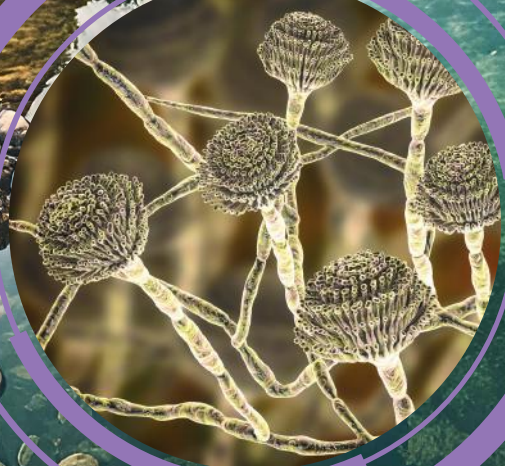


# Micorremediación: una forma de eliminar contaminantes del ambiente

Anderson A. Ramírez Ramírez  
Florentina Zurita Martínez  
Allan Tejeda Ortega  
Alberto J. Valencia Botín








Artículo

# Micorremediación: una forma de eliminar contaminantes del ambiente



**Cómo citar este artículo:** Ramírez-Ramírez AA, Zurita-Martínez F, Tejeda-Ortega A, Valencia-Botín AJ. 2024. Micorremediación: una forma de eliminar contaminantes del ambiente. Revista Ciencia y Naturaleza (1114).







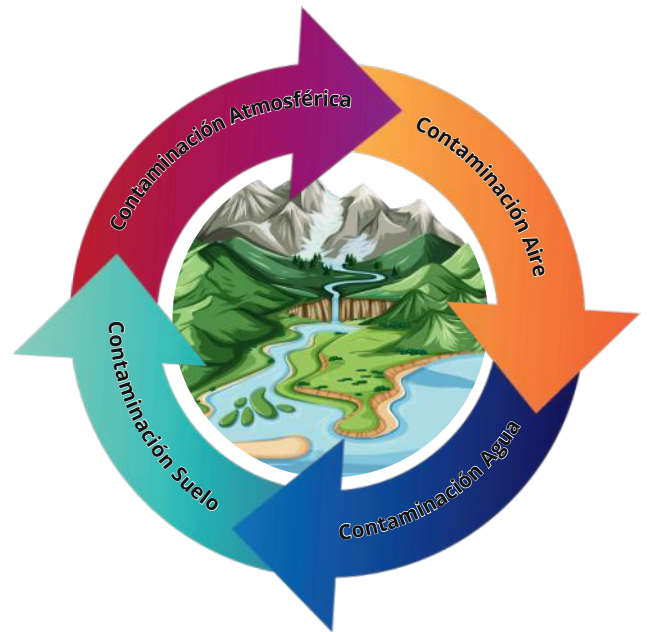
## *El porqué de la biorremediación*

El problema de la contaminación es un tema de moda en las pláticas de la mayoría de la gente preocupada por el planeta en el que vivimos. El constante y acelerado crecimiento poblacional, así como la industrialización han sometido a nuestro planeta a una presión ambiental difícil de revertir y en donde los componentes **bióticos** como microorganismos, plantas, animales y hongos, y **abióticos** como el agua, el suelo y el aire, son afectados negativamente.

