



CAPÍTULO

INTRODUCCIÓN A LA BIORREMEDIACIÓN MICROBIANA EN COLOMBIA



Chiriví & Delgado

1.1 INTRODUCCIÓN A LA PROBLEMÁTICA AMBIENTAL EN COLOMBIA

En Colombia, la problemática ambiental es diversa y altamente preocupante para las generaciones futuras. El recurso hídrico, los suelos y el aire han sido altamente vulnerados por la industrialización global, el crecimiento poblacional y el conflicto armado (McNeish, 2018). La producción de cuero y la extracción minera encabezan como sectores productivos de altos índices de contaminación del recurso hídrico, principalmente a ríos y ecosistemas de páramos y humedales (Castellanos Calderón, 2017; Gómez-Duarte, 2018; Martínez Buitrago & Romero Coca, 2018; McIntyre, y otros, 2018). Para el caso de los suelos, existen distintas fuentes que han venido deteriorando agresivamente este recurso; la minería de oro, la industria petroquímica y las actividades agropecuarias, entre otros, son los que más se destacan como punto causal de contaminación y posterior erosión de los suelos (Arias España, Rodríguez Pinilla, Bardos, & Naidu, 2018).

La industria de las curtiembres tiene el propósito de transformar la piel animal en cuero. Aunque sus orígenes se relacionan con el Departamento de Antioquia, actualmente la industria concentra cerca del 80% en Cundinamarca y Bogotá. El impacto ambiental asociado a este sector productivo se refleja en las aguas, principalmente en el municipio de Villapinzón alrededor de la ribera del Río Bogotá, donde se denuncia un gran consumo de agua y contaminación por metales pesados, pentaclorofenol, formaldehído y tributilestaño, entre otros compuestos (Martínez Buitrago & Romero Coca, 2018; Tobón Ramírez, 2013). Dentro de estos contaminantes se destaca la descarga de vertimientos ricos en cromo trivalente; estas concentraciones bajo condiciones ideales de temperatura y pH pueden reaccionar transformando el cromo trivalente en cromo hexavalente, el cual es cancerígeno (Molina Montoya, Aguilar Casas, & Cordovez Wandurraga, 2010) y de interés sanitario según el artículo 20 del Decreto 1594 de 1984 establecido en la legislación colombiana (Ministerio de Agricultura, 1984).

Es incuestionable que el sector minero o de tecnología extractiva de recursos se ha convertido en un componente importante para la economía colombiana. Aun con los esfuerzos de diferentes entidades gubernamentales y no gubernamentales de reducir los impactos ambientales asociados a este sector económico, se evidencia un deterioro importante de los recursos hídricos, suelos y el aire debido a las metodologías extractivas, principalmente provenientes de entidades informales, que utilizan y/o generan compuestos altamente tóxicos para el medio ambiente (Pérez O & Betancour V, 2016; Juárez, 2016). La utilización de mercurio para la minería aurífera aluvial es aquella que se ha identificado con mayor impacto ambiental. La problemática radica en el proceso



De igual forma, la industria minera requiere de grandes recursos maderables y agua, lo que implica una afectación importante en términos de deforestación y consumo excesivo del recurso hídrico (Sierra Praeli, 2019; Londoño Calle, 2013)

de amalgamación donde se emiten y se vierten grandes cantidades de este metal, entre otros, al aire y el recurso hídrico. El mercurio es altamente tóxico para el ambiente ya que se bioacumula al transformarse en metilmercurio (Pérez O & Betancour V, 2016; García Gómez, 2013). De igual forma, la industria minera requiere de grandes recursos maderables y agua, lo que implica una afectación importante en términos de deforestación y consumo excesivo del recurso hídrico (Sierra Praeli, 2019; Londoño Calle, 2013).

Por otro lado, la industria petrolera, cuya problemática también yace de tecnología extractiva, posee unos impactos importantes en el ambiente que actualmente son debatidos por diferentes entidades, tanto gubernamentales como empresariales, que discuten sobre la magnitud del impacto y la tolerancia del ambiente (Gudynas, 2018). Dentro de los impactos ambientales asociados a la extracción del petróleo y sus derivados, a los que se suma la deforestación y el deterioro de los suelos como en cualquier proceso extractivo (Castañeda & Chapurrí, 2018; Zimmermann, 2018; Trujillo Quintero, Losada Cubillos, & Rodríguez Zambrano, 2017), la liberación de compuestos tóxicos al agua y los suelos durante la extracción, la falta de un aislamiento eficiente de los pozos con los recursos naturales y la inadecuada disposición final de vertimientos y lodos tóxicos encabezan la lista de factores que reclaman esta industria como una altamente nociva para el ambiente (Gudynas, 2018; Arias Serna, 2019; Velásquez Arias, 2017).

El sector agropecuario también es un gran contribuyente del impacto negativo en el medio ambiente, pues el recurso hídrico y los suelos son altamente afectados por la ganadería intensiva y la sobreutilización de fertilizantes y plaguicidas de origen químico (Montenegro Gómez et al., 2019; Mora Marín et al. 2017; Arévalo et al. 2011). El suelo es el recurso que primeramente se ve severamente afectado por las actividades agrícolas y ganaderas, pues la erosión se ve acelerada por la sobre explotación y la utilización de químicos (Montenegro Gómez, y otros, 2019; Mora Marín, Ríos Pescador, Ríos Ramos, & Amario Charry, 2017). Por otro lado, se ha estimado que la actividad agrícola, especialmente aquella asociada al cultivo de café, ha contribuido enormemente al índice de huella hídrica gris, la cual se asocia con la contaminación y se ve principalmente reflejada en el Cauca, Medio y Alto Magdalena (Arévalo, Lozano, & Sabogal, 2011).

