



***PERSPECTIVAS PARA LA BIORREMEDIACIÓN DE SUELOS CONTAMINADOS
CON PLOMO EN COLOMBIA.***

RICHARD ENRIQUE IBARRA RAMOS

**MONICA ALEJANDRA RODRIGUEZ ARISTIZABAL
DOCENTE ASESOR**

**UNIVERSIDAD COLEGIO MAYOR DE CUNDINAMARCA
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA SALUD
PROGRAMA DE BACTERIOLOGÍA
TRABAJO DE GRADO
BOGOTÁ, NOVIEMBRE 2022**



**PERSPECTIVAS PARA LA BIORREMEDIACIÓN DE SUELOS CONTAMINADOS
CON PLOMO EN COLOMBIA.**

APROBADA: _____

JURADOS: _____

DOCENTE ASESOR: MONICA ALEJANDRA RODRIGUEZ ARISTIZABAL

**UNIVERSIDAD COLEGIO MAYOR DE CUNDINAMARCA
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA SALUD
PROGRAMA DE BACTERIOLOGÍA
TRABAJO DE GRADO
BOGOTÁ, NOVIEMBRE 2022**

DEDICATORIA

Quiero dedicar este trabajo a mis padres Richard Ibarra y Dolquis Ramos, puesto que el amor y el apoyo que me brindaron a lo largo de mi desarrollo académico hizo posible la culminación de esta monografía.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco en primer lugar a mis padres Richard Ibarra y Dolquis Ramos, que con su cariño, esfuerzo y dedicación me apoyaron a lo largo de mi proceso académico que culmina con la entrega de este documento, agradezco también a Valentina Fernández pues su compañía y apoyo a lo largo de proceso tuvo un papel muy significativo para mí, agradezco a la Universidad colegio mayor de Cundinamarca así como a sus docentes que a lo largo de la carrera transmitieron de manera asertiva sus conocimientos y experiencias, finalmente pero no menos importante agradezco enormemente la asesoría de la docente Mónica Rodríguez pues sin su paciencia la realización del trabajo habría sido imposible.

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
1. INTRODUCCIÓN	8
2. ANTECEDENTES	11
3. MARCO CONCEPTUAL	16
3.1 <i>Plomo</i>	16
3.2 <i>Contaminación del Suelo con Pb</i>	17
3.3 <i>Factores que afectan los procesos de biorremediación</i>	18
3.3.1 <i>Temperatura</i>	17
3.3.2 <i>Humedad</i>	20
3.3.3 <i>pH</i>	20
3.3.4 <i>Nutrientes</i>	20
3.4 <i>Organismo Biorremediador</i>	21
4. MARCO DE REFERENCIA	21
4.1 <i>Características generales de los suelos colombianos</i>	21
4.2 <i>Contexto Socioambiental de la contaminación de suelos con Pb en Colombia.</i>	23
5. MARCO LEGAL	23
6. METODOLOGÍA	25
7. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	26
7.1 <i>Estrategias de biorremediación de suelos contaminados con plomo</i>	29
7.2 <i>Perspectivas para la biorremediación de suelos contaminados con Pb en Colombia</i>	44
8. CONCLUSIONES	49
9. RECOMENDACIONES	50
10. BIBLIOGRAFÍA	51

ÍNDICE DE FIGURAS

1. Figura 1. Número de artículos encontrados según el idioma: español e inglés	27
2. Figura 2. Distribución de artículos encontrados teniendo en cuenta el país	27
3. Figura 3. Distribución de artículos encontrados teniendo en cuenta el año de publicación de la información.	28
4. Esquema general de las diferentes rutas que pueden establecerse en estrategias de fitorremediación	38

ÍNDICE DE TABLAS

1. Características generales de la fitorremediación de suelos contaminados con Pb **35**
2. Consideraciones para la biorremediación de pb de acuerdo con los pisos térmicos en Colombia **42**



**UNIVERSIDAD COLEGIO MAYOR DE CUNDINAMARCA
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA SALUD
PROGRAMA DE BACTERIOLOGÍA**

***PERSPECTIVAS PARA LA BIORREMEDIACIÓN DE SUELOS CONTAMINADOS
CON PLOMO EN COLOMBIA.***

RESUMEN

En Colombia, la contaminación de suelos con metales pesados es una problemática que afecta a zonas rurales y urbanas como consecuencia de actividades antrópicas como la minería y la agricultura, así como las dinámicas propias de los procesos sociales de desarrollo urbano. En ese sentido y teniendo en cuenta los servicios ecosistémicos que presta el suelo, es necesario encontrar alternativas que permitan dar un uso y manejo sostenible a este recurso. De acuerdo con esto, la biorremediación en respuesta a los problemas de contaminación de suelos con metales pesados, ha evaluado el uso de organismos y microorganismos para disminuir las concentraciones de estos contaminantes. Sin embargo, aún existe desconocimiento sobre las implicaciones de la contaminación con metales pesados, las características de los contaminantes y las interacciones que se dan en los procesos de biorremediación en el suelo, teniendo en cuenta la diversidad de ecosistemas que se presentan en el país, además de las características socioambientales propias de las zonas contaminadas. Con base en este contexto, esta revisión presenta las perspectivas para la biorremediación de suelos contaminados con plomo en el país, haciendo el análisis de las técnicas usadas y cómo podrían ser aplicadas de acuerdo a las características específicas de los suelos afectados. De acuerdo con esto, en Colombia comúnmente se usa la bioestimulación como un eficaz complemento a todas las estrategias de biorremediación presentadas en este trabajo, sin embargo, hay que tener en cuenta las interacciones que se dan en el suelo entre microorganismos, las condiciones ambientales al momento de la aplicación del tratamiento, y las características y necesidades de las poblaciones microbianas que se van a bioestimar.

PALABRAS CLAVES: *Biorremediación, suelos, contaminación, plomo, microorganismos*

1. INTRODUCCIÓN

El suelo es una composición heterogénea y diversa, resultado de las diferentes interacciones dadas entre la geosfera, la hidrosfera, la atmósfera y la biosfera; todos esos sistemas convergen en la llamada zona crítica.⁽¹⁾ Por ello es necesario entender que el suelo como constituyente de la superficie geológica de la tierra no puede ser entendido como un componente aislado de los demás medios físicos y químicos en los que se desarrolla la vida, por el contrario debe ser reconocido como un sistema frágil, cuyas reparaciones son lentas y complicadas por lo que es considerado un recurso natural no renovable a corto plazo.⁽¹⁾ Entre los componentes que se pueden hallar en el suelo de forma natural se encuentran los metales pesados, su depósito natural se deriva de procesos de meteorización, erupciones volcánicas, erosión e incendios forestales, por lo general se encuentran en concentraciones que no perjudican las diferentes formas de vida⁽²⁾ sin embargo en cantidades elevadas, los metales pesados (MP) se transforman en contaminantes muy peligrosos para el medio ambiente, esto aunado a otras características como la persistencia, bioacumulación, biotransformación, hace que se encuentren contaminando los ecosistemas por prolongados periodos, ya que su degradación por métodos naturales es complicada⁽³⁾

Dentro de los MP que se encuentran de forma habitual en el suelo está el plomo (Pb), que es un elemento anfótero, lo que significa que tiene la capacidad de formar sales a partir de los ácidos, como el ácido plúmbico, que forma compuestos óxidos y organometálicos; el Pb se encuentra de manera natural en el ambiente en forma de una amplia diversidad de minerales, entre los que se destacan primordialmente la galena (PbS), la anglesita (PbSO₄) y la cerusita (PbCO₃)⁽⁴⁾ El Pb en el suelo, se encuentra en mayor medida en los estados de oxidación de Pb²⁺ y Pb⁴⁺ sin embargo estos compuestos no participan de forma esencial en el metabolismo de las plantas; por lo que la absorción, en aquellos casos donde se presenta, se realiza de forma pasiva, además la tasa de absorción de MP se puede ver disminuida al aumentar el pH siendo compuestos como el PbCO₃ insolubles⁽⁵⁾

La asimilación de los MP por parte de las plantas se ejecuta esencialmente desde el suelo, mediante acción de las raíces, esta acción resulta influenciada por varios factores: la clasificación del suelo, la variabilidad de temperatura, el pH, aireación del suelo, condiciones Redox, el uso de fertilizantes, la especie vegetal, el estadio

del desarrollo y las particularidades del sistema radicular, entre otros ⁽¹⁾. En el momento en que los iones metálicos han sido absorbidos, pueden desplazarse por la totalidad de la planta, este movimiento dependerá del tipo de metal absorbido, de los organelos y órganos en los que la planta deposite el metal, así como de su edad; pero en general, dependen del porcentaje de los elementos que son movilizados al interior de las plantas ⁽¹⁾

Por otra parte, el Pb afecta varios sistemas respecto a la salud humana, por ejemplo, en el sistema nervioso puede llegar a generar daños a las neuronas especialmente las encontradas en el cerebro, también afecta la médula ósea y los riñones, donde es frecuentemente encontrado, específicamente en sistema tubular de las nefronas ⁽⁶⁾. De esa manera se entiende el Pb como un contaminante de afectación sistémica que no puede ser menospreciado como potencial problema de salud pública.

El depósito de Pb en el suelo también tiene origen antrópico, en Colombia existen varias localizaciones y distintas actividades que favorecen el aumento de las concentraciones de este MP en suelo; por ejemplo la zona del Magdalena Medio, es uno de estos puntos donde la industria petroquímica representa un peligro para la salud pública, dado que algunos MP pueden incorporarse con facilidad a la cadena trófica, lo que significa que pueden ser absorbidos por las plantas, posteriormente ingeridos por ganado y finalmente consumidos por los seres humanos⁽⁷⁾

En Colombia, particularmente, la región de la Mojana, es uno de estos puntos donde las actividades mineras han generado daño, reflejado no solo en el ambiente, sino también en la salud humana, provocando genotoxicidad en las poblaciones aledañas expuestas a la contaminación por MP ⁽⁸⁾. Estos efectos genotóxicos y su relación con la concentración de MP han sido evaluados en muestras de sangre de las personas expuestas en esta zona, encontrándose que las concentraciones de los metales sobrepasan los límites establecidos por la OMS, de manera que los efectos genotóxicos hallados posiblemente se encuentren asociados a la presencia de dichos metales en sangre ⁽⁸⁾

De igual manera, en el alacrán, departamento de Córdoba la industria agrícola y la explotación ilegal de oro, han provocado numerosos daños en el ambiente, relacionados con la alteración de las propiedades físicas, químicas y biológicas de los recursos naturales contaminados, y el daño directo a los ecosistemas y cadenas tróficas ⁽⁹⁾. A pesar de que los anteriores casos se presentan en zonas rurales, los procesos antropogénicos asociados al depósito de MP en suelo, van más allá de las de la industrias y sus fábricas contaminantes, y más allá del suelo

de los campesinos que se ven afectados, pues en las ciudades, uno de los factores que se relaciona con el aumento de MP, específicamente Pb en el ambiente es el tráfico, el cual favorece la acumulación en las zonas urbanas; por lo cual, esta fuente también debe ser considerada relevante ya que estas zonas albergan un alto porcentaje de la población mundial en la actualidad, y a diario se presenta la exposición directa a este contaminante, en ocasiones sin tener conocimiento de esta situación⁽¹⁰⁾

En ese sentido, la problemática de contaminación por Pb en el suelo, constituye un dilema de salud pública y ambiental ampliamente estudiado en países del primer mundo, pero del que poco se conoce en países como Colombia, aunque existen algunos estudios que reflejan los orígenes y efectos del Pb en el ambiente y la salud de la población colombiana ⁽¹¹⁾⁽¹²⁾⁽¹³⁾. De acuerdo con este contexto es necesario buscar alternativas que permitan contribuir con la disminución de la contaminación por MP y/o la recuperación de suelos afectados; en respuesta a esta situación, la biorremediación, entendida como el proceso realizado por organismos vivos para remediar un ambiente contaminado, podría ser una estrategia sostenible para los suelos afectados; específicamente los microorganismos mediante sus interacciones y diversidad metabólica pueden facilitar o mediar los procesos de bioacumulación de MP; dentro de estos procesos bioquímicos se destacan la biosorción, biomineralización, acumulación intracelular y transformación catalizada por enzimas mediante procesos redox⁽²⁾.

Estas características pueden ser propias de diversos microorganismos, sin embargo bacterias y hongos, microscópicos y macromicetos son conocidos por emplear estas herramientas bioquímicas y son los más utilizados en procesos de biorremediación, pero la realidad es que otros organismos también se han estudiado por su potencial para biorremediar, como el uso de plantas para llevar a cabo estrategias de fitorremediación, o el uso de invertebrados terrestres como bioacumuladores de MP en suelo⁽⁷⁾.

Aunque existen varias investigaciones sobre el uso de organismos para biorremediar suelos contaminados por diferentes sustancias, entre estas los MP y particularmente el Pb, en Colombia todavía hacen falta estudios que permitan establecer estrategias de biorremediación aplicadas en contextos específicos, no solo por falta de investigación en el tema sino también porque en ocasiones no se tienen en cuenta los diferentes factores que pueden influir en dichas estrategias.

En ese sentido el presente trabajo se realizó con el objetivo de analizar la información disponible acerca de la biorremediación de suelos contaminados con Pb en Colombia; para dar respuesta a este objetivo se tuvieron en cuenta dos

objetivos específicos, identificar las estrategias de biorremediación de suelos contaminados con plomo usadas en Colombia y establecer los retos y perspectivas para biorremediación suelos contaminados con Pb en Colombia.

2. ANTECEDENTES

En Colombia los estudios de la contaminación por MP se han enfocado principalmente en evidenciar las fuentes de dicha contaminación más no en presentar alternativas para la recuperación de ambientes degradados por estos elementos, un artículo publicado en el año 2004, llamado “*Los residuos sólidos municipales como acondicionadores de suelos*” concluyó que la estrategia de compostaje puede presentar riesgos y causar daños al ser empleado como remediador o acondicionador de suelos, debido a que pueden depositarse exceso de materiales inertes, particularmente para el Pb se habla de que una concentración por encima de 300 mg/k ó ppm no es recomendable ⁽¹³⁾

Con relación al uso de acondicionadores para el suelo, fertilizantes o enmiendas para suplir micro y macronutrientes, se ha analizado que existen varias problemáticas ocasionadas por el exceso, sobre todo de los micronutrientes no esenciales, como el Pb, por ello es importante llevar a cabo prácticas preventivas con el objetivo de reducir la toxicidad, entre éstas, llevar a cabo caracterizaciones de los estados de disponibilidad que puede llegar a tener el elemento para aplicar solo la cantidad necesaria de acuerdo al cultivo; emplear aguas de riego que cumplan con estándares de calidad que tengan niveles bajos o que no posean elementos menores; de igual forma no utilizar compuestos o materiales ricos en elementos menores, como las aguas negras, los lodos, aguas ricas en Selenio o Molibdeno; en la medida de lo posible procurar no emplear fertilizantes orgánicos con abundantes elementos menores, especialmente si la dosis a aplicar es alta o si las condiciones del suelo son precisas⁽¹⁴⁾. Se ha encontrado por ejemplo que suelos regados con agua proveniente del río Bogotá proveniente de su cuenca alta han mostrado concentraciones elevadas de metales como Pb, Ni, Cr, Co y V, los cuales potencialmente tóxicos para la salud pública humana y animal sobre todo teniendo en cuenta que se pueden ingerir productos agrícolas que han crecido en estos suelos contaminados ⁽¹⁴⁾

Posteriormente empiezan a desarrollarse trabajos aplicados con el fin de disminuir la concentración de contaminantes; se evidenció por ejemplo que el hongo *Phanerochaete chrysosporium* podría tener potencial para degradar MP, una investigación llamada “*Determinación de la capacidad de remoción de cadmio, plomo y níquel por hongos de la podredumbre blanca inmovilizados*” concluyó que

Phanerochaete chrysosporium resultó ser la cepa con mayor tolerancia a Pb, llegando a crecer en concentraciones de 10000 mg/L, con tiempos mínimos de 2, 5 y 3 días, al final del estudio se encontró que *P. chrysosporium*, bajo condiciones no estériles tuvo la capacidad de remover Pb en la mezcla contaminada a razón de 300 ppm, alcanzando su máximo porcentajes sobre el 57% y en células libres e inmovilizadas en 9%. Demostrando que este microorganismo es una cepa prometedora para la recuperación de aguas contaminadas con elevados niveles de Pb⁽⁴⁾

Estudios realizados en el departamento de Nariño han evidenciado que la problemática por contaminación de MP va más allá del Pb, pues compuestos como las sales de Cromo son comúnmente usadas en la industria del cuero, sus desechos son descartados tanto directa como indirectamente a los cuerpos de agua más importantes, generando en el proceso desequilibrio ecológico y biogeoquímico a su paso⁽²⁰⁾, frente a esto, investigaciones con microorganismos han permitido aislar bacterias obtenidas de muestras de agua del Río Pasto que podrían tener aplicaciones biotecnológicas, sobre todo en términos de biorremediación de ambientes contaminados por MP, en ese sentido se ha evaluado la capacidad de reducción de Cr(VI) de estas bacterias en procesos de fermentación realizados en medios de cultivo artificiales, con el fin de seleccionar los aislamientos que presentaron un óptimo crecimiento en medios modificados con Cromo hexavalente, a partir de este estudio abren perspectivas importantes para implementar estrategias de biorremediación que permitan la recuperación de efluentes contaminados con MP ⁽²⁰⁾

Con respecto al uso de otros microorganismos, como los Hongos, Sánchez, Marrugo & Urango, realizaron un estudio de remoción de Pb en un efluente minero por medio de biomasa fúngica de *Penicillium sp*, en este trabajo se menciona que los hongos tienen variadas propiedades bioquímicas, enzimáticas y genéticas que los convierten en microorganismos idóneos para ser usados en la limpieza de ecosistemas contaminados con MP. Esta investigación se llevó a cabo tomando 10 muestras de suelo al azar de la mina el Alacrán (Córdoba-Colombia), los aislamientos de la cepa de *Penicillium sp* proveniente de un suelo circundante a una zona minera arrojan resultados que indican que estos podrían ser utilizados como un biosorbente con buena rentabilidad, además de ser un microorganismo poco exigente por lo que es fácilmente cultivable para emplearlo en la eliminación de los iones metálicos de ecosistemas contaminados ⁽²¹⁾.