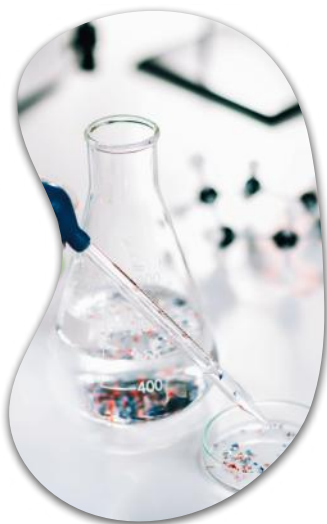




En nuestro planeta existe una conexión entre cuatro componentes importantes y cuyos cambios afectan a los seres vivos y viceversa, dichos componentes son la biósfera, atmósfera, hidrósfera y litósfera. Aunque la definición de contaminante a veces es difícil de precisar, se puede decir que un contaminante es aquello capaz de alterar o degradar el estado natural de un ser vivo o del mismo ambiente. Tales contaminantes existen en diferentes formas, como vapores, líquidos, sólidos, etc., además, se les puede encontrar por periodos cortos de tiempo o muy prolongados. La contaminación puede clasificarse en atmosférica (contaminación del aire) o de la litósfera (contaminación del suelo) (Fig. 1).



**Figura 1.** Clasificación de la contaminación.



Para hacer frente al problema de la contaminación, existen métodos químicos y físicos que pueden ser empleados; sin embargo, presentan inconvenientes como los altos costos que estos generan en su desarrollo, la generación de subproductos tóxicos o la baja efectividad cuando se tratan compuestos químicos en concentraciones muy pequeñas. En la actualidad surge una alternativa viable, la **biorremediación** (ver cuadro de conceptos) la cual tiene el potencial de superar algunas limitantes de los métodos fisicoquímicos, y tiene la virtud de poder realizarse **in situ**.



## *Biorremediación, la naturaleza como una herramienta*

Remediar significa resolver un problema, por lo tanto, biorremediar, consiste en solventar un problema mediante el uso de distintos organismos de la naturaleza. De manera específica, biorremediar puede definirse como: “proceso que se vale principalmente de microorganismos, plantas y hongos para descontaminar ambientes” (Fig. 2). Un aspecto importante de la biorremediación es que la tasa de eliminación de contaminantes, se ve favorecida por aspectos como la utilización de medios de cultivo enriquecidos o la inserción de organismos **autóctonos** adaptados en algún nivel al medio contaminante; caso contrario a lo que ocurre de manera natural, los procesos de descontaminación ocurren a una velocidad determinada y lo cual muchas veces puede ser una limitante importante.



**Figura 2.** Hongo inoculado en olote de maíz con el objeto de descontaminar vinazas tequileras.



**“La naturaleza es la mejor maestra, pues nos enseña que de manera natural es capaz de sanar muchos ambientes contaminados, y por ello resulta factible emularla”.**



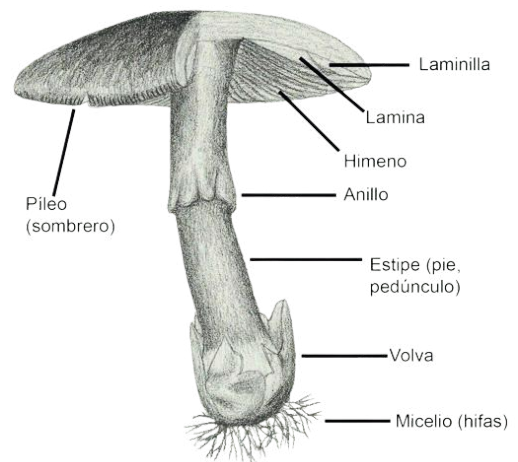
## *Ventajas y desventajas de la biorremediación*

La biorremediación es un proceso biotecnológico, y por ello su impacto en el ecosistema tiende a ser más medido que el de los procesos fisicoquímicos. Esta característica la ha guiado a la aceptación de la opinión pública. Otro factor importante es que resulta más económico hacer uso de este proceso, por ejemplo, remover *in situ* un contaminante del suelo, que transportarlo para ser procesado y descontaminado. También se tiene la ventaja de que se preserva la estructura del suelo y que requiere menor energía. Respecto a los inconvenientes, a veces no es sencillo escalar los resultados de laboratorio a nivel piloto o escala real.



## *Hongos, los pequeños de gran importancia*

Los hongos son organismos cuyo crecimiento vegetativo se da en forma de filamentos algodonosos con ramificaciones llamadas **hifas** que a su vez en conjunto conforman lo que se conoce como **micelio** y que es lo que conforma el cuerpo del hongo (Fig. 3).