Aun cuando la problemática ambiental en Colombia se encuentra bien definida en sus orígenes, así como se han establecido políticas para la reducción de algunos de los contaminantes, el país se enfrenta a grandes retos y oportunidades para su desarrollo, los cuales implican el uso sostenible de sus recursos naturales y la remediación del impacto ambiental generado por el conflicto armado y las actividades de extracción y manufactura ilegales (McNeish, 2018; Arias Espana, Rodríguez Pinilla, Bardos, & Naidu, 2018; Betancur-Corredor, Loaiza-Usuga, Denich, & Borgemeister, 2018; Tognato, 2018).



El sector agropecuario también es un gran contribuyente del impacto negativo en el medio ambiente, pues el recurso hídrico y los suelos son altamente afectados por la ganadería intensiva y la sobreutilización de fertilizantes y plaguicidas de origen químico

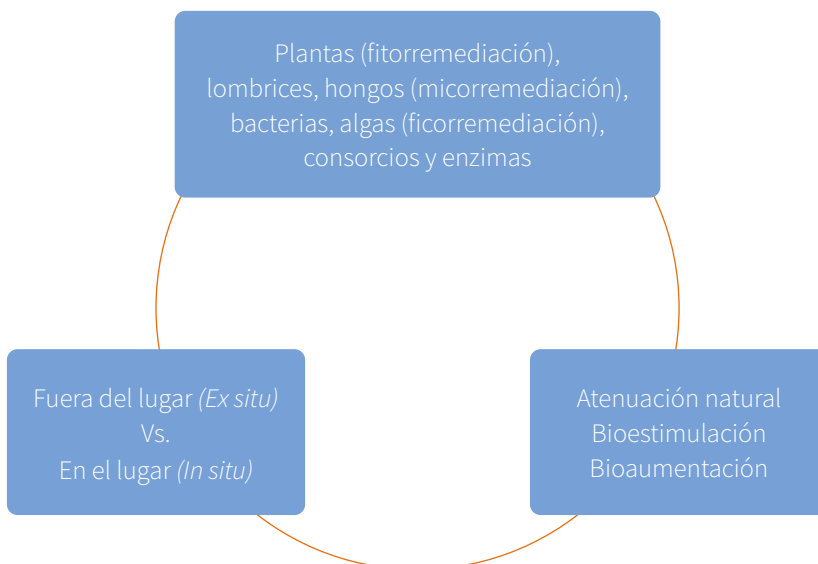
1.2 BIORREMEDIACIÓN Y DEFINICIONES

A través de la historia, la biorremediación se ha consolidado como una tecnología, o un conjunto de ellas, que utiliza agentes biológicos para la remoción o la reducción de los contaminantes presentes en un ambiente. Actualmente, cuando se aplica de manera amplia el término de “biorremediación”, aún existen diferentes nociones que no son resueltas entre la comunidad científica por su discurso folclórico y prometedor a nivel gubernamental. De Lorenzo (2018) estableció una notoria diferencia entre los términos “biodegradación” y “biorremediación”, donde “biodegradación” es referido a los fenómenos de catabolismo, entre otros procesos biológicos, relacionados con los organismos que son capaces de transformar o retener compuestos químicos altamente complejos, y confirma la “biorremediación” como la aplicación de esta ciencia en la solución de problemáticas ambientales asociadas a contaminantes químicos. Por otro lado, es importante definir los términos de “resistencia” y “tolerancia”, que suelen usarse arbitrariamente en los estudios de biodegradación; Gadd (1992) brindó una definición simple para los microorganismos que eran resistentes o tolerantes a los metales y que es congruente con la mayoría de los estudios y extrapolable para otros compuestos químicos. Se interpreta que un organismo es resistente cuando tiene un mecanismo específico para sobrevivir a los efectos tóxicos de la exposición a un compuesto, mientras que un organismo tolerante es aquel que tiene propiedades naturales que lo protegen del contaminante y no son específicas. Experimentalmente, los organismos resistentes son seleccionados cuando se encuentra, de manera reproducible, que hay una eficiencia de la reducción de la concentración del contaminante en combinación con la viabilidad celular del organismo expuesto (Atashgahi, et al., 2018). En microorganismos, es común utilizar la técnica original o poco modificada de plaqueo repetitivo (en inglés: *replica-plating*), propuesto inicialmente por Lederberg & Lederberg (1952) para conservar patrones fisiológicos de cepas bacterianas en medio de cultivo, a través del cultivo de poblaciones del microorganismo en presencia constante del contaminante y, llevándolos a la selección catabólica del mismo, reduciendo la composición de nutrientes simples de uso instantáneo (ej. Glucosa) (Roza & Dussan, 2010; Lederberg & Lederberg, 1952).

1.3 TÉCNICAS DE BIORREMEDIACIÓN

Las técnicas de biorremediación presentan actual y creciente interés en el mundo, debido a que la eliminación, la inhibición o la reducción de los contaminantes en suelos y aguas pueden darse de manera efectiva, usualmente económica, y tiende a concebirse como una tecnología amigable con el medio ambiente (Kumar, Shahi, & Singh, 2018; De Lorenzo, 2018). Para este propósito se utilizan diferentes organismos y/o sus derivados metabólicos que pueden llegar a transformar o acumular contaminantes complejos, tales como compuestos derivados de la industria petrolera, agropecuaria, minera y manufacturera, entre otras (Akash, Babu, & Navneet, 2018). Existen varias formas de categorizar estas técnicas, siendo las más frecuentes por agente remediador (plantas, hongos, bacterias, enzimas o mezclas y consorcios), ubicación (*in situ* o *ex situ*) y metodología de implementación (monitoreando el área de estudio hasta la atenuación del contaminante, modificando las condiciones para estimular los organismos nativos o introduciendo organismos eficientes en términos de biodegradación) (Akash, Babu, & Navneet, 2018; Kumar, Shahi, & Singh, 2018; Roy, et al., 2018; Yuan, Shen, Huang, & Hu, 2018; Vidali, 2001) (Figura 1). Estas clasificaciones no son excluyentes entre sí y su combinación puede facilitar la elección del mejor proceso de biorremediación para reducir o eliminar de manera efectiva un contaminante.

FIGURA 1. Clasificación de los procesos de biorremediación.



