

**Sección:** Hot Science

# *Biosorción de cobre: El poder de las bacterias para reestablecer ambientes contaminados*

*Copper biosorption: The power of bacteria to restore contaminated environments*

---

Meliza Jiménez Rivero  
Kadiya Calderón\*  
Luis Fernando Enríquez Ocaña

*Departamento de Investigaciones Científicas y Tecnológicas, Universidad de Sonora, Hermosillo C.P. 83000, Sonora, México.*

*\*Autor para la correspondencia: kadiya.calderon@unison.mx*

## **RESUMEN**

La contaminación por cobre amenaza a los ecosistemas debido a su elevada toxicidad. En respuesta, las bacterias actúan como pequeños “imanes biológicos” en un fenómeno llamado: biosorción, proceso mediante el cual los metales se adhieren a su superficie. Cuando distintas especies bacterianas se unen formando consorcios, pueden obtener resultados sorprendentes frente al cobre en comparación a cuando lo hacen solas. Este artículo aborda el impacto ambiental del cobre y cómo la biosorción por consorcios bacterianos constituye una estrategia natural para la biorremediación sostenible, planteando retos y oportunidades para su aplicación a gran escala.

*Palabras clave: Biosorción, consorcios bacterianos, cobre.*

---

## **SUMMARY**

Copper pollution threatens ecosystems due to its high toxicity. In response, bacteria act as tiny “biological magnets” in a phenomenon called biosorption, a process by which metals adhere to their surface. When different bacterial species join together to form consortia, they can achieve surprising results against copper compared to when they act alone. This article addresses the environmental impact of copper and how biosorption by bacterial consortia constitutes a natural strategy for sustainable bioremediation, outlining challenges and opportunities for its large-scale application.

*Keywords: Biosorption, bacterial consortia, copper.*

## Introducción

La industria minera le ha dado a la humanidad la posibilidad de poner los recursos minerales a disposición de la sociedad. Gracias a esto tenemos baterías de litio de gran durabilidad, circuitos eléctricos, paneles solares, teléfonos inteligentes e internet. Sin embargo, esta genera residuos cargados de metales pesados que, si no se manejan bien, pueden provocar daños significativos en los seres vivos que habitan cerca de la zona minera.

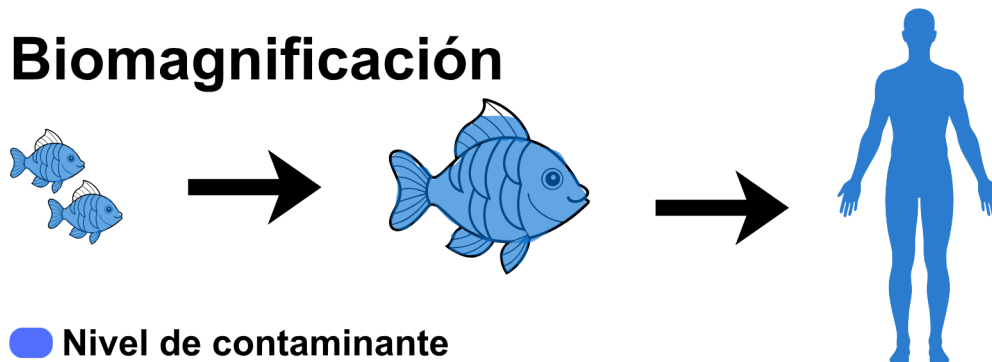
Los metales pueden acumularse lentamente en los organismos a través del agua, los alimentos o el aire, en un proceso conocido como bioacumulación (Figura 1a). Cuando un organismo contaminado es ingerido por otro, el nivel de contaminante se transfiere al depredador, provocando que, al avanzar en la cadena trófica, la concentración aumente. Este fenómeno llamado biomagnificación es de singular importancia para el ser humano, ya que, al situarse en la cima de la cadena trófica, los metales pueden llegar principalmente a través del consumo de alimentos contaminados (Figura 1b) [1].

El cobre es uno de los metales más usados a nivel mundial y a pesar de participar en muchos procesos biológicos importantes como la respiración celular, cuando se encuentra en altas concentraciones puede provocar afecciones al hígado y sistema nervioso en el ser humano, marchitamiento de hojas en plantas, estrés celular en organismos acuáticos e interferencia en procesos vitales de los

### (a) Bioacumulación



### (b) Biomagnificación



**Figura 1.** Representación esquemática de los procesos de (a) bioacumulación y (b) biomagnificación de metales en la cadena trófica.

microorganismos [2, 3]. Pero, la naturaleza siempre encuentra oportunidad en la adversidad. Frente a este peligro, dotó a ciertos microorganismos, en especial las bacterias, con habilidades increíbles para resistir y remover metales pesados del ambiente. Estos diminutos seres, realizan tareas extraordinarias como un David microscópico frente al Goliat de la contaminación. En este artículo conoceremos cómo las bacterias han convertido la desgracia en una fortaleza que las convierte en aliadas de la biorremediación, una técnica que las utiliza como “filtros biológicos” que absorben o transforman los contaminantes de manera que dejan de ser dañinos para el medio ambiente.

