vol. 226, p. 112863, Dec 15 2021, doi: 10.1016/j.ecoenv.2021.112863.
- [21] S. Verma and A. Kula, "Bioremediation of heavy metals by microbial process," *Environmental Technology & Innovation*, vol. 14, May 2019, Art no. 100369, doi: 10.1016/j.eti.2019.100369.
- [22] J. J. Fan, T. O. Okyay, and D. F. Rodrigues, "The synergism of temperature, pH and growth phases on heavy metal biosorption by two environmental isolates," *Journal of Hazardous Materials*, vol. 279, pp. 236-243, Aug 2014, doi: 10.1016/j.jhazmat.2014.07.016.
- [23] D. Kossoff, W. E. Dubbin, M. Alfredsson, S. J. Edwards, M. G. Macklin, and K. A. Hudson-Edwards, "Mine tailings dams: Characteristics, failure, environmental impacts, and remediation," *Applied Geochemistry*, vol. 51, pp. 229-245, Dec 2014, doi: 10.1016/j.apgeochem.2014.09.010.
- [24] P. Gupta and B. Diwan, "Bacterial Exopolysaccharide mediated heavy metal removal: A Review on biosynthesis, mechanism and remediation strategies," (in eng), *Biotechnol Rep (Amst)*, vol. 13, pp. 58-71, Mar 2017, doi: 10.1016/j.btre.2016.12.006.
- [25] T. Kiran Marella, A. Saxena, and A. Tiwari, "Diatom mediated heavy metal remediation: A review," (in eng), *Bioresour Technol*, vol. 305, p. 123068, Jun 2020, doi: 10.1016/j.biortech.2020.123068.
- [26] O. Monge-Amaya, J. L. Valenzuela-Garcia, E. Acedo-Felix, M. T. Certucha-Barragan, and F. J. Almendariz-Tapia, "Copper biosorption in batch and continuous evaluation using immobilized aerobic bacteria in clinoptilolite," *Revista Internacional De Contaminacion Ambiental*, vol. 24, no. 3, pp. 107-115, Aug 2008.
- [27] J.-L. Zhou, L. Yang, K.-X. Huang, D.-Z. Chen, and F. Gao, "Mechanisms and application of microalgae on removing emerging contaminants from wastewater: A review," *Bioresource Technology*, vol. 364, p. 128049, 2022, doi: https://doi.org/10.1016/j.biortech.2022.128049.
- [28] M. Nanda, V. Kumar, and D. K. Sharma, "Multimetal tolerance mechanisms in bacteria: The resistance strategies acquired by bacteria that can be exploited to 'clean-up' heavy metal contaminants from water," *Aquatic Toxicology*, vol. 212, pp. 1-10, Jul 2019, doi: 10.1016/j.aquatox.2019.04.011.
- [29] A. K. Priya, L. Gnanasekaran, K. Dutta, S. Rajendran, D. Balakrishnan, and M. Soto-Moscoco, "Biosorption of heavy metals by microorganisms: Evaluation of different underlying mechanisms," *Chemosphere*, vol. 307, Nov 2022, Art no. 135957, doi: 10.1016/j.chemosphere.2022.135957.
- [30] A. Choinska-Pulit, J. Sobolczyk-Bednarek, and W. Laba, "Optimization of copper, lead and cadmium biosorption onto newly isolated bacterium using a Box-Behnken design," *Ecotoxicology and Environmental Safety*, vol. 149, pp. 275-283, Mar 2018, doi: 10.1016/j.ecoenv.2017.12.008.
- [31] S. Banerjee, S. R. Joshi, T. Mandal, and G. Halder, "Insight into Cr⁶⁺ reduction efficiency of *Rhodococcus erythropolis* isolated from coalmine waste water," *Chemosphere*, vol. 167, pp. 269-281, Jan 2017, doi: 10.1016/j.chemosphere.2016.10.012.
- [32] M. Oves, M. S. Khan, and A. Zaidi, "Biosorption of heavy metals by *Bacillus thuringiensis* strain OSM29 originating from industrial effluent contaminated north Indian soil," *Saudi Journal of Biological Sciences*, vol. 20, no. 2, pp. 121-129, Apr 2013, doi: 10.1016/j.sjbs.2012.11.006.
- [33] W. Mwandira et al., "Biosorption of Pb (II) and Zn (II) from aqueous solution by *Oceanobacillus profundus* isolated from an abandoned mine," *Scientific Reports*, vol. 10, no. 1, Dec 2020, Art no. 21189, doi: 10.1038/s41598-020-78187-4.
- [34] E. Villagrasa et al., "Cellular strategies against metal exposure and metal localization patterns linked to phosphorus pathways in *Ochrobactrum anthropi* DE2010," *Journal of Hazardous Materials*, vol. 402, Jan 2021.

Cómo citar este artículo:

Trujillo Peralta, F. A., López Avilés, G., Mondragón Camarillo, L., & Calderón Alvarado, K. del C. (2023). Bacterias tolerantes y resistentes a los metales pesados en el ambiente. *EPISTEMUS*, 17(34).
<https://doi.org/10.36790/epistemus.v17i34.287>