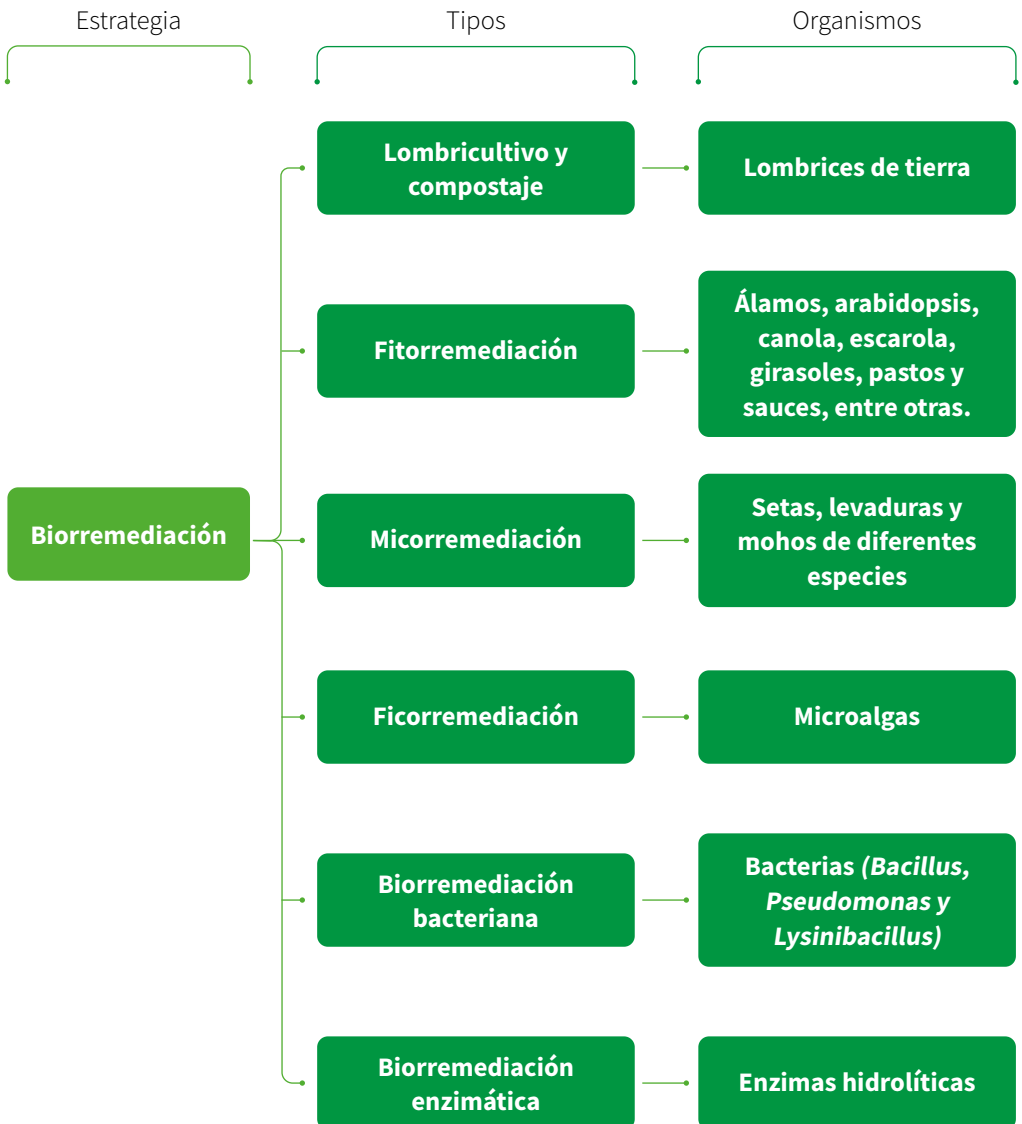
En cuanto al agente biológico remediador, suele hablarse de la utilización de lombrices, plantas, hongos, bacterias, algas, consorcios y productos metabólicos derivados de los mismos (Abatenh, Gizaw, Tsegaye, & Wassie, 2017; Coelho, y otros, 2015) (Figura 2). La lombricultura es una técnica principalmente utilizada para mejorar los suelos, sin embargo, algunos estudios lo utilizan como proceso de biorremediación (Vera Solano, 2013). La biorremediación mediada por plantas, también denominada fitorremediación, es ampliamente utilizada debido a la simplicidad de su montaje y al doble propósito en relación con los servicios ecosistémicos que estas proveen (fotosíntesis, sombra, hábitat y embellecimiento del paisaje, entre otros) (Lavorel, 2012). En Colombia, la creación de humedales artificiales se ha vuelto tendencia para la recuperación de ambientes acuáticos (Peña-Salamanca, Madera-Parra, Sánchez & Medina-Vásquez, 2013). Aun cuando las lombrices y las plantas tienen un gran impacto por su practicidad, el enfoque de esta revisión se encuentra en la biorremediación microbiana debido a su eficiencia (Boopathy, 2000). Los microorganismos que son ampliamente utilizados en procesos de biorremediación, así como los derivados metabólicos de los mismos, son discutidos en las siguientes secciones. Las bacterias y las levaduras son los microorganismos más ampliamente utilizados en biorremediación de contaminantes en medio acuoso, pues su velocidad de crecimiento y resistencia a la fuerza de cizalla los convierte en la elección más práctica (Timmis & Pieper, 1999). Sin embargo, las microalgas han encontrado un lugar especial para la degradación de ciertos compuestos tóxicos para el ambiente debido a aspectos económicos y eco-amigables (Idi, Md Nor, Abdul Wahab, & Ibrahim, 2015). Algunos estudios muestran un efecto sinérgico cuando se aplican microalgas en consorcio con bacterias, pues la captación de nutrientes y el efecto biodegradador alcanzan valores más altos cuando se cultivan juntos (Subashchandrabose, Ramakrishnan, Megharaj, Venkateswarlu, & Naidu, 2011).