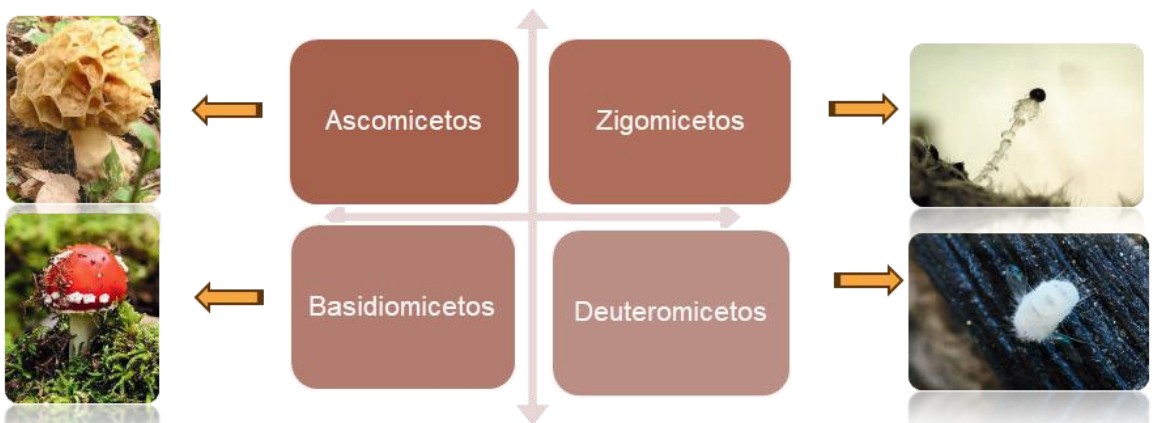
**Figura 3.** Esquema general del cuerpo fructífero de un hongo macroscópico







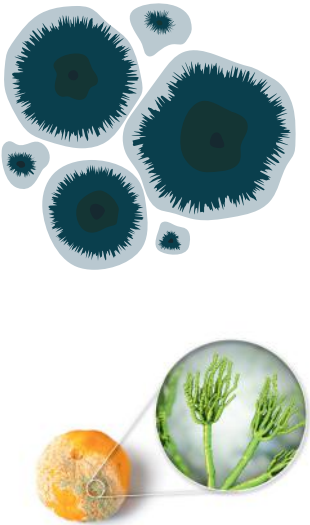
Su alimentación se lleva a cabo secretando sustancias (enzimas) que se encargan de degradar los nutrientes, descomponiéndose en sustancias más sencillas y asimilables. Este tipo de alimentación se conoce como alimentación externa (osmosis) y hay que destacar que es en el micelio en donde se da la absorción de dichos nutrientes. Además, se clasifican en 4 principales tipos (Fig. 4), cuyas diferencias de clasificación se debe a la manera de reproducirse, así como al tipo de estructura reproductora.



**Figura 4.** Clasificación principal de los hongos.

En cuanto a su distribución, son organismos presentes en ambientes muy diversos como el aire, agua, suelo, el ser humano, los animales y otros hongos. Pueden estar presentes como parásitos, saprobios o mediante una relación de beneficio mutuo con otros organismos (**simbiosis**). Su función ambiental es muy importante, ya que muchos de ellos al ser organismos descomponedores, son capaces de degradar la materia orgánica y liberar elementos como el nitrógeno o el fósforo para que regresen al medio ambiente y poder ser utilizados por otros organismos.



