

ALTERNATIVAS PARA LA RECUPERACIÓN DE SUELOS CONTAMINADOS POR
ACTIVIDADES INDUSTRIALES EN COLOMBIA

OLGA LUCIA ZUÑIGA BLANCO

UNIVERSIDAD NACIONAL ABIERTA Y A DISTANCIA

PROGRAMA INGENIERÍA AMBIENTAL

CEAD PAMPLONA

2019

ALTERNATIVAS PARA LA RECUPERACIÓN DE SUELOS CONTAMINADOS POR
ACTIVIDADES INDUSTRIALES EN COLOMBIA

*Proyecto de grado presentado para obtener el título de
Ingeniero Ambiental*

OLGA LUCIA ZUÑIGA BLANCO

Tutor

ING. FABIÁN YÁÑEZ

UNIVERSIDAD NACIONAL ABIERTA Y A DISTANCIA

PROGRAMA INGENIERÍA AMBIENTAL

CEAD PAMPLONA

2019

Dedicatoria

Esta tesis va dedicada principalmente a Dios, por haberme regalado la vida y permitido llegar a este esperado momento de mi formación profesional. A mis hermanas por haberme apoyado a lo largo de toda mi carrera universitaria y de mi vida, ellas son el pilar y guía para salir adelante y no desvanecerme en medio de este camino, siempre han aportado mucha sabiduría a mi formación profesional, y como ser humano, sin ustedes no hubiera logrado esta meta.

Agradecimientos

Agradezco principalmente a Dios, por haberme dado las fuerzas para seguir luchando hasta el final, en aquellos momentos de dificultad y debilidad, para poder lograr este sueño.

A la Universidad (UNAD), por permitirme concluir con una etapa de mi vida, gracias por la paciencia, orientación y guiarme en el desarrollo de esta investigación, por haberme brindado las oportunidades para enriquecerme en conocimiento.

De manera especial a mi tutor de tesis Ing. Fabián Yáñez, quien desde el primer momento me brindó su amistad, su bondad, y fue de gran apoyo en momentos, por haberme guiado, no solo en la elaboración de este trabajo de titulación, sino a lo largo de mi carrera universitaria y haberme brindado el apoyo para desarrollarme profesionalmente y seguir cultivando mis valores.

Tabla de Contenido

	Pág.
Introducción	9
1. Generalidades de la Monografía	11
1.1 Descripción del Problema	11
1.2 Justificación	13
1.3 Objetivos	14
1.3.1 Objetivo General.	14
1.3.2 Objetivos Específicos.	14
2. Marco Referencial	15
2.1 Antecedentes	16
2.2 Bases Teóricas	18
2.3 Marco Legal	24
3. Metodología	27
3.1 Tipo de Estudio	27
3.2 Unidad de Trabajo	27
3.3 Procedimiento de Análisis Documental	28
3.4 Aspectos Éticos	29
4. Alternativas de Tratamiento para Suelos Contaminados por los Vertimientos Industriales	30

	6
5. Métodos de Remediación de Suelo Aplicable Acorde al Tipo de Contaminación Generados por las Industrias	38
6. Análisis Especies Vegetales Locales Potencialmente Utilizables en Tecnologías de Biorremediación	45
Conclusiones	55
Referencias Bibliográficas	57

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1 Servicios ambientales del suelo	19
Tabla 2 Agentes contaminantes por las prácticas industriales	22
Tabla 3 Procedimiento análisis documental	28
Tabla 4 Clasificación alternativa de tratamiento suelos contaminados	33
Tabla 5 Técnicas físico- químicas descontaminación del suelo	33
Tabla 6 Técnicas biológicas descontaminación del suelo	36
Tabla 7 Factores biodegradación del contaminante	40
Tabla 8 Procesos básicos de la fitorremediación	43

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1 Causas degradación de suelos	21
Figura 2 Formas de contaminación en el suelo causada por las actividades industriales	30
Figura 3 Estado del suelo y procesos de degradación	38
Figura 4 Factores evaluación riesgo del suelo contaminado	39
Figura 5 Diagrama de flujo pasos previos aplicación de la biorremediación en el suelo contaminado	42
Figura 6 Tipos de fitorremediación	44
Figura 7 Heliconia (<i>Psittacorum</i>), permite la formación de nitratos a partir de la materia orgánica	47
Figura 8 El Maíz (<i>Zea Mays</i>), planta excluyente o estabilizadora frente a los metales pesados	49
Figura 9 Tomate (<i>Solanum lycopersicum</i>), en actuación con otros biorremediadores permite descomponer la estructura de los hidrocarburos, minimizando su toxicidad	50
Figura 10 Alfalfa (<i>Medicago sativa</i>), apropiada para suelos contaminados con plomo	52
Figura 11 Peniseto (<i>Pennisetum setaceum</i>), planta ornamental que favorece el tratamiento de contaminación por metales pesados	53
Figura 12 Proceso de descontaminación del suelo	53