En Colombia, la creación de humedales artificiales se ha vuelto tendencia para la recuperación de ambientes acuáticos

Finalmente, los hongos filamentosos, micromicetes y macromicetes, han demostrado tener gran efectividad cuando se trata de contaminantes adheridos a superficies o matrices sólidas; esto se debe a su crecimiento micelial y a la acción de diferentes enzimas hidrolíticas que son secretadas de forma inducida por la presencia del mismo sustrato (Rodríguez-Cousto, 2016; Gadd, 2001). Entre los contaminantes más comunes que se han estudiado capaces de ser reducidos por biorremediación están los hidrocarburos, metales pesados tales como Cr (VI), Co, Hg, Fe o As (Velásquez & Dussan, 2009) y compuestos organofosforados provenientes del uso de plaguicidas en cultivos y suelos agrícolas.

FIGURA 2. Clasificación de las estrategias de biorremediación por agente biológico utilizado.



En relación con la ubicación del proceso de biorremediación, se plantean dos categorías: *in situ*, cuando se realiza directamente en el lugar de afectación, y *ex situ*, cuando el proceso se trata en un lugar diferente al de la afectación (Figura 3, Tabla 1). La primera corresponde a los tratamientos que no requieren procesos invasivos como la excavación y tienen por objetivo la mínima perturbación del lugar; suele ser la más utilizada debido a que requiere menos costos. En el segundo caso, se retira el suelo o el agua a tratar y por lo general se maneja en un sistema controlado como una celda de *land farming* o biorreactor (Vidali, 2001; Azubuiké, Chikere, & Okpokwasili, 2016).

FIGURA 3. Técnicas de biorremediación clasificadas por ubicación

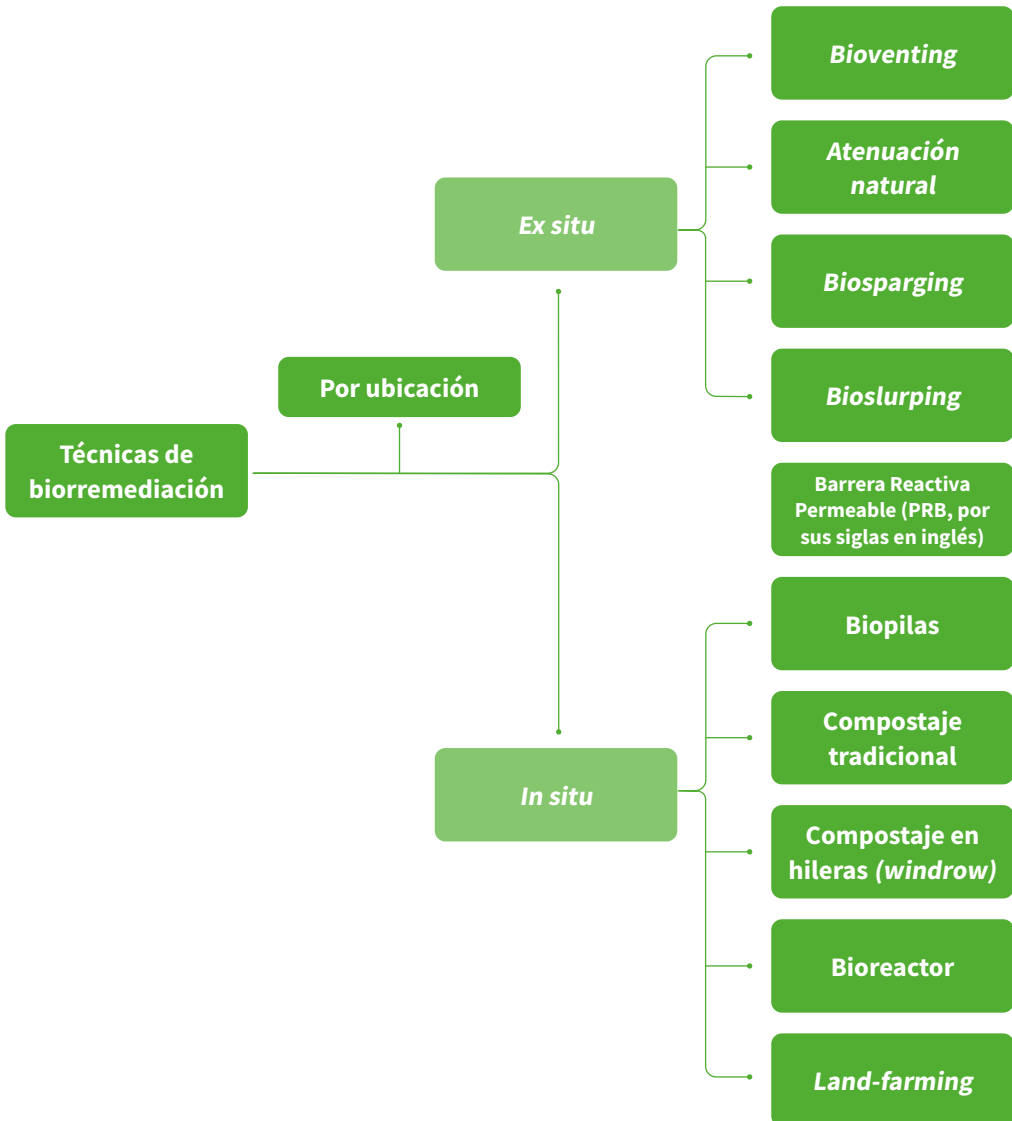


TABLA 1. Descripción de técnicas de biorremediación clasificadas por ubicación.

