

UNIVERSIDAD NACIONAL ABIERTA Y A DISTANCIA

Rector

Jaime Alberto Leal Afanador.

Vicerrectora Académica y de Investigación

Constanza Abadía García.

Vicerrector de Medios y Mediaciones Pedagógicas

Leonardo Yunda Perlaza.

Vicerrector de Desarrollo Regional y Proyección Comunitaria

Leonardo Evemeleth Sánchez Torres.

Vicerrector de Servicios a Aspirantes, Estudiantes y Egresados

Edgar Guillermo Rodríguez Díaz.

Vicerrector de Relaciones Internacionales

Luigi Humberto López Guzmán.

Decana Escuela de Ciencias Agrícolas, Pecuarias y del Medio Ambiente

Julialba Ángel Osorio.

Líder Nacional de Investigación

Juan Sebastián Chiriví Salomón

Líder de investigación de Escuela

Yolvi Prada Millán



PRACTICAS DE BIORREMEDIACIÓN EN SUELOS Y AGUAS

Sandra Patricia Montenegro Gómez

sandra.montenegro@unad.edu.co

ORCID <https://orcid.org/0000-0003-0035-0089>

Sandra Yamile Pulido

sandra.pulido@unad.edu.co

ORCID <https://orcid.org/0000-0003-4208-0611>

Luisa Fernanda Calderón Vallejo

luisa.calderon@unad.edu.co

ORCID <https://orcid.org/0000-0002-4963-0631>

Ficha Bibliográfica Diligencia por Biblioteca

Título: Prácticas de biorremediación en suelos y aguas

Autores: Sandra Patricia Montenegro Gómez, Sandra Yamilé Pulido y Luisa Fernanda Calderón Vallejo.

Grupo de Investigación: CIAB, PRODUCCIÓN SOSTENIBLE

Escuela de Ciencias Agrícolas Pecuarias y del Medio Ambiente

DOI: <https://doi.org/10.22490/notas.3451>

©Editorial
Sello Editorial UNAD
Universidad Nacional Abierta y a Distancia
Calle 14 sur No. 14-23
Bogotá D.C

Edición No. 1

Año 2019.

Esta obra está bajo una licencia Creative Commons - Atribución – No comercial – Sin Derivar 4.0 internacional. https://co.creativecommons.org/?page_id=13.



Tabla de contenido

Resumen.....	7
1. INTRODUCCIÓN	8
2. BIORREMEDIACIÓN EN SUELOS	10
2.1. Biorremediación microbiana	11
2.1.1 Estudios de caso.....	13
2.1.1.1. Biorremediación microbiana en la producción agrícola.....	13
2.1.1.2. Microorganismos con diversas funciones metabólicas con capacidad de biorremediación	14
2.1.2. Consideraciones finales.....	17
2.1.3. Evaluación.....	18
2.2. FITORREMEDIACIÓN	19
2.2.3. Oportunidades de mercado para fitorremediación sostenible.....	23
2.2.4. Estudio realizado con plantas remediadoras.	27
3. BIORREMEDIACIÓN EN AGUAS.....	28
3.1 Origen de la contaminación hídrica e importancia de su tratamiento	28
3.2. Biorremediación de aguas contaminadas con hidrocarburos	31
3.3. Biorremediación de aguas contaminadas con lixiviados mediante sistemas biológicosalgales y sistemas de humedales construidos plantados.....	33
3.4. Biorremediación de lodos acuosos provenientes de sistemas de tratamiento de aguas residuales (tanques sépticos) en sistemas de humedales construidos de flujo vertical	36

3.5. Biorremediación de metales pesados en aguas	37
4. BIBLIOGRAFÍA.....	41

Resumen

Contextualización: En la actualidad la biorremediación se ha convertido en una interesante y promisoría alternativa a las convencionales técnicas para el tratamiento de sustancias que contaminan el ambiente. La biorremediación consiste básicamente en la transformación biológica de contaminantes por parte de microorganismos, plantas o sus enzimas en diversos ambientes incluyendo el suelo y el agua. **Información**

relevante: La amplia actividad funcional microbiana ha sido relacionada con la degradación de diversos compuestos xenobióticos o recalcitrantes. Los principales tipos de biorremediación microbiana en suelos se listan a continuación: bioaumentación, bioestimulación, landfarming, bioventilación y compostaje. Los microorganismos nativos en los ecosistemas acuáticos y del suelo que habitan el entorno de la raíz de las plantas (efecto rizosférico), también contribuyen en la degradación de contaminantes como resultado de esta asociación. Por su parte las plantas, por medio del proceso de fitorremediación, contribuyen significativamente en acelerar la degradación de contaminantes. Las tecnologías de fitorremediación más comunes son: rizofiltración, fitoestabilización, fitovolatilización, fitoextracción, fitodegradación o fitotransformación. En aguas contaminadas con metales pesados, los mejores resultados de biorremediación se obtienen a partir de inmovilización y transformación de xenobióticos como resultado de trabajo conjunto entre plantas y microorganismos. **Propósito de la nota**

de campus: El presente documento dará herramientas básicas para la comprensión de los procesos de biorremediación de suelos y aguas contaminadas. **Metodología:** El documento aborda las temáticas de biorremediación en suelos, biorremediación en aguas y fitorremediación; cada temática aborda conceptualización teórica, algunos casos de aplicación y preguntas finales. **Cursos de formación:** 358025-procesos de biorremediación; 303018- Microbiología de suelos; 358003-sistemas de tratamiento de aguas residuales; 358006- biología ambiental.

Conclusiones: La biorremediación es una técnica factible, sin embargo, requiere de estudios previos de cada situación propia de contaminación ambiental y en su mayoría de pretratamientos y/o acondicionamientos para facilitar los entornos adecuados para microorganismos y plantas.

Palabras Clave: Biorremediación, microorganismos, fitorremediación, suelo

1. INTRODUCCIÓN

La biorremediación es un proceso en el que los organismos vivos, normalmente plantas, microorganismos o sus enzimas, se utilizan tecnológicamente para eliminar o reducir (remedio) contaminantes en el medio ambiente (Gaylarde, Bellinaso & Manflo, 2005). De acuerdo con la Agencia de protección Ambiental de los Estados Unidos de América (EPA), las principales categorías de contaminantes del suelo de acuerdo a su toxicidad son, en orden decreciente: Cicloalifáticos>pesticidas> hidrocarburos aromáticos cloroaromáticos>aromáticos simples y otros Moreira, F. D. S. (2006), en este sentido la presencia de grupos "artificiales" como cloro, nitro o sulfonato en muchos productos químicos sintéticos, los hacen resistentes a la descomposición, ya que ya no son reconocidos por los microorganismos y son difíciles de metabolizar (Sayyed & Patel, 2011).

Tanto in situ como ex situ se utilizan métodos comerciales para la limpieza del suelo y el agua subterránea asociada. Por ejemplo, se ha encontrado que los costos del tratamiento de las aguas residuales pueden reducirse mediante la conversión de los residuos en productos útiles en la agricultura, por ejemplo, el compost de los depurados (EFB, 1999; Di Paola & Vicién, 2010).

Teniendo en cuenta la gravedad de la problemática de contaminación ambiental sobre la que puede intervenir la biorremediación, por ejemplo metales pesados, compuestos orgánicos volátiles (COV), bifenilpoliclorados (PCBs) etc., causantes de degradación de los

ecosistemas; variados problemas de salud pública asociados al compuesto de exposición, concentración y/o periodo al que se ha estado expuesto; situación que conlleva a establecer prioridad en tratamientos biológicos, con el fin de disminuir la concentración de estos compuestos en aguas residuales, suelo y aire (García, Pérez & Cocero. 2007; Garzón, Rodríguez & Hernández 2017).

Los actuales métodos de biorremediación comprenden procesos aeróbicos, anaeróbicos y fisicoquímicos en filtros de lecho fijo y biorreactores, en los cuales se retienen en suspensión materiales y microbios Di Paola & Vicién, (2010).

Para biorremediar suelos y/o aguas, se debe realizar un estudio previo sobre la conveniencia técnica, económica y principalmente ambiental del impacto generado a partir del proceso seleccionado (Figura 1).

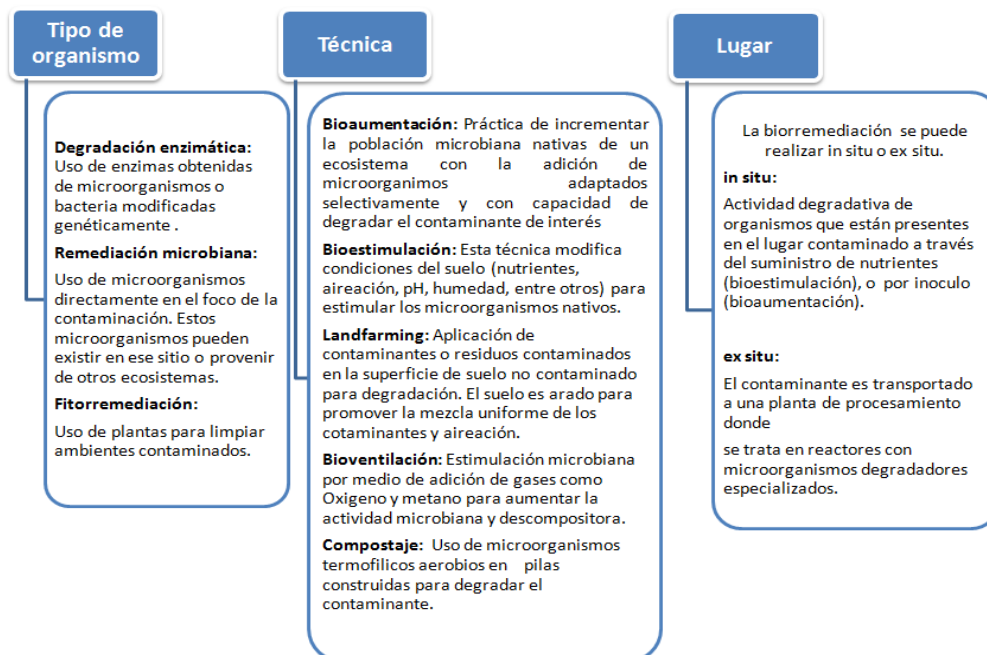


Figura 1. Tipos y estrategias de biorremediación. Adaptado de: Skipper, 1999; Di Paola & Vicién, 2010.

