

## Bacillus: Microorganismos versátiles para la biorremediación del suelo

Las bacterias del género *Bacillus* han emergido como protagonistas clave en la restauración ambiental a través de la biorremediación del suelo. Este género bacteriano, conocido por su amplia diversidad genética y metabólica, desempeña un papel fundamental en la degradación de contaminantes, siendo un aliado crucial en la eliminación de compuestos dañinos.

**Palabras clave:**  
Bacterias, Bacillota, contaminación, glifosato, remediación.

OSCAR ALEJANDRO VIVEROS-AGUILAR,  
MIGUEL ÁNGEL HERRERA-ALAMILLO Y  
LUIS CARLOS RODRÍGUEZ-ZAPATA

Unidad de Biotecnología, Centro de Investigación Científica de Yucatán, A.C. Calle 43 x 32 y 34, No. 130, Col. Chuburná de Hidalgo, Mérida, Yucatán, 97205, México.  
[oscarviveros2155@gmail.com](mailto:oscarviveros2155@gmail.com)

Durante el transcurso de los siglos XX y XXI el mundo ha presenciado una rápida industrialización y un drástico incremento en su número de habitantes, eventos que han traído consigo un aumento crítico en los niveles de contaminantes sólidos y líquidos, tanto en los suelos como en los cuerpos acuíferos de nuestro planeta.

Compuestos químicos derivados del petróleo, actividades industriales, ganaderas, residuos domésticos y agroquímicos son los principales agentes que provocan la contaminación de nuestros suelos (Rodríguez *et al.* 2019), generando consigo problemáticas como disminución en la productividad agrícola, reducción de la seguridad alimentaria y daño a micro y macroorganismos que se encuentran en contacto directo con el suelo (Figura 1). Los anteriores son efectos devastadores para la sociedad, ya que, tal como mencionó la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO) en 2015, el 95 % de la producción de alimentos depende del suelo.

Ante todas las problemáticas previamente mencionadas, la búsqueda de estrategias para la protección y saneamiento del suelo y agua se ha vuelto una tarea primordial para el ser humano en el intento de proteger el planeta.

### Remediación ambiental: un paso indispensable

Cuando hablamos de remediación, nos referimos al conjunto de estrategias y medidas que se deben aplicar en un sitio contaminado con el fin de eliminar o reducir los contaminantes

