



ISBN: 978-607-7760-78-8



9 786077 760788

# **CALIDAD AMBIENTAL Y DESARROLLO SUSTENTABLE**

## *Indicadores*

### **TOMO II**

María Laura Sampedro Rosas  
Justiniano González González

RED de Cuerpos Académicos: Calidad  
Ambiental y Desarrollo Sustentable.

Universidades Participantes: Universidad Autónoma de Guerrero (UAGRO-CA-29, CA-110, CA-143); Universidad Autónoma de Hidalgo (UAEH-CA-59, CA-10); Benemérita Universidad Autónoma de Puebla (BUAP-CA-169, CA-177, CA-93); Universidad Autónoma de Baja California (UABC-CA-51); Universidad Autónoma de Tamaulipas (UAT-CA-29) y Universidad Autónoma de Zacatecas (UAZ-CA-131).

## ÍNDICE

|  |     |
|--|-----|
| Presentación .....   | 5   |
| Introducción .....   | 7   |
| Evaluación ambiental territorial de la cuenca Río la Sabana-Laguna de Tres Palos .....   | 9   |
| <i>Justiniano González-González; Abad Francisco Quiterio Daza; Naú Silverio Niño Gutiérrez; Maximino Reyes Umaña y Gloria Torres Espino</i>  |     |
| Evaluación rápida de biodiversidad para estimar prioridad biológica (ERP BIO) .....  | 29  |
| <i>Juan Carlos Gaytán-Oyarzun; Griselda Pulido-Flores; Scott Monks; Ana Laura López-Escamilla; Maritza López-Herrera; Leticia Romero-Bautista; Miguel Ángel Villavicencio-Nieto y Blanca Estela Pérez-Escandon</i> |     |
| Bioindicadores de contaminación marina .....   | 43  |
| <i>Irma E. Soria Mercado; Graciela Guerra Rivas y Nahara E. Ayala Sánchez</i>  |     |
| Variación temporal de la abundancia y composición de especies del fitoplancton de la Bahía de Acapulco, México como consecuencia de contaminación antropogénica .....  | 73  |
| <i>Agustín A. Rojas-Herrera; Juan Violante-González; Martha Alvarez-Añorve; Justiniano González-González; Jaime S. Gil-Guerrero; Sergio García-Ibañez y José Antonio Rendón-Dircio</i>                             |     |
| Biondicadores de contaminación y calidad del agua en el cauce Aguas Blancas, en Acapulco, Gro., México .....   | 109 |
| <i>José Luis Rosas-Acevedo; Audel Sánchez-Infante; Ana Yolanda Rosas-Acevedo; Laura Sampedro-Rosas y Ana Laura Juárez-López</i>  |     |
| Los hongos en la biorremediación .....   | 139 |
| <i>Nahara E. Ayala-Sánchez; Irma E. Soria-Mercado; Leticia Bautista Romero; Edgar Esparza-Ibarra y Graciela Guerra Rivas</i>   |     |
| Modelación del cambio climático en la zona costera de Tamaulipas ....  | 157 |
| <i>Ana Cecilia Conde Álvarez; Jesús Efrén Ospina Noreña; Julio Cesar Rolón Aguilar; Rodolfo Graza Flores; Roberto Pichardo Ramírez; Rocío Vargas Castilleja y Jazmín Eduwiges Ruiz Maraboto</i>                    |     |

- Wright, J.F. M.T. Furse y P.D. Armitagem (1993): RIVPACS – a technique for evaluating the biological quality of rivers in U.K. *European Water Pollution Control* 3(4):15-25.
- Zamora-Muñoz, C y J. Alba-Tercedor (1996): Bioassessment of organically polluted spanish rivers, using a biotic index and multivariate methods. *Journal of the North American Benthological Society* 15:332-352.

## LOS HONGOS EN LA BIORREMEDIACIÓN

*Dra. Nahara E. Ayala-Sánchez<sup>1</sup>*

*Dra. Irma E. Soria-Mercado<sup>2</sup>*

*Dra. Leticia Bautista Romero<sup>3</sup>*

*MC. Edgar Esparza-Ibarra<sup>4</sup>*

*Dra. Graciela Guerra Rivas<sup>5</sup>*

### Resumen

En el presente trabajo se tratan los conceptos más relevantes en torno a la biorremediación con especial énfasis en la micorremediación, como medios técnicamente razonables para controlar el efecto de los principales compuestos contaminantes o xenobióticos en el medio ambiente, así como una revisión sobre conceptos del origen, el desarrollo, los principios, las dimensiones, los ámbitos de aplicación, su impacto y los límites de estas biotecnologías. Asimismo se enmarcan los agentes microbianos más frecuentemente utilizados hasta el momento, destacando algunos casos de éxito.