El objetivo del presente documento de consulta es brindar herramientas básicas de comprensión de procesos de biorremediación en suelos y aguas, citando estudios de caso en cada ambiente estudiado.

2. BIORREMEDIACIÓN EN SUELOS

El incremento en compuestos tóxicos (metales pesados, pesticidas, etc.) en suelos afecta a la salud humana y/o la provisión de servicios ecosistémicos y puede reducir la seguridad alimentaria, decreciendo el rendimiento agrícola y generando cultivos inseguros para consumo (Reyes et al., 2016)

Las tres principales vías para la contaminación difusa del suelo son la deposición atmosférica, agricultura e inundaciones. La figura 2, muestra la situación mundial de la contaminación de los suelos y la tendencia de este fenómeno (FAO, 2016).



Figura 2. Contaminación del suelo en el mundo: Condición y tendencia
Fuente: (ManojJoshi,2016).

Por lo anterior mencionado, la remediación de suelos contaminados es esencial. Sin embargo, los métodos de remediación física, como la inactivación química o el secuestro en vertederos, son cada vez más costosos y están siendo reemplazados por métodos biológicos basados en la ciencia, como la degradación microbiana o la fitorremediación (ManojJoshi, 2016). A continuación, se presenta la conceptualización y algunas aplicaciones de estos procesos biológicos de remediación.

2.1. Biorremediación microbiana

La biorremediación microbiana emplea microorganismos o sus enzimas para desintoxicar contaminantes en el suelo u otros ambientes, actúa

transformando contaminantes hacia formas de menor riesgo ambiental (Adriano et al., 1999;Moreira, 2006).

Aunque las bacterias son las más empleadas en el proceso de biorremediación, también se han empleado otros microorganismos como hongos, algas, cianobacterias y actinomicetos para la degradación de compuestos tóxicos en el suelo (Rodríguez, 2003). A continuación, presentamos los principales aspectos a tener en cuenta en el proceso de biorremediación. En la tabla 1 se relacionan tipos y estrategias del proceso.

*Existencia de microorganismos con capacidad metabólica para degradar el contaminante.

*El contaminante debe estar disponible al ataque microbiano o enzimático.

*Deben existir condiciones ambientales adecuadas para el crecimiento y actividad del agente biorremediador

Tabla No.1. Tipos y estrategias para biorremediación de suelo
Fuente: skipper, (1999); Moreira, (2006).

Biorremediación	Fundamentos y definiciones
Pasiva	Degradación natural por microorganismos nativos del suelo
Bioestimulación	Adición de nutrientes como N y P para estimular microorganismos nativos
Bioventilación	Bioestimulación por adición de gases O ₂ y CH ₄ para aumentar actividad microbiana descompositora
Bioaumentación	Inoculación del lugar contaminado con microorganismos seleccionados para degradación del contaminante
“Landfarming”	Degradación de contaminantes o residuos de contaminantes aplicados o incorporados en la superficie de suelo no contaminado; este suelo es posteriormente arado para promover la mezcla uniforme del contaminante y su aireación.
Compostaje	Uso de microorganismos termofílicos aerobios en pilas construir para degradar el contaminante.

2.1.1 Estudios de caso

2.1.1.1. Biorremediación microbiana en la producción agrícola

En el caso de la producción agrícola, la FAO recomienda la prevención y eliminación de la contaminación del suelo por medio de un código internacional de conducta para el uso y manejo de fertilizantes, ya que ha evidenciado que su manejo sin control conduce a desequilibrios de nutrientes, altera su biodiversidad y acidifica, contribuyendo a la movilización y biodisponibilidad de otros contaminantes.

En lo que respecta a excesos de nitrógeno (N) y fósforo (P), el primero conduce a liberación de N_2O a la atmósfera, un gas de efecto invernadero con un mayor efecto de calentamiento potencial que el CO_2 . Cuando estos elementos nutricionales no pueden ser absorbidos por las plantas y los suelos, contaminan los cuerpos de agua (FAO, 2018).

2.1.1.2. Microorganismos con diversas funciones metabólicas con capacidad de biorremediación

Las rutas metabólicas de degradación son determinadas por la estructura química y funcional del producto, depende tanto del microorganismo involucrado como del ambiente, estos factores determinan los productos formados, los cuales a partir de prácticas de biorremediación se espera que eliminen o minimicen el potencial de efectos residuales (Moreira, 2006). A continuación, presentamos algunos casos de microorganismos degradadores de sustancias contaminantes y que por sus capacidades metabólicas, son empleados en procesos de biorremediación.

Tabla No. 2 Degradación microbiana frente a diversos contaminantes del suelo.

Contaminante	Biodegradación microbiana	Acción microbiana	Referencia
<p>Petróleo Su contaminación por derrames y desechos alteran la composición original del suelo y lo mantienen degradado por años.</p>	<p>Bacterias agrupadas en diversos consorcios de los géneros: <i>Acidovorans</i>, <i>Acinetobacter</i>, <i>Agrobacterium</i>, <i>Alcaligenes</i>, <i>Aeromonas</i>, <i>Arthrobacter</i>, <i>Beijernickia</i>, <i>Burkholderia</i>, <i>Bacillus</i>, <i>Comomonas</i>, <i>Corynebacterium</i>, <i>Cycloclasticus</i>, <i>Flavobacterium</i>, <i>Gordonia</i>, <i>Microbacterium</i>, <i>Moraxella</i>, <i>Mycobacterium</i>, <i>Micrococcus</i>, <i>Neptunomonas</i>, <i>Nocardia</i>, <i>Paracoccus</i>, <i>Pasteurella</i>, <i>Polaromonas</i>, <i>Pseudomonas</i>, <i>Ralstonia</i>, <i>Rhodococcus</i>, <i>Sphingomonas</i>, <i>Stenotrophomonas</i>, <i>Streptomyces</i>, <i>Vibrio</i></p> <p>Hongos: <i>Trichoderma</i> spp.</p>	<p>La complejidad de los procesos metabólicos necesarios para degradar petróleo, lleva a la formación de consorcios, con microorganismos de distintos géneros y especies, cada uno especializado en degradar una o varias fracciones del aceite</p>	<p>(Crapez et al., 2002, Tiburtius et al. 2004, Jacques et al. 2007, Mandri&Lin 2007, Seo et al. 2009, Tonini, de Rezende & Grativol, 2010)</p> <p>Pesántez, M., & Castro, R. (2016)</p>

Continúa...

...Continuación

Contaminante	Biodegradación microbiana	Acción microbiana	Referencia
<p>Glifosato Herbicida, clasificado como "probablemente cancerígeno para los seres humanos" de acuerdo a reporte de la OMS en el año 2015 Zuesse, E. (2015)</p>	<p>Bacterias: <i>Agrobacterium</i> sp. <i>Streptomyces</i> sp.</p>	<p>Los microorganismos utilizan el glifosato como fuente de fósforo e energía</p>	<p>Moreira, F. D. S. (2006) Zuesse, E. (2015)</p>
<p>Atrazina Herbicida con gran impacto ecológico y ambiental por sus diversas rutas de contaminación, un ejemplo ha sido la reversión de sexo en anfibios.</p>	<p><i>Agrobacterium</i> <i>Klebsiella</i> <i>Rhodococcus</i></p>	<p>Los microorganismos desclorinizan y desalquilizan el anillo s-triazina y posteriormente lo rompen</p>	<p>Moreira, F. D. S. (2006)</p>
<p>Carbamatos Nematicidas e insecticidas con dos principios activos: aldicarbe (alta toxicidad para los animales) y carbaril</p>	<p>Bacterias: <i>Pseudomonas aeruginosa</i> <i>Bacillus</i> <i>Nocardia</i> <i>Arthrobacter</i> Hongos: <i>Fusarium</i> <i>Penicillium</i></p>	<p>Varios hongos usan carbamatos como fuente de carbono. Aldicarbe: Se degrada por oxidación microbiana</p>	<p>Moreira, F. D. S. (2006)</p>

Continúa...