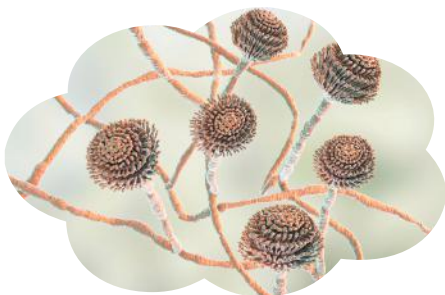


Los hongos son organismos que, por su relación con el humano, han sido muy bien estudiados. Su estudio ha llevado al descubrimiento de importantes aportes científicos como el descubrimiento de la penicilina, el primer antibiótico desarrollado por y para la humanidad. Finalmente, es importante mencionar que estos organismos también son de interés económico, científico y cultural, pues se han convertido en materia de estudio y materia prima en la elaboración de alimentos o medicamentos en el conocimiento tradicional de las comunidades.

## *Micorremediación, los hongos al servicio de la comunidad*



La palabra micorremediación surge de la conjunción de las palabras mico (del griego mykēs), que significa hongo, y remediación, en referencia al proceso de recuperación del estado sano del medio ambiente. En términos prácticos, la micorremediación se define como “el uso de los hongos para degradar o eliminar contaminantes”. El proceso de descontaminación se logra mediante el empleo de **enzimas** digestivas que los hongos son capaces de formar y liberar.



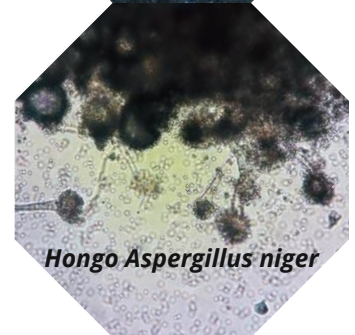




Entre estas encontramos tres principales, que son la lignina peroxidasa (LiP), manganeso peroxidasa (MnP) y lacasa, aunque existen muchas otras. Los contaminantes que pueden ser degradados pueden ser encontrados en las aguas residuales domésticas, la materia orgánica, productos farmacéuticos como los antibióticos, colorantes, herbicidas u otros compuestos liberados por las industrias y el sector agrícola. Finalmente, se puede señalar que diferentes estudios han demostrado que, a diferencia de los métodos fisicoquímicos, los hongos son capaces de liberar subproductos inocuos para el ser humano y el medio ambiente.

Debido a que la economía juega un papel primordial en cualquier aspecto del desarrollo humano, la remediación ambiental no es la excepción, ya que siempre se busca cualquier metodología que sea eficiente y económicamente viable. En este sentido la micorremediación resulta ser una potencial estrategia para hacer frente al incesante y cada vez mayor problema de contaminación del agua, suelo y aire.

Los hongos, y en especial los ligninolíticos (que poseen un sistema enzimático capaz de degradar un polímero tan complejo como la lignina), poseen características únicas que los hacen excelentes candidatos para la descontaminación de diversos ambientes. Entre estas características se cuentan: su adaptabilidad a factores ambientales como el pH, la temperatura, su resistencia a contaminantes como los metales pesados, su crecimiento robusto y una vasta red formada por sus hifas, así como evidentemente la producción de sus enzimas.







Los hongos pueden ser usados de manera *in situ*, o alternativamente mediante el uso de biorreactores (Fig. 5). Estos últimos, son dispositivos en donde se controlan y favorecen condiciones fisicoquímicas o biológicas que hacen más eficientes y rápidos los procesos de eliminación de contaminantes. Factores como el control de la biomasa o la promoción del crecimiento biológico, son algunos de los procesos que se controlan en tales dispositivos.

**“La capacidad de los hongos de adaptarse a diferentes ambientes los hace una herramienta excepcional para la biorremediación de sitios contaminados”.**



**Figura 5.** Biorreactor con potencial uso en la producción de hongos para la micorremediación.

A continuación, se hace una breve descripción de algunos de los contaminantes que pueden ser degradados mediante el uso de hongos.