Biorremediación <i>in situ</i>	Biorremediación <i>ex situ</i>
<p>Bioventing: inyección de oxígeno y nutrientes en zonas no saturadas a través de pozos con el fin de estimular la actividad microbiana. Esta técnica tiene una buena reputación en la restauración de suelos contaminados con hidrocarburos ligeros (Vidali, 2001; Azubuike, Chikere, & Okpokwasili, 2016).</p>	<p>Land farming: técnica que consiste en esparcir suelo contaminado en una cama y labrarla periódicamente; su objetivo es estimular la actividad microbiana y la degradación aeróbica de los contaminantes. Esta técnica es la más sencilla, tiene un bajo costo asociado y se requiere poco equipo operativo. No es recomendable si el suelo está contaminado con compuestos volátiles tóxicos (Vidali, 2001; Azubuike, Chikere, & Okpokwasili, 2016).</p>
<p>Biosparging: inyección de oxígeno y nutrientes en zonas saturadas con el mismo fin de estimular la actividad y crecimiento microbiano. Esta técnica se utiliza para la degradación de compuestos orgánicos en el suelo y aguas subterráneas y se ve promovida por la distribución de los compuestos orgánicos volátiles en zonas no saturadas (Azubuike, Chikere, & Okpokwasili, 2016).</p>	<p>Compostaje: combinación de suelo contaminado con residuos agrícolas no peligrosos como residuos agrícolas o compost. La presencia de este material orgánico fomenta el desarrollo de una población microbiana y por ende de la degradación de los contaminantes (Vidali, 2001).</p>
<p>Biodegradación <i>In situ</i>: la aplicación de oxígeno y nutrientes a través de la circulación de disoluciones acuosas en las zonas contaminadas con el fin de estimular la actividad y crecimiento microbiano. Se utiliza para suelos y aguas subterráneas (Vidali, 2001).</p>	<p>Biopile: acumulación del suelo contaminado excavado en la superficie, donde se le aplica en ocasiones irrigación, aeración y adición de nutrientes con el fin de fomentar la actividad microbiana. Esta técnica puede ayudar a limitar la volatilización de contaminantes de bajo peso molecular (Azubuike, Chikere, & Okpokwasili, 2016).</p>

Biorremediación in situ	Biorremediación ex situ
<p>Atenuación natural (o atenuación intrínseca): biorremediación sin intervención antrópica y de largo plazo. El ambiente presenta procesos fisicoquímicos y microbianos que degradan los contaminantes (Azubuike, Chikere, & Okpokwasili, 2016).</p>	<p>Compostaje por hileras (<i>Windrows</i>): remoción periódica de suelo contaminado acumulado. Esto junto con la adición de agua aumenta la aireación, la actividad microbiana y la distribución de nutrientes en el suelo, logrando así acelerar la biorremediación. Esta técnica no se recomienda si el suelo está contaminado con contaminantes con volatilidades tóxicas (Azubuike, Chikere, & Okpokwasili, 2016).</p>
<p>Bioslurping: combinación de la generación de vacío, extracción de vapores y bioventing para lograr fomentar la biodegradación de contaminantes en suelo y aguas subterráneas a través del aprovisionamiento indirecto de oxígeno. Este método es deficiente si el suelo tiene una baja permeabilidad (Azubuike, Chikere, & Okpokwasili, 2016).</p>	<p>Bioreactores: transformación de la materia prima (suelo contaminado) a productos menos peligrosos a través de una serie de reacciones biológicas controladas y monitoreadas en un vessel (recipiente), las cuales pueden ser tipo estacionario, semi estacionario, proceso continuo o de multietapa. El control de parámetros y su optimización permiten una efectiva biorremediación (Azubuike, Chikere, & Okpokwasili, 2016).</p>
	<p>Barrera Reactiva Permeable (PRB): método que consiste en una permanente o semi-permanente barrera reactiva hecha principalmente de hierro cero-valente. Esta barrera se utiliza para eliminar metales pesados y componentes clorados de agua subterránea contaminada (Azubuike, Chikere, & Okpokwasili, 2016).</p>

Finalmente, existen las técnicas de bioaumentación y de bioestimulación (Figura 4). La primera consiste en la adición de microorganismos bien sean nativos o exógenos con la capacidad de degradar los contaminantes. La segunda consiste en la adición de nutrientes para favorecer y fomentar el crecimiento de los microorganismos nativos capaces de degradar el contaminante (Bento, Camargo, Okeke, & Frankenberger, 2005; Tyagi, da Fonseca, & de Carvalho, 2011; Adams, Fufeyin, Okoro, & Ehinomen, 2015). Varios estudios han comparado ambas técnicas a través de la degradación de hidrocarburos como contaminante. La atenuación natural, y su seguimiento por monitoreo, suele incluirse en esta clasificación, pues no tiene un grado alto de perturbación y suele usarse cuando las zonas de estudio son pequeñas, en estudios de bioprospección y de evaluación de resiliencia de un ecosistema.

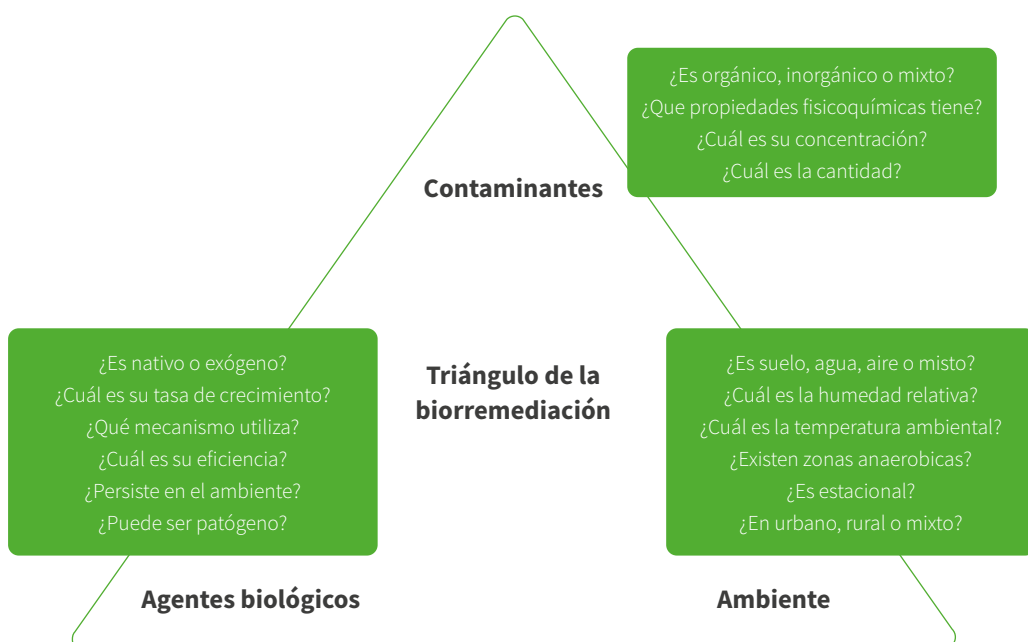
FIGURA 4. Clasificación y definición de estrategias de biorremediación por metodología de implementación.