...Continuación

Contaminante	Biodegradación microbiana	Acción microbiana	Referencia
<p>Cromatos El cromo hexavalente es considerado con potencial cancerígeno</p>	<p>Bacteria: <i>Serratia marcescens</i></p>	<p>Tolerante a cromato, capacidad de formar biopelículas y transformar el 95 % de cromato presente en el medio a Cr(III), compuesto menos tóxico.</p>	<p>Campos, Moraga, Fernández, Yáñez, Valenzuela, & Mondaca, (2013)</p>
<p>Cobre Contaminación producida por actividad industrial, minera o acumulo de residuos de fungicidas a base de cobre.</p>	<p>Hongos: Ectomicorrízicos <i>Thelephoraterrestris</i> y <i>Suillusbovinus</i></p>	<p>Por sus propiedades intrínsecas y / o modificaciones ambientales, como la pared celular impermeable y la excreción de metabolitos que conducen a la desintoxicación de metales.</p>	<p>Van Tichelen et al., (2001)</p>
<p>Plástico –polietileno de baja densidad- Los plásticos están compuestos por sustancias derivadas del petróleo, retienen y transportan gran cantidad de tóxicos que tardan cientos de años en degradarse</p>	<p>Hongos y bacterias 6 cepas, identificadas como <i>Pseudomonassp.</i> MP3a y MP3b, <i>Penicilliumsp.</i> MP3a, <i>Rhodotorulasp.</i> MP3b, <i>Hyalodendronsp.</i> MP3c y una levadura no identificada.</p>	<p>Los dos hongos <i>Thelephoraterrestris</i> y <i>Suillusbovinus</i>, acumulan Cu en diferentes cantidades.</p> <p>La actividad microbiana sobre los plásticos está dada por acción enzimática</p>	<p>Bertolazi., Canton, Azevedo, Soares (2010)</p> <p>Uribe, Giraldo, Gutiérrez, & Merino, (2010)</p>

2.1.2. Consideraciones finales

Estudios a nivel global han identificado que los cambios en el uso de la tierra durante los últimos 50 años, han generado alteraciones en la abundancia, composición y actividad de las comunidades microbianas, afectando la disponibilidad de nutrientes del suelo y la productividad de

las plantas, además de deteriorar el ambiente y disminuir la calidad de vida de las personas (Soka & Ritchie, 2014; Ruiz et al., 2015, Montenegro et al., 2019), siendo un factor relevante la remoción de materia orgánica la cual desempeña un papel fundamental en la funciones del suelo incluyendo la actividad microbiana (Montenegro, Ararat & Betancur, 2015).

En el caso de los ambientes ya deteriorados, es prioritario iniciar procesos de remediación de la forma más natural posible a partir de comunidades microbianas nativas, ya que como se ha planteado en el presente capítulo, los microorganismos y sus procesos metabólicos son los mejores aliados y merecen ser siempre tenidos en cuenta, como reguladores del equilibrio ambiental y remediadores cuando este equilibrio se ve afectado (Polanco et al., 2019).

2.1.3. Evaluación

El uso y manejo del suelo son determinantes en la conservación de su equilibrio en términos de sanidad y productividad. La situación y tendencias actuales (figura 2) sugiere un panorama en el que deben tomarse medidas de protección y donde los procesos de descontaminación a partir de biorremediación basada en aprovechamiento funcional microbiano es importante, dado su papel en los ciclos biogeoquímicos. En este sentido, la perspectiva propositiva y/o aplicación de estrategias mitigantes del impacto generado es donde profesionales en las áreas agrícolas, agroforestales, pecuarias y ambientales pueden contribuir de forma significativa.

A continuación, se plantean cuatro ítems, donde se espera que la respuesta de los mismos se realice tomando como base la información del capítulo y de modo general, que este ejercicio evaluativo fortalezca el conocimiento en la temática abordada:

1. De acuerdo a Bringezu & colaboradores (2014), hasta 849 millones de hectáreas de terrenos naturales hacia el año 2050 estarían en riesgo de degradarse si se continúa la tendencia de uso insostenible del suelo. Desde la perspectiva de biorremediación microbiana del suelo, ¿cómo plantearía un proyecto de investigación encaminado a procesos de remediación en suelos colombianos degradados?
2. ¿Considera que la biorremediación microbiana es 100% segura en todo tipo de suelo y se pueden implementar estas prácticas solamente con el fundamento teórico? Si considera que deben considerarse otros factores, méncionelos y argumente su respuesta.
3. ¿Cuáles considera pueden ser los factores ambientales negativos de la biorremediación microbiana?
4. Plantee un ejemplo de biorremediación microbiana en un suelo de importancia agrícola contaminado por metales pesados.

2.2. FITORREMEDIACIÓN

En la comunidad científica ha aumentado el interés por desarrollar tecnologías limpias seguras de bajo costo y poco impacto ambiental (Chandra & Souza, 2018). La fitorremediación puede ser una alternativa para descontaminar. La palabra proviene del latín y significa planta que remedia, existen gran cantidad de plantas que crecen naturalmente o

plantas genéticamente modificadas para remediación ambiental (Flathman & Lanza, 1998).

2.2.1. Tecnologías de fitorremediación. Comprende diferentes tecnologías que se caracterizan por tener mecanismos particulares para la remediación de contaminantes de agua, suelos o sedimentos y se han utilizado para limpiar cuerpos de agua y suelos (Figura 3) (Maiti, & Kumar, 2016; Delgadillo-López *et al.*, 2011)

Los autores arriba mencionados, clasifican las tecnologías de fitorremediación en cinco principales:

- **Rizofiltración:** las plantas toman los metales del agua y los secuestran a través de las raíces, las cuales deben tener alta biomasa, área superficial amplia y tolerancia a excesos de metales. Esta técnica es de fácil manejo y bajo costo de mantenimiento, genera pocos residuos secundarios, sirve para remediar varios metales como Pb, Cr, Ni, Cd, Cu, V y radionucleótidos como Sr, U, y Cs, entre otros y actúa como tamiz para atrapar sólidos en suspensión.
- **Fitoestabilización:** las plantas transforman los metales tóxicos en una forma no tóxica, reduciendo el riesgo medioambiental. Esta técnica puede ser útil para estabilizar desechos y prevenir las vías de exposición a través del agua y erosión eólica, también proporciona un sistema hidráulico que restringe la lixiviación vertical de contaminantes en el agua subterránea y en la raíz reduce la movilidad por adsorción y fijación química de los contaminantes físicos y químicos. Este método puede ser

implementado como un control indirecto cuando áreas de suelo y cuerpos de agua están contaminadas.

- **Fitovolatilización:** las plantas son usadas para absorber metales tóxicos y transformarlos en menos tóxicos, volátiles, formados por el proceso de transpiración. A través de esta técnica pueden ser volatilizados metales como Hg, As y Se.
- **Fitodegradación o fitotransformación:** las plantas son usadas para degradar contaminación orgánica por medio de sus propios procesos metabólicos y con asociación de la rizósfera microbial. Las enzimas de las plantas están en relación con la rizósfera donde los microorganismos juegan un importante papel en la degradación y transformación de contaminantes. Se han identificado enzimas en zonas de la rizósfera de la planta de sedimentos y suelos como nitro reductasa, laccasa, peroxidasa, dehalogenasa y nitritos. Por esta tecnología puede ser remediado contaminantes orgánicos como solventes clorinados, insecticidas, herbicidas y nutrientes orgánicos.
- **Fitoextracción:** es la más conocida, esta toma los contaminantes por las raíces, los trasloca y acumula en las partes que se cosechan de la planta. Después de la maduración son cosechadas y esta biomasa es descargada en contenedores o vertederos herméticos. Con este proceso se remueven metales tales como Pb, Cd, Cu, Cr, Ni y V de los suelos contaminados. Las especies de plantas ideales para este tipo de tecnología deben tener características tales como:

- Tolerancia a la concentración de contaminantes acumulados.

- Rápido crecimiento y alta biomasa.
- Acumulación de contaminantes en las partes aérea y en las que se cosechan.
- Fácil de cosechar.
- Posibilidad de cultivar la planta fitoextractora adecuada/especies de cultivos en el lugar contaminado.

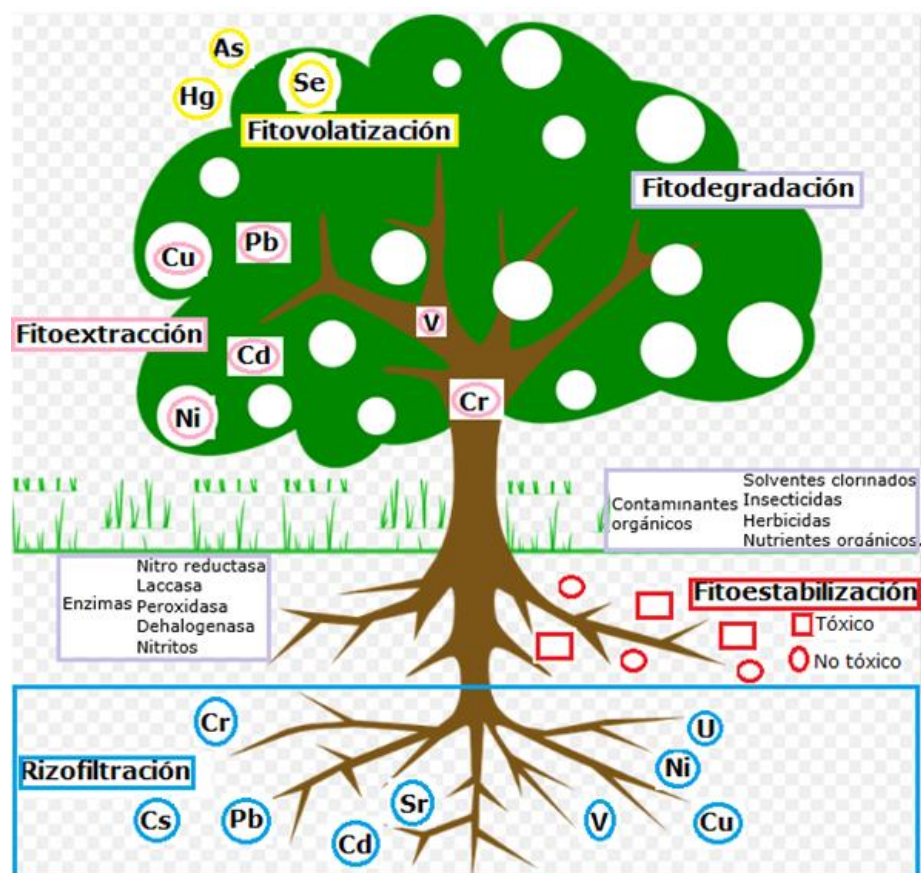


Figura 3. Tecnologías de fitorremediación. Fuente: Adaptado de Townie Arulnagai & Xavier Dengra from the original in .png extension [CC BY-SA 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0>)], from Wikimedia Commons.