### Abstract

This paper discusses the most relevant concepts about bioremediation with special emphasis on micorremediación as technically reasonable to control the effect of the main xenobiotics or polluting compounds in the environment, as well as concepts of the origin, development, principles, dimensions, and areas of application, its impact and limits of these biotechnologies were reviewed. It was also framed most frequently used antimicrobial agents to date, highlighting some success stories.

<sup>1</sup> Profesor-Investigador, Facultad de Ciencias, Universidad Autónoma de Baja California Km. 103 Carretera Tijuana-Ensenada, Ensenada, BC, México. 22830.nahara.ayala@uabc.edu.mx

<sup>2</sup> Profesor-Investigador, Facultad de Ciencias Marinas, UABC iesoria@uabc.edu.mx, gguerra@uabc.edu.mx

<sup>3</sup> Profesora-investigadora. Universidad Autónoma de Hidalgo; Km. 4.5 carretera Pachuca-Tulancingo, Pachuca, Hidalgo, 42184. México. romerob@uoeh.edu.mx

<sup>4</sup> Profesor-investigador. Universidad Autónoma de Zacatecas. Jardín Juárez 147 Centro Histórico, C.P. 98000 Zacatecas, México. edgarzac@gmail.com

## Introducción

Una de las mayores problemáticas que enfrenta el mundo es la contaminación de suelo, agua, y aire por sustancias tóxicas. Debido a la magnitud de este problema, la búsqueda de una salida viable constituye una prioridad mundial, considerando que estas soluciones deben ser técnicamente razonables, rápidas, responsables con el medio ambiente y económicamente factibles.

La situación que enfrentamos en este sentido es sumamente amplia y difícil de dimensionar con precisión, no obstante, tenemos claro que entre los principales compuestos contaminantes o xenobióticos (ajeno a la vida), según (Alexander, 1999; Eweis, *et al.*, 1999), se encuentran: hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAPs); bifenoles policlorinados (PCBs); compuestos aromáticos mononucleares como el benceno, tolueno, etilbenceno y xileno (BTEX); hidrocarburos clorados como el tricloroetileno (TCE), percloroetileno (PCE); compuestos nitroaromáticos como el trinitrotolueno (TNT); compuestos organofosforados como el diclorodifeniltricloroetano (DDT); cianuro y metales pesados, entre otros, los cuales son sumamente persistentes en el medio ambiente y tienen efectos carcinogénicos y mutagénicos, estos compuestos representan solo un ejemplo de los innumerables compuestos contaminantes con los que nos enfrentamos.

Debido a esto, se ha llegado a considerar diversas opciones de saneamiento ambiental. Al respecto, la biorremediación representa actualmente una alternativa que debemos explorar de manera muy particular. Así, el uso de microorganismos para degradar contaminantes tóxicos en laboratorio ha tenido gran éxito. Pero, el gran reto que enfrentamos es el escalonamiento de estas técnicas para su aplicación en el campo. Al respecto, el presente apartado tiene como finalidad establecer los conceptos básicos para entender que es la biorremediación, partiendo de su marco teórico, dimensiones, ámbitos de aplicabilidad, generalidades de los principales procesos microbiológicos implícitos, y dentro de esta, el papel que pueden desempeñar los hongos.

## Desarrollo

### Definición

Para Yonni, (2000), la biorremediación, abarca la modificación de contaminantes químicos a compuestos inocuos para las comunidades de organismos vivos, a través de la acción de microorganismos. Según, Glazer y Nikaido, (1995), la biorremediación es una tecnología que utiliza el potencial

metabólico de los microorganismos para transformar contaminantes orgánicos en compuestos más simples poco o nada contaminantes. Para Vidali, (2001), constituye un proceso para desintegrar o reducir compuestos tóxicos utilizando la actividad biológica natural. Con un concepto muy próximo, Shanahan, 2004, indica que es el uso de microorganismos para destruir o inmovilizar materiales de desecho. Prasad *et al.*, (2010), la definen como la eliminación, atenuación o transformación de sustancias contaminantes por el uso de procesos biológicos, indicando que la biodegradación o descomposición orgánica, comprende el producto de los procesos de digestión, asimilación y metabolización de compuestos orgánicos a través de la participación de bacterias, hongos, protistas y otros organismos. Van Deuren *et al.*, (1997), indican que el término debe considerar a la "variedad de sistemas que utilizan organismos vivos (plantas, hongos, entre otros), para remover (extraer), degradar (biodegradar) o transformar (biotransformar) compuestos orgánicos tóxicos en productos metabólicos menos tóxicos o inocuos".