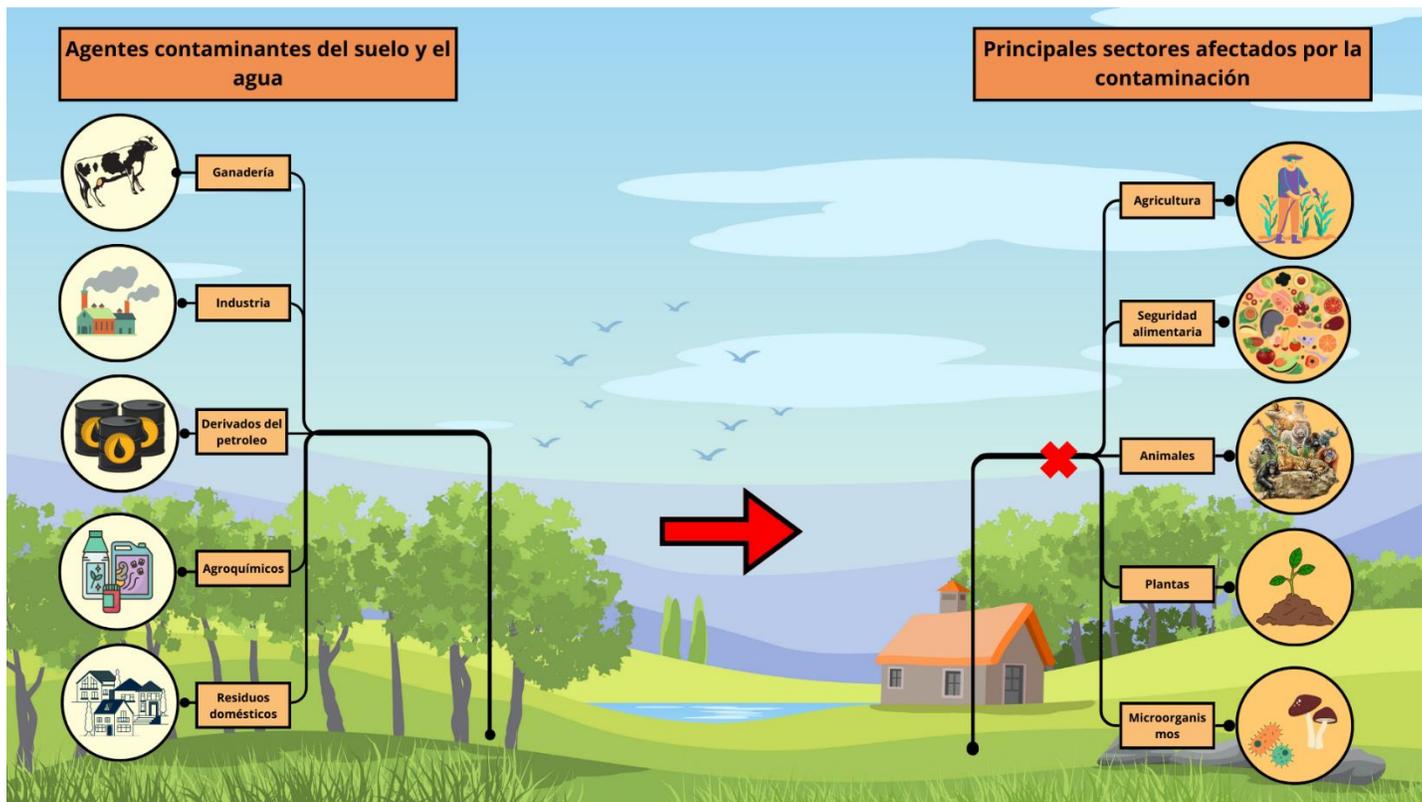


Figura 1. Principales agentes contaminantes del suelo y el agua y sus efectos negativos. (Elaborado por O. Viveros-Aguilar).

hasta niveles considerados seguros para la salud y el medio ambiente, de acuerdo con las normativas establecidas (Sedas y Ruiz 2012). Estas estrategias se clasifican en tres grandes grupos: fisicoquímicas, térmicas y biológicas (Cuadro 1).

Si bien todos los métodos ofrecen ventajas y desventajas (y en muchas ocasiones la mejor alternativa es el uso de estrategias mixtas), los residuos secundarios, los elevados costos de los procesos y la disposición final de los residuos en las estrategias fisicoquímicas y térmicas han propiciado que en años recientes el interés por los métodos biológicos aumente, considerándolas tecnologías sumamente prometedoras para el tratamiento de zonas contaminadas, siendo las bacterias las estrellas principales de estas tecnologías.

### Bacterias y biorremediación

Las técnicas de remediación biológica, también conocidas como técnicas de biorremediación, consisten en el uso de organismos vivos (bacterias, hongos, algas y plantas) para degradar, neutralizar, transformar o remover los contaminantes del ambiente (suelo, agua o aire). Dentro de los organismos

mencionados, los más utilizados en biorremediación han sido las bacterias, debido a su adaptabilidad y versatilidad, las cuales son empleadas con el objetivo de realizar reacciones enzimáticas que permitan degradar los compuestos contaminantes.

Bacterias pertenecientes a géneros como *Pseudomonas* (Migula 1894), *Bacillus* (Cohn 1872), *Acinetobacter* (Brisou y Prévot 1954), *Serratia* (Bizio 1823) y *Proteus* (Hauser 1885), entre muchas otras, han sido utilizadas para la biorremediación de suelos contaminados con hidrocarburos y con metales pesados, entre otros contaminantes (Castillo *et al.* 2020, Malik 2004). Dentro de estos grupos, el género *Bacillus* ha destacado por poseer una amplia variedad de bacterias con potencial para su uso en la biorremediación.

### El género *Bacillus* y su participación en la biorremediación del suelo

Las bacterias del género *Bacillus* (Figura 2) son microorganismos Gram positivos (poseen una capa gruesa de peptidoglicano en su pared celular), con forma de bastón y resistentes a condiciones ambientales extremas. Su capacidad para formar espore



**Figura 2.** Representación de bacterias del género *Bacillus* observadas a escalas micro y macroscópicas. (Elaborado con Krea.ai por O. Viveros-Aguilar).

ras les otorga una notable resistencia a factores adversos como altas temperaturas, pH extremos y radiación ultravioleta. Además, su metabolismo versátil les permite utilizar una amplia gama de sustratos orgánicos e inorgánicos para su crecimiento y generar, gracias a diferentes mecanismos de señalización, diferentes moléculas químicas en respuesta a las condiciones ambientales. Dichas características las ha convertido en objeto de estudios biotecnológicos, siendo empleadas como bacterias promotoras de crecimiento en plantas, probióticos en alimentos de interés como la miel (Canché y Ramos 2024) y también como microorganismos clave en la remediación ambiental.