Introducción

La contaminación de los suelos es una problemática con alcance global, razón por la cual Colombia también la enfrenta, en ese sentido las prácticas vinculadas con la actividad industrial son uno de los focos de riesgo que contribuyen a su crecimiento e intensificación. En ese orden de ideas en la presente monografía se exploran e identifican las alternativas viables para su tratamiento y recuperación, eso a partir de la revisión bibliográfica de investigaciones y experiencias que son empleadas como referencia.

La pertinencia del tema radica en el suelo como recurso finito alberga gran parte de la biodiversidad del planeta y es el sustrato clave para el sostenimiento de la vida humana. En ese sentido los objetivos planteados reflejan el interés por identificar opciones de intervención, definir los métodos de remediación apropiados según los contaminantes industriales y analizar las diferentes especies vegetales locales que pueden ser de ayuda en esa misión.

En ese orden de ideas en el primer capítulo se presentan las generalidades que fundamentan y marcan la dirección de la investigación, en el segundo capítulo se contextualiza teóricamente el tema al analizar estudios similares, perspectivas académicas y el marco legal del problema. En el tercer capítulo se describen las bases metodológicas del proyecto que consiste en el enfoque cualitativo con el desarrollo de un análisis documental, desarrollado a partir de las fases heurística, hermenéutica, de consolidación y validación.

Posteriormente los capítulos subsiguientes presentan la solución y respuesta de cada uno de los objetivos previamente definidos, acompañados de figuras, imágenes y descripciones encargadas de ilustrar los procesos de biorremediación y fitorremediación seleccionados. Hacia el final del

documento se presentan las conclusiones obtenidas con el proceso. La presente investigación se encuentra enmarcada en el grupo de investigación Semillero SECAPMA.

1. Generalidades de la Monografía

1.1 Descripción del Problema

La sociedad desde hace décadas, en su mayoría, se desarrolla bajo un modelo económico capitalista enfocado hacia la explotación de recursos y la obtención de la máxima rentabilidad, una situación que ha causado un deterioro generalizado en el medio ambiente y ha configurado una problemática de alcance global, en la cual según la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación (FAO, 2018) el 33% del suelo a nivel mundial se encuentra contaminado.

La importancia del suelo es fundamental para garantizar la sostenibilidad de las diferentes formas de vida en el planeta tierra, puesto que al ser un recurso finito su degradación no es recuperable y genera reacciones en cadena como la alteración de la biodiversidad, la reducción de la materia orgánica que actúa como un filtro, entre otros aspectos (FAO, 2018).

De este modo, la realización de las actividades industriales es una de la mayores fuentes contaminantes debido a diferentes prácticas que han normalizado durante años, generando efectos nocivos tanto en el corto como en el largo plazo, entre esas acciones identificadas por Chan y otros (2015) se encuentran: el entierro de sustancias tóxicas bajo el suelo, el almacenamiento inadecuado o sin planeación de residuos, el vertido accidental de químicos, la acumulación de basuras, las fugas por problemas en las infraestructuras, el uso de pesticidas, el uso de algunos materiales, las chimeneas de las plantas de producción, entre otras.

En Colombia de acuerdo con El Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC) el estado de los suelos es crítico, puesto que cerca del 40% tiene algún grado de erosión, eso equivale a 45 millones

de hectáreas, siendo uno de los problemas centrales su compactación, un fenómeno que explican al afirmar que “es como si se estuvieran asfixiando. Están perdiendo su porosidad; cuando eso pasa, el suelo se degrada, se erosiona y pierde capacidad para producir alimentos, retener y liberar agua” (IGAC, 2018, p. 23). Entre sus orígenes identifican las malas prácticas agrícolas y agropecuarias con la inclusión constante de químicos, la tala de árboles, la minería indiscriminada y la contaminación de las fuentes de agua, entre otras.

Los departamentos que presentan mayor afectación son Caldas, Cesar y Córdoba, sin embargo también los están “Cundinamarca, Santander, La Guajira, Atlántico, Magdalena, Sucre, Tolima, Quindío, Huila y Boyacá” (Udca, 2017, p. 23). De esa forma cerca del 70% del territorio experimenta un crecimiento constante en la erosión, lo cual para el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (2018) implica una disminución constante en la calidad del terreno, una reducción de los ecosistemas y un desafío para garantizar la seguridad alimenticia de los habitantes.