1.4 TRIÁNGULO DE LA BIORREMEDIACIÓN

Diferentes aspectos pueden influir en la elección del mejor proceso de biorremediación para una problemática ambiental asociada a contaminantes químicos; sin embargo, la mayoría podrían agruparse en 3 factores y la interacción de estos: el contaminante, el agente biológico y el ambiente. Algunos autores proponen trabajar con el triángulo epidemiológico para el estudio de enfermedades que utiliza tres factores similares: el agente causante de la enfermedad, el hospedero y el ambiente (Stevenson, 2018); de manera similar y como propuesta de esta revisión, la elección del mejor proceso de biorremediación puede deducirse del cuestionamiento orientado a estos tres ejes y buscando un equilibrio para su resolución (Figura 5).

FIGURA 5. *Triángulo de la biorremediación, propuesto en esta revisión para orientar la elección de la mejor técnica de biorremediación.*



Esta herramienta gráfica, la cual relaciona a la contaminación como una enfermedad, permite una toma más rápida y práctica de decisiones. Dependiendo de la información con la que se disponga para implementar una estrategia de biorremediación, es más eficiente el proceso de selección enfocándose en los vértices del triángulo con menor información. Por brindar un ejemplo, si se conocen las propiedades fisicoquímicas del contaminante y que existen varios microorganismos que pueden realizar la tarea de biorremediar, sólo restaría conocer mejor el hospedero de la problemática (el ambiente); si es una matriz fija (ej. Suelo) probablemente la mejor elección sea un hongo o un consorcio de ellos, pero si es una matriz acuosa, la mejor opción sea un consorcio bacteriano o uno mixto; de igual forma, si es estacional seco, aplicar hongos sería lo menos recomendable y posiblemente sea mejor utilizar una estrategia de fitorremediación; si fuera una matriz fija y con poco oxígeno, la utilización de microalgas, microorganismos anaerobios facultativos o la implementación de bioventing sean las elecciones más precisas.



Dependiendo de la información con la que se disponga para implementar una estrategia de biorremediación, es más eficiente el proceso de selección enfocándose en los vértices del triángulo con menor información.

1.5 BIBLIOGRAFÍA

Abatenh, E., Gizaw, B., Tsegaye, Z., & Wassie, M. (2017). Application of microorganisms in bioremediation-review. *Journal of Environmental Microbiology*, 1(1), 2-9. Recuperado de <https://www.pulsus.com/scholarly-articles/application-of-microorganisms-in-bioremediationreview-4189.html>

Adams, G. O., Fufeyin, P. T., Okoro, S. E., & Ehinomen, I. (2015). Bioremediation, Biosimulation and Bioaugmentation: A Review. *International Journal of Environmental Bioremediation & Biodegradation*, 3(1), 28-39. doi:10.12691/ijebb-3-1-5

Akash, M. P., Babu, N., & Navneet. (2018). Bioremediation of Environmental Pollulants. En P. V. Mohan, & Navneet, *Handbook of Research on Microbial Tools for Environmental Waste Management* (págs. 80-104). India: IGI Global. doi:10.4018/978-1-5225-3540-0.ch005

Arévalo, D., Lozano, J., & Sabogal, J. (2011). Estudio nacional de huella hídrica Colombia sector agrícola. *Sostenibilidad, Tecnología y Humanismo* (6), 101-126. Recuperado de <http://hdl.handle.net/2099/11915>

Arias Espana, V. A., Rodríguez Pinilla, A. R., Bardos, P., & Naidu, R. (2018). Contaminated land in Colombia: A critical review of current status and future approach for the management of contaminated sites. *Science of the Total Environment*, 618, 199-209. doi:10.1016/j.scitotenv.2017.10.245

Arias Serna, D. (24 de febrero de 2019). Petróleo, sinónimo de contaminación. *La crónica del Quindío*. Recuperado de <https://www.cronicadelquindio.com/noticia-completa-titulo-petroleo-sinonimo-de-contaminacion-cronica-del-quindio-nota-127734>

Atashgahi, S., Sánchez-Andrea, I., Heipieper, H. J., van der Meer, J. R., Stams, A. J., & Smidt, H. (2018). Prospects for harnessing biocide resistance for bioremediation and detoxification. *Science*, 360(6390), 743-746. doi:10.1126/science.aar3778

Azubuike, C., Chikere, C., & Okpokwasili, G. (2016). Bioremediation techniques-classification based on site of application: principles, advantages, limitations and prospects. *World J Microbial Biotechnology*, 32, 180. doi:10.1007/s11274-016-2137-x

Bento, F. M., Camargo, F. A., Okeke, B. C., & Frankenberger, W. T. (2005). Comparative bioremediation of soils contaminated with diesel oil by natural attenuation, biostimulation and bioaugmentation. *Bioresource Technology*, 96(9), 1049-1055. doi:10.1016/j.biortech.2004.09.008

Betancur-Corredor, B., Loaiza-Usuga, J. C., Denich, M., & Borgemeister, C. (2018). Gold mining as a potential driver of development in Colombia: Challenges and opportunities. *Journal of Cleaner Production*, 199, 538-553. doi:10.1016/j.jclepro.2018.07.142

Boopathy, R. (2000). Factors limiting bioremediation technologies. *Bioresource Technology*, 74(1), 63-67. doi:10.1016/S0960-8524(99)00144-3

Castañeda, P., & Chapurrí, L. F. (24 de abril de 2018). Petróleo y deforestación, las amenazas que enfrenta La Macarena. *Semana rural*. Recuperado de <https://semanarural.com/web/articulo/petroleo-y-deforestacion-las-amenazas-que-enfrenta-la-macarena/495>

Castellanos Calderón, G. (2017). Las problemáticas socioambientales generadas por la explotación minera en los páramos de Colombia. *Misión jurídica*, 11(13), 367-379.