2.2.2. Especies de planta propuestas para fitorremediación. Se han clasificado varios cultivos utilizados para la remediación y manejo de un amplio rango de sitios y tipos de contaminantes económicamente valiosos, reconocidos y aprobados (Chandra & Souza, 2018), como se muestra en la tabla 3.

Tabla 3. Especies fitorremediadoras.

Nombre de la especie	Familia	Tolerancia	Uso económico
<i>Vetiveria zizanioides</i>	Poaceae	Alta tolerancia	Aceite esencial
<i>Mentha piperita</i> L.	Lamiaceae	Tolerante	Aceite esencia
<i>Ricinus communis</i>	Euphorbiaceae	Alta tolerancia	Biodiesel
<i>Leucena leucocephala</i>	Fabaceae	Tolerante	Pulpa de madera
<i>Gmelina arborea</i>	Verbenaceae	Tolerante	Maderable
<i>Salix spp.</i>	Salicaceae	Tolerante	Maderable
<i>Jasminum Auriculatum</i>	Oleaceae	Alta tolerancia	Floricultura
<i>Nerium oleander</i>	Apocynaceae	Tolerante	Floricultura

2.2.3. Oportunidades de mercado para fitorremediación sostenible. Actualmente se exploran alternativas teniendo en cuenta modelos y herramientas de sostenibilidad, esto es importante para vincular este tipo de situaciones con la fitorremediación comercial. Para

satisfacer principios de sostenibilidad a largo plazo se debe tener en cuenta la perspectiva ecológica, el desarrollo de oportunidades de mercados y establecimiento de la sostenibilidad corporativa (Seghezzeo, 2009). Un ejemplo de esto se ilustra en la figura 4.

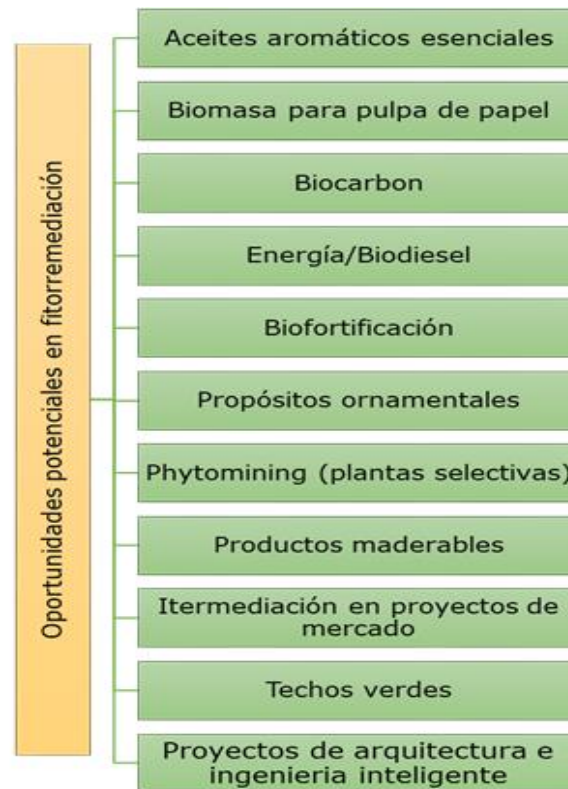


Figura 4. Ejemplos de diferentes propuestas que incluyen plantas económicamente valiosas en el negocio de la fitorremediación.

Fuente: Chandra & Souza, 2018

Chandra & Souza (2018) describen la sostenibilidad como la expresión de una combinación de cinco perspectivas:

- **Perspectiva ambiental:** Establece los principales objetivos y parámetros que tienen la fitorremediación. Cubre todos los aspectos de este tipo de proyectos desde su inicio hasta el fin: niveles tóxicos de los contaminantes identificados, grupos de organismos

involucrados y afectados por la contaminación, selección de un plan adecuado para los fines de la fitorremediación, selección de especies de plantas adecuadas, reducción del contaminante, disponibilidad en el tiempo, niveles de biodiversidad e índices ecológicos que en el futuro pueden ser considerados para evaluar la efectividad de la fitorremediación.

- **Perspectiva en el tiempo:** No hay un tiempo estándar para alcanzar los objetivos de la fitorremediación, además cada sitio contaminado tiene sus propias características, por ejemplo, extensión de la variable, tipo de suelo, vegetación, nivel y tipo de contaminación. Por lo tanto, el éxito de la fitorremediación va a depender del tiempo asignado para alcanzar legalmente los niveles de seguridad en un sitio, porque la limpieza puede durar años e incluso décadas (Zeunert, 2017).
- **Perspectiva económica:** La fitorremediación es de muy bajo costo en insumos, porque se usan organismos autónomos que usan energía solar que se traducen en un costo efectivo bajo y metodología energéticamente baja para su implementación. Sin embargo, es necesario fondos básicos para mantener en un periodo corto y reforzar en las primeras etapas un proyecto de este tipo. Si esta tecnología puede ser rentable y se desarrolla de una manera sostenible para mejorar la tierra, su implementación puede llegar a atraer diferentes empresarios en este tipo de comercio tales como agencias de certificación y regulación, expertos en remediación, asesores en sostenibilidad, consultores, granjas, biorrefinerías,

patrocinadores financieros, organizaciones gubernamentales y no gubernamentales.

- **Perspectiva social:** Tanto las decisiones políticas como de compañías, deben ser aceptadas o surgir de las demandas sociales. El público en general puede ser consultado durante los procesos de construcción de decisiones antes de la implementación de nuevos proyectos pudiendo participar activamente y ser comprometido con acciones. Al mismo tiempo pueden ser amplia y progresivamente beneficiados por el mejoramiento del medio ambiente de áreas contaminadas. Cuando existe participación social en acciones de manejo y restauración, en remediación son mejor implementadas y generalmente aceptadas. La información de las consecuencias ecológicas y sociales de la contaminación y su posible remediación pueden resultar en inversión pública y privada. Siguiendo el consejo respecto a la participación pública en el control de especies invasivas, la evidencia de la degradación medioambiental y futuras consecuencias de contaminación medioambiental puede ser usada para involucrar la sociedad en dialogo de costo beneficio y obtener su apoyo para tales inversiones (Le Maitre *et al.*, 2011).
- **Perspectivas educativas:** Basados en el conocimiento en colaboración, participación social y la confianza sobre la experiencia son pasos claves para lograr sostenibilidad en la innovación, consumo, producción y mantenimiento de la remediación medioambiental. Por esto es urgente la necesidad de introducir el concepto de fitorremediación desde los primeros niveles educativos. Derivado de la dimensión social surge la necesidad de educación en

prácticas sustentables, principalmente enfocada en fitorremediación, esto para obtener un futuro en desarrollo sostenible (Lozano *et al.*, 2015a). Las universidades tienen que formar en políticas responsables, investigaciones científicas, e como sus criterios pueden beneficiar sociedades y las herramientas medioambientales de sostenibilidad (Lozano y Lozano, 2014; Lozano *et al.*, 2015b).

2.2.4. Estudio realizado con plantas remediadoras. En estudio para evaluar cómo se desempeñaban especies de plantas acuáticas para la fitorremediación de agua contaminada con arsénico, realizado por Jasrotia *et al.*, en el 2015, utilizaron tres especies Jacinto de agua (*Eichhorniacrassipes*) y dos algas (*Chlorodesmissp.* y *Cladophorasp.*), las cuales crecían cerca de cuerpos de agua con altas concentraciones de Arsénico, se determinó la tolerancia y su efectividad para tomarlo reduciendo la contaminación orgánica en aguas residuales de concentraciones diferentes. Las variables evaluadas fueron pH, demanda química de oxígeno (COD) además de monitorear las concentraciones de arsénico. A partir de los resultados se pudo confirmar que la especie de alga *Cladophorasp.* es suficiente para remediar el Arsénico encontrado dentro de las aguas residuales y que pueden hacerla apta para irrigación.

2.2.5 Evaluación

Las respuestas a estas preguntas están encaminadas a una mejor conceptualización de la temática abordada y su aprovechamiento.

1. ¿Qué significa fitorremediación?