Retomando estos conceptos, consideramos que la biorremediación debe definirse como el conjunto de procesos de modificación de contaminantes químicos a compuestos inocuos, a través de la intervención de microorganismos vivos, sus constituyentes estructurales o los productos de sus procesos metabólicos.

### Referente Histórico

La evidencia de elaboración de pilas de desechos orgánicos para reintegrarlos posteriormente al suelo, se remonta a 6,000 AC, y el uso formal de la biorremediación data de hace más de 100 años con la apertura de la primera planta de tratamiento biológico de aguas residuales en Sussex, Inglaterra, en 1891 (Leung, 2004).

El proceso de saneamiento a través del uso de microorganismos se da a conocer a través del trabajo de Störmer, (1907), en el que indica la acción benéfica de algunas bacterias, con especial énfasis en las responsables del incremento de nitrógeno en el suelo. Posteriormente, se introduce el concepto "autolimpieza" para indicar el potencial de bacterias del grupo de *Mycobacterium* para eliminar aceites de la superficie de canales, apoyando a través de este proceso la limpieza de las aguas residuales de procesos de refinerías de petróleo.

A partir de 1970 y con los estudios sobre la podredumbre blanca se inicia el campo de la micorremediación o remediación basada en los hongos.

Alexander, (1981), indica que las investigaciones que siguieron a estas primeras evidencias de saneamiento ambiental, se abocaron al estudio de los procesos abióticos y microbianos implícitos, lo que permitió determinar las actividades microbianas de la mineralización o la completa biodegradación de los contaminantes orgánicos.

Sin embargo, la palabra biorremediación es bastante nueva. Apareciendo por primera vez en la literatura científica en 1987 (Hazen, 1997). La biorremediación utilizando microorganismos fue inventada por el científico norteamericano George M. Robinson, quien trabajó como químico petrolero en la compañía Santa María de California y se dedicó a experimentar con una serie de microorganismos en frascos contaminados de petróleo (Harshad *et al.*, 2009).

Hasta principios de la década de 1980, se consideraba como la mejor solución para la biorremediación de suelos y sedimentos contaminados a la actividad bacteriana (Yonni, 2000).

#### Tipos de Biorremediación (figura 1)

**Biorremediación intrínseca o de atenuación natural:** Es aquella que se da cuando en el propio ambiente existen las poblaciones y condiciones óptimas (temperatura, pH, nutrientes, etc.), para un autosaneamiento o solución del problema (Rosenberg y Ron, 1996) y la que se sustenta en que los mejores microorganismos para la eliminación de tóxicos presentes en un medio son en principio los presentes *in situ*, este postulado está basado en la observación de las capacidades de adaptación de microorganismos autóctonos que logran sobrevivir en medios contaminados. La base de este fenómeno se encuentra, por una parte, en la adquisición de nuevas capacidades metabólicas, mediante mecanismos de variación genética convencionales (mutación, conversión génica, duplicación, transposición) o intercambio de genes y, por otra, en la posibilidad de complementación de las actividades metabólicas de los distintos grupos (Jaenecke *et al.*, 1996), al respecto en este tipo de remediación solo se interviene para monitorear el proceso.

**Biorremediación *in situ*:** aquellos que apoyan el restablecimiento de las condiciones ambientales en y desde el ambiente contaminado, y que incluyen:

1. **Compostaje:** Tratamientos aeróbicos o termófilos en los cuales el material contaminado es mezclado con un agente de carga. Pueden ser realizados en pilas estáticas o en pilas aireadas.

2. **Bioventilación:** método para tratamiento de suelos contaminados a través de la aplicación de oxígeno mediante aireación, para estimular la actividad microbiana.
3. **De reinyección:** efectuada por el bombeo de agua subterránea a la superficie.
4. **Bioestimulación:** promoción de la población microbiana nativa (autóctona), a través de proveerle los nutrientes necesarios o ajustes de pH. Considerando que los microorganismos autóctonos son capaces de degradar el contaminante tras un proceso más o menos largo de aclimatación previa; y que hay que tener en cuenta que de manera natural, el tamaño de la población de microorganismos degradadores crece rápidamente como respuesta a la contaminación del medio y es muy difícil, si no imposible, incrementar la población microbiana más allá de esos valores.
5. **Bioincremento o bioaumentación:** adición de cultivos bacterianos o fúngicos (o consorcios microbianos) autóctonos a medios contaminados para mejorar la degradación. Los microorganismos añadidos deben sobrevivir a los depredadores, tener la habilidad para degradar el o los compuestos contaminantes, contar con un buen grado de estabilidad genética, alta tasa de crecimiento, elevada producción de enzimas, capacidad para competir con éxito con otros microorganismos autóctonos, no ser patógenos y no producir sustancias metabólicas tóxicas (Korda *et al.*, 1997), indican que existen en el mercado productos comerciales, ensayados en el laboratorio, que reúnen microorganismos con gran potencial biodegradador. Considerando que la reintroducción de microorganismos indígenas, aislados del sitio contaminado y cultivados posteriormente, es más efectiva, si adicionalmente se acompañan de un suplemento nutricional y oxígeno.
6. **Manipulación genética de microorganismos autóctonos:** en la que se busca fortalecer sus capacidades metabólicas y por ende degradadoras de compuestos tóxicos.
7. **Biofiltros:** El uso de microorganismos para el tratamiento de emisiones a la atmósfera, a través del uso de columnas.