Estas bacterias son reconocidas por su contribución en la degradación de compuestos tóxicos en el suelo, actuando como agentes de descomposición de contaminantes orgánicos. Entre los contaminantes que pueden degradar se encuentran hidrocarburos, metales pesados y herbicidas. Estudios como los de Sahoo y Goli (2020) señalan el potencial de *Bacillus pumilus* (Meyer y Gottheil 1901) en el tratamiento de la contaminación contra metales pesados como el plomo, mientras que cepas de *B. subtilis* (Ehrenberg 1835) Cohn, 1872 y *B. amylo-liquefaciens* (ex Fukomoto 1943) Priest *et al.* 1987 han mostrado eficiencia en la degradación de hidrocarburos (Masika *et al.* 2020).

## El papel del género *Bacillus* en la degradación de glifosato

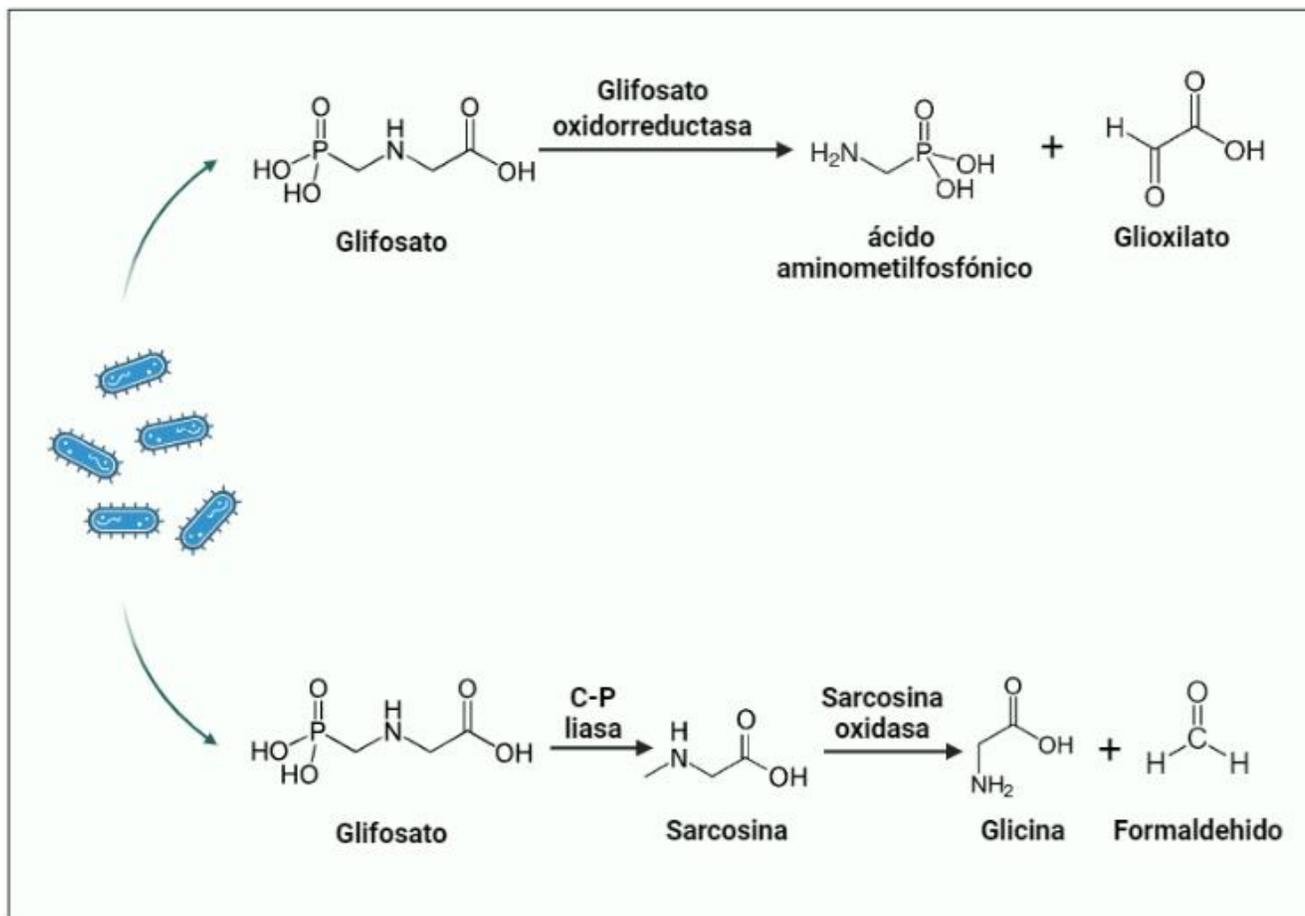
Un par de especies notables dentro del género son *Bacillus aryabhatai* (Shivaji *et al.* 2009) y *B. cereus* (Frankland y Frankland 1887), las cuales han sido identificadas por su capacidad para degradar el glifosato, uno de los herbicidas más utilizados en la agricultura, del cual se han reportado múltiples efectos negativos para la salud, como hipotiroidismo, enfermedades renales crónicas y cáncer.