Coelho, L. M., Rezende, H. C., Coelho, L. M., de Sousa, P. A., Melo, D. F., & Coelho, N. M. (2015). Bioremediation of Polluted Waters Using Microorganisms. En K. Coelho, *Advances in Bioremediation of Wastewater and Polluted Soil*. Londres, Reino Unido: IntechOpen.

De Lorenzo, V. (2018). Biodegradation and Bioremediation: An Introduction. En R. Steffan, *Consequences of Microbial Interactions with Hydrocarbons, Oils, and Lipids: Biodegradation and Bioremediation. Handbook of Hydrocarbon and Lipid Microbiology* (págs. 1-21). Cham, Alemania: Springer. doi:10.1007/978-3-319-44535-9_1-1

Gadd, G. M. (1992). Metals and microorganisms: A problem of definition. *FEMS Microbiology Letters*, 100(1-3), 197-203. doi:10.1111/j.1574-6968.tb14040.b

Gadd, G. M. (2001). *Fungi in Bioremediation*. Cambridge: Cambridge University Press.

García Gómez, A. G. (2013). Evaluación de la contaminación por vertimiento de mercurio en la zona minera, Pacarní - San Luis departamento del Huila. *Revista de Tecnología*, 12(1), 91-98. Recuperado de <https://revistas.unbosque.edu.co/index.php/RevTec/article/view/653/308>

Gómez-Duarte, O. (2018). Contaminación del agua en países de bajos y medianos recursos, un problema de salud pública. *Revista de la Facultad de Medicina*, 66(1), 7-8. doi:10.15446/revfacmed.v66n1.70775

Gudynas, E. (31 de enero de 2018). Los nudos del petróleo en Colombia: ambiente y ciencia, política y democracia. *Palabras al margen*. Obtenido de <http://palabrasalmargen.com/edicion-122/los-nudos-del-petroleo-en-colombia-ambiente-y-ciencia-politica-y-democracia/>

Idi, A., Md Nor, M. H., Abdul Wahab, M. F., & Ibrahim, Z. (2015). Photosynthetic bacteria: an eco-friendly and cheap tool for bioremediation. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, 14(2), 271–285. doi:10.1007/s11157-014-9355-1

Juárez, F. (2016). La minería ilegal en Colombia: un conflicto de narrativas. *Revista El Agora USB*, 16(1), 135-146. Obtenido de <https://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:0168-ssoar-464002>

Kumar, V., Shahi, S. K., & Singh, S. (2018). Bioremediation: An Eco-sustainable Approach for Restoration of Contaminated Sites. En J. Singh, D. Sharma, G. Kumar, & N. Sharma, *Microbial Bioprospecting for Sustainable Development* (págs. 115-136). Singapur, República de Singapur: Springer. doi:10.1007/978-981-13-0053-0_6

Lavorel, S. (2012). Plant functional effects on ecosystem services. *Journal of Ecology*, 101(1), 4-8. doi:10.1111/1365-2745.12031

Lederberg, J., & Lederberg, E. M. (1952). Replica plating and indirect selection of bacterial mutants. *Journal of Bacteriology*, 64(3), 399-406.

Londoño Calle, V. (6 de mayo de 2013). Colombia no está preparada para la locomotora minera. *El Espectador*. Recuperado de <https://www.elespectador.com/noticias/medio-ambiente/colombia-no-esta-preparada-locomotora-minera-articulo-420422>

Martínez Buitrago, S. Y., & Romero Coca, J. A. (2018). Revisión del estado actual de la industria de las curtiembres en sus procesos y productos: un análisis de su competitividad. *Revista Facultad de Ciencias Económicas: Investigación y Reflexión*, 26(1), 113-124. doi:10.18359/rfce.2357

McIntyre, N., Angarita, M., Fernández, N., Camacho, L. A., Pearse, J., Huguet, C., Ossa-Moreno, J. (2018). A Framework for Assessing the Impacts of Mining Development on Regional Water Resources in Colombia. *Water*, 10(3), 1-18. doi:10.3390/w10030268

McNeish, J. A. (2018). Resource Extraction and Conflict in Latin America. *Colombia internacional*, 95, 3-16. doi:10.7440/colombiaint93.2018.01

Ministerio de Agricultura. (26 de junio de 1984). Decreto 1594 del 26 de junio de 1984. Bogotá, Colombia. Recuperado de <http://oab.ambientebogota.gov.co/descargar/3841/>

Molina Montoya, N. P., Aguilar Casas, P., & Cordovez Wandurraga, C. (2010). Plomo, cromo III y cromo VI y sus efectos. *Ciencia & Tecnología para la Salud Visual y Ocular*, 8(1), 77-88.

Montenegro Gómez, S. P., Barrera Berdugo, S. E., Chiriví Salomón, J. S., Pulido Pulido, S. Y., Sepúlveda Casadiego, Y. A., Vinasco Guzmán, M. C., & Palomino Leiva, M. L. (2019). Prevención de la erosión y conservación de la fertilidad del suelo. En S. P. Montenegro Gómez, & J. A. Osorio, *Servicios ecosistémicos: Un enfoque introductorio con experiencias del occidente Colombiano* (págs. 172-187). Bogotá: UNAD Sello Editorial. Recuperado de <http://hemeroteca.unad.edu.co/index.php/book/article/view/3124/3133>

Mora Marín, M. A., Ríos Pescador, L., Ríos Ramos, L., & Amario Charry, J. L. (2017). Impacto de la actividad ganadera sobre el suelo en Colombia. *Ingeniería y Región*, 17, 1-12. doi:10.25054/22161325.1212

Nordberg, G. (1998). *Enciclopedia de salud y seguridad en el trabajo*. Madrid, España: Ministerio de Trabajo y Asuntos Sociales, Subdirección General de Publicaciones.