2. ¿Cuáles son las tecnologías utilizadas en la fitorremediación?
3. La fitorremediación tiene potencial en mercado. ¿Cuáles son?
4. Enumere cinco especies fitorremediadoras con su respectivo uso económico.
5. ¿Cómo se puede describir la sostenibilidad en fitorremediación? Explique.
6. ¿Qué características deben tener las especies de plantas ideales para la fitoextracción?

3. BIORREMEDIACIÓN EN AGUAS

3.1 Origen de la contaminación hídrica e importancia de su tratamiento

A nivel mundial, el recurso hídrico ha venido presentando un alto deterioro a través del tiempo debido a las actividades generadas por las dinámicas del desarrollo y del incremento poblacional desmedido. Por estas razones, es fundamental concebir planes de saneamiento básico que incluyan tecnologías limpias para garantizar la calidad y la disponibilidad del recurso para las generaciones actual y futura (Polanía & Calderón-Vallejo, 2018).

Con el desarrollo de la Revolución Industrial, la producción de bienes permitió que se generaran diferentes tipos de residuos de los cuales se desconocían sus efectos devastadores para el medio ambiente (BBC,

2012) y solo a partir de los años sesenta se empezó a dimensionar el problema de una manera consciente. Más recientemente, se ha trabajado más en la gestión de aguas residuales incluyendo los riesgos de salud crónicos y las preocupaciones medioambientales (NAU, 1999).

En las aguas superficiales, subterráneas, y residuales se empezaron a identificar componentes de difícil degradación, lo cual ha hecho que, en los últimos años, se hayan publicado nuevos datos en la literatura científica especializada que relacionan los efectos de la exposición a ciertos compuestos químicos llamados xenobióticos. Estos compuestos traen la aparición de nuevos síndromes y el desarrollo de enfermedades específicas en animales y humanos (Serrano et al., 2001). La preocupación por estas consecuencias ha hecho que investigadores de diferentes países del mundo se dediquen a buscar soluciones para eliminar o reducir de manera considerable estos compuestos que causan contaminación ambiental y que finalmente afectan la salud humana.

Para eliminar estas sustancias contaminantes tan complejas recientemente se han investigado varios tipos de tratamiento entre ellos, los físicos, químicos y biológicos. Estos últimos son los más atractivos para los países en vías de desarrollo como Colombia, ya que son más viables económicamente en cuanto a construcción, operación (consumo de energía y las emisiones de CO₂) e insumos químicos (Song et al., 2009).

Es por ello, el interés en estudiar en este documento la biorremediación en aguas que contienen altas cargas orgánicas de hidrocarburos, lixiviados de residuos sólidos, entre otras sustancias tóxicas, mediante

microorganismos (bacterias, hongos, algas), permitiendo la eliminación de estos compuestos nocivos disminuyendo su concentración.

Los xenobióticos son compuestos químicos en su mayoría sintéticos, de difícil degradación, por tanto, es posible que en la naturaleza haya pocos organismos capaces de utilizarlos. Sin embargo, diferentes compuestos xenobióticos son susceptibles del ataque microbiano. Es posible la degradación de una determinada sustancia xenobiótica ya que pueden establecerse con bastante rapidez microorganismos con propiedades genéticas nuevas que permitan la rotura de dicha sustancia (Madigan et al., 1999). Los microorganismos pueden degradar multitud de compuestos bajo condiciones distintas. Muchos compuestos sintéticos pueden también modificarse o transformarse mediante el uso de algún tipo de población microbiana. Muchos productos químicos xenobióticos son resistentes al ataque microbiano y/o son tóxicos para los microorganismos (Levin & Gealt, 1998).

En general, la biodegradación de contaminantes depende de factores tanto abióticos como bióticos y es un proceso que puede durar horas, días, meses o años según las condiciones (Ercoli et al., 2002). Según Nápoles & Ábalos (2008), los factores abióticos o físico - químicos agrupan aquellos que se relacionan con el contaminante, como la estructura química, concentración y biodisponibilidad, así como las condiciones ambientales, que involucran parámetros como el pH, humedad, temperatura, disponibilidad de oxígeno y nutrientes; por otra parte, los bióticos dependen de los microorganismos, o sea de población microbiana y el cometabolismo.

Los compuestos xenobióticos pueden provenir de la naturaleza o de actividades antropogénicas, entre las fuentes se tienen: los fármacos, las sustancias químicas industriales, los venenos presentes en la naturaleza y los contaminantes del medio ambiente (Silbergeld, 2000). Los compuestos xenobióticos naturales comprenden un amplio rango de químicos, incluyendo productos de plantas, toxinas animales, incendios forestales, hidrocarburos naturales, entre otros. Por otra parte, los compuestos xenobióticos pueden provenir de fábricas de plásticos, crema dental, detergentes, volcanes, teléfonos celulares, lavaderos de carros, zapatos, plantas de tratamiento de aguas residuales y muchos otros artefactos e instalaciones, aunque la extensión y naturaleza de los xenobióticos liberados a partir de estas distintas fuentes ciertamente presentará variaciones (Fatta-Kassinos et al., 2009; Linvingstone, 1998).

Controlar la presencia de compuestos xenobióticos en el agua es uno de los grandes desafíos para el futuro. Por lo anterior se debe dar una mirada a comprender su proveniencia, las rutas de flujo, su transporte y destino en el ambiente mediante sus rutas de transformación, el riesgo, su mitigación, métodos de tratamiento, y sus efectos en el ciclo urbano del agua (Bester et al. 2010).

3.2. Biorremediación de aguas contaminadas con hidrocarburos

Las aguas contaminadas con hidrocarburos son normalmente el resultado de la explotación, refinación, distribución y/o almacenamiento, derrames provocados o accidentales del petróleo crudo y de sus derivados (Adams-Schroeder et al., 1999). La biorremediación ha sido ampliamente utilizada para tratar agua contaminada con estas sustancias, pues es una solución de bajo costo y ambientalmente es amigable si se le compara con

tratamientos físicos y/o químicos, los cuales siempre son más costosos. Sin embargo, la biorremediación puede tardar varios años para completar la restauración de las áreas impactadas, lo cual está relacionado con la cantidad de contaminante y condiciones ambientales que favorezcan a los organismos que se utilicen (Adams-Schroeder et al., 1999).

En su mayoría, los derivados del petróleo pueden ser oxidados a CO₂ y H₂O, sin embargo, la velocidad del proceso depende de factores como la naturaleza, cantidad y propiedades físicas y químicas que influyen en la biodegradabilidad. Esta oxidación puede ser aerobia o anaerobia, pero generalmente en la primera etapa de la biodegradación de hidrocarburos insolubles el proceso aerobio predomina (Gavrilescu, 2010).

La biorremediación asistida con microalgas y bacterias resulta atractiva para la descontaminación de este tipo de sustancias debido a su capacidad fotosintética, convirtiendo la energía solar en biomasa, incorporando nutrientes como nitrógeno y fósforo (Cerón, 2014).

Según Ferrera-Cerrato *et. al*, (2006), las investigaciones sobre biorremediación de aguas contaminadas con hidrocarburos utilizando microalgas y cianobacterias, se enfocan principalmente a los siguientes aspectos: aislamiento in situ de microalgas degradadoras, uso de pigmentos de microalgas como biomarcadores de contaminación, análisis de enzimas involucradas en procesos de remoción de sustancias contaminantes, y diseño de reactores para el tratamiento de aguas contaminadas con hidrocarburos. El biotratamiento con microalgas es útil como tratamiento terciario de aguas residuales, es decir, se requieren pretratamientos. Dentro de los microorganismos que pueden degradar hidrocarburos se destacan las bacterias (*principalmente pseudomonas*),

levaduras y hongos filamentosos (A. niger, P. glabrum and C. cladosporioides) (Pérez-Armendáriz, 2010 & Torres-Rodríguez, 2003).

3.3. Biorremediación de aguas contaminadas con lixiviados mediante sistemas biológicosalgales y sistemas de humedales construidos plantados

Según Méndez Novelo *et. al* (2009), los lixiviados son el resultado de la percolación de líquidos a través de los desechos en proceso de estabilización; es decir, líquidos que brotan a la superficie o se infiltran hacia el terreno donde se encuentra situado un relleno sanitario, vertedero de basura u otro similar.

Dado la compleja estructura de los lixiviados, se han propuesto diferentes ecotecnologías para llevar a cabo su tratamiento, entre estos se encuentran humedales construidos, lagunas de estabilización y algales, los cuales tienen como principio fundamental el tratamiento mediante la actividad biológica que se da mediante la simbiosis entre bacterias y microalgas, que facilita la remoción de diversos contaminantes allí presentes (metales pesados, nutrientes, materia orgánica, algunos compuestos xenobióticos y otros contaminantes), Cerón (2014).

Cerón (2014) en el departamento del Valle del Cauca, en Colombia, estudió un sistema de laguna algal de alta tasa que presenta ventajas como:

- No generar contaminación adicional dado que la biomasa puede ser cosechada permitiendo de esta manera un efectivo reciclaje de nutrientes.

- Sistema de bajo costo por lo que no requiere de equipos sofisticados para su funcionamiento y mantenimiento.
- Sistema que puede ser utilizado como un sistema de captura de CO₂.
- Potencial de convertir en biocombustible la biomasa de algas producidas y cosechadas a partir de este tipo de sistemas.