Avances recientes han permitido comprender mejor los mecanismos de degradación del glifosato por parte de estas bacterias a nivel molecular (Figura 3). *B. aryabhatai* utiliza el glifosato como fuente de fósforo, mediante una enzima FAD-glifosato oxidoreductasa, la cual degrada el glifosato en dos compuestos, el ácido aminometilfosfónico (AMPA) y glioxilato, mediante la ruptura del enlace carbono nitrógeno (C-N). Por otro lado *B. cereus*, puede emplear la misma vía de degradación de glifosato que *B. aryabhatai* o también utiliza una ruta de degradación través del rompimiento del enlace carbono fósforo (C-P) mediante una actividad enzimática de C-P liasa que produce los compuestos sarcosina, glicina y formaldehído (Elarabi *et al.* 2020, Fan *et al.* 2012). Si bien, estudios han demostrado que el AMPA presenta un rango de toxicidad similar al del glifosato, debido a que el AMPA aún conserva el enlace C-P, dicho compuesto posteriormente puede ser canalizado a la vía CP-liasa para una degradación completa en compuestos menos dañinos.

El potencial de *B. aryabhatai*, *B. cereus* y otras cepas en la bioremediación del suelo es prometedor. Su capacidad para degradar el glifosato no solo sugiere una herramienta efectiva para contrarrestar la contaminación por herbicidas, sino que también abre la puerta a estrategias más amplias de descontaminación ambiental. Además, gracias a los recientes avances en el estudio de las secuencias genéticas implicadas en las vías de degradación de estos microorganismos, se han abierto nuevas posibilidades para la ingeniería genética y la optimización de estos procesos, con el fin de obtener una mayor eficiencia en la biodegradación de herbicidas y otros contaminantes.

**Cuadro 1.** Principales Tecnologías de Remediación Según Tipo de Tratamiento (FCH, 2015)

Tratamientos Físicoquímicos	Tratamientos Térmicos	Tratamientos Biológicos
Sellado de suelos	Incineración	Compostaje
Barreras físicas	Inyección de vapor	Fitorremediación
Extracción de agua	Pirólisis	Lodos biológicos
Extracción de aire	Calentamiento por conducción térmica	Bioaumentación
Flushing	Calentamiento por radiofrecuencia	Pilas biológicas
Oxidación UV	Desorción térmica	Bioventing
Pozos de recirculación	Vitrificación	Biodegradación asistida



**Figura 3.** Vías bacterianas para la degradación de glifosato. En la parte superior se observa la vía AMPA, en la cual se produce glioxilato y ácido aminometilfosfónico (AMPA), siendo esta la vía mayoritaria de degradación. En la parte inferior se aprecia la vía C-P liasa, donde el glifosato se degrada a sarcosina y, posteriormente, a glicina y formaldehído. (Elaborado por O. Viveros-Aguilar).

## Conclusión

En resumen, el género *Bacillus*, con ejemplos notables como *B. aryabhatai*, se posiciona como una pieza clave en la restauración ambiental a través de la biorremediación del suelo. Si bien, hoy en día aún hay muchos obstáculos por superar en el desarrollo de estrategias efectivas para la remediación biológica, los avances científicos y tecnológicos continuos ofrecen nuevas perspectivas para aprovechar su potencial en la eliminación de contaminantes, marcando un camino prometedor hacia un entorno más limpio.