**Biorremediación extrínseca:** es aquella que se lleva a cabo a través de la intervención dirigida, ya sea *in situ*, *ex situ* o que puede efectuarse en ambos ámbitos.

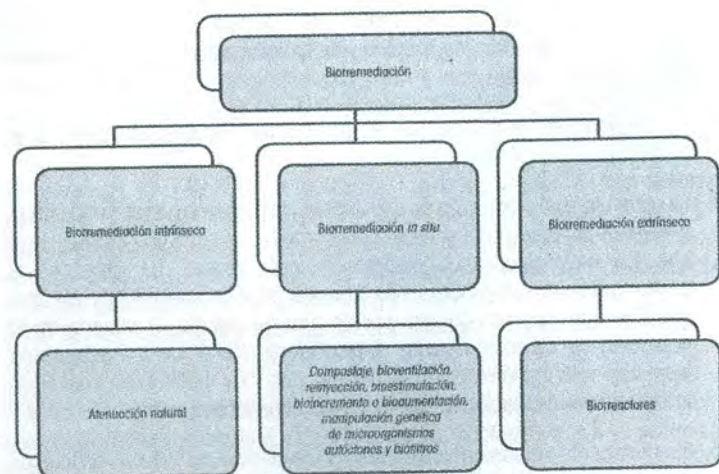


Figura 1. Tipos de biorremediación.

### Métodos usados en sistemas *ex situ*

Comprenden los tratamientos efectuados en condiciones controladas de laboratorio, y para lo cual es necesario extraer el contaminante (removerlo físicamente) y degradarlo en otro sitio. Lo cual frecuentemente resulta muy costoso y cuyo escalonamiento al ambiente natural es complicado.

Estos métodos en sistemas *ex situ* incluyen el uso de:

1. Biorreactores: la biodegradación se efectúa en contenedores o reactores, los cuales pueden ser utilizados para el tratamiento de líquidos o lodos.

### Ámbitos de aplicabilidad

Considera todos los estados de la materia contaminados (Atlas y Unterman, 1999):

Sólido: suelos, sedimentos, lodos, o residuos, etc.

Líquido: aguas superficiales y subterráneas, aguas residuales.

Gases: emisiones industriales, o derivados gaseosos de tratamientos a aguas o suelos.

Enmarcándose que los tratamientos físicos y químicos están basados en transferir la contaminación entre medios gaseoso, líquido o sólido, en la biorremediación es poco intrusiva, transfiriendo lo mínimo de un medio a otro.

### Factores que Impactan a la Aplicabilidad (figura 2)

En condiciones ideales, los contaminantes se deberán transformar en compuestos químicos más simples y no dañinos para los posibles receptores ni para el medio. Lamentablemente, además de la propia recalcitrancia de la molécula, hay bastantes factores que pueden limitar o impedir la atenuación en un medio contaminado (King *et al.*, 1997). Entre ellos, se ubican los siguientes:

Propiedades del contaminante (biodegradabilidad): Considerando que por lo general los hidrocarburos alifáticos se degradan rápidamente y que las estructuras más ramificadas por ser más complejas, son más difíciles de degradar que las cadenas lineales. Por otra parte el número de anillos bencénicos o las sustituciones químicas (metilaciones halogenaciones, ácidos dicarboxílicos, nitrilos) también hacen a la molécula más resistente.

Disponibilidad del contaminante: Considera la interacción con el medio, dado que muchos contaminantes orgánicos, como los derivados del petróleo, PCBs, hidrocarburos aromáticos policíclicos (naftaleno, pireno, fluoreno), solventes halogenados, etc., son hidrofóbicos y tienden a adsorberse en el suelo, concretamente a la fracción orgánica (ácidos húmicos, ácidos fúlvicos y humina).