Se han analizado la implementación de tecnologías que implican el uso de microorganismos resistentes y/o tolerantes, así como plantas con capacidad hiperacumuladora de MP en ensayos a nivel in vitro y en campo con resultados

prometedores; afirmando así que el uso de plantas hiperacumuladoras y de microorganismos tolerantes y resistentes a los MP bajo las condiciones adecuadas pueden ser una estrategia prometedora para contrarrestar el efecto tóxico de estos contaminantes ⁽²²⁾. Así mismo, se han estudiado los mecanismos bioquímicos y genéticos asociados a la biorremediación de MP, concluyendo que la microremediación y la fitorremediación son consideradas tecnologías promisorias en el tratamiento de la contaminación de MP, su utilización tanto *in vitro* como *in situ* campo demuestran el potencial biotecnológico en la recuperación de ambientes afectados. El conocimiento de los procesos a nivel metabólico y genético de microorganismos y plantas, permite el desarrollo y la aplicación de técnicas efectivas en procesos de biorremediación ⁽²³⁾.

Retomando el uso de los hongos, se puede decir que estos microorganismos han sido los más usados en la biorremediación de suelos contaminados con Pb, sobre todo procesos de bioadsorción han demostrado ser útiles en este propósito; por ejemplo se ha probado la de la concentración de actinomicetes sobre la remoción de MP en suelos contaminados, concluyendo que el tratamiento de actinomicetos más suelo contaminado tiene mayor efectividad a las 36 horas a una concentración de 6×10^9 UFC/ml, siendo los valores máximos de remoción Zn (77.41%), As (48.79%) y Pb (33.1)⁽²⁴⁾

También se ha visto una relación simbiótica de los hongos con las plantas, observándose asociaciones positivas y significativas, bastante representativa entre el porcentaje de plantas que muestran relaciones simbióticas y la concentración de Pb y Cd en los tejidos correspondientes a la raíz, el tallo y las hojas. Potenciando la colonización micorrízica y la capacidad extractora de Pb y Cd ⁽⁵⁸⁾. Los hongos en suelos contaminados pueden crecer en presencia de MP debido a su gran capacidad de adaptación fisiológica además de desempeñar funciones en el ambiente asociadas con el incremento de la capacidad de absorción de MP y por lo tanto con la biorremediación ⁽⁵⁹⁾. Así mismo, *Penicillium sp.* aislado de suelos provenientes de la industria minera contaminados por MP, se ha usado como un potencial biosorbente de estos contaminantes, Los resultados a ensayos de laboratorio han mostrado una alta capacidad de este hongo para eliminar Pb (II), Cd (II) y Hg (II). Los resultados indican que los hongos aislados de los suelos contaminados con desechos mineros, podrían ser utilizados como biosorbentes rentables y fácilmente cultivables para la eliminación de los iones metálicos de ambientes contaminados de MP ⁽²¹⁾.

Otro estudio con macromicetos de la Bahía de Cispatá analizó la contaminación por MP y su bioacumulación; se cuantificaron las concentraciones de MP Ni, Cu, Mn, Cr, Zn, Co, Hg, Pb y Cd y su capacidad de movilización desde el sedimento y sustrato hasta las estructuras aéreas propias de los macromicetos, resaltando su

capacidad bioacumuladora; el estudio concluye que estos datos cuantitativos apoyan la hipótesis de que estos hongos podrían utilizarse como estrategias para mitigar el impacto de los contaminantes metálicos de origen antrópico, lo que reviste gran interés para futuras investigaciones⁽²⁵⁾. La literatura muestra resultados favorables respecto al uso de macromicetos en estrategias de bioremediación de Pb en suelo, entre los mayores bioacumuladores de Pb se han descrito los hongos *Chandrosterum*, *Pleurotus Ostreatus*, *Lentinus edodes* y *Agaricus bisporus*, que han demostrado remover Pb sin exceder los límites permisibles presentes en la legislación ambiental⁽²⁵⁾⁽⁶⁵⁾⁽⁶⁶⁾.

Por otra parte, estrategias como el uso de reactores tipo Batch donde no existe flujo de entrada ni de salida, también han sido usadas en Colombia, aunque son escasas y por lo general se realizan en condiciones y proporciones experimentales. Particularmente los reactores tipo Batch de flujo vertical en el país han sido estudiados por permitir el uso simultáneo de procesos fisicoquímicos y microbiológicos para el tratamiento y descontaminación de las aguas residuales; estos han sido aplicados por ser una opción efectiva y de bajo costo para el tratamiento tanto de agua provenientes del sector alimentario como el industrial⁽³⁹⁾. El uso de esta clase de reactores en la biorremediación de MP se ha enfocado en ensayos que pretenden desarrollar metodologías eficientes para la remoción de Cromo (Cr)⁽⁴⁰⁾⁽⁴¹⁾ que es uno de los MP de mayor importancia ambiental dado que puede ser encontrado en altas concentraciones en el general de desechos producidos por las actividades industriales⁽⁴¹⁾. Cabe resaltar que los reactores tipo Batch no sólo tienen aplicación en ámbito de la biorremediación, también pueden ser usados en procesos de producción de biocombustibles o biogás⁽⁴¹⁾.

Finalmente, un trabajo más reciente presenta los estudios publicados sobre biorremediación en Colombia entre los años 2016 a 2018, se presenta información sobre los departamentos y ciudades donde se realizaron, así como el tipo de biorremediación y los tipos de microorganismos usados. De este estudio se puede concluir que sobre todo el conocimiento en esta área está orientado al uso de bacterias y las estrategias de bioestimulación, y su principal propósito ha sido la disminución de la contaminación por MP en el suelo, relacionados con el uso de agroquímicos⁽⁴⁸⁾. El común denominador en los resultados presentados en estos estudios es un alto rendimiento bacteriano en condiciones ideales, y cómo esto puede llegar a influir en los porcentajes de reducción de Pb hasta en un 98,3%; adicionalmente se resalta que la mitad de las investigaciones se han realizado en Cundinamarca, esto es importante teniendo en cuenta que actualmente la industria se concentra cerca del 80% en Cundinamarca y Bogotá⁽⁴⁷⁾.

Aunque la información presentada hace referencia a los antecedentes en Colombia, la contaminación por MP en suelo es un problema de interés mundial, debido a su toxicidad, se conoce que llegan al medio ambiente impulsados en menor medida por fenómenos naturales, pero principalmente la mayor fuente de contaminación es la industrialización extensiva, que ocasiona efectos nocivos en los seres vivos, causa daños en los órganos tanto de los animales como de los humanos y representa una grave amenaza en los ecosistemas ya que persisten durante largo plazo e incluso pueden almacenarse en redes alimentarias convirtiéndose en un problema de salud pública ^(105,111,112).

Por otra parte, estudios realizados han evidenciado que la contaminación por MP en suelo también inhibe la biodegradación de los compuestos orgánicos clorados, que son otro tipo de contaminantes ambientales, por ejemplo el acetocloro, un herbicida de uso común que en conjunto con el Pb pueden ocasionar graves problemas a nivel del suelo; además los efectos citotóxicos de los MP como el Pb reducen considerablemente la eficacia de los procesos de biorremediación microbiana realizados con el objetivo de eliminar los contaminantes químicos en el suelo, específicamente por que interactúan con enzimas relacionadas con el metabolismo microbiano impidiendo su correcto funcionamiento ^(105,106,111,112).

De igual manera, algunos autores ^(106, 107, 113) han identificado que la contaminación por MP puede disminuir la eficiencia del funcionamiento del suelo y el ciclo de elementos esenciales debido a la necesidad que causa en los microorganismos de gastar una mayor cantidad de energía para mantener y reparar las células, sobre esto se ha mencionado que una posible solución podría ser promover la identificación de cepas microbianas tolerantes a los metales pesados y/o con la capacidad de degradar contaminantes químicos, por ejemplo en cepas de *S. pasteurii* biotratadas se ha observado una reducción significativa de las concentraciones de MP y en general las bacterias que hidrolizan la urea tienen ventajas significativas ya que pueden acelerar la precipitación de metales al aumentar el pH ^(106, 107, 113).

También se ha encontrado que la actividad microbiana tiene el potencial de mitigar los impactos de los desechos de las minas de metales pesados, un enfoque que podría resultar de interés para estudios posteriores ⁽¹¹³⁾. Y con relación a los estudios de biorremediación que emplean la bioaumentación se ha encontrado una máxima eficiencia en cuanto a la biorremoción de MP, evidenciándose que los suelos tratados con bioaumentación tienen la mejor eliminación de metales pesados en comparación con los suelos usados como control ⁽¹¹⁴⁾.

Otras investigaciones han podido determinar el rendimiento de las cepas bacterianas en la eliminación de Pb(II), encontrando que se correlaciona fuertemente con condiciones iniciales de pH y temperatura, así mismo, la eficacia de estas cepas para eliminar Pb (II) y Cd (II), de una matriz acuosa ha demostrado ser considerablemente mayor cuando se utiliza un cultivo bacteriano mixto en lugar de puro ⁽¹⁰⁸⁾, sin embargo se requiere una mayor demostración de esta tecnología a escala de campo completa, al igual que más investigación para optimizar la biorremediación y para investigar estrategias de remediación combinadas.

Desde la perspectiva de la micorremediación la mayoría de los estudios han demostrado que las células fúngicas activas y sin vida desempeñan un papel importante en la absorción de productos químicos inorgánicos, adicionalmente el metabolito secundario denominado como aflatoxina B1 (AFB1), que es una toxina natural capaz de degradar algunas formas químicas del Pb en el suelo ha resulta de gran interés ^(109, 113). La eliminación de contaminantes por medio de agentes biológicos como microorganismos, especialmente hongos, ha llamado la atención debido a la naturaleza del proceso y al hecho de que no presenta ningún efecto secundario a largo plazo para el ecosistema tratado ⁽¹¹²⁾.

Aunque el enfoque de la biorremediación de Pb sobretodo se encuentra relacionado al uso de microorganismos, algunos estudios con macroinvertebrados han evidenciado resultados relevantes, particularmente en China una investigación encontró que cuatro especies de lombrices de tierra pueden tener potencial para la biorremediación de suelos contaminados por MP como Cu, Cd, Pb y Zn, en este estudio el análisis de componentes principales mostró que la actividad de las lombrices de tierra mejora la calidad del suelo ⁽¹⁰⁸⁾.

3. MARCO CONCEPTUAL

3.1 Plomo

El plomo es un MP de símbolo (Pb), geológicamente dicho MP no pertenece a los ciclos biológicos de los ecosistemas dado que su origen radica en el uranio, otro elemento de características radiactivas cuya desintegración genera un elemento de número atómico 82 y peso atómico 207.19, sus valencias químicas normales en el ambiente son dos y cuatro. posee una densidad relativa de 11.4 a 16°C (61 °F), suele ser de color azulado o color gris mate. Es un material flexible, inelástico, que se funde sin complicaciones a 327.4°C (621.3 °F) y hierve a 1725°C (3164 °F). Relativamente resistente a la corrosión de los ácidos sulfúrico y clorhídrico, pero

se disuelve lentamente en ácido nítrico. El Pb es un elemento anfótero, ya que tiene la capacidad de formar tanto sales de Pb de los ácidos, así como sales metálicas del ácido plúmbico; en ese orden de ideas forma muchas sales, óxidos y compuestos organometálicos ⁽⁴⁾.

El interés ambiental por los MP como contaminantes del suelo está relacionado con su naturaleza acumulativa, su casi nula biodegradabilidad, su capacidad de pasar desapercibida mientras se acumula en el perfil del suelo hasta alcanzar concentraciones tóxicas adicionalmente su interacción con diferentes características del suelo que determinan su capacidad de acumulación, movilidad y biodisponibilidad hacia otros constituyentes del ambiente, sobre todo en el caso de los suelos con vocación agrícola, los MP se convierten en una problemática que tiene que ser estudiada con más detalle⁽²⁹⁾; las concentraciones naturales de Pb en el suelo no contaminado están entre 5 y 25 mg/Kg, en el caso de las áreas contaminadas se pueden encontrar en concentraciones de hasta 1000 veces más alta; recientes estudios informan que actualmente puede haber más de 400 a 1.000 veces de Pb nuestro sistema óseo que hace 400 años, debido a que la presencia de este metal en productos alimenticios e industriales es relativamente común ⁽³⁰⁾. Algunos datos relevantes del Pb en el suelo son: presión de vapor a 25°C <0,1, Persistencia: permanente, coeficiente de adsorción (Koc): 4,297; este coeficiente refleja una unidad de medida que describe la tendencia de un compuesto orgánico a ser absorbido por los suelos o sedimentos⁽³¹⁾⁽³²⁾ El Koc de cada contaminante es único, Además de independiente de las propiedades del suelo. Los valores del Koc van de 1 a 10. Un Koc elevado significa que el contaminante problema se adhiere firmemente en la materia orgánica del suelo.

⁽³¹⁾⁽³²⁾

En ese sentido, con respecto a sus interacciones en el suelo, se entiende que el Pb es un contaminante de bajo potencial para volatilizarse por lo que es retenido en el suelo; las formas estables de Pb en suelo poseen un Koc bajo por lo que se procesan, que involucren la fijación a la materia orgánica pueden verse afectados, esto de la mano con la persistencia permanente de este metal en el suelo, lo cual termina de constituir el panorama general de la problemática por contaminación de Pb en Colombia, sobre todo teniendo en cuenta que el país posee gran diversidad de climas, pisos térmicos y tipos de suelo⁽³¹⁾.

3.2 Contaminación del Suelo con Pb

En términos generales la movilidad de los metales en suelo es muy baja, por ello es común encontrar una concentración más marcada en los primeros centímetros del terreno contaminado e incluso luego de procesos de lixiviación a horizontes

inferiores se encuentran valores de metales en muy pequeñas cantidades ⁽³⁶⁾. En suelos con un pH ácido existe una reducida capacidad de adsorción y por lo tanto aumenta la disponibilidad de Pb ⁽³⁶⁾, además un pH elevado provocan la precipitación de los MP en hidroxicomplejos ⁽³⁷⁾. Esto es importante teniendo en cuenta que en el país preponderan los denominados suelos ácidos y extremadamente ácidos, (pH menor de 5.5) después están los suelos moderadamente ácidos y neutros (pH 5.5 - 7.5), y finalmente los suelos básicos y alcalinos ⁽³⁸⁾. Al ser Colombia un país con un clima predominantemente húmedo, el exceso de precipitación lava o lixivía los compuestos básicos y los cationes que habitualmente están en el suelo, tales como calcio, magnesio, potasio y sodio ⁽³⁴⁾. En el momento en que estos elementos son eliminados, los suelos desarrollan un proceso de acidificación; sin embargo, en Colombia también se conocen territorios sobre todo en la región Caribe y en gran parte de los valles interandinos en los existen condiciones básicas o alcalinas ⁽³⁴⁾.

Por otra parte, los óxidos e hidróxidos de Fe y Mn facilitan en gran medida la retención de MP, estos se encuentran habitualmente diseminados en el suelo lo que los hace compuestos con un comportamiento muy activo. Poseen una baja cristalinidad y su forma en el ambiente es pequeña molecularmente hablando, tienen una alta capacidad sorcitiva, especialmente Cu y Pb. Respecto a las interacciones ambientales entre las sales del suelo y los MP, se sabe que en principio el aumento de la salinidad incrementa la movilización de metales, sin embargo, posteriormente o conforme la concentración de sales vaya aumentando también aumenta la retención de los metales, los aniones Cl⁻ y sulfato tienden a formar compuestos más estables cuando se relacionan con Pb ⁽³⁶⁾.

Con respecto a los diferentes tipos de suelos, los suelos arcillosos tienden a retener un mayor cantidad de metales por los procesos de adsorción o en las interacciones de cambio de los minerales de la arcilla, a su vez los suelos arenosos carecen de capacidad de fijación de MP existiendo un gran riesgo de contaminación del nivel freático⁽³⁶⁾ además el Pb puede llegar a formar quelatos muy estables en este tipo de suelos, incluso en muchos casos se forman complejos organometálicos facilitando la solubilidad del metal, la disponibilidad y dispersión, esto tiene una relación directa con la degradación de estos elementos y/o compuestos por los organismos del suelo ocasionando la persistencia de estos contaminantes⁽³⁶⁾.

3.3 Factores que afectan los procesos de biorremediación

Para que los procesos de biorremediación ocurran es necesario considerar factores que afectan las interacciones que se dan entre los organismos / microorganismos y el suelo, factores como el pH, la temperatura, la humedad, los macro y micronutrientes pueden determinar las características fisicoquímicas implicadas en los procesos de biorremediación en el suelo ^{(26) (27) (28)} como la estructura molecular del contaminante y su concentración, lo cual puede influir de forma directa en la capacidad del potencial biorremediador de este contaminante

^{(26) (27) (28)} En ese sentido es importante mencionar que las concentraciones altas del contaminante en el suelo pueden dificultar las estrategias de biorremediación ya que pueden existir efectos tóxicos sobre los organismos/microorganismos, aunque estos tengan un alto potencial biotecnológico ^{(26) (27) (28)}.

Por otra parte, un suelo que carece de los nutrientes y las condiciones necesarias para facilitar los procesos metabólicos y las interacciones ecológicas, también tiene relación directa con las estrategias de biorremediación, por ejemplo, factores como el nitrógeno y el fósforo influyen en los tiempos de biodegradación de los contaminantes, en muchos casos prolongando los procesos biológicos ^{(26) (27) (28)}.

3.3.1 Temperatura

Este es uno de los factores ambientales más determinantes, ya que tiene una gran influencia en los procesos de biodegradación debido a sus efectos sobre la naturaleza física y química de los contaminantes y sobre la actividad metabólica de las poblaciones microbianas, ya que por lo general las tasas de biodegradación aumentan de forma directamente proporcional a la temperatura ⁽²⁶⁾⁽²⁷⁾⁽²⁸⁾. Sin embargo, este es uno de los factores que podría ser más difícil de controlar en condiciones *in vivo*, pues depende de las características climatológicas y edáficas propias de las zonas contaminadas ^{(26) (27) (28)}; la temperatura también influye en el comportamiento del contaminante, alterando su volatilidad, solubilidad y movilidad ^{(26) (27) (28)}.