## Agradecimientos

Este trabajo fue financiado por el Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnología (CONAHCYT) de México, a partir del proyecto con clave: CF-2023-G-636.

## Referencias

- Canché C. y Ramos A. 2024.** Microbios en la miel ¿Qué sabemos y qué aplicaciones pueden tener? una oportunidad en *Melipona beecheii*. *Desde El Herbario CICY*, 16: 40-44.
- Castillo R., More F., Cornejo M., Fernández J. y Mialhe E. 2020.** Aislamiento de bacterias con potencial biorremediador y análisis de comunidades bacterianas de zona impactada por derrame de petróleo en Condorcanqui-Amazonas-Perú. *Revista de Investigaciones Altoandinas*, 22(3): 215-225.
- Elarabi N.I., Abdelhadi A.A., Ahmed R.H., Saleh I., Arif I.A., Osman G. y Ahmed D.S. 2020.** *Bacillus aryabhatai* FACU: A promising bacterial strain capable of manipulate the glyphosate herbicide residues. *Saudi Journal of Biological Sciences*, 27(9): 2207-2214. <https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2020.06.050>
- Fan J., Yang G., Zhao H., Shi G., Geng Y., Hou T. y Tao K. 2012.** Isolation, identification and characterization of a glyphosate-degrading bacterium, *Bacillus cereus* CB4, from soil. *The Journal of General and Applied Microbiology*, 58(4): 263-271. <https://doi.org/10.2323/jgam.58.263>
- FCH [Fundación Chile]. 2015.** Manual de tecnologías de remediación de sitios contaminados. CORFO y Gobierno de Chile. Santiago de Chile, Chile, 116 pp.
- Malik A. 2004.** Metal bioremediation through growing cells. *Environment international*, 30(2): 261-278. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2003.08.001>
- Masika W., Moonsamy G., Mandree P., Ramchuran S., Lalloo R. y Kudanga T. 2020.** Biodegradation of petroleum hydrocarbon waste using consortia of *Bacillus* sp. *Bioremediation Journal*, 25(1): 72-79. <https://doi.org/10.1080/10889868.2020.1842322>
- FAO [Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura] 2015.** Los suelos sanos son la base para la producción de alimentos saludables. Food and Agriculture Organization of the United Nations. <https://www.fao.org/soils-2015/news/news-detail/es/c/277721>
- Rodríguez-Eugenio N., McLaughlin M. y Pennock D. 2019.** La contaminación del suelo: una realidad oculta. FAO, Roma, Italia, 144 pp.
- Sahoo S. y Goli D. 2020.** Bioremediation of lead by a halophilic bacteria *Bacillus pumilus* isolated from the mangrove regions of Karnataka. *International Journal of Scientific Research*, 9: 1337-1343.
- Sedas E. y Ruiz U. 2012.** La remediación de sitios contaminados. Para todo el Público. ReLASC, GIZ, SEMARNAT. Ciudad de México, México. 23 pp.

**Desde el Herbario CICY, 16: 163-168 (22-agosto-2024)**, es una publicación semanal editada por el Herbario CICY del Centro de Investigación Científica de Yucatán, A.C., con oficinas en Calle 43 x 32 y 34 No. 130, Col. Chuburná de Hidalgo, C.P. 97205, Mérida, Yucatán, México. Tel. 52 (999) 942-8330 Ext. 110, [www.cicy.mx/Sitios/Desde\\_Herbario/](http://www.cicy.mx/Sitios/Desde_Herbario/), [webmas@cicy.mx](mailto:webmas@cicy.mx). Editores responsables: Rodrigo Duno de Stefano, Patricia Rivera Pérez y Lilia Lorena Can Itzá. Reserva de Derechos al Título Exclusivo No. 04-2016-041413195700-203, otorgado por el Instituto Nacional del Derecho de Autor, ISSN: 2395-8790. Responsable de la publicación: José Fernely Aguilar Cruz, Calle 43 x 32 y 34 No. 130, Col. Chuburná de Hidalgo, C.P. 97205, Mérida, Yucatán, México. Fecha de última modificación: 22 de agosto de 2024. Las opiniones expuestas por los autores no necesariamente expresan la postura del editor de la publicación. De la misma manera, la responsabilidad sobre la veracidad y la precisión de los contenidos, le corresponde totalmente a los autores de los ensayos.