Las algas involucradas en este tipo de sistemas biológicos son utilizadas para la biorremediación de contaminantes. La configuración de lagunas algales de alta tasa facilita mejores condiciones para la estabilización de aguas residuales domésticas, industriales y lixiviados (Cerón, 2014). En este caso, es la fotosíntesis el principal proceso biológico de las algas y se produce oxígeno que es utilizado para la actividad de transformación / degradación bacteriana (Craggs et al. 2002). El tratamiento con algas también contribuye a la mitigación de los efectos producidos por el exceso de CO₂ en la atmósfera, el cual es un gas de efecto invernadero.

El afluente analizado en el sistema de laguna algal evaluado por Cerón (2014), presentó una baja biodegradabilidad del sustrato. Sin embargo, la productividad en biomasa conseguida y la eliminación de materiales orgánicos y de nutrientes, demostró que estos sistemas son capaces de tratar residuos con altas concentraciones de compuestos xenobióticos y recalcitrantes. Indicando que con sustratos menos complejos como aguas residuales domésticas se podrían obtener mejores resultados como mayor producción algal y más altas eficiencias de remoción (Cerón, 2014).

Los resultados de la investigación en las lagunas algales de alta tasa para el tratamiento de lixiviados indicó que se presentan entre 5 a 6 horas al día de actividad fotosintética, actuando el sistema como un sumidero de

carbono, con una buena actividad de las algas que son las encargadas de realizar el tratamiento de contaminantes. El desempeño del sistema fue satisfactorio en términos de $DQO_{filtrada}$ y $DBO_{5filtrada}$, alcanzando valores del 31.53 % y 71 % respectivamente. Así mismo, los porcentajes de eliminación de nutrientes en términos de $NTK_{filtrado}$, $N-NH_{4filtrado}$ y $N-NO_3$ fueron: 38.45%, 36.74% y 25 % correspondientemente. En general, el sistema mostró la buena capacidad de eliminar materia orgánica, nutrientes y metales pesados. La productividad de algas obtenida en el sistema piloto fue de $7.2 \text{ g.m}^{-2}.\text{día}^{-1}$ y $37.2 \text{ g.m}^{-3} \text{ día}^{-1}$, permitiendo de esta manera, establecer la posibilidad de un aprovechamiento de esta biomasa algal para la obtención de metabolitos secundarios, la generación de biocombustibles, y también el uso de esta como alimento para ganado vacuno o peces, entre otros diferentes usos comerciales (Cerón, 2014).

Los hallazgos permitieron establecer una metacomunidad de algas (*Chilomonas insignis* y *Desmodesmus quadricauda*) y de grupos de bacterias reductoras de amonio. También se evidenció la alta eliminación de sustancias tóxicas como el Cr VI (Cerón, 2014).

De otro lado, Rojas (2014) realizó también para el tratamiento de lixiviados un estudio con un sistema de humedales construidos de flujo horizontal sembrados con policultivo de plantas tropicales (*Gynerium sagittatum* Gs, *Colocasia esculenta* Ce, *Heliconia psittacorum* He) para la remoción de Cr (VI). Se encontró que estas plantas se pueden utilizar para la fitorremediación de lixiviados con potencial de eliminación para el Cr VI.

Las especies evaluadas en este estudio piloto presentaron buena capacidad de adaptación (de tasa de crecimiento de área foliar y longitud de tallo, supervivencia y floración) a las condiciones ambientales y del lixiviado.

3.4. Biorremediación de lodos acuosos provenientes de sistemas de tratamiento de aguas residuales (tanques sépticos) en sistemas de humedales construidos de flujo vertical

En Brasil, Calderón-Vallejo *et. al* (2015) estudió el tratamiento de efluentes de lodos de tanques sépticos en sistemas real y piloto de humedales construidos plantados y de flujo vertical. Durante el estudio se encontró que el sistema logró satisfactoria biodegradabilidad del efluente del tratamiento de tanques sépticos, que contenía alto contenido de materia orgánica, sólidos, grasas, entre otras sustancias. Así mismo, las plantas de los humedales lograron obtener excelente productividad y acumulación de nutrientes a lo largo de la experimentación, llevando a reflexionar sobre el hecho de que tal vez con más estudios sobre el tema, esta biomasa podría ser aprovechada para otros usos comerciales. En esta investigación, el uso de plantas también permitió que el medio filtrante de la unidad de tratamiento lograra mejorar el intercambio de oxígeno y la deshidratación del lodo.

En la Figura 5, se puede apreciar un ejemplo de humedal construido plantado con especie tolerante a afluentes contaminados provenientes de sistemas de tratamiento de aguas residuales como tanques sépticos (*Cynodon spp.*). En otros estudios realizados con afluentes contaminados en el mismo lugar de la experimentación, otras especies de plantas no fueron tolerantes a las características tóxicas de los mismos.



Figura 5. Humedal Construido de Flujo Vertical usado para el tratamiento de lodos acuosos provenientes del tratamiento de aguas residuales en Brasil
Fuente: Calderón-Vallejo *et. al* (2015)

Las especies vegetales en estas tecnologías de tratamiento ofrecen adicional a la remoción de los contaminantes y nutrientes, diversos servicios ecosistémicos, los cuales se ven potenciados especialmente en países con ambientes tropicales.

3.5. Biorremediación de metales pesados en aguas

Los metales pesados son sustancias que por su resistencia a la biodegradación generan impactos negativos en ecosistemas en general (Herrera-Nuñez *et al.*, 2013). Los metales pesados se encuentran generalmente como componentes naturales de la corteza terrestre, en forma de minerales, sales u otros compuestos. No pueden ser degradados o destruidos fácilmente de forma natural o biológica dado que no tienen funciones metabólicas específicas para los seres vivos (Abollino *et al.*,

2002). Los metales pesados están presentes en el suelo como componentes naturales del mismo o como consecuencia de las actividades antropogénicas. Los metales al encontrarse como iones libres, pueden tener acción directa sobre los seres vivos, lo que ocurre a través del bloqueo de las actividades biológicas, es decir, la inactivación enzimática (Méndez, 2008).

Los metales pesados en suelos y aguas residuales pueden ser bioacumulados en las diferentes esferas del ecosistema. Por su carácter no biodegradable, la toxicidad que ejercen sobre los seres vivos puede resultar peligrosa (Méndez, 2008). Los metales pesados, como contaminantes inorgánicos, se pueden clasificar en dos grupos: tóxicos sólo a altas concentraciones: cobre, zinc, manganeso, hierro y cromo; y tóxicos a bajas concentraciones: cadmio, mercurio, plomo, níquel, selenio, arsénico (Nápoles y Ábalos, 2008).

Los metales pesados incorporados al suelo pueden también movilizarse a las aguas superficiales o subterráneas (entre agua, sedimentos y biota) mediante procesos como la escorrentía superficial, la percolación y la precipitación atmosférica (Herrera-Nuñez et al., 2013). Asimismo, la minería informal enfocada principalmente a la extracción de oro es un consumidor de mercurio (metal muy persistente), que ocasiona contaminación y deterioro de fuentes hídricas, así como de suelos en donde se llevan a cabo este tipo de actividades.

Según Beltrán-Pineda & Gómez-Rodríguez (2016), la biorremediación es una tecnología muy efectiva para aguas contaminadas con metales y con

una alta viabilidad para su aplicación. Los procesos de biotransformación que se presentan en la biorremediación de aguas contaminadas son llevados a cabo por microalgas, hongos y bacterias. La técnica de biorremediación de por sí tiene una mayor capacidad de remoción de contaminantes que los métodos fisicoquímicos convencionales, sin embargo, la efectividad de la remoción dependerá del tipo de metal a tratar y la capacidad metabólica de las especies biorremediadoras a utilizar.

Los mecanismos bioquímicos desarrollados por los microorganismos para acumular o transformar metales pesados son principalmente: Unión a metales, bioacumulación y biosorción, transformación de la valencia del metal, biometilación y mecanismo de volatilización, mecanismo de precipitación química extracelular y mecanismo simbiótico.

Acorde a Beltrán-Pineda & Gómez-Rodríguez (2016), algunos de los microorganismos involucrados en los procesos de biorremediación de metales pesados como el Cadmio (Cd), Cromo (Cr) y Mercurio (Hg) son:
Cadmio: *Cunninghamellaechinulata*, *Fusarium oxysporum*, *Rhizopusstolonifer*, *Thrichodermaviride*, *Deinococcusradiodurans*, *Thermusthermophilus*, *Acidiphliumangustum*, *Flavobacteriumaquatile* y *Flavobacteriumhibernum*.

Me Hg (Metil Mercurio): *Pseudomonas baleárica*, *Pseudomonas putida V1* y *Pseudomonas fluorescens*, *Enterobactercloacae*, *Citrobacterbraakii*, *Alcaligenesfaecalis*

Cr (VI): *Pseudochrobactrum saccharolyticum*, *Enterobactercloacae* y *Pseudomonas sp*, *Micrococcu ssp.*, *Bacillu ssp.*, *Achromobactersp*, *Microbacteriumsp*, *Arthrobactersp*, y *Corynebacteriu*

La manipulación de cepas microbianas genera microorganismos con capacidades potenciadas introduciendo genes dentro de las células vegetales (especies transgénicas) para la transformación de metales pesados. La biorremediación en aguas contaminadas con metales se da con mejores resultados utilizando las capacidades de plantas y microorganismos en simultáneo (simbiótico) para la inmovilización y transformación de estas sustancias (Beltrán-Pineda y Gómez-Rodríguez, 2016).