Concentración del compuesto contaminante: dado que este puede estar en concentraciones insuficientes para inducir el sistema enzimático necesario que defina el proceso catabólico, aun cuando el microorganismo pueda tener la capacidad degradativa para descomponer en compuesto (Korda *et al.*, 1997).

Ausencia de aceptores adecuados de electrones (generalmente oxígeno).

Geoquímica e hidrogeología del área.

Inexistencia de condiciones medioambientales apropiadas (pH, potencial redox, humedad, temperatura).

Presencia o ausencia de comunidades microbianas adecuadas: determinada por su capacidad enzimática para metabolizar el compuesto o los compuestos, y su capacidad para la producción de surfactantes. Por lo que la conversión de un sustrato orgánico en un producto inorgánico dependerá de la capacidad de

la población microbiana para usarlo como fuente de carbono, y del proceso de mineralización implicado (Korda *et al.*, 1997).

Capacidad para proliferar en productos del co-metabolismo: Sustentado en que en ocasiones las enzimas utilizadas por el microorganismo son sumamente específicas y si el producto formado no resulta un sustrato apropiado para sus sistemas enzimáticos, el compuesto no se degradará (Brodie y Nicholls, 1968).

Capacidad de carga del ambiente: determinada por factores tales como la presencia de toxinas, cantidad de nutrientes esenciales que pudieran promover o limitar el crecimiento microbiano, movilidad y/o distribución de los microorganismos y la presencia de abundante materia orgánica.

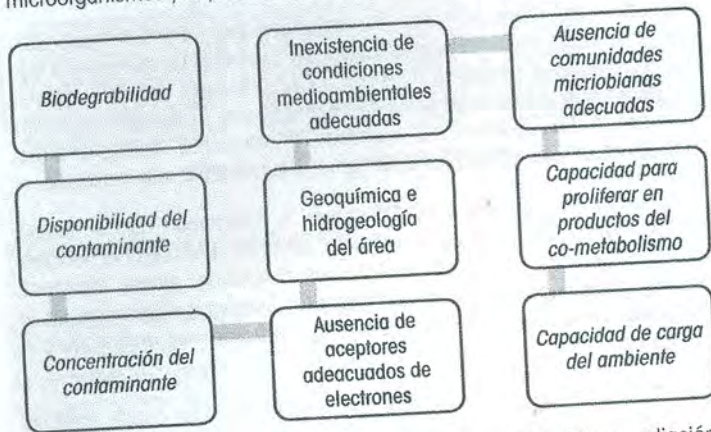


Figura 2. Factores que impactan en la aplicabilidad de la biorremediación.

## Procesos

### Rutas de Degradación

El recorrido, catalizado por las enzimas microbianas a través de los diversos subproductos, se pueden efectuar por medio de:

Biodegradación anaerobia: Efectuada cuando hay escasez de oxígeno (condiciones anaeróbicas) y los microorganismos dependen de otros aceptores de electrones disponibles (nitrate, sulfato, formas oxidadas de Fe o Mn) (Heider *et al.*, 1999).

Biodegradación aerobia: En presencia de oxígeno (condiciones aerobias) los microorganismos convierten a los contaminantes en dióxido de carbono, agua y masa celular microbiana.

### Interacciones Microbianas

Las interacciones microbianas están dadas por las relaciones entre poblaciones microbianas y que enfatizan la importancia de las poblaciones mixtas de organismos o consorcios microbianos, entre las cuales se encuentran:

Cometabolismo: Que se refiere al metabolismo de un sustrato secundario (compuesto contaminante) por enzimas que requieren otro sustrato primario diferente, el cual proporciona la energía y/o los cofactores reductores necesarios, que dan como resultado la acumulación de productos de reacción a partir del contaminante, que implica la existencia de otros microorganismos que hacen factible la degradación posterior de esos productos.

Sintrófrismo: acción concertada de diferentes microorganismos sobre uno o varios sustratos mediante la combinación de sus actividades metabólicas, lo que permite su degradación.

### Capacidades Microbianas

Conrelación a su potencial biorremediador, las capacidades de los microorganismos pueden ubicarse en:

Generación de biosurfactantes: agentes que disminuyen la tensión superficial del agua (tensioactivos), descartando los efectos potencialmente nocivos de estas moléculas.

Generación de bioemulsionantes: estabilizan las emulsiones entre el agua y otro líquido, facilitando la disponibilidad de los compuestos hidrofóbicos

### Limitantes e Inconvenientes de la Biorremediación

- La biodegradación incompleta puede producir compuestos metabólicos nocivos, de igual o superior toxicidad que los compuestos iniciales.
- El tiempo requerido para un proceso puede ser difícil de estimar.
- El seguimiento y control del proceso es laborioso.