## Desarrollo

A pesar de la amenaza grave que representan los metales pesados para la vida, algunas bacterias han aprendido a sobrevivir e incluso prosperar en estas condiciones extremas como *Cupriavidus necator* que como su nombre en latín indica: “deseoso de cobre” se potencia con el metal [4]. Esto es posible gracias a la presencia de mecanismos que les permiten captar, acumular o transformar metales pesados de forma efectiva:

1. **Bioacumulación:** cuando las bacterias sirven de mini cofres naturales

Las bacterias pueden internalizar grandes cantidades de metales pesados. Una vez dentro, el metal puede almacenarse en pequeños compartimentos celulares, unirse a proteínas que lo mantienen bajo control o sufrir transformaciones químicas que lo hacen menos tóxico.

2. **Bioprecipitación o Biomineralización:** cuando las bacterias hacen alquimia:

Algunas bacterias pueden inducir la producción de minerales como carbonatos que encapsulan a los metales fuera de la célula, ha-

ciéndolos menos tóxicos para el ecosistema.

3. **Biolixiviación:** cuando las bacterias disuelven metales sin contaminar:

Algunas bacterias tienen la capacidad de fabricar sustancias naturales como el ácido cítrico (como el que tiene el limón) que ayudan a “disolver” metales pesados. Esto permite atrapar y recuperar al contaminante con mayor facilidad.

4. **Expulsión:** cuando las bacterias actúan como catapultas de metales

En otros casos, pueden activar bombas de expulsión para sacar el metal o lo transforman en formas volátiles, que luego difunden fuera de la célula y deja de ser tóxico para ellas.

5. **Biosorción:** cuando las bacterias activan su “modo imán”

Las bacterias tienen abundantes cargas negativas en su superficie que actúan como microimanes que capturan los metales pesados con carga positiva. Así *Pseudomona aeruginosa* es capaz de adsorber superficialmente hasta 180 mg de mercurio por gramo de biomasa ¡el equivalente al 18% de su propio peso! Una eficiencia de remoción asombrosa que convierte a las bacterias en una poderosa y prometedora alternativa para la descontaminación ambiental.

Lo mejor de la biosorción es que lo pueden realizar tanto bacterias vivas como muertas, ya que es un proceso pasivo (no requiere actividad metabólica). Además, es rápido ya que, en apenas una hora, la biomasa retiene todo el metal que es capaz de captar, lo que la hace ideal para remediar grandes volúmenes de agua en un periodo relativamente corto de tiempo.

También pueden secretar compuestos químicos como los biosurfactantes que atrapan al metal fuera de la célula.

## Cuando la unión hace la fuerza, la descontaminación ocurre

El éxito de las tecnologías de biorremediación se puede lograr potenciando las comunidades microbianas nativas o introduciendo microorganismos con tolerancia a metales pesados conocida que actúen en sinergia para eliminarlos del ambiente [6]. Durante la biosorción, diferentes especies bacterianas pueden unirse para hacerle frente al metal. Muchas de ellas secretan sustancias pegajosas llamadas sustancias poliméricas extracelulares (SPE) que funcionan como “pegamento biológico”. Su función es doble: por un lado, ayudan a descontaminar metales pesados, debido a que sus componentes son ricos en grupos cargados negativamente que retienen a estos elementos, disminuyendo su concentración y evitando que sean tóxicos para la célula. Por otro lado, son la cuna de la formación de biopelículas; fascinantes comunidades microbianas con gran capacidad de adherencia, donde cada uno de sus miembros se beneficia de las actividades de los demás. Este nivel de cooperación marca el inicio de consorcios bacterianos, asociaciones en las que diferentes especies combinan sus potenciales para sobrevivir a estrés del ambiente como puede ser el inducido por los metales pesados dando como resultado que todas se beneficien [7].

En los últimos años, los científicos han descubierto que cuando diferentes especies bacterianas se asocian, la eficiencia en la remoción de contaminantes puede multiplicarse. Diversos estudios respaldan esta sinergia. Por ejemplo, Che et al., reportaron que un consorcio formado por *Cellulomonas iranensis* y *Pseudomonas brassicacearum* no solo fue capaz de soportar concentraciones extremas de 900 mg/L de cadmio y 2500 mg/L de plomo, sino que también, eliminó 94.25 % de cadmio y 25.25 % más plomo que las bacterias individuales gracias a la formación de un material cristalino que atrapaba los metales en su superficie [8]. Resultados similares se obser-

varon con el cobre en el estudio de Irawati et al., quienes formaron consorcios con *Acinetobacter* sp. IrC1 y *Cupriavidus* sp. IrC4 que presentaron una tolerancia mayor (3mM) y lograron remover hasta un 33% el cobre presente, mientras que las bacterias aisladas solo llegaban hasta un 10% [6].