## *Hidrocarburos aromáticos policíclicos (PAHs)*

Los PAHs (por sus siglas en inglés *Polycyclic aromatic hydrocarbons*) son compuestos complejos en su composición y se generan de actividades como la combustión incompleta del petróleo e hidrocarburos, el carbón, la basura, el gas, la madera o los incendios forestales. Existen más de 100 clases diferentes. Dependiendo de sus propiedades es como se van a movilizar en el ambiente. Por ejemplo, en el agua se les puede encontrar de manera suspendida ya que no se disuelven, y en el aire se les puede encontrar como vapores o adheridos a partículas muy pequeñas. Debido a esto último pueden viajar grandes distancias antes de precipitarse junto con el agua de lluvia o de depositarse con las partículas.





En cuanto a los problemas que estos pueden ocasionar a la salud humana, pueden dañar al sistema inmunológico, a los riñones, generar o intensificar alergias, producir inflamación, propiciar cataratas, cáncer de piel, de pulmones o de estómago. Respecto a los métodos para su degradación se han probado procesos como la **oxidación química**, la **fotodegradación** o la **biodegradación**; esta última, ampliamente investigada.



Sobre el uso de los hongos para el tratamiento de los PAHs, se ha demostrado que debido a la similitud de estos con la lignina es que las enzimas como la lacasa, la lignino peroxidasa y el manganeso peroxidasa, son efectivas para su degradación. Aunque muchos hongos son capaces de degradar completamente los PAHs hasta la producción de  $\text{CO}_2$ , muchos otros no tienen esta capacidad y por lo tanto la degradación es incompleta; sin embargo, las bacterias presentes en el ambiente pueden terminar el proceso. Finalmente es importante mencionar que existen atenuantes que muchas veces dificultan o impiden el proceso de descontaminación como las bajas temperaturas, que afectan a la actividad enzimática, o la presencia de otros contaminantes como los metales pesados o la salinidad del suelo.







## *Metales pesados y su micorremediación*

Los metales pesados representan un gran problema de contaminación debido a las diferentes formas de emisión de los mismos, así como debido a su movilidad. Su generación puede ser de tipo natural o antropogénica. En cuanto a la primera, los fenómenos como las erupciones volcánicas, o el intemperismo de la superficie de la corteza terrestre son los responsables. En cuanto a la segunda, la actividad industrial (industria textil, de fertilizantes, agrícola o minería) así como la disposición de residuos electrónicos, son las causantes. La manera en que se convierten en un problema para el ser humano resulta derivado de la lixiviación (proceso por el cual se extrae uno o varios solutos de un sólido) de los mismos y la posterior ingesta por parte del ser humano o los animales.



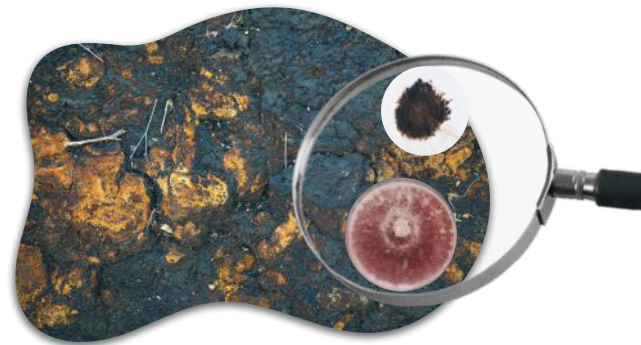
Se sabe que son compuestos carcinógenos o mutágenos. Entre los padecimientos que pueden ocasionar se tienen daños en el corazón, hígado, riñones, bazo o afectaciones en el sistema reproductivo. Respecto a los daños en el medio ambiente, pueden afectar la actividad enzimática (catalasa, glucosidasa, etc.) de los microorganismos; en las plantas, pueden causar problemas en la fotosíntesis, afectar el metabolismo y crecimiento, además de causar deformidad en flores y frutos. Entre los metales comúnmente encontrados se tiene al arsénico, cobre, cadmio, níquel, cromo, plata y mercurio.