### Microorganismos Relevantes en la Biorremediación

Se pueden emplear una gran gama de organismos en los procesos de biorremediación. Particularmente: bacterias, algas y hongos, aunque recientemente se les está dando una atención especial a las plantas como fitorremediadoras y a los nematodos en la vermiremediación; y aun cuando entre estos organismos destacan las bacterias, por su alta capacidad metabólica, los hongos han llamado la atención de numerosos investigadores quienes se abocan a la denominada micorremediación en la que nos centraremos a partir de este punto.

### Micorremediación

Denominación acuñada por Paul Stamets y que se refiere específicamente al uso de micelio en la biorremediación.

### Definición

Fragmentación o remoción de compuestos tóxicos de un medio a través del uso de hongos, retornando al medio ambiente compuestos en un estado menos tóxico que el original. Otro concepto paralelo es el de micofiltración, asignado a los procesos por medio de los cuales el micelio fúngico filtra desechos tóxicos y microorganismos del agua en el suelo.

### Principio-Función Ambiental de los Hongos

Los hongos son organismos eucariontes con alta dependencia de fuentes de carbono como alimento. Son descomponedores por excelencia cumpliendo un papel fundamental en los ciclos de los nutrientes junto con las bacterias, actinomicetos y proflistas a través de su capacidad saprobia, es decir que se alimentan de materia orgánica muerta, rica en carbohidratos, la cual es desarrollada en su fase micelial. El micelio tiene la capacidad para secretar enzimas extracelulares y ácidos que tienen la capacidad de descomponer compuestos orgánicos complejos, constituidos por carbono e hidrogeno, que son algunos de ellos estructuralmente muy similares a numerosos contaminantes orgánicos.

Harms *et al.*, (2011), Adinarayana(1995) y Asgher(2008), entre otros investigadores, partiendo del hecho de que la madera está compuesta principalmente de celulosa, hemicelulosa y lignina, indican que esta es degradada en la naturaleza principalmente por hongos ligninocelulósicos. Siendo estos los responsables de reciclar el carbón que se encuentra en la lignina, que es un polímero natural de estructura aromática. Partiendo de la capacidad metabólica de este grupo de hongos, indican que dicha estructura química es similar a las de muchos contaminantes actuales, razón por la cual las enzimas fúngicas extracelulares de estos organismos son buenas candidatas como biorremediadoras, aunado al hecho de su baja especificidad respecto al sustrato de actuación. Características que los hacen potencialmente descomponedores de numerosos compuestos estructuralmente similares a la lignina como son: PAH, PCBs, TNT y DDT, entre otros. Las tres enzimas modificadoras de la lignina (LMEs) son lignina peroxidasa, manganeso peroxidasa y lacasa. Estas tres enzimas se encuentran en los hongos que producen la podredumbre blanca por lo que se ha centrado la atención de numerosos investigadores en su utilización como biorremediadores.

Durante las dos pasadas décadas, muchos micólogos e ingenieros han trabajado en la observación de las capacidades de los hongos para degradar compuestos orgánicos. Investigaciones a través de las cuales han obtenido resultados muy alentadores.

Una parte central en el desarrollo de este ámbito de conocimiento, fue el descubrimiento del hongo causante de la podredumbre blanca aplicado a la biorremediación, lo que ha traído grandes logros y ha estimulado la investigación en este campo en todo el mundo. Dando pie a una nueva era de uso de tecnología de degradación de compuestos orgánicos a través del uso de hongos.

### Importancia

Considerada como una alternativa prometedora en la extracción, transporte y almacenaje de compuestos tóxicos. Se centran primariamente en la remoción de barreras toxicas y posteriormente a interaccionar con otros organismos para desnaturalizar las toxinas y sus derivados a compuestos más simples factibles y de baja toxicidad para ser utilizados por otras especies. Por lo que la clave es determinar la especie correcta de hongo para descomponer un determinado contaminante.

### Grupos fúngicos y acción biorremediadora

Se ha encontrado que hongos lignícolas son particularmente efectivos en el desdoblamiento de compuestos aromáticos contaminantes, como son los compuestos clorinados.

### Tipos

**Micofiltración:** Un proceso a través del cual se utilizan redes miceliales para eliminar microbios, químicos y metales pesados.

**Método de aplicación:** A través del uso de tapetes miceliales o inclusión directa de micelio en el medio.

### Procesos

**Fragmentación:** Capacidad para desintegrar largas cadenas de compuestos tóxicos, proceso a través del cual generan moléculas más simples y de menor toxicidad. Algunas enzimas fúngicas pueden descomponer compuestos sumamente resistentes presentes en la naturaleza o fabricados por el ser humano, como son: herbicidas, pesticidas, tintes textiles y aceites, entre otros. Algunos hongos son capaces de degradar varios de estos materiales y otros son sumamente específicos.