## Aplicaciones y perspectivas futuras

El uso de bacterias resistentes al cobre se perfila como una alternativa eficiente, económica y ecológicamente segura frente a los métodos convencionales de remediación. La producción de SPE, la formación de biopelículas y la expresión de genes de resistencia que les permiten sobrevivir en ambientes contaminados representan una alternativa prometedora y sostenible frente a técnicas físico-químicas costosas y con eficiencia limitada.

Gracias a los avances en la investigación del tema, hoy es posible diseñar consorcios robustos, seleccionando cepas nativas resistentes y potenciando su cooperación. Aplicadas en suelos agrícolas, en asociaciones con plantas, en ríos o zonas mineras, podrían reducir la bioacumulación de cobre en los organismos, evitando que el metal llegue a las cadenas tróficas.

Pero la clave no solo está en actuar cuando el daño está hecho, sino prevenirlo. Es por ello que integrar estas tecnologías en la minería sostenible sería de gran ayuda para el planeta. Los metales recuperados por biosorción pueden volver a venderse o usarse, de manera que; transformamos un problema medioambiental en un beneficio económico.

Aun así, los desafíos no son invisibles. La biomasa bacteriana necesita ser más estable y las condiciones ambientales son muy variables. Todo esto atenta contra su aplicación a gran escala. Una solución prometedora es usar residuos de la agroindustria (como cáscaras o

restos de cosechas) para ayudar a las bacterias a ser más resistentes y eficientes. Estas innovaciones podrían hacer de la biosorción una herramienta clave en la transición hacia procesos industriales más limpios, sostenibles y regenerativos.

## Conclusiones

La actividad minera produce una grave contaminación de los ecosistemas por cobre y otros metales. La biorremediación se erige como una alternativa prometedora y dentro de esta la biosorción llevada a cabo por bacterias y principalmente consorcios, se consolida como una estrategia de alto potencial. Su bajo costo y posibilidad de recuperar el metal la hacen excepcionalmente atractiva para la biotecnología y la minería sostenible.

No obstante, su escalabilidad aún enfrenta retos entre los que se encuentran la estabilidad de los cultivos, la variabilidad del ambiente y la optimización de los sistemas de operación. Estos desafíos se pueden superar aplicando enfoques multidisciplinares donde converjan la ingeniería ambiental, la biotecnología y la economía para garantizar procesos eficientes y económicamente factibles.

La implementación de tecnologías complementarias basadas en inteligencia artificial, sensores y el desarrollo de nuevos materiales biológicos que tengan características biosorbentes potenciaría su aplicabilidad en diferentes escenarios. De esta forma se vería potenciado el poder de las bacterias para reestablecer ambientes contaminados.

## Referencias

[1] Saidon, N. B., Szabó, R., Budai, P., & Lehel, J. (2024). Trophic transfer and biomagnification potential of environmental contaminants (heavy metals) in aquatic ecosystems.

*Environmental Pollution*, 340, 122815. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.envpol.2023.122815>

[2] Murtić, S. (2024). Heavy Metals Dynamics in the Soil-Plant Continuum. In N. Kumar (Ed.), *Heavy Metal Toxicity: Human Health Impact and Mitigation Strategies* (pp. 25-43). Springer Nature Switzerland. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-56642-4\\_2](https://doi.org/10.1007/978-3-031-56642-4_2)

[3] Dhiman, V. (2024). Heavy Metal Toxicity and Their Effects on Environment. In: Kumar, N. (eds) *Heavy Metal Toxicity. Environmental Science and Engineering*. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-56642-4\\_1](https://doi.org/10.1007/978-3-031-56642-4_1)

[4] Novackova, I., Hrabalova, V., Slaninova, E., Sedlacek, P., Samek, O., Koller, M.,...Obruca, S. (2022). The role of polyhydroxyalkanoates in adaptation of *Cupriavidus necator* to osmotic pressure and high concentration of copper ions. *International Journal of Biological Macromolecules*, 206, 977-989. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2022.03.102>

[5] R., Suresh, K., & Jiang, G. (2022). Bacterial bioremediation of heavy metals in wastewater: A review of processes and applications. *Journal of Water Process Engineering*, 48, 102884. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2022.102884>

[6] Irawati, W., Ompusunggu, N. P., & Yuwono, T. (2018). Influence of bacterial consortium for copper biosorption and accumulation. *AIP conference proceedings*.

[7] Ghosh, A., Sah, D., Chakraborty, M., & Rai, J. P. N. (2024). Mechanism and application of bacterial exopolysaccharides: An advanced approach for sustainable heavy metal abolition from soil. *Carbohydrate Research*, 544, 109247. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.carres.2024.109247>

[8] Che, S., Wang, J., Zhou, Y., Yue, C., Zhou, X., Xu, Y.,... Li, S. (2024). The adsorption and fixation of Cd and Pb by the microbial consortium weakened the toxic effect of heavy metal-contaminated soil on rice. *Chemical Engineering Journal*, 497, 154684.