En climas tropicales, por ejemplo, mantener una temperatura aproximada de 30 a 35°C es recomendable y económico ya que no requiere ajustes constantes, ni mantenimientos especializados, además algunos microorganismos duplican su capacidad biorremediadora cuando la temperatura se incrementa en 10°C ⁽²⁶⁾. Cuando la temperatura es excesiva y supera los 40°C se produce una disminución de la actividad microbiana, por lo cual se recomienda usar especies termófilas resistentes a altas temperaturas, de lo contrario los procesos de biorremediación pueden decrecer debido a la desnaturalización de enzimas y proteínas de las bacterias ⁽²⁶⁾. Por otra parte, cuando la temperatura está a 0°C o menos los procesos metabólicos y enzimáticos pueden detenerse y afectar sustancialmente

la biodegradación, en esta situación es recomendable el uso de microorganismos psicrófilos ⁽²⁷⁾.

3.3.2 Humedad

La humedad del suelo puede ser una limitante severa de los procesos de biodegradación, actúa como un medio que permite el transporte de nutrientes y oxígeno a la célula, por eso es fundamental en los procesos de biorremediación, no solo hace parte del desarrollo del proceso y las interacciones, si no también como parte del protoplasma bacteriano, por lo que es indispensable para los procesos que desencadenan su crecimiento y desarrollo ^{(26) (27)}; sin embargo un exceso de humedad dificulta el crecimiento bacteriano puesto que se disminuye la concentración de oxígeno total en el suelo, mientras que una poca o nula humedad priva el intercambio de gases, lo que facilita la aparición de zonas anaeróbicas en el suelo; adicionalmente una baja humedad disminuye la actividad metabólica bacteriana ^{(18) (19) (20) (26)}.

3.3.3 pH

El pH afecta las poblaciones microbianas, puesto que determina en gran medida la biodisponibilidad de fuentes de energía y carbono; un pH extremadamente alcalino o extremadamente ácido ralentiza la biodegradación, en ese sentido el rango óptimo para para estos procesos se encuentra entre 6 y 8 unidades, se ha descrito que para mantener eficientemente la capacidad degradante de los microorganismos, por periodos de tiempo extensos, el pH debe ser neutro, lo ideal entre 7.4 y 7.8, evitando al máximo las variaciones, sin embargo, todo depende del contaminante y los requerimientos especiales que cada microorganismo requiere para bioacumular MP ⁽¹⁸⁾⁽¹⁹⁾⁽²⁰⁾. El pH también posee efecto en cuanto a la disponibilidad de nutrientes, debido a que afecta la solubilidad y estado de los compuestos nutricionales en el suelo; por ejemplo, la solubilidad del P se optimiza a un pH de 6.5, mientras que el Pb pierde solubilidad a un pH de 7 a 8, en general para minimizar el transporte de metales se recomienda un pH mayor a 6 ^{(18) (19) (20)}.

3.3.4 Nutrientes

Son diversas sustancias químicas necesarias para la actividad microbiana y metabólica y deben encontrarse disponibles para facilitar su asimilación y síntesis; según los requerimientos propios de cada estrategia de biorremediación deben ser

controlados para aumentar la eficiencia y el buen desarrollo de la misma ⁽²⁶⁾. Los nutrientes se dividen en dos grandes grupos: macronutrientes, entre los cuales se encuentran el carbono (C), el Nitrógeno (N), El fósforo (P), El Potasio (K) y micronutrientes: oligoelementos o elementos minoritarios, que constituye un conjunto variado de elementos como el hierro (Fe), cobre (Cu), zinc (Zn), azufre (S), cobalto (Co), manganeso (Mn), magnesio (Mg) y calcio (Ca), normalmente no se incorporan en el proceso de biorremediación, puesto que el ecosistema provee estos elementos en cantidades suficientes, aun así es necesario conocer las condiciones nutricionales iniciales del suelo que se busca biorremediar, para analizar qué clase de proceso puede ser el más adecuado⁽²⁶⁾ ⁽²⁷⁾.

3.4 Organismo biorremediador

En procesos de biorremediación, sobre todo bioaumentación, es necesario una rigurosa selección de aquellas especies con capacidad adaptativa para crecer en presencia de MP, una manera efectiva para realizar esta selección de microorganismos ideales para los procesos de biorremediación es mediante el uso de la información genética que hace referencia a la capacidad metabólica de cada microorganismo, ya que este es un factor que puede llegar a limitar el proceso de biorremediación, pues si no se tiene la expresión genética necesaria para poder realizar el catabolismo o procesamiento de los MP por medio de las acciones de tipo enzimático, el microorganismo no será capaz de asimilar o interactuar con el contaminante como fuente de energía y nutrientes⁽²⁶⁾.

Algunas especies de microorganismos tienen la capacidad de metabolizar un número limitado de contaminantes, de manera que la presencia de poblaciones microbianas mixtas con diversas habilidades metabólicas, es menester para aumentar la probabilidad de que haya degradación de contaminantes complejos ⁽²⁷⁾.

4. MARCO DE REFERENCIA

4.1 Características generales de los suelos colombianos

Los suelos en Colombia cuentan una amplia diversidad y fragilidad, Colombia cuenta con 11 de los 12 órdenes de suelos existentes a nivel mundial, el único suelo con el que no cuenta es el denominado gelisol, en Colombia se destacan suelos incipientes, poco evolucionados con un 58.11 % del territorio nacional correspondiente a los órdenes entisoles e inceptisoles ⁽³³⁾.

El piso térmico cálido comprende los territorios o superficies ubicadas entre 0 y 1000 metros de altura desde el nivel del mar, su temperatura alcanza o supera en promedio superior a los 24 grados centígrados; en Colombia, este piso representa alrededor de 913.000 Km², lo que es correspondiente a aproximadamente el 80% del territorio nacional. En él se localizan las llanuras costeras tanto las ubicadas en el Pacífico como las del Caribe, los valles del río Magdalena, Cauca, Cesar, Catatumbo, así como también, en las extensas llanuras del Orinoco y la Amazonía. entre otros, por ellos es fácil deducir que estas zonas cuentan con una gran variada geografía además una gran diversidad de fauna y flora ⁽³⁴⁾ ⁽³⁵⁾.

El piso térmico templado comprende todas el territorio ubicadas entre los 1.000 y 2.000 metros de altura desde el nivel del mar, sus temperaturas por lo general se encuentran oscilando entre los 17 y 24 grados centígrados, este piso abarca alrededor de 114.000 Km² lo que corresponde a aproximadamente 10 % del territorio nacional, en este piso térmico podemos ubicar desde las zonas bajas de las montañas, es necesario mencionar que sobre este piso se encuentran varias ciudades importantes para el país como Ibagué, Pereira y Medellín, además es la zona de condiciones más propicias para el desarrollo de la vida humana, sobre todo, cerca de los 2.000 metros de altura ⁽³⁵⁾.

El piso térmico frío corresponde a las zonas localizadas entre los 2.000 y 3.000 metros de altura desde el nivel del mar, este piso térmico por lo general manifiesta temperaturas que tienden a oscilar entre los 12 y 17 grados, este tipo de piso térmico cubre 93.000 Km², lo que corresponde a aproximadamente el 7.9% del territorio nacional. Este piso tiene más diversidad de temperaturas, según su altura; en las noches un poco más bajas que en el día, además de que el terreno montañoso y las mismas condiciones climáticas hacen que el territorio colombiano del piso térmico frío tenga una menor diversidad en flora y fauna, respecto a los pisos cálido y templado. Se encuentran en este piso ciudades como Bogotá, Pasto, Manizales y Tunja ⁽³⁴⁾ ⁽³⁵⁾.

Finalmente, el piso térmico de páramo corresponde a las áreas del territorio ubicadas entre los 3.300 y 3.500 a 4.000 metros de altura sobre el nivel del mar, el piso térmico de páramo cuenta con temperaturas que rondan entre los 6 y 12 °C, además abarcan alrededor de 23.000 Km², lo que es equivalente a aproximadamente el 2% del territorio nacional. Este piso se localiza en la parte superior de las cordilleras y se sabe que al menos el 70% de los ríos del país nacen en esta zona, misma que está caracterizada por tener una vegetación baja, plantas como los frailejones y numerosas lagunas. Este ecosistema es único no solo en el país si no en el mundo, puesto que es exclusivo de los países

tropicales, y Colombia tiene la mayor extensión de páramos, el 50%, incluyendo al más grande, Sumapaz, cerca de Bogotá ⁽³⁴⁾ ⁽³⁵⁾.

4.2 Contexto Socioambiental de la contaminación de suelos con Pb en Colombia.

En Colombia se han realizado diferentes estudios sobre la contaminación con MP, principalmente el monitoreo de estos elementos ha sido de gran interés a nivel ambiental, durante el año de 1996 se determinaron los niveles de Mercurio (Hg), Cadmio, Arsénico y Plomo en el río Bogotá, más específicamente en su la cuenca baja, encontrándose que el Pb y el Hg estaban en cantidades normales para las mediciones realizadas (Suelo, agua y tejido vegetal); sin embargo, el tejido animal, en particular los músculos bovinos presentaron niveles elevados de Pb y Hg (3679,4 pg/Kg y 241,8 pg/Kg respectivamente), que estaban por encima de la ingestión semanal máxima admisible (1400 pg Pb y 300 pg Hg); estos resultados evidencian contaminación activa, con niveles que superaban los límites máximos admisibles establecidos por las diferentes instituciones de orden internacional, mostrando así un alto riesgo no solo para la salud animal si no también la humana a través de la ingesta de alimentos contaminados⁽¹¹⁾

En el año 2012 se realiza el primer diagnóstico nacional de salud ambiental, y este expone la construcción de excelente fuente de información que se establece como una de las fuentes más completas y concreta de información sobre salud humana y su relación con varios agentes ambientales en el agua, el aire, los residuos sólidos y peligrosos, las sustancias tóxicas y radiaciones no ionizantes en Colombia. Se hace hincapié en la industria de la explotación aurífera y su relación con las poblaciones circundantes, como es el caso de Nariño, Quindío, Chocó y Antioquia ⁽¹⁵⁾

En un contexto más específico, se ha encontrado que el porcentaje de Pb en asociación a la materia orgánica de los suelos en la Sabana de Bogotá pertenecientes a las inmediaciones del Río Bogotá- Nemocón era aproximadamente 37,5% para el año 2012, de acuerdo con esta información se resalta que solo el 27,2% está biodisponible para las plantas. Estos porcentajes indican que en suelos con dichas características edáficas el Pb tiende a formar compuestos químicos con la capacidad de ser fácilmente absorbido y transportado en las dinámicas de la cadena alimenticia, afectando la flora, la fauna y representando así un riesgo potencial para la salud de la población humana⁽¹⁶⁾ Por otra parte en Soacha (Bogotá), desde el año 2013 se conoce que el Pb supera

los límites establecidos por la legislación utilizada como referencia, excediendo la concentración 4,3 veces el límite establecido⁽¹⁰⁾ , esto evidencia que el problema de contaminación del suelo con MP, específicamente Pb, no es restringido a las zonas rurales del país y/o en las cuales se realiza explotación minera.

Así mismo, en otras zonas del país se ha estudiado el efecto del Pb en la población humana, en la región de la Mojana, una zona perteneciente a de la depresión Momposina y ubicada sobre las cuencas de los ríos Cauca San Jorge, y Magdalena, y por lo tanto se configura como una zona rica en humedales, se han evidenciado concentraciones de Pb que sobrepasan los límites establecidos por la Organización Mundial de la Salud, lo cual se relaciona con el posible daño genético registrado en varios estudios acerca de los pobladores de esta región, por ejemplo en el año en 2013 estudio de los efectos genotóxicos asociados a MP, encontrándose que había presencia de estos elementos en muestras de sangre⁽¹⁷⁾ Es importante resaltar que las concentraciones de MP en sangre y los efectos genotóxicos en las personas estudiadas, demuestran que la población no padece de una contaminación por una exposición ocupacional, sino que se contaminaron de mercurio, cadmio y plomo por la presencia de estos metales en procesos ambientales y en alimentos, dado que en esta zona no existen actividades mineras o industriales que puedan dar origen en una exposición directa de las de la región de la Mojana⁽¹⁷⁾

A partir del 2014 y hasta la actualidad el número de trabajos orientados al entendimiento del Pb en suelo, sus efectos en la salud y sus posibles estrategias de biorremediación ha ido en aumento. Se han identificado focos de contaminación en numerosas zonas del país como por ejemplo Bogotá, Córdoba, Boyacá, Magdalena, Medellín, Chocó, entre otros, además se han puesto a consideración otros orígenes de Pb en suelo dejando de lado la idea que únicamente las actividades mineras pueden depositar este MP en el ambiente. Por otra parte, las estrategias de biorremediación también han sido ampliamente exploradas sobre todo en ensayos de laboratorio bajo condiciones controladas, aun así, vale la pena mencionar que se han empleado varias estrategias como, por ejemplo, el uso de quelantes químicos; empleo de bacterias, hongos y plantas, así como de compostajes especializados.

5. MARCO LEGAL

Con relación al marco normativo, El *Codex Alimentarius* reúne una serie de normas y legislaciones de índole alimentaria internacionalmente adoptadas. Esta tiene como objetivo velar por la ejecución del Programa Conjunto FAO/OMS sobre

Normas Alimentarias, que tiene por objeto proteger la salud de los consumidores y asegurar prácticas equitativas en el comercio de alimentos ⁽¹⁵⁾.

En la Ley 23 de 1973: El Congreso de Colombia concede facultades extraordinarias al presidente de la República para expedir el Código de Recursos Naturales y protección al medio ambiente y se dictan otras disposiciones, más específicamente en El artículo 4 se define la prioridad sobre la prevención de la contaminación del medio ambiente, por sustancias o formas de energía puestas allí por la actividad humana o de la naturaleza en cantidades, concentraciones o niveles capaces de interferir con el bienestar y la salud de las personas, atentar contra la flora y la fauna, degradar la calidad del medio ambiente o afectar los recursos de la Nación o de particulares⁽¹⁵⁾.

Para el año 2002 se modificó el artículo 40 mediante el artículo 1 del Decreto 1530 del mismo año, donde se establece que en Colombia no se podrá importar, producir o distribuir en el país, gasolinas que contengan tetraetilo de Pb en cantidades superiores a las especificadas internacionalmente para las gasolinas no plomadas, salvo como combustible para aviones de pistón; también se reglamentó a partir de este decreto la contaminación de Pb en juguetes y vajillas⁽¹⁵⁾.

En la Resolución 4506 de 2013 se expresa que: El ministro de Salud y Protección Social, Por la cual se establecen los niveles máximos de contaminantes en los alimentos destinados al consumo humano y se dictan otras disposiciones ⁽¹⁵⁾.

6. METODOLOGÍA

La metodología usada para buscar la información tuvo como criterios de inclusión el idioma, la fecha de publicación, el tipo de fuente y las palabras claves (*soil, lead, heavy metals, contamination, bioremediation, bacteria, fungi, yeasts, lichens, macroinvertebrates, phytoremediation, ecosystem, degradation, colombia, Ph, Humidity, Mesophylls, Termifiles, Psychrophiles/suelo, plomo, metales pesados, contaminacion, biorremediación, bacterias, hongos, levaduras, líquenes, macroinvertebrados, fitoremediación, ecosistema, degradación, colombia, Ph, Humedad, Mesofilos, Termifilos, Psicofilicos*).

Se tuvieron en cuenta artículos de revisión y de investigación publicados en los últimos 15 años en revistas indexadas, en inglés y español; con relación a las palabras clave se usaron las siguientes combinaciones (*Contaminación plomo suelo, Contaminación metales pesados suelo, Contaminación plomo metales*

pesados suelo colombia ,Biorremediación Plomo suelo ,Biorremediación metales pesados suelo, Soil Lead Contamination, Soil Heavy Metal Contamination, Soil Lead Heavy Metal Contamination Colombia, Soil Lead Bioremediation, Soil Heavy Metal Bioremediation not cadmium not mercury not contaminated water), teniendo en cuenta los conectores booleanos (and, or, not) con el fin de hacer una búsqueda de forma lógica que permitiera incluir los conceptos o grupos de términos para ampliar, limitar o definir la búsqueda en función de los documentos disponibles. Se usaron bases de datos como Sciencedirect, Scopus, Proquest, Nature, Springer y Google Académico; adicionalmente se usó Mendeley como gestor bibliográfico.

7. RESULTADOS

En la consulta realizada en las bases de datos, de acuerdo con los criterios de inclusión definidos, se encontraron en total 104 artículos; principalmente porque al usar las palabras y combinaciones anteriormente mencionadas, tanto en inglés como en español, el rango de búsqueda continúa siendo relativamente amplio puesto que actualmente el empleo de estrategias de biorremediación en el tratamiento de suelos contaminados con plomo ha venido en aumento y aunque Colombia no es un país pionero en temas de investigación agroambiental tampoco se queda por fuera de la ola verde de la biorremediación de suelos. Particularmente se encontró que, para las bases de datos Nature y Scopus no existe tanta variedad para la búsqueda, los resultados en su mayoría se encontraron a través de Sciencedirect y Google académico, siendo la mayoría de los documentos artículos de revisión o tesis, lo que deja ver que existe voluntad científica en el país en cuanto al desarrollo de estrategias de biorremediación que tengan en cuenta los tipos de suelo en los cuales el plomo actúa como contaminante de interés público. De forma general en las figuras 1, 2 y 3. Se presentan los resultados obtenidos, teniendo en cuenta aspectos de Idioma de publicación, país de origen y fecha de publicación.

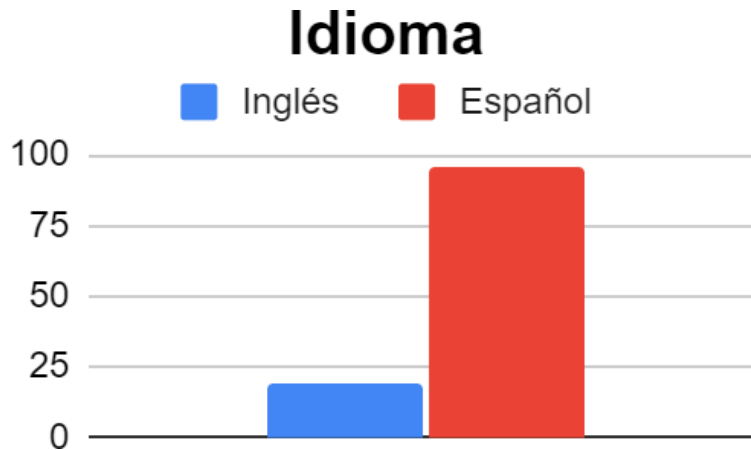


Figura 1. Número de artículos encontrados según el idioma: español e inglés, donde se evidencia un mayor número de los artículos en idioma español posiblemente debido a que la búsqueda estaba orientada a encontrar las estrategias de biorremediación usadas en Colombia.