**Remoción:** Capacidad de extraer metales pesados del medio y transferirlos y concentrarlos en sus cuerpos fructíferos.

**Uso como alimento:** Uso de estos compuestos como nutrientes.

### Potenciales Aplicaciones de la Micorremediación (figura 3)

- Descontaminación.
- Reducción de desechos agrícolas.
- Limpieza de sedimentos contaminados.
- Detectores y potenciales acumuladores de radionucleotidos y metales.
- Creación de zonas "buffer".
- Mejoramiento de masas arbóreas u arbusculares a través del aprovechamiento de su capacidad micorrizógena.

- Como blanqueadores en los procesos de elaboración del papel, en lugar del empleo de sustancias tóxicas para el ambiente.
- Inhibidores del crecimiento de contaminantes bacterianos.

### Ventajas de la Micorremediación

- Algunos macromicetos tienen la capacidad de degradar compuestos resistentes a otros tratamientos biológicos sin generar residuos secundarios que requieran de otro tratamiento.
- Los olores desagradables e impacto visual son inmediatamente mitigados a través de su aplicación.



Figura 3. Aplicaciones potenciales de la micorremediación

## Resultados

## Casos Destacados de Aplicación de la Micorremediación

1. Se han reportado que ciertas especies fúngicas han sido eficientes en la degradación del gas nervioso VX y sarín.
2. Experimento dirigido por el Dr. S. A. Thomas demostró la eficiencia de la micorremediación de suelo contaminado por aceite diesel a través del uso de *Pleurotus* spp., y teniendo como referente el uso de bacterias en otra muestra, que en el lapso de 4 semanas estos pudieron remover el 95 % de PAH (Hidrocarburos policíclicos aromáticos) a compuestos no tóxicos. Observando en este experimento la participación de comunidades microbianas naturales que apoyaron al desdoblamiento de estos compuestos hasta llevarlos a dióxido de carbono y agua. De lo que se ha observado que los hongos degradadores de la madera son particularmente eficientes en la descomposición de contaminantes aromáticos como el petróleo y de algunos compuestos clorinados como lo son algunos pesticidas.
3. Científicos de la Universidad de Dundee en Escocia, lograron que algunos hongos micorrizógenos pudieran captar el uranio ubicado en unos campos de batalla.
4. Gadd (2004), demostró la capacidad de algunos hongos en el reciclaje de algunos metales incluyendo cadmio y selenio.
5. Fragoeiro y Magan (2008), utilizando *Trametes versicolor* y *Phanerochaete chrysosporium* inocularon suelos contaminados con pesticidas, logrando la recuperación de dichos suelos.
6. Zhu (2002), realizó diversas investigaciones, partiendo de que el pentaclorofenol (PCP) a concentraciones superiores de 50 ppm es tóxico para diversos microorganismos, y que este se ha utilizado extensivamente a concentraciones mucho más elevadas como un conservador de la madera, fungicida y bactericida, por lo que hay muchos sitios contaminados con muy altas concentraciones de este compuesto, que no es biodegradado naturalmente debido a su alta toxicidad para una amplia gama de microorganismos, por lo que Zhu, trabajando con *P. chrysosporium* demostró la capacidad de este hongo para degradar este compuesto a muy altas concentraciones del rango de 1600 ppm.
7. Cajthaml *et al* (2002), determinaron *in vitro* la capacidad de degradación de varios compuestos PAHs, por medio de la acción de hongos lignolíticos

a través de procesos intra y extracelulares. Observando que en estos procesos no se formaron compuestos intermediarios tóxicos.

## Conclusiones

La biorremediación concebida en su más amplia dimensión, abre un campo de sumo interés en la enmienda de ambientes contaminados con compuestos particularmente recalcitrantes en los que otras tecnologías no han permitido su recuperación. En este ámbito, las habilidades metabólicas de los hongos ponen de manifiesto su potencial capacidad de enmienda de efluentes industriales, suelos y agua con altos niveles de contaminantes orgánicos e inorgánicos. Para lo cual es necesario continuar estudiando no solo su fisiología y comportamiento frente a estos compuestos, sino también su escalonamiento para el saneamiento ambiental a gran escala, no perdiendo de vista su costo económico y factibilidad técnica de aplicación en el campo.