Peña-Salamanca, E. J., Madera-Parra, C., Sánchez, J. M., & Medina-Vásquez, J. (2013). Bioprospección de plantas nativas para su uso en procesos de biorremediación: caso *Heliconia psittacorum* (*heliconiaceae*). *Revista de la Academia Colombiana de ciencias exactas, físicas y naturales*, 37(145), 469-481. doi:10.18257/raccefyn.29

Pérez O, M. M., & Betancour V, A. (2016). Impactos ocasionados por el desarrollo de la actividad minera al entorno natural y situación actual de Colombia. *Sociedad y Ambiente*, 4(10), 95-112.

Pino Rodríguez, N. J., Carvajal Acevedo, S., Gallo, A., & Peñuela Mesa, G. (2012). Comparación entre bioestimulación y bioaumentación para la recuperación de suelos contaminados con diesel. *Producción + Limpia*, 7(1), 101-108.

Presidencia de la República. (1984). Decreto 1594 del 26 de Junio. Bogotá D.C.: Ministerio de Agricultura.

Rodríguez-Cousto, S. (2016). Potential of White-Rot Fungi to Treat Xenobiotic-Containing Wastewater. En D. Purchase, *Fungal Applications in Sustainable Environmental Biotechnology. Fungal Biology* (págs. 91-113). Cham, Alemania: Springer. doi:10.1007/978-3-319-42852-9_5

Roy, A., Dutta, A., Pal, S., Gupta, A., Sarkar, J., Chatterjee, A., Kazy, S. K. (2018). Bio-stimulation and bioaugmentation of native microbial community accelerated bioremediation of oil refinery sludge. *Bioresource Technology*, 253, 22-32. doi:10.1016/j.biortech.2018.01.004

Rozo, C., & Dussan, J. (2010). Análisis de transferencia horizontal de genes en ensayos de biorremediación con grasas recalcitrantes. *Revista Colombiana de Biotecnología*, XII(1), 22-31. doi:10.15446/rev.colomb.biote

Sierra Praeli, Y. (17 de enero de 2019). Minería ilegal: estudio revela la peor devastación en la historia de la Amazonía. *Mongabay*. Recuperado de <https://es.mongabay.com/2019/01/mapa-mineria-ilegal-seis-paises-amazonia/>

Stevenson, F. (2018). Social Determinants of Health. En G. Scambler, *Sociology as Applied to Health and Medicine* (págs. 23-37). Macmillan International Higher Education.

Subashchandrabose, S. R., Ramakrishnan, B., Megharaj, M., Venkateswarlu, K., & Naidu, R. (2011). Consortia of cyanobacteria/microalgae and bacteria: Biotechnological potential. *Biotechnology Advances*, 29(6), 896-907. doi:10.1016/j.biotechadv.2011.07.009

Timmis, K. N., & Pieper, D. H. (1999). Bacteria designed for bioremediation. *Trends in Biotechnology*, 17(5), 201-204. doi:10.1016/S0167-7799(98)01295-5

Tobón Ramírez, C. (2013). Metabolismo social para el manejo sostenible de los recursos naturales. *El agua en la Cuenca Alta del Río Bogotá*. Universidad Nacional de Colombia. Bogotá, Colombia. Recuperado de <http://www.bdigital.unal.edu.co/39520/1/53108511.2013.pdf>

Tognato, C. (2018). Colombia: Oil and Civil Society. En I. Overland, *Public Brainpower* (págs. 91-106.). Cham, Alemania: Palgrave Macmillan.

Trujillo Quintero, H. F., Losada Cubillos, J. J., & Rodríguez Zambrano, H. (2017). Amazonía colombiana, petróleo y conflictos socioambientales. *Revista Científica General José María Córdova*, 15(20), 209-223. doi:10.21830/19006586.181

Tyagi, M., da Fonseca, M. M., & de Carvalho, C. C. (2011). Bioaugmentation and biostimulation strategies to improve the effectiveness of bioremediation processes. *Biodegradation*, 22, 231.

Velásquez Arias, J. A. (2017). Contaminación de suelos y aguas por hidrocarburos en Colombia. Análisis de la fitorremediación como estrategia biotecnológica de recuperación. *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*, 8(1), 151-167. Recuperado de <http://hemeroteca.unad.edu.co/index.php/riaa/article/view/1846/2065>

Velásquez, L., & Dussan, J. (2009). Biosorption and bioaccumulation of heavy metals on dead and living biomass of *Bacillus sphaericus*. *Journal of Hazardous Materials*, 167(1-3), 713-716. doi:10.1016/j.jhazmat.2009.01.044

Vera Solano, J. (2013). Tratamientos biorremediación para la eliminación de residuo de sales inorgánicas generados en laboratorios de Química general mediante el uso de técnica de lombricultura. *Revista ambiental agua, aire y suelo*, 4(1), 33-41.

Vidali, M. (2001). Bioremediation. An overview. *Pure and Applied Chemistry*, 73(7), 1163-1172. doi:10.1351/pac200173071163

Yuan, Q., Shen, Y., Huang, Y., & Hu, N. (2018). A comparative study of aeration, biostimulation and bioaugmentation in contaminated urban river purification. *Environmental Technology & Innovation*, 11, 276-285. doi:10.1016/j.eti.2018.06.008

Zimmermann, M. L. (21 de agosto de 2018). Colombia: industria petrolera pone en peligro el último relicto de bosque de niebla del Tolima. *Mongabay*. Recuperado de <https://es.mongabay.com/2018/08/bosque-de-niebla-peligro-petroleo-tolima-colombia/>