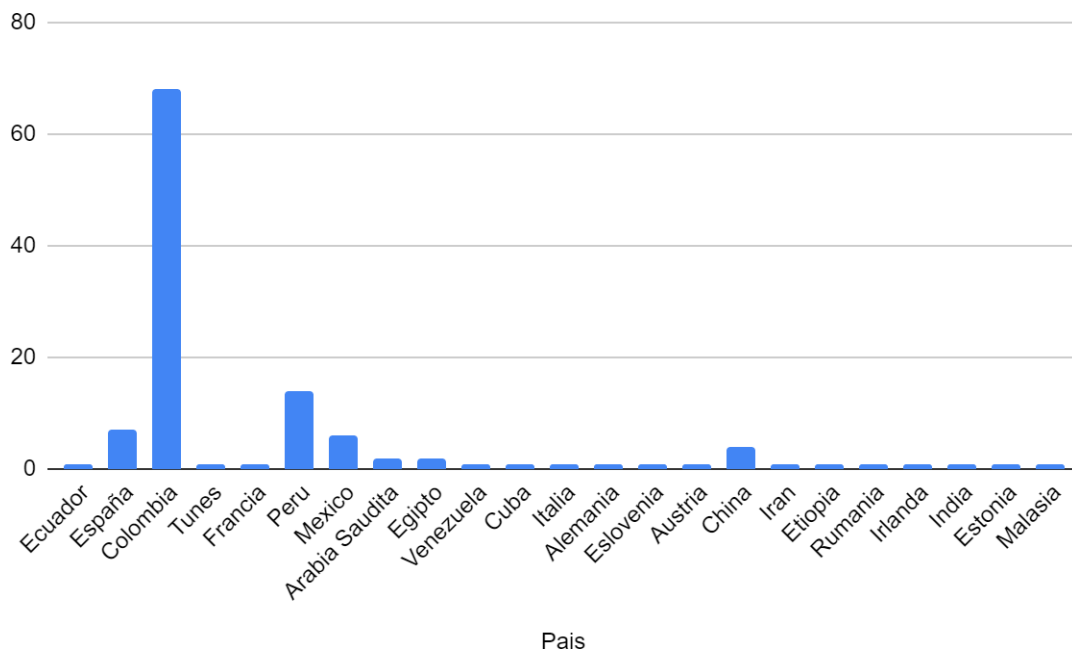


Figura 2. Distribución de artículos encontrados teniendo en cuenta el país de origen de la información. Se observa que debido a que la búsqueda se orientó a encontrar estrategias de biorremediación en Colombia, la mayoría de artículos

encontrados pertenecen a ese país, sin embargo también se encontraron artículos, de Venezuela, Cuba, Ecuador México y Perú, lo que también refleja un interés en países latinoamericanos por apostar a estas estrategias de biorremediación.

Años

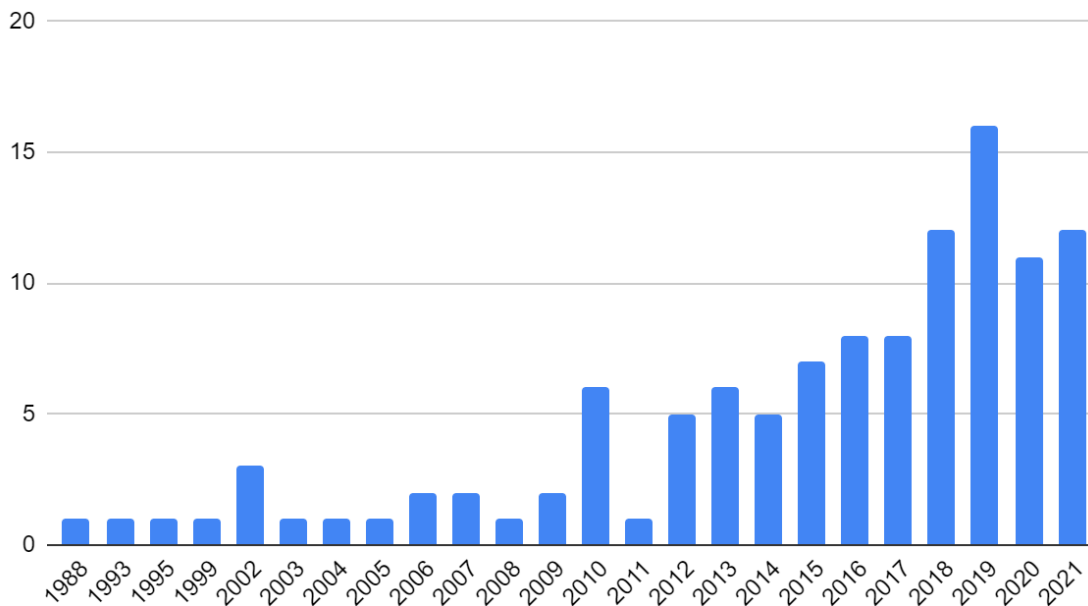


Figura 3. Distribución de artículos encontrados teniendo en cuenta el año de publicación de la información. Se observa que la búsqueda hizo énfasis en artículos producidos entre los años 2016 y 2021, puesto que se buscaba obtener un panorama actualizado, tanto de las problemáticas por contaminación de suelo con Pb, así como de las estrategias comúnmente utilizadas para biorremediación en ecosistemas contaminados en Colombia. Los resultados evidencian que entre el año 2018 y 2019 se incrementa el número de estudios realizados en el país, por lo cual podría ser interesante analizar este hallazgo.

DISCUSIÓN

Estrategias de biorremediación de suelos contaminados con plomo

7.1 Biorremediación Microbiana

La biorremediación microbiana es una estrategia de descontaminación que se basa en el empleo de uno o varios microorganismos o sus enzimas para degradar contaminantes en el suelo u otros ambientes, esta actúa mediante la transformación de los contaminantes para que pasen de formas o estructuras con alta toxicidad hacia formas de menor riesgo ambiental ⁽⁴²⁾.

La estructura celular de los microorganismos tiene la capacidad puede atrapar iones de MP para posteriormente absorberlos en los sitios de unión predispuestos en la pared celular de cada microorganismo, este proceso se conoce como biosorción, bioadsorción o captación pasiva, y es un proceso netamente independiente del ciclo metabólico bacteriano; Estos procesos de adsorción dependen de varios aspectos fundamentales, principalmente el equilibrio cinético y la composición de la superficie celular, el mecanismo en sí involucra varios procesos, de entre los cuales destacan las interacciones electrostática, el intercambio iónico, la precipitación y la formación de diferentes complejos en la superficie celular ⁽⁴³⁾. Dentro de la biorremediación bacteriana existe otro método que consiste un proceso que permite el paso de los iones de MP a través de la membrana celular con rumbo al el citoplasma, mediante el ciclo metabólico celular, lo cual se conoce como bioacumulación o absorción activa; en este proceso la estructura celular de un microorganismo especializado puede atrapar iones de MP y posteriormente absorberlos en los sitios de unión específicos de la pared celular

⁽⁴³⁾.

Otros procesos asociados a las acciones microbianas y que pueden llegar a afectar la disponibilidad de MP incluyen la biolixiviación el cual es un proceso que involucra la movilización de MP a través de la producción de ácidos orgánicos o reacciones que involucran la metilación, la biomineralización que se basa en la inmovilización de MP a través de la formación de sulfuros insolubles o complejos poliméricos, a su vez la acumulación intracelular y transformación catalizada por enzimas mediante procesos redox constituyen de manera integral las estrategias más comúnmente empleadas por microorganismos respecto a las interacciones ambientales con MP

⁽⁴³⁾.

7.1.2 Biorremediación bacteriana

- **Bioacumulación y biosorción:** En la pared de las bacterias se encuentran presentes grupos funcionales como los hidroxilos, los fosfodiéster y las aminas que pueden facilitar el intercambio iónico con los metales contaminantes de esta forma permitiendo que se lleve a cabo el proceso de adsorción⁽⁴³⁾. Los metales realizan procesos de unión a la superficie celular

a través de mecanismos como las fuerzas de Van der Waals, las interacciones electrostáticas, la unión covalente, la precipitación extracelular, las interacciones redox, o la ejecución en conjunto de esos procesos; los grupos cargados negativamente (carboxilo, hidroxilo y fosforil) de la pared celular bacteriana adsorben los iones metálicos y estos son retenidos en la misma ⁽²³⁾ .

La bioacumulación es un proceso celular con una gran complejidad que requiere un sistema de transporte a través de la membrana con el objetivo de que el microorganismo pueda internalizar el MP presente en el medio celular, para ello el microorganismo requiere consumo de energía, este gasto energético se realiza a mediante el consumo de la H⁺-ATPasa; una vez que el MP ha sido incorporado al citoplasma este es retenido por proteínas ricas en grupos sulfhidrilos y cisteínas llamadas metalotioneínas, en plantas estos compuestos químicos toman el nombre de fitoquelatinas, y algunos nuevos péptidos de unión a metales ⁽²³⁾.

Esta estrategia de acumulación, tipificación y separación de iones metálicos al interior de la célula bacteriana puede ocurrir en varios niveles tanto de la membrana como del interior de la célula , estos son: el espacio periplasmático e interior celular, durante este proceso intervienen varios polímeros estructurales y extracelulares que tienen la capacidad de interactuar con los metales presentes en el medio atrapándolos en su interior, lo que se conoce como bioadsorción de metales por otra parte existen proteínas que cuentan con una gran afinidad evitando sus interacciones con otras proteínas esenciales para el microorganismo, es de esta forma que los microorganismos se puede encargar de la neutralización y disminución de la toxicidad del metal contaminante del suelo ⁽²⁵⁾.

Existe una gran variedad de bacterias poseen dos tipos de sistemas encargados de la captura de cationes de MP; uno tiene un comportamiento rápido e inespecífico, este es expresado constitutivamente, además es un proceso netamente dependiente del gradiente quimiosmótico circundante en el medio, el contaminante deberá pasar a través de la membrana citoplasmática de la bacteria, cuando una bacteria se enfrenta a medios que cuentan con altas concentraciones de un MP que se encuentra acumulado por este tipo de sistema metabólico, el catión del MP es llevado al citoplasma, esto a pesar de su elevada concentración porque recordemos que estos transportadores son inespecíficos y constitutivos de microorganismo en cuestión y por consiguiente esta entrada ubicada en la membrana celular no puede ser cerrada ⁽²⁵⁾ . Por otra parte, el segundo tipo de sistema de captura cuenta con una elevada especificidad hacia el sustrato, este se desarrolla de una manera más lenta y generalmente se basa en la utilización de la hidrólisis de ATP con el objetivo de usarla como fuente de energía sin dejar de

lado el gradiente quimiosmótico; para la bacteria este sistema consumidor de energía solo se induce en la célula cuando esta lo ve estrictamente necesario, por ejemplo: en condiciones nutricionales desfavorables o en algunas situaciones metabólicas especiales ⁽²⁵⁾.

Gracias a este complejo mecanismo de bioacumulación o unión a metales descrito anteriormente, se han desarrollado tecnologías con el objetivo de facilitar la biosorción, por lo general esta utiliza biomasa microbiana activa y en algunos otros casos inactiva para secuestrar metales, mediante la habilidad que tienen estas para lograr la unión entre la superficie celular y el MP. Como ya se mencionó anteriormente el proceso puede ocurrir por diversos mecanismos fisicoquímicos como la adsorción o el intercambio iónico adicionalmente la utilización de biomasa viva en los mecanismos metabólicos de captación de metales también puede contribuir significativamente con el proceso ⁽²⁴⁾. Las posibilidades de desarrollar una estrategia con una mayor capacidad de absorción depende en gran medida del tipo de microorganismo y las particularidades asociadas a su etapa de crecimiento ⁽²⁵⁾ en lo que respecta a las tecnologías de biosorción se ven involucrados el acomplejamiento superficial y la microprecipitación como potencial y efectivas alternativas para el tratamiento moderno de los metales en suelo, estos son fenómenos bioquímicos metabólicos y genéticos son ampliamente estudiados en las estrategias de biorremediación de MP como el Pb ⁽²⁴⁾.

- **Bioestimulación:** En Colombia se han desarrollado varios proyectos que analizan la efectividad de estrategias de bioestimulación para la descontaminación de suelos y no solo eso si no que además existen estudios comparativos y complementarios a la bioaumentación. La bioestimulación, consiste en el suministro de nutrientes y otros componentes a manera de complementos a la población microbiana nativa con el objetivo de inducir y fomentar la propagación de dicho microorganismo a un ritmo acelerado ⁽⁴⁸⁾.

Se ha estudiado la bioestimulación con la adición de elementos químicos como Nitrógeno, Fósforo, Potasio y otros compuestos como por ejemplo Tween 80 y Leonardita; luego de la aplicación de estos estimulantes se debe realizar el monitoreo de los parámetros abióticos como temperatura, pH, humedad, oxigenación, entre otros ⁽⁴⁵⁾⁽⁴⁶⁾; así pues agregar nutrientes que favorezcan y fomenten el crecimiento de los microorganismos nativos capaces de degradar contaminantes, como el Pb se presenta como una buena estrategia⁽⁴⁷⁾⁽⁴³⁾.

- **Bioaumentación:** La bioaumentación hace referencia a una metodología que se puede aplicar en suelos contaminados para tratar sustancias tóxicas en una matriz que permita o facilite sus procesos de degradación, esta metodología, consiste en inocular y adicionar microorganismos autóctonos (nativos) o exógenos al medio; donde crecen de forma rápida como respuesta a la contaminación presente en él; además, este procedimiento es uno de los más apropiados para realizar tratamientos *ex situ* ⁽⁴⁹⁾. Esta técnica no solo establece el uso de microorganismos, sino que también puede implementar la adición de enzimas provenientes del resultado metabólico de diferentes cepas de microorganismos con propiedades especializadas en cuanto a la degradación y consumo de diferentes contaminantes ⁽⁵⁰⁾.

Esta tecnología puede ser utilizada cuando se requiere un tratamiento rápido y oportuno de un sitio contaminado, o cuando se ha determinado que la microflora nativa del suelo es insuficiente en cantidad o en capacidad degradadora, para esta se usan microorganismos vivos, con capacidad para degradar el contaminante en cuestión, para así promover su biodegradación o su biotransformación a formas menos tóxicas para el ambiente ⁽⁵¹⁾ gracias al aumento de la biomasa general del suelo ⁽⁴⁶⁾. Un factor sumamente importante para implementar esta estrategia de biorremediación es tener en cuenta el tamaño del inóculo que se pretende aplicar en el suelo, este depende de la extensión de la zona contaminada, de qué nivel de dispersión poseen los contaminantes y de la velocidad de crecimiento de los microorganismos degradadores bajo las condiciones que ofrece el medio ⁽⁵¹⁾.

Lo anterior está basado en un principio ecológico de que dice que por lo general los organismos autóctonos o nativos de las zonas contaminadas no desarrollan fácilmente las capacidades necesarias para biodegradar contaminantes además que el cambio en las propiedades físicas y químicas del suelo debido a las dinámicas del contaminante en el mismo podrían producir estrés fisiológico en esta población, por lo que la bioaumentación no solo evita este problema si no que también la presencia del nuevo inóculo puede promover la competencia y a su vez la biodegradación ⁽⁴⁶⁾. La bioaumentación ha demostrado ser eficiente para tratar suelos contaminados con variados compuestos contaminantes como, por ejemplo: compuestos orgánicos solventes clorados, desechos de nitrotolueno; agroquímicos clorados y organofosforados; además compuestos inorgánicos como Cd, Cr (VI), Co, Cu, Pb, Ni, Se y Zn ⁽⁵¹⁾.

7.1.2.1 Actinomyces

Los Actinomicetos son microorganismos pertenecientes a las bacterias Gram positivas abundantes en el suelo, estas poseen suma importancia en el mantenimiento del equilibrio ecológico debido a que presentan una alta actividad metabólica, misma que permite a estos microorganismos desencadenar reacciones que desembocan por ejemplo, en la transformación del Nitrógeno Atmosférico molecular en Nitrógeno mineral, este proceso de transformación es esencial porque de esta forma el nitrógeno se vuelve asimilable por las plantas, a su vez también, tienen la capacidad de producir pigmentos y enzimas extracelulares con propiedades que permiten degradar materia orgánica de origen vegetal y animal⁽⁸²⁾. Los actinomicetos también poseen propiedades quitinolíticas, gracias a su alto contenido de las bases nitrogenadas guanina y citosina dentro de su material genético, esto las diferencia de otras bacterias y hongos Gram positivas⁽²⁴⁾.

Los actinomicetos han generado interés en la comunidad científica, por lo que han sido ampliamente estudiados a lo largo del tiempo dado su importante papel en diferentes campos, mantienen la homeostasis del suelo, lo que contribuye a que el suelo dinámicamente con el ecosistema, por su gran capacidad de producir enzimas extracelulares se han utilizado en la industria de la producción de compuestos bioactivos como los antibióticos. Respecto a la biorremediación se ven involucrados en procesos de fitorremediación, actuando como recicladores de los constituyentes más resistentes de la materia orgánica como es el caso de la lignina, la celulosa, la hemicelulosa y la quitina⁽⁸³⁾. También se ha estudiado el uso de estos microorganismos para la remoción de MP, pues que poseen la capacidad de retener nitrógeno, permitiendo adaptaciones del medio mediante el intercambio gaseoso, lo que facilita el crecimiento de las diversas poblaciones bacterianas y por ende la remoción de MP⁽²⁴⁾.