En cuanto a los procesos de remoción de metales, los hongos resultan una buena opción de entre los organismos utilizados en la biorremediación. Propiedades como su gran relación volumen/superficie, su naturaleza robusta o su misma tolerancia a los metales, les da ventaja sobre las bacterias y algas. Son tres los mecanismos utilizados en la biorremediación y corresponden a la bioabsorción, bioacumulación y biovolatilización. La primera es un proceso que al no ser dependiente de la actividad metabólica puede ser llevado a cabo por células vivas o muertas. La segunda es lo contrario, es decir, es un método relacionado directamente con el metabolismo de los organismos y por lo tanto es posible solo en biomasa viva.



Por último, la tercera consiste en la realización de reacciones enzimáticas intracelulares para la conversión de compuestos orgánicos e inorgánicos en sus derivados volátiles.



En un estudio con hongos, se encontró que los géneros *Aspergillus*, *Rhizomucor*, *Fusarium* y *Emericella*, fueron capaces de tolerar altas concentraciones de arsénico en un sitio contaminado con este metal, además en estudios posteriores fueron capaces de mejorar las propiedades fisicoquímicas y la actividad enzimática del suelo. Este ejemplo de biorremediación tiene correspondencia con el hecho de que en sitios contaminados con metales ha sido posible aislar hongos (autóctonos) capaces de tolerar a los metales, así como las condiciones de contaminación, lo que indica el nivel de adaptabilidad y tolerancia de estos organismos.





## *Residuos farmacéuticos y antibióticos*



En el medio ambiente y derivado de la actividad antropogénica, constantemente se produce la liberación de compuestos xenobióticos (sustancias que no se encuentran de forma natural en los organismos), mismos que se van acumulando debido a la incapacidad de los procesos naturales de tratarlos de manera eficiente. A estos residuos corresponden los fármacos y antibióticos, cuya liberación proviene directamente de los productores de medicamentos, o mediante actividades como la disposición de los desechos hospitalarios, la cría de animales, o incluso a través de las heces y orina de los animales, incluyendo al ser humano.

Entre los problemas que estos ocasionan se tiene la afectación al balance ecológico (donde se encuentra incluida el agua potable) y a la salud pública. En las plantas pueden afectar el contenido de clorofila y carotenoides, y con ello también a la fotosíntesis, pueden inhibir el crecimiento, así como generar mutaciones cromosómicas. En los cuerpos acuáticos pueden ocasionar toxicidad crónica en peces, anfibios y otras formas de vida. Además de todo esto, se tiene el hecho de que en los sistemas convencionales de tratamiento no es posible eliminar tales sustancias.





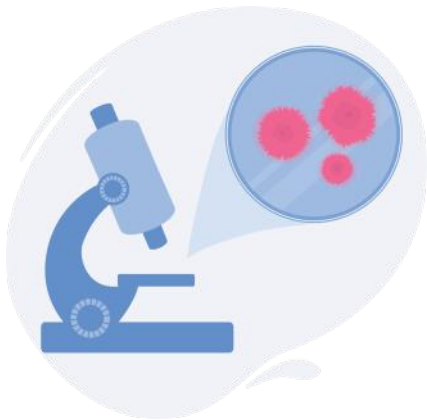
Respecto al uso de los hongos, específicamente de los ligninolíticos, para el tratamiento de estos residuos se ha encontrado que estos son una potencial opción viable. Hongos de las especies *Trametes versicolor* y *Phanerochaete chrysosporium* han demostrado su capacidad de asimilar y en unos casos remover fármacos como el naproxeno, el diazepam, el metoprolol o la carbamacepina, esto en biorreactores. En cuanto a los antibióticos también se ha tenido el mismo resultado, de tal forma que con los hongos *Pleurotus ostreatus*, *Irpex lacteus*, y *Trametes versicolor*, ha sido posible la eliminación de sustancias como la oxitetraciclina la ciprofloxacina y la ofloxacina, demostrándose en estos procesos la participación de las enzimas como la manganeso peroxidasa o el sistema citocromo 450.