3.6 Evaluación

Una vez concluido el capítulo de biorremediación en aguas, en el cual se abarcaron diferentes aspectos y perspectivas de esta técnica, se pueden responder varias preguntas que se plantean a continuación.

1. ¿Qué características deben tener las especies de plantas que tratan sustancias tóxicas como aguas residuales domésticas, lixiviados o aguas residuales contaminadas con metales pesados o hidrocarburos?
2. ¿Qué características se requieren para la producción de biocombustibles a partir de las algas?
3. ¿Cuales características ambientales favorecen el desempeño de las soluciones ecotecnológicas para el tratamiento de aguas contaminadas con compuestos xenobióticos o recalcitrantes?

4. BIBLIOGRAFÍA

Abollino, O., Aceto, M., Malandrino M., Mentasti E., Sarzanini, C. & Barberis R. (2002) Distribution and mobility of metals in contaminated sites. Chemometric investigation of pollutant profiles. *Environmental Pollution* 119, no. 2 177-193

Adams Schroeder, R.H., Domínguez Rodríguez, V. I., & García Hernández, L. (1999). Potencial de la biorremediación de suelo y agua impactados por petróleo en el trópico mexicano. *Terra Latinoamericana*, 17(2), 159-174. ISSN: Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=573/57317209>

Adriano, D. C., Bollag, J. M., Frankenberger Jr, W. T., & Sims, R. C. (1999). Biodegradation of Contaminated Soils *Agronomy Monograph* 37, American Society of Agronomy. *Crop Science of America, Soil Science Society of America*, 772.

Beltrán-Pineda, M. E., & Gómez-Rodríguez, A. M. (2016). Biorremediación de Metales Pesados Cadmio (Cd), Cromo (Cr) y Mercurio (Hg), Mecanismos Bioquímicos e Ingeniería Genética: Una Revisión. *Revista Facultad de Ciencias Básicas*, 12(2), 172-197.

Bertolazi, A. A., Canton, G. C., Azevedo, I. G., Cruz, Z. M. A., Soares, D. N. E. S., Conceição, J. M., ...& Ramos, A. C. (2010). O papel das ectomicorrizas na biorremediação de metais pesados no solo. *Natureza on line, Santa Teresa*, 8(1), 24-31.

Bester K., McArdell C.S., Wahlberg C., Bucheli T.D. (2010) Quantitative Mass Flows of Selected Xenobiotics in Urban Waters and Waste Water Treatment Plants. In: Fatta-Kassinos D., Bester K., Kümmerer K. (eds) *Xenobiotics in the Urban Water Cycle*. *Environmental Pollution*, vol 16. Springer, Dordrecht

Calderón-Vallejo L.F., Andrade C.F., Manjate E.S., Madera-Parra C.A., von Sperling, M. (2015) [Performance of a system with full-and pilot-scale sludge drying reed bed units treating septic tank sludge in Brazil.](#) *Water Science and Technology* 71 (12), 1751-1759

Campos, Víctor, Moraga, Rubén, Fernández, Ítalo, Yáñez, Francisco, Valenzuela, Ariel, & Mondaca, María-Angélica. (2013). Reduction of hexavalent chromium by *Serratia marcescens* immobilized on active carbon and their potential use in bioremediation. *Gayana (Concepción)*, 77(1), 61-63. <https://dx.doi.org/10.4067/S0717-65382013000100008>

Cerón, V. (2014) Estudio de la Capacidad de Biofijación de CO₂ de una Laguna Algal de Alta Tasa en Condiciones del Trópico. Tesis de Maestría en Ingeniería. Universidad del Valle. Cali, Colombia.

Chandra, V. P. and Souza-Alonso, P. (2018). Market Opportunities in Sustainable Phytoremediation In V. C. Pandey and K. Baudh (Eds.). *Phytomanagement of Polluted Sites Market Opportunities in Sustainable Phytoremediation* (pp. 51 - 82). Elsevier.

Craggs, R. J. et al., 2002. Advanced pond system: performance with high rate ponds of different depths and areas. In *5th International IWA specialist group conference on waste stabilisation ponds*. New Zealand

Crapez, M.A.C.; Borges, A.L.N.; Bispo, M.G.S. & Pereira, D.C. (2002). Biorremediação: tratamento para derrames de petróleo. *Ciência Hoje*, 30: 179.

Di Paola, M. M., & Vicién, C. (2010). Biorremediación: vinculaciones entre investigación, desarrollo y legislación. *CEUR-CONICET. Argentina*.

Delgadillo-López, A., González-Ramírez¹, C., Prieto-García, F., Villagómez-Ibarra, J., & Acevedo-Sandoval, O. (2011). Phytoremediation: an alternative to eliminate pollution. *Tropical And Subtropical Agroecosystems*, 14(1), 597 - 612

Ercoli, G., Gálvez, J., P Di Paola, Cantero, J., Videla, S., Medaura, M., & Bauzá, J. (2002). Análisis y evaluación de parámetros críticos en la biodegradación de hidrocarburos en suelo. Laboratorio de Bioprocesos, Facultad de Ingeniería. Universidad Nacional de Cuyo, Mendoza, Argentina.

EFB (1999): "Environmental Biotechnology" Briefing Paper 4, Second Edition, January 1999. Task Group on Public Perceptions of Biotechnology. European Federation of Biotechnology.

FAO(2016) Cotaminación del suelo. Recuperado de:
<http://www.fao.org/3/a-i6475s.pdf>

FAO (2018) Be the solution to soil pollution on: outcome document of the global symposium on soil pollution. Recuperado de:
<http://www.fao.org/3/ca0362en/CA0362EN.pdf>

Fatta-Kassinos, D., Bester, K., & Kümmerer, K. (2009). Xenobiotics in the urban water cycle: mass flows, environmental processes, mitigation and treatment strategies, Berlin.

Ferrera-Cerrato, R., Rojas-Avelizapa, N. G., Poggi-Varaldo, H. M., Alarcón, A., & Cañizares-Villanueva, R. O. (2006). Procesos de biorremediación de suelo y agua contaminados por hidrocarburos del petróleo y otros compuestos orgánicos. *Revista Latinoamericana de Microbiología*, 48(2), 179-187.

Flathman, P.E., Lanza, G.R., (1998). Phytoremediation: current views on an emerging green technology. *J. SoilContam.* 7 (4), 415- 432.

Garcia, J., Perez, L., & Cocero, M. (2007). New trends for design towards sustainability in chemical engineering: Green engineering. *Chemical Engineering Journal*, 133(1-3) 7-30.

Garzón, J. M., Rodríguez-Miranda, J. P., & Hernández-Gómez, C. (2017). Aporte de la biorremediación para solucionar problemas de contaminación y su relación con el desarrollo sostenible. *Universidad y Salud*, 19(2), 309-318.

Gavrilescu, M. 2010. Environmental Biotechnology: Achievements, Opportunities and Challenges. *Dynamic Biochemistry, Process Biotechnology and Molecular Biology. Global Science Books.*

Gaylarde, C. C., Bellinaso, M. D. L., & MANFIO, G. P. (2005). Biorremediación. *Biotecnología Ciencia & Desarrollo*, 34, 36-43.

Guerrero, J., Ortíz, Z. (2003). Biorremediación de la contaminación por mercurio en minería informal. Recuperado de: https://www.researchgate.net/publication/258499354_BIORREMEDIACION_DE_LA_CONTAMINACION_POR_MERCURIO_EN_MINERIA_INFORMAL/stats

Herrera-Núñez, J. , Rodríguez-Corrales, J. , Coto-Campos, J. M. , Salgado-Silva, V., & Borbón-Alpizar, H. (2013). Evaluación de metales pesados en los sedimentos superficiales del río Pirro. *Tecnología en Marcha*, 26(1), 27-36.

Jacques, R.J.S.; Bento, F.M.; Antonioli, Z.I. & Camargo; F.A.O. (2007). Biorremediación de solos contaminados con hidrocarburos aromáticos policíclicos. *Ciencia Rural*, 37 (4): 1192-1201.

Jasrotia, S., Kansal, A., & Mehra, A. (2015). Performance of aquatic plant species for phytoremediation of arsenic-contaminated water. *Applied Water Science*, 7(2), 889-896. doi: 10.1007/s13201-015-0300-4

Levin, M., & Gealt, M. (1998). Biotratamiento de Residuos Tóxicos y Peligrosos. Selección, Estimación, Modificación de Microorganismos y sus Aplicaciones, Editorial D'Vinni Ltda.

Livingstone. (1998). The fate of organic xenobiotics in aquatic ecosystems: quantitative and qualitative differences in biotransformation by invertebrates and fish. *Comparative Biochemistry and Physiology - Part A: Molecular & Integrative Physiology*, 120, 43-49.

Le Maitre, D.C., Gaertner, M., Marchante, E., Ens, E.J., Holmes, P.M., Pauchard, A., et al., (2011). Impacts of invasive Australian acacias: implications for management and restoration. *Divers. Distrib.* 17 (5), 1015 - 1029.

Lozano, F.J., Lozano, R., (2014). Developing the curriculum for a new Bachelor's degree in Engineering for Sustainable Development. *J. Clean. Prod.* 64, 136 - 146.

Lozano, R., Ceulemans, K., Alonso-Almeida, M., Huisingh, D., Lozano, F.J., Waas, T., et al., (2015a). A review of commitment and

implementation of sustainable development in higher education: results from a worldwide survey. *J. Clean. Prod.* 108, 1 - 18.