Adicionalmente la remoción de metales sucede por las capacidades metabólicas que puede ejercer el actinomiceto en condiciones ideales, debido a sus enzimas extracelulares las cuales por lo general son ligninolíticas e hidrolíticas, estas son encargadas de mediar procesos metabólicos desembocan en la capacidad de estas bacterias para asimilar gran parte de los compuestos a degradar o descomponer⁽²⁴⁾. A partir de distintos trabajos que concluyen que la concentración de los actinomicetos puede llegar a influir en la remoción de los MP teniendo en cuenta sus diferentes concentraciones en la estrategia de biorremediación. En condiciones ideales estos microorganismos pueden llegar a promover hasta un 33.1 % la remoción de Pb en suelo⁽²⁴⁾

7.1.3 Micorremediación

7.1.3.1 Hongos Microscópicos

De manera general, los hongos microscópicos se dividen en dos grandes grupos: los hongos filamentosos y los hongos levaduriformes. El primer grupo crece formando filamentos alargados llamados hifas, mientras que los levaduriformes son capaces de sobrevivir en forma unicelular durante la mayor parte de su ciclo de vida ⁽⁵⁴⁾. Los hongos son organismos de gran complejidad debido a sus características morfológicas, fisiológicas y genéticas; son ubicuos, es decir que se encuentran en todos los ecosistemas, a lo largo de la historia de la vida en la tierra han sido capaces de colonizar todas las matrices (suelo, agua, aire) y aquí no sólo desempeñan papeles como colonizadores, sino que también juegan un rol sumamente importante y clave en el mantenimiento del equilibrio de los ecosistemas ⁽⁵⁵⁾.

En ese sentido la micorremediación usa los hongos para degradar o inmovilizar los contaminantes generados en el medio ambiente, por ello se ha estudiado su utilidad como método de remediación ambiental para MP ⁽⁵⁶⁾. Los hongos tienen muchas ventajas que facilitan su implementación en estudios y estrategias de biorremediación, pues están presentes en gran variedad de ecosistemas, desde sedimentos acuáticos, hasta en hábitats terrestres y sus hifas tienen la capacidad de penetrar el suelo contaminado y de producir enzimas extracelulares con las cuales degradan los contaminantes ⁽⁵⁷⁾. Los hongos representan una gran estrategia puesto que si un MP no puede ser reducido de manera convencional por las vías celulares o su reducción no es conveniente, entonces los hongos desarrollan estrategias metabólicas que permiten que el metal puede ser acomplejado o transportado al exterior celular, de manera contraria los hongos también pueden hacer que dicho MP sea compartimentalizado dentro de las vacuolas propias de las hifas ⁽²³⁾ ⁽⁶⁰⁾. Las estructuras más importantes de los hongos micorrízicos arbusculares, involucradas en la simbiosis y tolerancia a MP, son los arbusculos, las vesículas y las hifas ⁽⁶²⁾.

En la literatura se ha reportado un amplio rango de hongos con la capacidad de producir materiales extracelulares mucilaginoso (MECM o emulsionante) dicha sustancia cuenta con una excelente capacidad de unión a metales tóxicos ⁽⁵⁹⁾. Existen algunos hongos micorrízicos arbusculares tales como las especies *Glomus sp* y *Gigaspora sp*, estos tienen la capacidad de producir una glicoproteína de manera extracelular en el suelo llamado glomalina, la glomalina que posee una formidable capacidad para secuestrar MP. La glomalina se encuentra distribuida principalmente en la pared celular del hongo, es allí donde

además de la glomalina, otros polímeros de la pared celular como la quitina y la melanina también se desempeñan papeles fundamentales en la biosorción de metales ⁽⁵⁹⁾. Particularmente, con relación al Pb, estudios han demostrado que hongos como *Saccharomyces* y *Mucor rouxii* pueden producir peptidoglucanos y quitosano respectivamente para bioacumular la forma Pb⁺² en suelo ⁽⁵⁷⁾.

Uno de los aspectos más interesantes de la micorremediación es que los hongos y las plantas pueden establecer complejas relaciones simbióticas, son las complejas interacciones entre las plantas y las micorrizas las que en conjunto generan plantas con una mayor tolerancia a los MP, lo que está en parte mediado por la capacidad que tienen los hongos para inmovilizar los metales en la raíz, impidiendo el paso de estos a las partes aéreas de la planta. Como primer obstáculo en la entrada de MP la constituye a la pared celular del hongo, que como ya se ha mencionado anteriormente tiene una gran capacidad de adsorber cationes sobre su superficie, puesto que la carga eléctrica de su superficie celular es negativa. De esta manera, el hongo logra restringir de manera efectiva el movimiento de los MP el interior de las raíces de la planta ⁽⁶¹⁾. Las plantas, a su vez han desarrollado mecanismos que modifican algunas de las características de su entorno, por ejemplo, mediante la excreción de compuestos orgánicos por la raíz, puesto que, para las comunidades microbianas del suelo, estos sustratos representan una fuente de energía rica en nutrientes, adicionalmente estos mismos sustratos pueden estar involucrados aspectos básicos como la quelación y acidificación de la rizosfera, lo que disminuyen la movilidad de MP ⁽⁶²⁾.

7.1.3.2 Hongos Basidiomicetos

Las estructuras reproductoras de los hongos macroscópicos (esporoma) están compuestas por conjuntos de hifas que forman “pseudotejidos” llamados plecténquimas, a su vez, estas masas de hifas se encuentran en el sustrato conformando lo que se conoce como micelio ⁽⁶³⁾. Estos organismos también poseen potencial de bioadsorción y son efectivos cuando se trata de acumular MP en ambientes contaminados ⁽²⁵⁾. En el caso de los macromicetos, la composición bioquímica de la pared fúngica resulta ser clave en la capacidad de obtención de metales por hongos, ya que, la presencia de polisacáridos como la quitina, además de componentes como proteínas, polímeros fenólicos, melaninas y otros pigmentos, hace de estos organismos buenos bioindicadores, gracias a que los grupos químicos funcionales que presentan tienen una amplia afinidad para la captación y fijación de metales tóxicos ⁽⁶³⁾. La pared celular ejecuta la retención o inmovilización del metal mediante una interacciones fisicoquímicas que se dan

entre el metal con grupos amino e hidroxilo intrínsecos en la estructura química de la quitina, presente en la pared del hongo, estas interacciones también pueden darse entre los grupos fosfato, sulfhidrilo y carboxilo, proceso que desemboca en la formación de un enlace covalente puesto que el ion metálico actúa como átomo central que posee orbitales vacíos con la capacidad de aceptar pares de electrones donados por los grupos funcionales ya nombrados⁽⁴⁾.

El proceso de adsorción depende en gran medida del pH ya que el suelo tiene un pH distinto y cada metal tiene un pH óptimo para ser extraído. Así mismo factores ambientales como la temperatura, la concentración de metal y la presencia de otros iones en disolución son factores que pueden influir tanto negativa como positivamente en el proceso de adsorción⁽⁴⁾, ya que en soluciones que presenta contaminación que involucra más de un metal, se pueden generar tres tipos de comportamiento, el sinergismo: Se habla de comportamiento de sinergia cuando el efecto de adsorción de la mezcla es mayor que cuando los componentes están por individual; antagonismo: se habla de antagonismo cuando el efecto de dicha asociación de metales perjudica los procesos de biorremediación obteniéndose así resultados inferiores a los de cada uno de los metales; sin interacción: cuando el efecto de la mezcla no es diferente al de los componentes por individual⁽⁴⁾. Los 2 grupos químicos que facilitan la bioacumulación de Pb en la pared fúngica son β glucano (1-6) y 16 β glucano(1-3) ambos proporcionando enlaces carboxilo⁽⁴⁾; de igual manera, el sedimento determina la disponibilidad y la movilidad de los metales hasta los hongos, quienes dependen del sustrato específico sobre el que se desarrolla el micelio, y definen la mayor o menor capacidad acumulativa según sus necesidades nutricionales⁽²⁵⁾.

7.1.4 Uso de Plantas para biorremediar pb

7.1.4.1 Fitorremediación

La fitorremediación es una técnica que aprovecha los procesos metabólicos de plantas y árboles para descontaminar aguas y los suelos contaminados. Las medidas fitorremediadoras por lo general son pasivas y pueden ser usadas junto con otras técnicas químicas o mecánicas de limpieza⁽⁶⁷⁾. Con base en el desarrollo de las plantas es posible descomponer o degradar contaminantes, de igual forma también es posible estabilizar los metales pesados en suelo. Estas estrategias son apropiadas en ecosistemas en los cuales la contaminación no sea demasiado profunda ni excesivamente extensa⁽⁶⁷⁾. Esta alternativa contempla varios procesos que en conjunto constituyen un complejo sistema de biorremediación que puede tener como objetivo directo la descontaminación de suelos, aguas contaminadas y

sedimentos por medio del uso de plantas, procesos se denominan como fitoestabilización, fitoextracción, fitoestabilización, fitovolatilización, rizofiltración, la fitodegradación, y gracias a ellos se pueden implementar procesos de fitorremediación ⁽⁵²⁾⁽⁶⁸⁾.

Las plantas utilizan mecanismos de complejación al interior de las células con el objetivo de llevar a cabo procesos de detoxificación de metales pesados, para ello une a estos elementos contaminantes ligandos que terminan a su vez formando complejos. De esta manera, el metal pesado puede quedar inmerso al interior de un sistema de interacciones químicas que le mantienen el equilibrio electrónico, de la reacción pero que no lo deja fuera del metabolismo, sin embargo, esta también es una espada de doble filo ya que el metal pesado no se ha eliminado del citoplasma de la célula y, por ello, sigue siendo potencialmente tóxico. Como se ha mencionado a lo largo del texto, los metales pesados muestran gran afinidad por determinados grupos funcionales que son los que terminan actuando como principales ligandos, los grupos sulfidrido, radicales amino, fosfato, carboxilo e hidroxilo. Los ligandos que utilizan las plantas son básicamente aminoácidos y ácidos orgánicos con propiedades especiales, estas más específicamente, se dividen en dos clases de péptidos: las fitoquelatinas y las metalotioneinas ⁽⁶¹⁾.

Es bien sabido que la acumulación de metales pesados mediada por plantas es un buen método de fitorremediación. Sin embargo, es necesario mencionar que muchas de ellas tienen muy poca biomasa, por lo que actualmente también se exploran estrategias que involucren el uso de tecnología de ingeniería genética, para así, por ejemplo, poder transferir y sobreexpresar genes de bacterias y levaduras, en plantas modificadas favoreciendo así, la acumulación excesiva de metales además de la producción de una gran biomasa ⁽⁵²⁾. Para el caso del Pb existen varias características edáficas que junto a las condiciones de un suelo ácido permiten una mayor movilidad y biodisponibilidad del metal, lo que tiene como resultado a una mayor remoción de este, sin embargo, no en todas tecnologías o estrategias correspondientes la fitorremediación estas condiciones serían las adecuadas, es necesario un minucioso estudio de las plantas que planea utilizar analizando sus requerimientos físicos y químicos así como su susceptibilidades y tiempos de crecimiento⁽⁵⁾. Un esquema de los diferentes procesos relacionados con la fitorremediación de contaminantes se presenta en la figura 4.

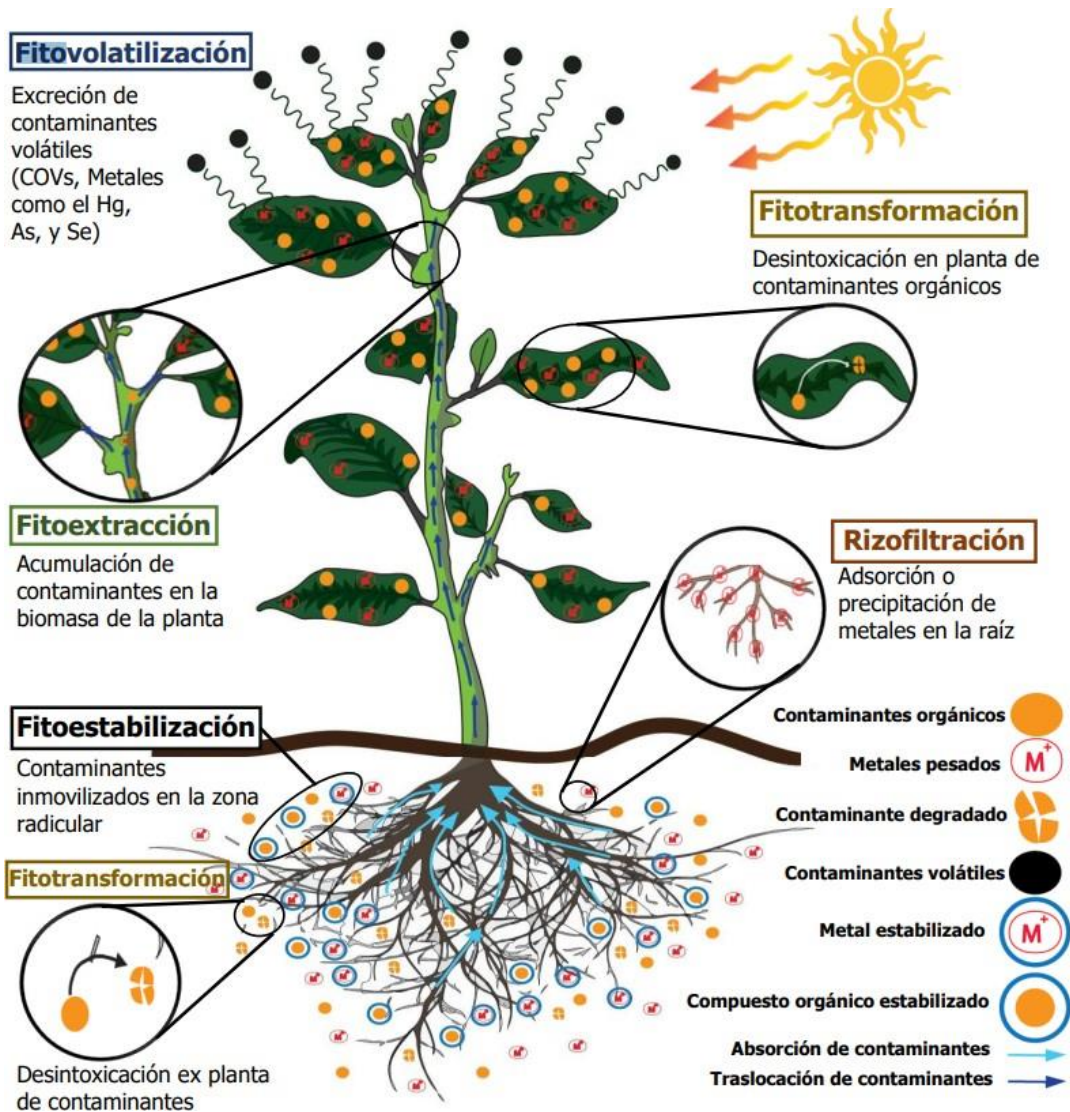


Figura 4. Esquema general de las diferentes rutas que pueden establecerse en estrategias de fitorremediación Tomada de ⁽⁷⁰⁾.

7.1.4.2 Fitodegradación

Esta se enfoca en la degradación de los contaminantes en suelo gracias a la acción conjunta de las plantas y la influencia de los diferentes microorganismos presentes en el medio ya sean nativos o introducidos. Así pues cuando los contaminantes son metabolizados y posteriormente depositados al interior de los tejidos vegetales y la planta produce nuevas enzimas, por lo general entre esas se sintetizan la deshalogenasa y la oxigenasa, que desencadenan la catalización de la degradación ⁽⁶⁷⁾. Asimismo, en los procesos denominados Rizorrecuperación o Rizodegradación la degradación de los metales pesados sucede en las raíces de

las plantas, mediada por relaciones simbióticas presentes en las estructuras rizomicrobianas, donde las raíces se cumplen el papel de liberar sustancias naturales que nutren y estimulan a los hongos, las levaduras o las bacterias, potenciando así la funcionalidad y utilidad de la actividad biológica en el suelo contaminado ⁽⁶⁷⁾. La fitodegradación ha demostrado tener buenos resultados para tratar eficientemente suelos contaminados con compuestos inorgánicos como Pb. E incluso se ha demostrado también su eficiencia en la remoción de materiales radioactivos y tóxicos tanto en suelo como en agua ⁽⁶⁷⁾.

7.1.4.3 Fitoestabilización

Esta hace referencia al uso de plantas como el objetivo de generar procesos de estabilización de los contaminantes en el suelo, evitando de esta su dispersión en el ambiente. En términos sencillos, lo que se pretende es que la planta almacene el contaminante al interior de sus estructuras para que posteriormente esta sea removida del suelo y almacenada de forma segura. Este método presenta algunas limitaciones, principalmente debido a que in situ nada puede garantizar que la planta no sea ingerida por organismos que cohabitan el ambiente, representando así un riesgo para la cadena alimentaria ⁽⁷⁰⁾. Los procesos de fitoestabilización de metales pesados, generados por la relaciones simbióticas entre los hongos micorrízicos arbusculares y las plantas pueden ser una excelente manera de manejar el problema de la contaminación ⁽⁷¹⁾; sin embargo tanto a nivel teórico como experimental, esta estrategia se ha caracterizado por su gran distanciamiento en términos de remoción. Para la correcta aplicación de esta técnica, cada caso debe ser considerado como único e irrepetible, pues son las características ambientales propias de cada cultivo, además su variedad y tipo de planta, así como los elementos involucrados como contaminantes del suelo, para resumir el tipo de metal pesado, la planta fitorremediadora, el ambiente, e incluso la presencia de micorrizas influyen y condicionan rasgos particulares y en la constante dinámica de suelo y sus interacciones, lo que influye directamente en el éxito de esta técnica ⁽⁷²⁾. En ese sentido, la fitoestabilización de metales pesados mediante puede constituir una estrategia de fitorremediación de suelos contaminados ⁽⁶²⁾.

7.1.4.4 Fitoextracción

Se fundamenta en la idea de a partir del uso de procesos fisiológicos propios de la planta para lograr que esta actúe como un succionador de metales pesados para que así mediante la fotosíntesis puedan extraer los metales del suelo gracias a las raíces, para luego almacenarlas en sus tejidos aéreos. Existe un grupo de plantas

con un excelente potencial para este tipo de prácticas de biorremediación, por ejemplo, las especies metalófitas, son especies vegetales que soportan altos niveles de metales y sobreviven en forma endémica en ambientes contaminados con los mismos ⁽⁶⁸⁾. Una de las especies con alto potencial para la fitoextracción de metales pesados se encuentran los pastos, estos comprenden el género más adecuado para llevar a cabo la fitorremediación tanto de formas orgánicas como de formas inorgánicas de metales, por sus variados hábitats de crecimiento y su capacidad adaptarse a una gran variedad de condiciones edáficas y climáticas ⁽⁶⁸⁾. Algunos estudios muestran la evidencia de que las pasturas pueden crecer con relativa facilidad en los suelos contaminados por metales pesados y así mismo estas plantas pueden configurar una excelente estrategia de bioacumulación de Pb principalmente en lo que respecta sus sistemas radicales ⁽⁴⁾.