## Bibliografía

- Adinarayana Reddy. (1995). The potential for white-rot fungi in the treatment of pollutants. *Current Opinion in Biotechnology*. 6 (3): 320-328.
- Alexander Martin. (1981). Biodegradation of chemical of environmental concern. *General biology. Science*. Vol. 11: 132-138.
- Alexander, M. (1999). Biodegradation and Bioremediation. 2nd ed. Academic Press, London.
- Asgher Muhammad, Nawaz Haq, Ashraf Muhammad, Legge Raymond. (2008). Recent developments in biodegradation of industrial pollutants by white rot fungi and their enzyme system. *Biodegradation* Vol. 19 (6): 771-783.
- Atlas R.M. y Unterman, R. (1999). Bioremediation. In: Demain AL & Davies JE (Eds) *Manual of Industrial Microbiology and Biotechnology 2nd ed* (pp 666-681), ASM Press, Washington D.C.
- Brodie, J. D. and Nicholls, P. (1968). Enzymatic and metabolic behaviour of fluorosuccinic acids. *Biochem. Biophys. Res. Comm.* 32: 1071-1077.
- Cajthaml T., Möder P., Kacer V. y Šašek P. (2002). Study of fungal degradation products of polycyclic aromatic hydrocarbons using gas chromatography with ion trap mass spectrometry detection. *Journal of Chromatography A*. 974: 213-22.
- Eweis, J.B.; Ergas, S.J.; Chang, D.P.V. y Schroeder, E. (1999). Principios de biorrecuperación. McGrawHill, Madrid.

- Fragoeiro S y Magan N. (2008). *International Biodeterioration & Biodegradation*. 62(4):376-383.
- Gadd G. (2004). Mycotransformation of organic and inorganic substrates. *Mycologist*. 18:60-70.
- Glazer, A.N. and Nikaido, H. (1995). *Microbial Biotechnology: Fundamentals of Applied Microbiology*. W.H. Freeman and Co., New York.
- Harms Hauke, Schlosser Dietmar y Wick Lukas. (2011). Untapped potential: exploiting fungi in bioremediation of hazardous chemicals. *Nature Reviews Microbiology* 9:177-192.
- Harshad Kulkarni, Nikhil Shetye, Vishal Chougale, Santosh Shirke, Dipti Shinde and Shaha S. (2009). Constructed wetland system for wastewater treatment. Project Report. Shivaji University, Kolhapur. 54 pags.
- Hazen, T. (1997). *Bioremediation. Microbiology of the terrestrial subsurface*. Boca Raton, FL: CRC Press.
- Heider, J.; Spormann, A.M.; Beller, H.R. y Widdel, F. (1999). Anaerobic bacterial metabolism of hydrocarbons. *FEMS Microbiology Reviews* 22: 459-473.
- Jaenecke, S.; de Lorenzo, V.; Timmis, K.N. and Diaz, E. (1996). A stringently controlled expression system for analysing lateral gene transfer between bacteria. *Mol. Microbiol.* 21: 293-300.
- Korda, A.; Santas, P.; Tenente, A. and Santas, R. (1997). Petroleum hydrocarbon bioremediation: sampling and analytical techniques, in situ treatments and commercial microorganisms currently used. *Appl. Microbiol. Biotechnol.* 48: 677-686.
- Leung Molly, (2004). *Bioremediation: Techniques for Cleaning up a mess*. BioTeach.
- Rosenberg, E. and Ron, E.Z. (1996). Bioremediation of petroleum contamination. In: Crawford RL & Crawford DL (Eds) *Bioremediation. Principles and Applications* (pp 100-124). *Biotechnology Research Series 6*. University Press, Cambridge.
- Shanahan, Peter. (2004). *Bioremediation. Waste Containment and Remediation Technology*. Massachusetts Institute of Technology, MIT OpenCourseWare.
- Shukla Prasad, Kumar Nandand Sharma Shivesh. (2010). Bioremediation: Developments, Current Practices and Perspectives. *Genetic Engineering and Biotechnology Journal*, Vol. 3: 1-20.
- Störmer K. (1907). Über die Wirkung des Schwefelkohlenstoffs und ähnlicher Stoffe auf den Boden. *Jber. Vcr. angew. Bot.*, 5, 113-131.

- Van Deuren, J., Z. Wang and J. Ledbetter. (1997). *Remediation technologies screening matrix and reference guide*. 3er. edition. Technology innovation office. EPA.
- Vidali M. (2001). *Bioremediation. An overview. Pure Appl. Chem.* Vol. 73(7): 1163-1172.
- Yonni Fernando (2000). *Biorremediación: el empleo de hongos que crecen en la madera*. Estructplan on line, Argentina. Art. 603.
- Zhu P. (2002). *Deactivation (neutralization or detoxification) and safe disposal of germicides and pesticides*. Symposia Papers Presented Before the Division of Environmental Chemistry American Chemical Society. Boston, MA.