### *Lo que se puede deducir...*

Con base en una gran cantidad de estudios dentro y fuera de ambientes controlados, se ha podido demostrar la factibilidad e importancia de emplear la micorremediación para el tratamiento de ambientes contaminados con una variedad de compuestos como los indicados en este artículo. Desde el uso de plantas hasta los hongos, son diversos los organismos de los que se puede apoyar para tratar los problemas de contaminación que afectan a nuestros ecosistemas y de los cuales el ser humano ha sido responsable.





En el caso de los hongos, específicamente de los ligninolíticos, su uso para el saneamiento se debe principalmente a las enzimas que producen y que poseen la particularidad de ser inespecíficas. Por ello, estos organismos han sido utilizados para el tratamiento de contaminantes tan difíciles de eliminar como los de la industria minera, los de la petroquímica, o incluso los mostrados en este texto.

Finalmente, es importante mencionar que en la actualidad se está explorando el uso de estos organismos para el tratamiento de los residuos líquidos de la producción del tequila (vinazas), esperando con ello encontrar una alternativa viable para los pequeños y microproductores, cuya capacidad de instalar sistemas de tratamiento más costosos como los convencionales (digestión anaeróbica o lodos activados), es limitada. 🍀

**"En la naturaleza está la preservación del mundo."**  
*Henry David Thoreau*



## *Agradecimientos*

Al Consejo Nacional de Huamidades, Ciencia y Tecnología (CONAHCYT) por el apoyo financiero brindado para el desarrollo del quehacer científico a través de la beca nacional de posgrado con número de apoyo 756353.



## Conceptos

**Biorremediación:** proceso que se vale principalmente de microorganismos, plantas, hongos u otro tipo de organismos para descontaminar ambientes como pueden ser suelo, agua, o aire.

**Autóctono:** ser vivo que es originario o nativo del lugar en el que se encuentra.

**in situ:** expresión latina que significa en el sitio o en el lugar.

**Hifa:** filamento de tamaño microscópico que puede ser ramificado o no, y que en conjunto con otros filamentos forma el cuerpo vegetativo de los hongos.

**Micelio:** estructura vegetativa de los hongos y que le sirve para nutrirse.

**Simbiosis:** asociación íntima de especies diferentes que se da para beneficio mutuo, en su desarrollo vital.

**Enzimas:** proteína soluble producida por las células del organismo, que favorece y regula las reacciones químicas en los seres vivos.

**Oxidación química:** reacción química que ocurre entre una sustancia oxidante y una sustancia reductora. Durante la reacción, la sustancia oxidante pierde electrones y la sustancia reductora gana electrones.

**Fotodegradación:** Dicho de un material o de una sustancia que pueden ser degradados por la exposición prolongada a la luz.

**Biodegradación:** Proceso de descomposición de una sustancia mediante la acción de organismos vivos.







## Para Consulta

- Agencia para sustancias tóxicas y el registro de enfermedades. 2016. [https://www.atsdr.cdc.gov/es/phs/es\\_phs69.html](https://www.atsdr.cdc.gov/es/phs/es_phs69.html)
- Akhtar N, Mannan MA. 2020. Mycoremediation: Expunging environmental pollutants. *Biotechnology Reports*. 26: 1-10. <https://doi.org/10.1016/j.btre.2020.e00452>
- Alexopoulos CJ, Ahmadjian V, Moore D. 2023. <https://www.britannica.com/science/fungus/Form-and-function-of-fungi>.
- Gouma S, Fragoeiro S, Bastos AC, *et al.* 2014. Bacterial and Fungal Bioremediation Strategies. In *Microbial Biodegradation and Bioremediation*. Surajit, D. (Editor). Elsevier.
- Prasad R. 2017. *Mycoremediation and Environmental Sustainability*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-68957-9>