La fitoextracción debe entenderse como una estrategia de biorremediación a largo plazo, que en su proceso puede requerir de varios ciclos de cultivo y varios tipos de plantas para reducir la concentración de los contaminantes a niveles aceptables. El tiempo requerido por supuesto dependerá de la concentración y las características del contaminante en suelo, de la duración del periodo de crecimiento de cada planta y de la eficiencia de remoción de la especie utilizada ⁽⁷³⁾. Algunos criterios de selección de especies vegetales con potencial para la fitoestabilización y la fitoextracción se muestran en la tabla 1.

Tabla 1. Características generales de la fitorremediación de suelos contaminados con Pb.

Proceso	Mecanismo	Metales Pesados	Criterios para la selección de especies vegetales
Rizofiltración	Acumulación de Rizosfera	Pb, Cd, Zn, Ni, Cu.	Es necesario buscar plantas con una desarrollada resistencia a los MP, con superficie de alta absorción, además de una buena tolerancia a la hipoxia, generalmente las plantas con un sistema de raíces fibrosas son eficientes en esta labor.

Fitoestabilización	Complejación	Pb, Cd, Zn, As, Cu, Cr, Se, U,	Es necesario encontrar plantas con sistemas radiculares prominentes y abundantes, lo que se traduce por lo general en una buena capacidad de mantener la translocación de metales de las raíces a los brotes.
Fitoextracción	Hiperacumulación	Pb, Cd, Zn, Ni, Cu con adición de EDTA para Pb.	Estas son de las más complejas de elegir puesto que deben ser plantas tolerantes a elevadas concentraciones de metales, además de poseer una alta capacidad de acumulación de metales, junto a una rápida de crecimiento y finalmente pero no menos importante una gran capacidad de acumulación de oligoelementos en partes aéreas.

Información adaptada de ⁽⁷⁰⁾.

7.1.5 Biorremediación de pb con Algas

Las algas comprenden un extenso grupo de organismos acuáticos cuyo metabolismo es autótrofo por lo que entre otras características presentan pigmentos fotosintéticos primarios como la clorofila a, característica que comparten con las plantas superiores ⁽⁷⁴⁾. Existe un gran debate que surge en torno a su clasificación taxonómica debido a que las algas guardan una íntima relación con otros grupos como las plantas, las bacterias, los hongos e incluso los protozoarios, aun así actualmente las algas comparten una serie de características comunes entre sí que las han clasificado como un gran conjunto artificial denominado polifilético ⁽⁷⁴⁾, las algas poseen la capacidad de crecer bajo condiciones ambientales adversas y en algunos casos extrema sobre todo si se habla de contaminación por de MP, adicionalmente también resisten condiciones de alta salinidad, estrés nutricional, altas o bajas temperaturas ⁽⁷⁵⁾. Las algas son organismos con una excepcional capacidad para desarrollar mecanismos únicos de autoprotección contra la toxicidad de MP, como pueden ser mecanismos de inmovilización, de regulación de genes, de exclusión y de quelación, así mismo bajo las condiciones ideales las algas pueden producir antioxidantes o enzimas reductoras que como su nombre lo indica se encargan de reducir los MP medianter reacciones redox ⁽⁷⁵⁾.

Algunos estudios han demostrado un efecto sinérgico cuando se aplican microalgas en determinadas comunidades microbianas, pues luego de la introducción de algas la captación de nutrientes y el efecto biodegradador pueden alcanzar valores más altos cuando se cultivan juntos ⁽⁴⁷⁾. Las microalgas además de emplearse para la eliminación de MP, también se usan para la biorremediación de pesticidas, herbicidas y, entre otros; esto determinado por su capacidad de bioacumular elevadas concentraciones de compuestos tóxicos, sin afectar significativamente su actividad biológica ⁽¹³⁾. Otro beneficio de la aplicación microalgas en sistemas de biorremediación es su tendencia de liberar O₂ por medio de los procesos asociados a la fotosíntesis, contribuyendo de esta manera a la degradación de compuestos orgánicos lo que genera una acumulación de biomasa, misma que puede ser reutilizada en sistemas de producción de biocombustibles y/o en estrategias de avicultura, acuicultura o agricultura ⁽¹³⁾.

Con relación a el potencial de las algas y microalgas en estrategias para la remoción de Pb⁺², se ha evidenciado que en sistemas en serie de agitación continua mediante consorcios entre hongos y microalgas los porcentajes de remoción de Pb pueden ser hasta del 98.72%. Con base en estos resultados es posible decir que estos consorcios podrían usarse como un método efectivo y además de bajo costo que permite y estimula la remoción de Pb de efluentes antropogénicos o industriales ⁽⁷⁶⁾ ⁽⁷⁷⁾.

7.1.6 Biorremediación de pb con Líquenes

Se denomina líquen a el resultado de relaciones simbióticas cíclicas entre dos microorganismos propios del ambiente en general, los líquenes están compuestos por relaciones que se dan al menos entre un hongo heterótrofo también llamado micobionte y un socio o simbionte fotosintético denominado también fotobionte ⁽⁷⁸⁾. Ambos organismos y los procesos asociados a las interacciones fruto de las estrechas asociaciones simbióticas de carácter mutualista, es decir, con beneficio mutuo. Constituyen en integridad el concepto de líquen. Esta interacción mutualista se da porque el hongo micobionte, es un microorganismo de metabolismo heterótrofo por lo que necesita tomar compuestos orgánicos elaborados para nutrirse y el alga o fotobionte tiene la capacidad de hacer fotosíntesis y en el proceso generar hidratos de carbono a partir de CO₂ y agua ⁽⁷⁹⁾.

A los líquenes se les considera como bioindicadores de componentes nocivos y contaminantes en el suelo ⁽⁸⁰⁾. Algunos estudios han probado que los líquenes no liberan los MP que acumulan extracelularmente, lo cual indica que podrían ser posibles agentes de limpieza en el agua. Así mismo en ciudades donde existe

contaminación principalmente de Cd, Cu, Mo y Sb, se han encontrado en los líquenes presentes, valores mucho mayores a los normales en el aire urbano⁽⁸⁰⁾. En ese orden de ideas se entiende que los líquenes son asociaciones especialmente útiles para el diagnóstico de contaminantes, sin embargo, su papel como biorremediadores de MP en suelo está poco explorado, debido a que sus características fisiológicas los hacen habitantes con relaciones simbióticas con mayor impacto en el aire y en sistemas acuáticos o que circundan medios acuosos⁽⁸¹⁾.

7.1.7 Biorremediación de pb con Macroinvertebrados

El interés en los macroinvertebrados del suelo y su importancia en el ecosistema ha provocado el estudio de los isópodos terrestres, los cuales son miembros abundantes y extendidos de la macrofauna del suelo cuya biología básica se conoce bien ahora. En las regiones templadas, a menudo son el componente dominante del gremio de macro descomponedores de artrópodos y sirven como reguladores clave del sistema para las funciones del ecosistema de descomposición y reciclaje de nutrientes en algunos hábitats⁽⁸⁴⁾. Debido a que son sensibles a la labranza, los cambios en la entrada de basura, la aplicación de plaguicidas y otras contaminaciones, comparar su abundancia en sitios sujetos a diferentes regímenes de manejo puede dar una idea de cómo los cambios en el manejo de la tierra pueden afectar la función del ecosistema⁽⁸⁴⁾.

Otros autores incluso hablan de la relación que existen entre el microbioma intestinal de los isópodos, sus funciones biológicas y su papel en el ecosistema, evidenciando la importancia de las bacterias endosimbiontes, así como el microbioma en su conjunto en isópodos terrestres, destacando que estos organismos representan un excelente sistema modelo para estudiar diversas interacciones simbióticas a lo largo del espectro del parasitismo y el mutualismo. Es más, este grupo de animales habita virtualmente todos los tipos de ambientes terrestres desde la zona litoral marina hasta los desiertos, por lo que permiten el estudio de las interacciones anfitrión-simbionte a gran escala⁽⁸⁵⁾.

También existen estudios que relacionan a los macroinvertebrados terrestres con la bioacumulación de MP, tal es el caso de *Porcellio Scaber* que habita una amplia gama de hábitats, mastican plantas muertas o material vegetal mezclado con tierra en pequeños fragmentos⁽⁸⁶⁾. El epitelio hepatopancreático de *Porcellio Scaber* está constituido principalmente de dos tipos de células llamadas células B y células S⁽⁸⁷⁾. Las células B están involucradas en procesos de secreción y absorción de diferentes compuestos, de acuerdo con esto, los MP pueden ser

almacenados en células de tipo B y S; particularmente en el interior de las células de tipo B existen gránulos que pueden contener metales como cadmio, cobre, plomo, mercurio y zinc ⁽⁸⁸⁾; las células de tipo S contienen exclusivamente hierro ⁽⁸⁴⁾. De acuerdo con lo anterior, existen dos rutas por las cuales las cochinillas pueden realizar procesos de bioacumulación en sus cuerpos, una ruta es dependiente de sus relaciones simbióticas, donde las células B y S del sistema digestivo funcionan como almacén de MP y otra independiente de la microflora en la cual puede que intervengan sustancia como las metalotioneínas realizando funciones de suspensión, almacenamiento y precipitación de MP ⁽⁸⁸⁾.

A pesar de las numerosas investigaciones realizadas, algunas preguntas sobre el papel de los isópodos y sus limitaciones como indicadores ecológicos no están completamente respondidas. Por tanto, es evidente que su importancia seguirá siendo relevante. Sin embargo, se ha sugerido que el uso de los isópodos debe adaptarse a una estrategia con base en programas de seguimiento mediante la realización de estudios sobre el origen del estrés antropogénico, los mecanismos de desintoxicación de MP y la resistencia genética ⁽⁷⁾.

7.2 Perspectivas para la biorremediación de suelos contaminados con plomo en Colombia

Con base en el contexto mencionado es importante analizar cómo se puede diseñar una estrategia de biorremediación considerando el contexto socio ambiental específico en Colombia, esto además teniendo en cuenta la diversidad de ecosistemas, y suelos que existen en el país; el principal objetivo de este análisis es poder escoger entre todas las posibilidades el o los métodos más pertinentes para biorremediar el pb del suelo.

En ese sentido es relevante en primer lugar conocer la condiciones físicas y químicas tanto del suelo como del contaminante, debido a que son estas interacciones las que ofrecen el punto de partida para la correcta elección de una estrategia de biorremediación, esto quiere decir, que en un país como Colombia donde se ha evidenciado que no solo las zonas rurales si no también las urbanas ⁽¹¹⁾ son afectadas por la contaminación con pb, será necesario desarrollar alternativas complementarias y específicas de acuerdo con las características socioambientales del suelo afectado por esta problemática.

Colombia representa un reto para este propósito pues cuenta con 11 de los 12 tipos de suelos existentes alrededor el mundo ⁽³⁴⁾, con más de 31 geosistemas ⁽⁹³⁾ determinar un solo método de biorremediación con la capacidad de remediar

suelos contaminados con Pb es imposible sin tener en cuenta las particularidades de cada suelo en el país y su relación con el contaminante en cuestión, adicionalmente también es necesario considerar las variables de clima y la intervención humana. Además, es importante mencionar que Colombia es un país que año tras año presenta con más agudeza una extrema vulnerabilidad a los efectos nocivos e impredecibles asociados a el cambio climático, situación evidenciada en la manifestación de épocas con veranos más secos e inviernos más lluviosos⁽⁹⁴⁾.

De acuerdo con esto, hay que precisar que el clima de Colombia comprende tanto temporadas secas que van de diciembre a enero y de julio a agosto y temporadas de lluvias que ocurren entre los meses abril a mayo y de octubre a noviembre⁽⁹⁴⁾, esto implica que un buen entendimiento de las dinámicas Intraestacionales es fundamental para desarrollar cualquier estrategia de biorremediación, pues el suelo está directamente relacionado con estos eventos climáticos; estas temporadas de hecho, presentan oscilaciones climáticas que determinan las condiciones o manifestaciones del tiempo durante decenas de días o incluso en ocasiones de uno a dos meses, en términos generales en procesos de biorremediación in situ la mayoría de estas oscilaciones pasan desapercibidas porque su amplitud es pequeña, en comparación a otras como por ejemplo las del ciclo anual. Estas ondas son de gran importancia en los procesos involucrados en la predicción del clima, ya que en algunas ocasiones incluso pueden amortiguar o intensificar los procesos propios de las escalas interanuales⁽⁹⁵⁾. Además de lo anterior, la influencia de fenómenos ambientales representativos de la zona tropical a la que pertenece Colombia como el fenómeno de la niña y el niño, también tiene una relación directa en las interacciones ecológicas que se dan en el suelo.

Para entender mejor estos fenómenos es importante explicar de forma puntual que, el fenómeno de El Niño se define como el aumento en la temperatura media del Océano Pacífico, esto aunado las condiciones atmosféricas propicias, se expresa mediante un aumento de la temperatura media de hasta 0.5°C, además de una marcada disminución de lluvias que llega a ser en algunos sectores hasta del 60%, manifestándose también en sequías o heladas lo que a su vez causa un incrementado porcentaje de radiación ultravioleta que llega desde el sol hasta la superficie de la tierra⁽⁹⁴⁾⁽⁹⁵⁾. De esta manera la persistencia del tiempo seco o fenómeno del niño favorece considerablemente a el incremento de horas de brillo solar y por consiguiente a el aumento de cantidad de radiación solar incidente, la cual incluye las longitudes de onda ultravioleta incluidas en el espectro⁽⁹⁶⁾⁽⁹⁷⁾.

Por otra parte, el fenómeno de La Niña tiene su origen en el descenso de la temperatura media del Océano Pacífico, lo que, sumado a las condiciones atmosféricas propicias, tienen como resultado una disminución de la temperatura media de hasta 0.5°C además de un considerable aumento de las precipitaciones que llega a ser de más del 60% en algunos lugares, incluso presentándose lluvias fuertes que en más de una ocasión han generado problemas de inundaciones ⁽⁹⁴⁾⁽⁹⁵⁾. Adicionalmente en el fenómeno de la niña se registran un menor brillo solar y una reducción de las temperaturas, lo que pueden afectar negativamente el cultivo y la producción de las plantas durante el acontecer de este fenómeno ⁽⁹⁶⁾⁽⁹⁷⁾.

Con relación a los pisos térmicos, como ya se mencionó, en Colombia existen bastante particularidades, por ejemplo, el piso térmico cálido, donde las temperaturas son > 24°C, el pH oscila entre 3.5 y 4.37, la cantidad de materia orgánica se encuentra entre 0.1 y 6.6% y la humedad entre 60 y 90%, se recomienda biorremediación haciendo uso de bacterias, basidiomicetes, hongos filamentosos, algas y plantas ⁽³¹⁾⁽³²⁾⁽³³⁾. Las técnicas de bioestimulación y bioaumentación demuestran buenos resultados bajo la generalidad de estos parámetros edáficos tanto por la introducción de microorganismos eficientes en la remoción de Pb como en el uso de Macronutrientes y sales que favorecen el crecimiento de poblaciones bacterianas y la formación de compuestos químicos estables respectivamente; por otra parte el uso de compostaje tradicional también puede una estrategia viable, la degradación de compuestos orgánicos puede ayudar a mantener los niveles de pH ácido que es óptimo para mantener la disponibilidad de Pb en suelo ⁽³⁴⁾⁽³⁵⁾⁽³⁶⁾. No se recomienda el uso de macroinvertebrados debido a que las condiciones ácidas del suelo evitan su proliferación ⁽³⁴⁾⁽³⁵⁾⁽³⁶⁾.

En el caso de las zonas que corresponden al piso térmico templado, donde la temperatura se encuentra entre 17 y 24°C, el pH entre 4.5 y 6.7, la materia orgánica oscila entre 0.6 y 2.9% y la humedad está entre el 45.6 y 85.5 %, el compostaje tradicional puede ser una estrategia viable, la degradación de compuestos orgánicos puede provocar niveles de pH ácido y puede proveer de materia orgánica el suelo lo que es óptimo para mantener la disponibilidad de Pb ⁽³⁷⁾⁽³⁸⁾. Se recomienda biorremediación haciendo uso de bacterias, basidiomicetes, hongos filamentosos, algas y plantas, a través de las técnicas de bioestimulación y bioaumentación que demuestran buenos resultados bajo la generalidad de estos parámetros de microorganismos eficientes en la remoción de Pb como en el uso de macronutrientes y sales que favorecen el crecimiento de poblaciones bacterianas y la formación de compuestos químicos estables respectivamente; en niveles de pH neutros el uso de macroinvertebrados terrestres también puede tener resultados efectivos en cuanto la bioacumulación de Pb⁽³⁷⁾⁽³⁸⁾.

Para las zonas del país que se encuentran clasificadas dentro del piso térmico frío, y donde la temperatura está entre los 12 y 17 °C, el pH entre 6.1 y 7.3, la materia orgánica entre 1 y 7% y la humedad entre el 10 y 25, se recomienda la biorremediación haciendo uso de bacterias, hongos filamentosos y plantas a través de técnicas de bioestimulación, que demuestran buenos resultados bajo la generalidad de estos parámetros edáficos, sin embargo, la bioaumentación se hace complicada debido a que la selección de bacterias con buen desempeño a bajas temperaturas es dificultoso, aunque el pH es óptimo para el crecimiento de la mayoría de microorganismos estos mismos valores de pH también dificultan la movilidad de Pb en suelo y por lo tanto su bioacumulación, aun así el uso de microorganismos psicrófilos puede ser utilizado preferiblemente en conjunto con la estrategia de vermicompostaje debido a que esta mantiene neutros los niveles de pH y funciona bien a temperaturas relativamente bajas; en niveles de pH neutros el uso de macroinvertebrados terrestres también puede tener resultados efectivos en cuanto a la bioacumulación de Pb ⁽⁹⁰⁾.

Finalmente, para el piso térmico de páramo y las zonas clasificadas allí donde la temperatura está entre los 6 y 12°C, el pH oscila entre 4,5 y 4.85, la materia orgánica se encuentra entre 5.26 y 13.4 y la humedad entre 70 - 80 % Se recomienda biorremediación haciendo uso de las relaciones simbióticas micorrízicas que se pueden dar entre los hongos filamentosos y las plantas de la zona ⁽³⁷⁾⁽³⁸⁾. Con este enfoque técnicas de bioestimulación pueden facilitar procesos de biorremediación sin embargo las condiciones de temperatura y la radiación ultravioleta pueden afectar negativamente el desarrollo de microorganismos con capacidades biorremediadoras ^{(101) (102) (103) (104)}.