Lozano, R., Ceulemans, K., Seatter, C.S., (2015b). Teaching organisational change management for sustainability: designing and delivering a course at the University of Leeds to better prepare future sustainability changeagents. *J. Clean. Prod.* 106, 205 - 215.

Madigan, M., Martinko, J., & Parker, J. (1999). *Biología de los Microorganismos*. Tomo II. Octava Edición, Editorial Prentice Hall.

Maiti, S., & Kumar, A. (2016). Energy plantations, medicinal and aromatic plants on contaminated soil. In M. Prasad, *Bioremediation and Bioeconomy* (1st ed., pp. 29-47). M.N.V. Prasad

Mandri, T. & Lin, J. (2007). Isolation and characterization of engine oil degrading indigenous microorganisms in Kwazulu-Natal, South Africa. *African Journal of Biotechnology*, 6 (1): 023-027.

Manoj Joshi (2016). FAO publishes maps of soil threats on World Soil Day. Blog. Recuperado de <https://www.geospatialworld.net/blogs/fao-publishes-maps-soil-threats-world-soil-day/4/>

Mendez, J. P, Ramírez C. A.G, Gutiérrez A. D.R, & Garcia F. P. (2008) Plant contamination and phytotoxicity due to heavy metals from soil and water. *Tropical and Subtropical Agroecosystems* 10, no. 1 19.

Méndez Novelo, R. I., Castillo Borges, e. R., Sauri Riancho, M. R., Quintal Franco, C. A., Giácoman Vallejos, g., & Jiménez Cisneros, b. (2009). Comparación de cuatro tratamientos fisicoquímicos de lixiviados. *Revista internacional de contaminación ambiental*, 25(3), 133-145.

Montenegro Gómez, S., Ararat, M., & Betancur, J. (2015). Cachaza y carbonilla: residuos agroindustriales con potencial de fertilización biológica nitrogenada. *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*, 6(1), 83 - 89. doi:<https://doi.org/10.22490/21456453.1265>

Montenegro Gómez, S., Barrera Berdugo, S., Chiriví Salomón, J., Pulido Pulido, S., Sepúlveda Casadiego, Y., Vinasco Guzmán, M., & Palomino Leiva, M. (2019). Capítulo 9. Prevención de la erosión y conservación de la fertilidad del suelo. *Libros Universidad Nacional Abierta y a Distancia*,

0, 172 - 187. Recuperado de
<http://hemeroteca.unad.edu.co/index.php/book/article/view/3124>

Moreira, F. D. S. (2006). *Microbiología e bioquímica do solo*. UFLa.
Polanco Puerta, M., Montenegro Gómez, S., MoraesBoldini, J., Mosquera Mena, R., Vinasco Guzmán, M., Sepúlveda Casadiego, Y., & Palomino Leiva, M. (2019). Capítulo 13. Conservación de la diversidad genética. *Libros Universidad Nacional Abierta y a Distancia*, 0, 225 - 234.
Recuperado de
<http://hemeroteca.unad.edu.co/index.php/book/article/view/3128>

Nápoles, J. N, & Ábalos A. A. (2008). Biorremediación de ecosistemas contaminados con xenobióticos. *Monografías de Excelencia 2007-2008* 1, no. 0

NAU. (1999). The Evolution of Sewage Treatment. <<http://www.cefnns.nau.edu/Projects/WDP/resources/History/History.htm>> (Julio, 2019).

Pérez-Armendáriz, B, Martínez-Carrera, D, Calixto-Mosqueda, M., Alba, J., & Rodríguez-Vázquez, R.. (2010). Filamentous fungi remove weathered hydrocarbons from polluted soil of tropical Mexico. *Revista internacional de contaminación ambiental*, 26(3), 193-199.

Pesántez, M., & Castro, R. (2016). Potencial de cepas de *Trichoderma* spp. para la biorremediación de suelos contaminados con petróleo. *Biotecnología Vegetal*, 16(4).

Polania, A. V., & Calderón-Vallejo, L. F. (2018). Evaluación De Una Estrategia Centralizada Y Una Descentralizada Para El Control De Contaminación En Cuerpos Hídricos. *RIAA*, 9(1), 3.

Reyes, Y., Vergara, I., Torres, O., Lagos, M. D., & Jimenez, E. E. G. (2016). Contaminación por metales pesados: Implicaciones en salud, ambiente y seguridad alimentaria. *Ingeniería Investigación y Desarrollo: I2+ D*, 16(2), 66-77.

Rojas, L. (2014). Evaluación de la capacidad de eliminación de Cr (VI) y efecto en el crecimiento de tres Especies Vegetales Tropicales en

Humedales Construidos En el Tratamiento de Lixiviados de Rellenos Sanitarios. Tesis de Pregrado en Ingeniería Sanitaria. Universidad del Valle. Cali, Colombia.

Rodríguez, D. T. (2003). El papel de los microorganismos en la biodegradación de compuestos tóxicos. *Revista Ecosistemas*, 12(2)

Ruiz, D.M., Martinez, J.P. & Figueroa, A. 2015. Agricultura sostenible en ecosistemas de alta montaña. *Biotecnología del Sector Agropecuario*, 13(1), 129-138.

Seghezzeo, L. (2009). The five dimensions of sustainability. *Environ. Polit.* 18 (4), 539 - 556.

Sayyed, R. Z., & Patel, P. R. (2011). Soil microorganisms and environmental health. *Int J Biotechnol Biosci*, 1, 41-66.

Seo, J.; Keyn, Y & Li, Q.X. (2009). Bacterial Degradation of Aromatic Compounds. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 6: 278-309.

Serrano, N., Cabrera, F., & Olmedo, P. (2001). Disruptores endocrinos. El caso particular de los xenobioticos estrogénicos I. Estrógenos naturales. *Salud Ambiental*, 1(1), 6-11.

Silbergeld, E. (2000). Capítulo 33. Toxicología en: Enciclopedia de salud y seguridad en el trabajo, Ministerio de Trabajo y Asuntos Sociales. Subdirección General de Publicaciones, ed., Madrid.

Skipper, H. D. (1999). Bioremediation of contaminated soils. *Principals and Applications of Soil Microbiology*. Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ, 469-481.

Soka, G. & Ritchie, M. (2014). Arbuscular mycorrhizal symbiosis and ecosystem processes: Prospects for future research in tropical soils. *Open Journal of Ecology*, 4(1), 11-22

Song, H.-L., Nakano, K., Taniguchi, T., Nomura, M., & Nishimura, O. (2009). Estrogen removal from treated municipal effluent in small-scale constructed wetland with different depth. *Bioresource Technology*, 100(12), 2945-2951.

Tiburtius, E.R.L.; Peralta-Zamora, P. & Leal, E.S. (2004). Contaminação de águas por BTXs e processos utilizados na remediação de sítios contaminados. *Química Nova*, 27 (3):441-446.

Tonini, R. M. C. W., de Rezende, C. E., & Grativol, A. D. (2010). Degradação e biorremediação de compostos do petróleo por bactérias: revisão. *Oecologia Australis*, 14(4), 1025-1035.

Townie (Arulnagai & Xavier Dengra from the original in .png extension) (2018). [CC BY-SA 4.0] (<https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/>), from Wikimedia Commons. Recuperado de: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Phytoremediation_Process_-_svg.png

Uribe, Diego, Giraldo, Daniel, Gutiérrez, Susana, & Merino, Fernando. (2010). Biodegradation of low density polyethylene by the action of a microbial consortium isolated from a landfill, Lima, Peru. *Revista Peruana de Biología*, 17(1), 133-136. Recuperado en 19 de julio de 2019, de http://www.scielo.org.pe/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1727-99332010000100017&lng=es&lng=en

Van Tichelen KK, Colpaert JV e Vangronsveld J (2001) Ectomycorrhiza protection of *Pinus sylvestris* against copper toxicity. *New Phytologist*. 150: 203-213

Zuesse, E. (2015). German Companies Stop Sales of Roundup. Washington's blog. Recuperado de <https://www.transcend.org/tms/2015/06/german-companies-stop-sales-of-roundup/>

Zeunert, J., (2017). Landscape Architecture and Environmental Sustainability: Creating Positive Change Through Design. Bloomsbury Publishing, Sydney, Australia.

RÁCTICAS DE BIORREMEDIACIÓN EN SUELOS Y AGUAS

La vida de nuestro planeta está en peligro debido a la contaminación que perturba el medio ambiente y provoca daño en la salud humana, por esto disminuirla debe ser una prioridad. Recursos como el suelo y agua han sido gradualmente contaminados por actividades humanas como la agricultura, minería, industria entre otras.

La naturaleza por sí misma ha desarrollado una capacidad para superar este problema, a través de diferentes microorganismos y plantas, con las cuales se pueden recuperar suelos y aguas, transformando compuestos tóxicos a otros menos tóxicos, inmovilizar, quelar, reducir, mineralizar, solubilizar, redistribuir, excluir y concentrar o acumular metales pesados de una manera sustentable y beneficiosa para el medio ambiente.

Saber cómo la naturaleza nos ha enseñado a solucionar estos grandes problemas ambientales, nos ha ayudado a desarrollar estrategias para crear e implementar prácticas tecnológicas alternativas sustentables y de bajo costo, que han ayudado a recuperar ecosistemas dañados y a la vez al medio ambiente en el planeta.

Sandra Yamilé Pulido