Crédito de imágenes en orden de aparición: HappyNati (Getty Images, GI), Liountmila Korelidou (GI), eric1513 (GI), Stevica Mrdja / EyeEm (GI), Johannes Plenio (Pexels, P), CreativeValuation, microgen (GI), Robert Pavsic (GI), Vintage Illustrations, nellivalova, annachy (GI), MayaNavits, Stevebidmead (P), art4stock, Science Photo Library, oliviatimp96, Science Photo Library, BlueRingMedia (blueringmedia), brackish\_nz (GI), Nuwat Chanthachanthuek (NuwatPhoto's Images), nellivalova, VINZENCE STUDIO, Creativa Images, VINZENCE STUDIO, BRGFX, Dvojnik (GI), Valadzionak Volha (Valadzionak Volha's Images), Skypics Studio, Valadzionak Volha (Valadzionak Volha's Images) nunbun, AomAm, The img, kappacha, lemono, pikgura (Pikgura Sketches), Stephane Bidouze, AzhariaI, DesignNFMR, deemakdaksina, lestarikhanty, deemakdaksina, AzhariaI, Robert Pavsic (GI), Giuseppe Ramos G, Vectorium, Cavan Images (GI), Billion Photos, Rafael Zarate (GI), jxfzsy (Getty Images Signature, GIS), Aryfahmed (GI), Robert Kneschke, richcarey (GI), Damocean (GI), gianluigibec77 (GI), Artem Podrez (P), Marie Martin (P), art4stock, BlueRingMedia (blueringmedia), luoman (GIS), Pepermpron, richcarey (GI), Pepermpron, akaratwimages, sergio souza (P). Crédito de figuras: Proporcionadas por los autores (Figuras 1, 2, 5), Dominio publico Figura 3 [Link] y 4 [Link1, Link2, Link3, Link4].

Diseño: Isis G. Tovar De La Cruz

**Dra. Selene Ramos Ortiz**  
Editor Asociado



**Anderson Alberto Ramírez Ramírez**

Posdoctorante en el laboratorio de Calidad Ambiental del Centro Universitario de la Ciénega de la Universidad de Guadalajara. Sus líneas de investigación son el tratamiento de aguas residuales domésticas, residuos industriales (vinazas tequileras) y lodos residuales, mediante el sistema de humedales construidos.

Contacto: [ander\\_brit@hotmail.com](mailto:ander_brit@hotmail.com)



**Florentina Zurita Martínez**

Profesora Investigadora Titular en el Departamento de Ciencias Tecnológicas y Directora del Centro de Investigación en Calidad Ambiental en el Centro Universitario de la Ciénega de la Universidad de Guadalajara. Estudia tecnologías alternativas, como la fitorremediación y los humedales construidos, para el tratamiento de aguas residuales domésticas e industriales como las vinazas tequileras.

Contacto: [florentina.zurita@academicos.udg.mx](mailto:florentina.zurita@academicos.udg.mx)



**Allan Tejeda Ortega**

Profesor Investigador en el Centro Universitario de la Ciénega de la Universidad de Guadalajara y Miembro del Sistema Nacional de Investigadores desde el 2019. Las líneas de investigación que desarrolla como parte del Centro de Investigación de Calidad Ambiental son el tratamiento de aguas residuales con sistemas de humedales, fitorremediación, Análisis de Suelos y Química Analítica para la detección de microcontaminantes.



**Alberto Julián Valencia Botín**

Profesor investigador Titular del Centro Universitario de la Ciénega, responsable del laboratorio de Fitosanidad. Líneas de investigación es la microbiorremediación de suelos y el control biológico de plagas y enfermedades. SNII nivel I.





Ramírez-Ramírez AA, Zurita-Martínez F, Tejeda-Ortega A, Valencia-Botín AJ. 2024 Microrremediación: una forma de eliminar contaminantes del ambiente. *Revista Ciencia y Naturaleza* (1114).