Tabla 2. Consideraciones para la biorremediación de pb de acuerdo con los pisos térmicos en Colombia.

Piso térmico	Organismos y microorganismos recomendados	Estrategia de biorremediación
Piso térmico cálido	Bacterias, Basidiomycetes, hongos filamentosos, algas y plantas.	Bioestimulación y bioaumentación. No se recomienda el uso de macroinvertebrados.
Piso térmico templado	Bacterias, Basidiomycetes, hongos filamentosos, algas y plantas.	Bioestimulación, bioaumentación y macroinvertebrados cuando los niveles de pH son neutros
Piso térmico	Bacterias, hongos filamentosos y plantas.	Bioestimulación, y macroinvertebrados cuando los

frío		niveles de pH son neutros no se recomienda la bioaumentación.
Piso térmico páramo	Hongos filamentosos y plantas	Bioestimulación.

Información adaptada de (34-38, 98-104)

Las técnicas de biorremediación muestran numerosos casos de éxito, sin embargo, estas técnicas pueden llegar a presentar algunas limitaciones que debentenerse en cuenta en la evaluación de posibles resultados obtenidos de las estrategias utilizadas, por ejemplo existen algunas restricciones de uso en suelos arcillosos, con marcadas estratificaciones o demasiado heterogéneos ya que en esta clase de suelos puede afectarse la transferencia de oxígeno, por tanto la implementación de estrategias de biorremediación en suelos con poca o nula población microbiana por su puesto no generará los resultados esperados; otra limitación es el contaminante en sí mismo, factores como las concentraciones y una alta movilidad hacen muy complicado desarrollar efectivamente estrategias debiorremediación⁽⁴⁶⁾, en algunas ocasiones en el suelo se hallan contaminantes que poseen una baja capacidad de solubilizarse, por lo que también se puede optar por suplementar el suelo contaminado con emulsificantes y surfactantes para asegurar su biodisponibilidad⁽⁴⁶⁾.

Otro de los factores que puede intervenir significativamente en el desarrollo o aplicación de estrategias ambientales, es el tiempo, pues como ya se había mencionado anteriormente es necesario comprender las estrategias de biorremediación como soluciones a largo plazo⁽⁷³⁾ y por lo general las biomásas asociadas a estos procesos son pequeñas y bajo condiciones adversas pueden llegar a tener rendimientos limitados, esto es importante teniendo en cuenta que *in situ* pocas son las variables que se pueden controlar de manera eficiente

(21)(24)(25)(46)(52)

Por otra parte, los factores socioculturales asociados a las poblaciones circundantes a los suelos contaminados también deben ser considerados, pues intervenir un suelo contaminado desconociendo las dinámicas de las poblaciones que allí habitan puede limitar o incluso invalidar los resultados de una estrategia de biorremediación por falta de apropiación y desconocimiento; el análisis respectivo de estas dinámicas sociales y económicas en una región específica permitirá en primera medida entender las posibles fuentes antropogénicas del contaminante en cuestión y así comprender si la estrategia puede llevarse a cabo no, por ejemplo bajo usos del suelos como en el caso de Chocó o Nariño donde existe una economía que depende de la explotación aurífera⁽¹⁵⁾ es complejo

implementar una estrategia de biorremediación que se ajuste a las características sociológicas específicas, dado que las fuentes del contaminante siempre estarán presentes mientras la explotación minera de oro sea rentable ⁽¹⁵⁾.

Esto evidencia que las características socioambientales específicas de las zonas contaminadas deben ser analizadas con detalle para diseñar, implementar y monitorizar una estrategia de biorremediación, sobre todo teniendo en cuenta que Colombia es un país mega diverso con características tan variadas no solo con respecto al patrimonio natural sino también en lo relacionado con las características socioculturales y económicas ⁽⁴⁸⁾. Cabe resaltar que un aspecto importante a considerar es el hecho de que una de las principales actividades económicas en Colombia es la agricultura, que es sustento para un alto porcentaje de la población, sobre todo rural, suelos que posean contaminación por el uso habitual de pesticidas u otros productos agronómicos pueden afectar la implementación de estrategias de biorremediación de Pb incluso si dichas aplicaciones no se hacen directamente en el suelo tratado⁽⁴⁸⁾, así pues el análisis de los factores socio ambientales constituye un eje fundamental sobre el cual planear e implementar estrategias de biorremediación en los suelos contaminados por Pb en Colombia.

8. CONCLUSIONES

- Las estrategias de biorremediación deben ser empleadas bajo conocimiento de las características del suelo, clima, contaminante y organismo biorremediador, puesto que existen una gran cantidad de variables a considerar a la hora de establecer estrategias descontaminación de suelos haciendo uso de materia orgánica viva; un mayor conocimiento de estas variables y sus repercusiones permitirán tanto el diseño de la estrategia como la evaluación de los parámetros que posibiliten monitorizar el proceso de descontaminación del suelo.
- Las relaciones simbióticas establecidas entre diferentes estrategias de biorremediación muestran muy buenos resultados en la bioacumulación de Pb en suelo, donde se presentan de forma natural y constante interacciones entre varios grupos o poblaciones bacterianas, por esto, el aprovechamiento de estas interacciones pueden fomentar la sinergia en los inóculos usados para biorremediación, así mismo puede facilitar en gran medida la bioacumulación de Pb.
- En Colombia existe una gran diversidad de ambientes, el tipo de suelos y las características propias de los ecosistemas ya contaminados o susceptibles de contaminar son determinantes para establecer estrategias

de biorremediación de plomo; adicionalmente es escasa la legislación que regule los niveles de Pb, lo que explica porque la contaminación por Pb y sus efectos en la salud han sido poco estudiados, por ello es necesario fortalecer estrategias que fomenten la visualización de las problemáticas asociadas por Pb en suelo no solo a nivel ambiental sino también a nivel de la salud pública.

9. RECOMENDACIONES

- Fortalecer la investigación orientada a la biorremediación de MP metales pesados en suelo es necesario en Colombia debido a que posee múltiples fuentes de contaminación de Pb, el desarrollo científico en esta área no solo es aprovechable para la biorremediación de Pb, también contribuye con el entendimiento general que se tiene sobre las variadas dinámicas edáficas del suelo colombiano, con el avance en conocimientos de los organismos y microorganismos con potencial biotecnológico, así como sus relaciones simbióticas en el ambiente. Los estudios genéticos y bioquímicos pueden ser un eje central para la contribución de conocimiento en el área de la biorremediación.
- Avanzar en la construcción de conocimiento en el área de biorremediación de Pb en suelo no solo contribuye a las ciencias ambientales, también contribuye en temas de salud pública, es recomendable establecer estudios interdisciplinarios con el objetivo de establecer relaciones sociales con las fuentes de Pb en el ambiente y así socializar acerca de los peligros que esta conlleva.
- El uso de aditivos químicos puede facilitar los procesos de biorremediación de Pb en suelo, sin embargo, es necesario tener en cuenta el comportamiento de estos aditivos químicos en el suelo en cuestión puesto que en algunos casos pueden llevar a la formación de sales u otras sustancias que pueden afectar de manera negativa la estrategia de biorremediación implementada.
- El uso de líquenes como bioacumuladores de MP en suelo es escaso y posee resultados poco alentadores, sin embargo, pueden ser buenos indicadores biológicos de la salud de un ecosistema.
- El uso de macroinvertebrados puede verse dificultado por las interacciones particulares de cada especie con el entorno en cuestión, por ejemplo, un Ph ácido evitará el desarrollo de varias especies del género *Porcellio* por lo que es necesario conocer los requerimientos ambientales de los macroinvertebrados en cuestión antes de proponerlos como posible estrategia de biorremediación.

10. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Cueva Cruz, JP; Urquizo Rojas na. presencia de metales pesados (cadmio y mercurio) bajo distintos usos del suelo en la comunidad boayacu perteneciente a la parroquia teniente Hugo Ortiz. 2020;3(2017):54–67. available from: <http://repositorio.unan.edu.ni/2986/1/5624.pdf>
2. Vargas García m del C, López mj, Suárez Estrella F, Moreno J. compost as a source of microbial isolates for the bioremediation of heavy metals: in vitro selection. sci total environ [internet]. 2012;431:62–7. available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2012.05.026>
3. Rodríguez Heredia D. intoxicación ocupacional por metales pesados. medisan [internet]. 2017;21(12):3372–85. available from: http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=s1029-30192017001200012
4. Ruiz Tovar KJ. determinacion de la capacidad de remocion de cadmio, plomo y niquel por hongos de la podredumbre blanca inmovilizados Diana Milena Morales Fonseca Katherine Johanna Ruiz Tovar. pontif univ javeriana. 2008;(Bogota,d.c.Colombia):1–139.
5. Rey Gómez dm. revisión bibliográfica de uso y/o formación de compuestos de coordinación en la remediación y mitigación de plomo, cadmio y mercurio en el suelo. 2019;65. available from: https://repositorio.unal.edu.co/bitstream/handle/unal/76462/tesis_entrega_biblioteca.pdf?sequence=1&isallowed=y
6. Yusuf Sukman J. bibliográfica de uso y/o formación de compuestos de coordinación en la remediación actividad minera en Colombia 2010-2016. вестник росздравнадзора. 2017;4:9–15.
7. Ghemari C, Waterlot C, Ayari A, Douay f, Nasri-Ammar k. bioaccumulation of heavy metals in the terrestrial isopod porcellionides pruinosus in the vicinity of gabes-ghannouch industrial complex. hum ecol risk assess [internet]. 2020;26(5):1270–84. available from: <https://doi.org/10.1080/10807039.2018.1564621>
8. Peláez Peláez m-j, Bustamante Cano J, Gómez López Ed. presencia de cadmio y plomo en suelos y su bioacumulación en tejidos vegetales en especies de brachiaria en el magdalena medio colombiano. luna azul. 2016;43(43):82–101.
9. Calao Cr, Marrugo JI. Efectos genotóxicos asociados a metales pesados en una población humana de la región de la Mojana, colombia, 2013. biomedica. 2015;35(3):139–51.

10. Zoraya Martínez, María S. González Jp y mc. contaminación de suelos agrícolas por metales pesados, zona minera El alacrán, Córdoba Colombia. temas agrar. 2017;22:32.
11. Zafra C, luengas E, temprano j. influencia del tráfico en la acumulación de metales pesados sobre vías urbanas: Torrelavega (España)-Soacha (Colombia). rev fac ing. 2013;(67):146–60.
12. Sánchez Barrón g. ecotoxicología del cadmio: riesgo para la salud de la utilización de suelos ricos en cadmio. fac farm univ complut trab [internet]. 2016;5(6):23. available from: http://147.96.70.122/web/tfg/tfg/memoria/gara_sanchez_barron.pdf
13. Ortiz Villota mt, Romero Morales M, Meza Rodríguez Id. la biorremediación con microalgas (*Spirulina máxima*, *Spirulina platensis* y *Chlorella vulgaris*) como alternativa para tratar la eutrofización de la laguna de Ubaque, Colombia. rev investig desarro e innovación. 2018;9(1):163–76.
14. Alfaro, R., García, E., Montenegro o. niveles de contaminación de mercurio, cadmio, arsénico y plomo en subsistemas de producción de la cuenca baja del río Bogotá. vol. 4, revista udca. 2002. p. 66–71.
15. d.c. sg de la a de b. decreto 948 de 1995. 1995;1995(41):1–53. available from: <http://www.alcaldiabogota.gov.co/sisjur/normas/norma1.jsp?i=1479>
16. Puerta Echeverri sm. los residuos sólidos municipales como acondicionares de suelos. rev lasallista investig. 2004;1(1):56–65.
17. Silva rl. contaminación por elementos menores y posibles soluciones. rev udca actual divulg científica. 2007;10(55):5–20.
18. ministerio de ambiente y desarrollo sostenible. diagnostico nacional de salud ambiental.
<https://www.minsalud.gov.co/sites/rid/lists/bibliotecadigital/ride/inec/igub/diagnostico%20de%20salud%20ambiental%20compilado.pdf>. 2012;368.
19. Reyes Guzmán M, Avendaño Prieto G. estudio ambiental sobre el riesgo ecológico que representa el plomo presente en el suelo / environmental study on ecological lead risks in soils. rev esc adm negocios. 2012;(72):66–75.
20. Calao C, Marrugo J. [genotoxic effects in a human population exposed to heavy metals in the region of la Mojana, Colombia, 2013]. biomedica [internet]. 2015;35 spec:139–51. available from: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/26535750>
21. Sánchez J, Marrugo J, Urango i. remocion de plomo, cadmio y mercurio en un efluente minero por medio de biomasa de hongos penicillium sp. univ Córdoba. 2014;151–4.
22. Beltrán Pineda M, Alida Marcela gr. metales pesados (cd, cr y hg): su impacto en el ambiente y posibles estrategias biotecnológicas para suremediación heavy metals (cd, cr and hg): impact on environment and possible

- biotechnological strategies for remediation alida marcela gómez rodriguez. 2015;(2):82–113.
23. Beltrán Pineda M, Gómez Rodríguez M. biorremediación de metales pesados cadmio (cd), cromo (cr) y mercurio (hg), mecanismos bioquímicos e ingeniería genética: una revisión. rev fac ciencias básicas. 2016;12(2):172–97.
 24. Solano G, Cruz J. eficiencia de actinomicetos en la remoción de metales pesados presentes en suelos contaminados procedentes del distrito de Quiruvilca. rev investig estud ing. 2018;4(1):9.
 25. Cadavid Velásquez J, Pérez Vásquez S, Marrugo Negrete J. contaminación por metales pesados en la Bahía Cispatá en Córdoba Colombia y su bioacumulación en macromicetos. gestión y ambiente. 2019;22(1):43–53.
 26. Esmeralda, Sara Romero G, Carolina, Diana Bustos G, María, Ana Marín H, Zulay, Cindy Rodríguez Hernández, Casallas I, Cecilia, Paula Vargas M. factores bióticos y abióticos que condicionan la biorremediación por *Pseudomonas* en suelos contaminados por hidrocarburos. nov - publicación científica en ciencias biomédicas. 2021;6(9):76–84.
 27. Cuartas D. biorremediación para la degradación de hidrocarburos totales presentes en los sedimentos de una estación de servicio combustible. univ pereira. 2012;
 28. Vargas M. comparación de un proceso de bioestimulación y la combinación de bioestimulación-bioaumentación para la degradación de boscalid, bifentrina y fenvalerato en suelo [internet]. vol. 1. 2018. available from: <http://www.fao.org/3/i8739en/i8739en.pdf><http://dx.doi.org/10.1016/j.adolescence.2017.01.003><http://dx.doi.org/10.1016/j.childyouth.2011.10.007><https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/23288604.2016.1224023><http://pdx.sagepub.com/lookup/doi/10>
 29. Rueda G, Rodríguez J. metodologías para establecer valores de referencia de metales pesados en suelos agrícolas perspectivas para Colombia. acta agronómica. 2011;60(3):203–17.
 30. Londoño F, Londoño P, Muñoz F. los riesgos de los metales pesados en la salud humana y animal. biotecnología en el sector agropecuario y agroindustrial. 2016;14(2):145.
 31. Anónimo. características físico-químicas de los plaguicidas y su transporte en el ambiente. 2018.
 32. Vera Méndez J. análisis de los impactos ambientales asociados a la implementación de los planes posconsumo en Colombia análisis de los impactos ambientales asociados a la implementación de los planes posconsumo en Colombia. univ nac colomb [internet]. 2018;189. available from: <http://bdigital.unal.edu.co/71057/1/1018442766.2018.pdf>

33. Car. diagnóstico por erosión. Corporación Autónoma de Cundinamarca [internet]. 2012;1–56. available from: <https://www.car.gov.co/uploads/files/5b9045459a4e5.pdf>
34. Malagón D. los suelos de Colombia. inst geogr agustin codazzi [internet]. 2002;21. available from: <http://www.sogeocol.edu.co/documentos/05loss.pdf>
35. Echezuría C. pisos bioclimáticos en Colombia. 2002.
36. Fernández M. la contaminación del suelo por plomo y sus consecuencias sobre la salud humana. 2018.
37. Cuizano N, Reyes F, Domínguez S, Llanos P, Navarro E. relevancia del pH en la adsorción de iones metálicos mediante algas pardas. rev soc química Perú [internet]. 2010;76(2):123–30. available from: <http://www.scielo.org.pe/pdf/rsqp/v76n2/a02v76n2.pdf>
38. Castro D. ensayo sobre tipología de suelos colombianos - énfasis en génesis y aspectos ambientales. rev acad colomb cienc [internet]. 2003;27(104):319–41. available from: <http://www.scielo.org.pe/pdf/rsqp/v76n2/a02v76n2.pdf>
39. Hernández C, Guzmán ncc. construcción y puesta en marcha de un reactor tipo batch a escala piloto para el tratamiento terciario de aguas residuales municipales de la ciudad de barranquilla. 2019.
40. Camacho J, López P. evaluación de un proceso de electrocoagulación en un reactor tipo batch para la remoción de cromo hexavalente (cr6+) con electrodos de aluminio – aluminio y de hierro – aluminio en condiciones de laboratorio [internet]. vol. 7. 2015. available from: https://www.researchgate.net/publication/269107473_what_is_governance/link/548173090cf22525dcb61443/download%0ahttp://www.econ.upf.edu/~reynal/civilwars_12december2010.pdf%0ahttps://think-asia.org/handle/11540/8282%0ahttps://www.jstor.org/stable/41857625
41. Guerrero Ceballos D, Pinta Melo J, Fernández Izquierdo P, Ibargüen Mondragón E, Hidalgo Bonilla S, Burbano Rosero E. eficiencia en la reducción de cromo por una bacteria silvestre en un tratamiento tipo batch utilizando como sustrato agua residual del municipio de pasto, colombia. univ y salud. 2017;19(1):102.
42. Montenegro Gómez D, Yamile Pulido S, Calderón Vallejo I. practicas de biorremediación en suelos y aguas. ecapma. 2019;1:49.
43. Fajardo. biorremediación de metales pesados. revisión y panor nac la biorremediación microbiana. 2006;1999(december):1–6.
44. Bestawy e, helmy s, Hussien H, Fahmy M, Amer R. bioremediation of heavy metal-contaminated effluent using optimized activated sludge bacteria. appl water sci. 2013;3(1):181–92.
45. Vásquez M, Figueroa J, Quintero A. biorremediación de lodos contaminados con aceites lubricantes usados. (spanish). rev colomb biotecnol

- [internet]. 2010;12(1):141–57. available from: <http://www.revistas.unal.edu.co/index.php/biotecnologia/article/view/15579/16340>
46. Martínez Rivera a. biorremediación bacteriana de suelo contaminado con fluidos y residuos de perforación mediante diferentes métodos. 2018;123.
 47. Delgado. introducción a Colombia microbiana en la biorremediación. revisión y panor nac la biorremedación microbiana. 2006;1999(december):1–6.
 48. Guerra C. la bioprospección como alternativa para la disminución de la contaminación ambiental producida por agroquímicos: aproximación del estado actual en Colombia. 2021.
 49. Arroyave N, Grajales V, Herrera Y. potencial biorrecuperación de un suelo de minería de carbón proveniente de amagá (Antioquia) para posterior uso agrícola. 2019; available from: http://bibliotecadigital.usbcali.edu.co/bitstream/10819/7484/1/potencial_biorrecuperacion_suelos_uribe_2019.pdf
 50. Arcila Quiroga la. análisis comparativo de la eficiencia de productos para la biorremediación de suelos contaminados con diesel (un 1202) utilizando métodos de bioestimulación y bioaumentación a escala piloto. 2016; available from: https://ciencia.lasalle.edu.co/ing_ambiental_sanitaria
 51. Rodríguez J, Ruiz J. propuesta metodologica para el monitoreo, control y recuperación del suelo mediante bioaumentación de microorganismos para sitios de disposición final de residuos sólidos. univ la salle [internet]. 2016;15–8. available from: https://ciencia.lasalle.edu.co/ing_ambiental_sanitaria
 52. Maravi A, Gutiérrez P. revisión sistemática: métodos de remediación biológica de metales pesados para la remediación de suelos contaminados. universidad andina del cusco. 2020. 1–118 p.
 53. Gamboa JI. análisis teórico de las técnicas mixtas de nano-biorremediación en la recuperación de suelos contaminados con metales pesados [internet]. vol. 68. 2020. available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ndteint.2014.07.001><https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2017.12.003><http://dx.doi.org/10.1016/j.matdes.2017.02.024>
 54. Hern Z. los hongos microscópicos ¿amigos o enemigos? los hongos microscópicos ¿amigos o enemigos? 2021.
 55. Villalba Villalba A. conociendo a los hongos microscópicos. nuestra tierra. 2021;3–5.
 56. Villaveces c. biorremediación usando el hongo *Aspergillus niger* en el tratamiento de aguas residuales. 2019;1–23. available from: <https://repository.unimilitar.edu.co/bitstream/handle/10654/32776/villavecespalacioscarlosdaniel2019.pdf.pdf?sequence=1&isallowed=y>
 57. Vera Rodríguez ja. remoción de mercurio en aguas contaminadas mediante microorganismos tolerantes, una aproximación a la biorremediación microbiana.

- univ st tomás [internet]. 2016;64. available from: http://repository.usta.edu.co/handle/11634/2952#wn-uql_uxic.mendeley
58. Nieves Y, Parra N, Villanueva S, Henríquez M. tech note: bioremediation, enemy of cadmium. *rev ing uc*. 2019;26(1):96–104.
59. Arrieta I Kent. biosorción de metales pesados por hongos filamentosos, aislados de cuerpos de agua altoandinos contaminados con relaves mineros de la sierra central del Perú. 2019;116. available from: <https://cybertesis.unmsm.edu.pe/handle/20.500.12672/10061>
60. Jeannette Marrerocoto A Díaz V y Orquídea C. mecanismos moleculares de resistencia a metales pesados en las bacterias y sus aplicaciones en la biorremediación. *rev cenic ciencias biológicas*. 2009;40(1).
61. Navarro Aviñó jp, Aguilar Alonso I, López Moya J. aspectos bioquímicos y genéticos de la tolerancia y acumulación de metales pesados en plantas. *ecosistemas*. 2007;16(2):10–25.
62. Riopedre Galán T, Delgado Álvarez A, Cabrera Rodríguez J, Cartaya Rubio O. relación entre los metales pesados y los hongos formadores de micorrizas arbusculares. *cultiv trop [internet]*. 2021;42(4):14. available from: <http://ediciones.inca.edu.cu/octubre-diciembre>
63. Lucio Flores S, Otazo Sánchez E, Romero Bautista I, Gaytán Oyarzún J. hongos macroscópicos como bioacumuladores de metales pesados. *pädi boletín científico ciencias básicas e ing del icbi*. 2021;8(16):60–5.
64. Peña González J. procesos de biorremediación en el tratamiento de residuos sólidos de cigarrillo. *univ colomb [internet]*. 2017;99. available from: <http://bdigital.unal.edu.co/61353/7/jeimmyroxanapeñagonzalez.2017.pdf>
65. Castro C, Rojas Becerra I, Santos Padilla B. “recuperación de suelos y degradación de fusarium spp por micorremediación con sustrato de pleurotus ostreatus en cultivo de mora, comas -2019 [internet]. 2020. available from: https://repositorio.ucv.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12692/50737/cusma_gm-sd.pdf?sequence=1&isallowed=y
66. Rodríguez A, Meléndez D. “ eficiencia de lentinus edodes , pleurotus ostreatus y agaricus bisporus para la remediación de suelos contaminados por plomo y cadmio proveniente de la oroya antigua , lima - Perú , 2019 ” [internet]. 2019. available from: http://repositorio.ucv.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12692/48865/rodriguez_fae-melendez_cdz-sd.pdf?sequence=1&isallowed=y
67. Olga Lucia Zúñiga blanco. alternativas para la recuperación de suelos contaminados por actividades industriales en Colombia. 2019.
68. Cordero C. fitorremediación in situ para la recuperación de suelos contaminados por metales pesados (plomo y cadmio) y evaluación de selenio en la finca furatena alta en el municipio de Útica (Cundinamarca). *univ libr colomb [internet]*. 2015;1:1–90. available from:

[https://repository.unilibre.edu.co/bitstream/handle/10901/7958/fitorremediación in situ para la remoción de metales pesados \(plomo y cadmio\) y evaluación de sel.pdf?sequence=1](https://repository.unilibre.edu.co/bitstream/handle/10901/7958/fitorremediación_in_situ_para_la_remocción_de_metales_pesados_(plomo_y_cadmio)_y_evaluación_de_sel.pdf?sequence=1)

69. Velásquez J. contaminación de suelos y aguas por hidrocarburos en Colombia. análisis de la fitorremediación como estrategia biotecnológica de recuperación. *rev investig agrar y ambient* [internet]. 2017;8(1):151–68. available from:
<https://hemeroteca.unad.edu.co/index.php/riaa/article/view/1846/2065#:~:text=los derivados de hidrocarburos -gasolina,pueden ser transportados por escorrentía>
70. García C, Villada L, Roboyo J. evaluación de la adaptación de *helianthus annuus* en asocio con hongos micorrízicos en suelos contaminados con plomo. *cuad act* [internet]. 2018;10:20. available from:
<https://eds.p.ebscohost.com/eds/pdfviewer/pdfviewer?vid=2&sid=2466ea0f-1106-4881-96cd-bad72aaf142c%40redis>
71. Zhan f, Li b, Jiang m, Yue x, He y, Xia y, et al. arbuscular mycorrhizal fungi enhance antioxidant defense in the leaves and the retention of heavy metals in the roots of maize. *environ sci pollut res*. 2018;25(24):24338–47.
72. Aguirre W, Fischer G, Miranda D. tolerancia a metales pesados a través del uso de micorrizas arbusculares en plantas cultivadas. *rev colomb ciencias hortícolas*. 2014;05(10):897–905.
73. Sepúlveda T, Trejo Jav, Pérez R. suelos contaminados por metales y metaloides [internet]. vol. 7, *syria studies*. 2015. 37–72 p. available from:
https://www.researchgate.net/publication/269107473_what_is_governance/link/548173090cf22525dcb61443/download%0ahttp://www.econ.upf.edu/~reynal/civilwars_12december2010.pdf%0ahttps://think-asia.org/handle/11540/8282%0ahttps://www.jstor.org/stable/41857625
74. Dreckmann K, Senties A, Núñez M. manual de prácticas de laboratorio. *biología de algas*. univ autónoma metrop unidad iztapalapa méxico [internet]. 2013;1–85. available from:
https://www.researchgate.net/publication/259043527_manual_de_practicas_de_laboratorio_biologia_de_algas
75. Londoño P. biorremediación como estrategia para la recuperación de suelos mineros contaminados con mercurio, cadmio y plomo (hg, cd, pb). *univ córdoba, fac ciencias básicas, dep química, programa química*. 2020;110.
76. Vega J. determinación de la biorremoción de plomo (pb+2) mediante hongos y microalgas nativas aisladas de efluentes industriales empacadas en un sistema en serie de agitación continua. 2015.
77. Pérez y efecto biorremediador de las clorofitas filamentosas en el tratamiento de aguas contaminadas por metales pesados provenientes del río chillón-callao. *univ católica sedes sapientiae*. 2017;

78. Margulis I. biología de los líquenes. 1993; available from: http://www.uv.es/barreno/biologia_de_los_liquenes.pdf
79. Bubas P, Núñez J, Crespo A, Divakar P. líquenes: que son y su uso como bioindicadores. *proy innov.* 2010;1(23):1–9.
80. Montes Matos M. “evaluación de la biorremediación y fitorremediación para la absorción de pb en suelos contaminados por relave minero [internet]. 2019. available from: <http://repositorio.cientifica.edu.pe:8080/handle/ucs/710>
81. Tello F. “eficacia de acumulación de la ortiga (*urtica urens*) para la fitorremediación de suelos contaminados con plomo en la provincia constitucional del callao, 2018.” 2019.
82. Loaiza A, trabajo caog. aislamiento e identificación de actinomicetos fijadores de nitrógeno en suelo del jardín botánico de la universidad tecnológica de pereira. vol. 53, *occupational medicine.* 2013.
83. Jiménez Y. los actinomicetos: una visión como promotores de crecimiento vegetal. 2010.
84. Paoletti M, Hassall M. Woodlice (isopoda: oniscidea): their potential for assessing sustainability and use as bioindicators. *agric ecosyst environ.* 1999;74(1–3):157–65.
85. Kostanjšek R, Strus J, Lapanje A, Avguštin G, Rupnik M, Drobne D. intestinal microbiota of terrestrial isopods. *intest microorg termitt other invertebr.* 2005;6:115–31.
86. Udovic M, Drobne D, Lestan D. bioaccumulation in *porcellio scaber* (crustacea, isopoda) as a measure of the edta remediation efficiency of metal-polluted soil. *environ pollut [internet].* 2009;157(10):2822–9. available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.envpol.2009.04.023>
87. Prosi F, Dallinger R. heavy metals in the terrestrial isopod *porcellio scaber* latreille. i. histochemical and ultrastructural characterization of metal-containing lysosomes. *cell biol toxicol.* 1988;4(1):81–96.
88. Bautista B. toxicidad de lodos de perforación minera en el bioindicador *porcellio laevis*. 2018;1–126. available from: <http://repositorio.cientifica.edu.pe:8080/handle/ucs/710>
89. Penagos Vargas J, Adarraga Buzón J, Aguas Vergara D, Molina E. reducción de los residuos sólidos orgánicos en Colombia por medio del compostaje líquido. *ingeniare.* 2011;(11):37–44.
90. Karen C, Stefany C, Rojas Huaroto Aurora, Esperanza. eficiencia del compostaje y vermicompostaje en la biorremediación de suelos contaminados con cadmio y plomo por pasivos ambientales mineros de Huamantanga - cantá [internet]. 2021. available from: <http://repositorio.unac.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12952/5802/tesis-contreras%2c%20cuba%2c%20rojas-fiarn-2021.pdf?sequence=1&isallowed=y>

91. Ricardo E, Fernando I, Ricardo O, Fernando I, Valle U, Patricia T, et al. avances en investigación sobre el compostaje de biorresiduos en municipios menores de países en desarrollo . lecciones desde Colombia. ing investig y tecnol [internet]. 2017;xviii(número 1):1–13. available from: <https://www.redalyc.org/pdf/404/40449649003.pdf>
92. Moreno Navarro J, Rojas Vilela I. revisión sistemática: análisis de métodos de descontaminación de suelos contaminados por plomo, cadmio y mercurio. 2021.
93. ideam. caracterización de los suelos y las tierras. suelos y tierras colomb [internet]. 2015;64–163. available from: <http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/005192/macizo/pdf/capitulo4.pdf>
94. fedegán. federación colombiana de ganaderos (fedegánf) - fondo nacional del ganado foro ganadería regional visión 2014 -2018 Cundinamarca resumen y conclusiones Bogotá d . c . 2014;81.
95. Montealegre J. actualización del componente meteorológico del modelo institucional del ideam sobre el efecto climático de los fenómenos el niño y la niña en Colombia, como insumo para el atlas climatológico. [internet]. actividades desarrolladas en el marco del contrato de prestación de servicios profesionales no ideam 078 -2014. 2014. available from: <http://www.ideam.gov.co/documents/21021/440517/actualizacion+modelo+institucional+el+niño++la+niña.pdf/02f5e53b-0349-41f1-87e0-5513286d1d1d>
96. ideam. evolución de precipitación y temperatura durante los fenómenos el niño y la niña en Bogotá - Cundinamarca (1951-2012). 2014;16. available from: https://repositorio.gestiondelriesgo.gov.co/bitstream/handle/20.500.11762/19771/precipitaciontemperaturaenosbogota_ideam_2014.pdf?sequence=3&isallowed=y
97. cenicafé. evento de la niña en Colombia recomendaciones para la caficultura. fondo nac del café / gerenc técnica / programa investig científica. 2016;
98. Cortés E, Torres J, Curicó J, Velandia D, palabras. biología de suelos amazónicos. 2020;
99. Rosales J, Lasso C, Suárez C. descripción del medio natural de la cuenca del Orinoco. 2014.
100. Peña Venegas C. dinámica de los suelos amazónicos:procesos de degradación y alternativas para su recuperación. [internet]. 2010. 115 p. available from: <http://hdl.handle.net/20.500.12324/19383>
101. Díaz Diez c. características de los suelos del bajo cauca y los principales procesos erosivos que sobre ellos se han dado. :3–8. available from: <http://hdl.handle.net/20.500.12324/35624>
102. Mantilla G, Torre Is, Gómez C, Napoleón Ordóñez J, Euscátegui C, Pérez P, et al. los suelos: estabilidad, productividad y degradación [internet]. vol. 35. 2019.

229–277 p. available from:
http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=s0120-3630201400010008

103. Rivera Pinilla M, Bustos Rodríguez H, Oyola Lozano D, rojas Martínez ya, Ávila Pedraza E, Pérez Alcázar G. characterization of agricultural soils mineral phases of rice, using the mössbauer spectrometry and x-ray diffraction. *rev colomb fis.* 2013;45(2):1–4.
104. Tolima C. zonificación de amenaza por movimientos en masa y zonificación geomecánica de la cuenca del río combeima – Ibagué.
105. Hassan, A., Periathamby, A., Ahmed, A., Innocent, O., & Hamid, F. S. (2020). Effective bioremediation of heavy metal–contaminated landfill soil through bioaugmentation using consortia of fungi. *Journal of Soils and Sediments*, 20(1), 66–80. <https://doi.org/10.1007/s11368-019-02394-4>
106. Imran, M., Ahmad, I., Barasubiye, T., Abulreesh, H. H., Samreen, Monjed, M. K., & Elbanna, K. (2020). Heavy metal tolerance among free-living fungi isolated from soil receiving long term application of wastewater. *Journal of Pure and Applied Microbiology*, 14(1), 157–170. <https://doi.org/10.22207/JPAM.14.1.17>
107. Periasamy, D., Mani, S., & Ambikapathi, R. (2019). White Rot Fungi and Their Enzymes for the Treatment of Industrial Dye Effluents (Vol. 3). https://doi.org/10.1007/978-3-030-25506-0_4
108. Sevak, P. I., Pushkar, B. K., & Kapadne, P. N. (2021). Lead pollution and bacterial bioremediation: a review. *Environmental Chemistry Letters*, 19(6), 4463–4488. <https://doi.org/10.1007/s10311-021-01296-7>
109. Láng, P. H. (2021). Recent Trends in Musicological Research. In *Bulletin of the American Musicological Society* (Vol. 1). <https://doi.org/10.2307/829255>
110. Gradinaru, A. C., Solcan, G., Spataru, M. C., Hritcu, L. D., Burtan, L. C., & Spataru, C. (2019). The ecotoxicology of heavy metals from various anthropogenic sources and pathways for their bioremediation. *Revista de Chimie*, 70(7), 2556–2560. <https://doi.org/10.37358/rc.19.7.7379>
110. Medfu Tarekegn, M., Zewdu Salilih, F., & Ishetu, A. I. (2020). Microbes used as a tool for bioremediation of heavy metal from the environment. *Cogent Food and Agriculture*, 6(1). <https://doi.org/10.1080/23311932.2020.1783174>
112. Heidari, P., & Panico, A. (2020). Sorption Mechanism and Optimization Study for the Bioremediation of Pb(II) and Cd(II) Contamination by Two Novel Isolated Strains Q3 and Q5 of *Bacillus* sp. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17(11), 1–20. <https://doi.org/10.3390/ijerph17114059>
113. Liu, P., Zhang, Y., Tang, Q., & Shi, S. (2021). Bioremediation of metal-contaminated soils by microbially-induced carbonate precipitation and its effects on ecotoxicity and long-term stability. *Biochemical Engineering Journal*, 166, 107856. <https://doi.org/10.1016/j.bej.2020.107856>

114. Xin, Y., Zhai, Z., & Qu, X. (2021). Identification of a Pb-Resistant Acetochlor-Degrading Bacterium for Bioremediation of Soils Contaminated with Herbicides. *Water, Air, and Soil Pollution*, 232(2), 1–9. <https://doi.org/10.1007/s11270-021-05026-1>
115. Pratush, A., Kumar, A., & Hu, Z. (2018). Adverse effect of heavy metals (As, Pb, Hg, and Cr) on health and their bioremediation strategies: a review. *International Microbiology*, 21(3), 97–106. <https://doi.org/10.1007/s10123-018-0012-3>