En ese sentido en el país se han comenzado a explorar e implementar algunas prácticas de manejo orientadas a reducir los impactos causados por las actividades industriales, en esa medida se destaca el aumento en la producción de materia vegetal y busca favorecer el incremento en el contenido de materia orgánica por medio del uso de la reforestación, el no reemplazo de vegetación estacional por perenne, el uso de materiales orgánicos como fertilizantes, evitando así mismo la quema de áreas naturales, entre otras medidas (IGAC, 2017).

Desde el año 2015 se cuenta con la Política para la Gestión Sostenible del Suelo (Minambiente, 2015) que promueve su conservación como recurso natural, una herramienta que reconoce los peligros de los procesos de degradación como la erosión, la contaminación, el sellamiento, la salinización, la desertificación, entre otros, aunque todavía no se ha podido avanzar lo suficiente

en sus resultados, puesto que apenas se comienza a desarrollar y por consiguiente son mayores las incógnitas que las respuestas, representando entonces un área de oportunidad donde la tecnología puede ser de importancia estratégica para su ajuste y evolución.

De ese modo la pregunta de investigación se orienta a:

¿Cuáles son las alternativas viables para el tratamiento de los suelos contaminados por las actividades industriales en Colombia?

1.2 Justificación

La presente monografía tiene como propósito la elección de las mejores alternativas para la remediación de suelos contaminados, en ese orden de ideas la tarea fundamental se refiere a consultar fuentes de información confiables internacionales y nacionales, que permitan conocer la viabilidad de los últimos hallazgos en torno a las tecnologías de biorremediación y otras similares para su aplicación en Colombia.

Del mismo modo, propone una visión integral donde se analizan las alternativas de tratamiento frente a la afectación causada por los vertimientos industriales, identificando su viabilidad en las características y dinámicas del suelo colombiano, al reconocer tanto sus fortalezas como sus debilidades.

También promueve la selección de un grupo de prácticas de manejo para tratar los suelos que ya están contaminados, según las fuentes que causan el daño, generando una correspondencia entre el origen, los síntomas y las consecuencias, de esta forma se puede clasificar la información para un estudio comprensivo sobre el tema.

Igualmente, incentiva el análisis de las diferentes especies vegetales locales, potencialmente utilizables en las tecnologías de biorremediación para optimizar su uso en el país, una visión innovadora que está marcando la diferencia en la recuperación del suelo a nivel global, pero que en Colombia apenas está dando sus primeros pasos, para lo cual se requiere de una investigación extensiva y responsable en torno a su desarrollo, con lo cual esta investigación busca contribuir.

La necesidad e importancia de este tema de estudio, se ve ratificado por la FAO (2015), puesto que este organismo especializado de la ONU, considera que el cuidado y la recuperación del suelo es un desafío esencial para garantizar el futuro del planeta, debido a sus invaluable aportes al equilibrio ambiental, en palabras de la FAO (2015) “El suelo alberga la cuarta parte de la diversidad biológica del planeta” (p. 11), debido a los millones de microorganismos que allí tienen lugar, además de ser la mayor reserva de carbono orgánico y ser un agente activo en la mitigación del cambio climático a través del secuestro de carbono.

Otro aspecto que esta investigación pretende identificar y visibilizar son los nuevos instrumentos que sean pertinentes para la recuperación del suelo en el país. Además es una oportunidad para la autora de seguir profundizando en una mirada actualizada de como la Ingeniería Ambiental a partir del conocimiento puede generar nuevos caminos y estrategias para aportar al desarrollo sostenible de la sociedad, sin que necesariamente tengan que ir por vías diferentes la economía y el medio natural.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo General. Desarrollar una investigación documental sobre las alternativas actuales para el tratamiento de suelos contaminados por las actividades industriales en Colombia.

1.3.2 Objetivos Específicos.

- Identificar alternativas de tratamiento para suelos contaminados por los vertimientos industriales.
- Definir los métodos de remediación de suelo aplicable acorde al tipo de contaminación generados por las industrias
- Analizar diferentes especies vegetales locales potencialmente utilizables en tecnologías de biorremediación y optimizar su uso mediante distintas prácticas.

2. Marco Referencial

2.1 Antecedentes

El estudio de Munive, Loli, Azavache y Gamarra (2018) titulado *Fitorremediación con Maíz (Zea mays L.) y compost de Stevia en suelos degradados por contaminación con metales pesados*, estableció entre sus hallazgos que el maíz es una planta exclusora y estabilizadora de metales pesados, aunque presenta el vermicompostaje de Stevia como el más efectivo absorbiendo los metales del suelo. El aporte de esta investigación radica en la identificación y descripción del conjunto de tecnologías conocidas como fitorremediación donde se utilizan las plantas para descontaminar el suelo, el aire o el agua, por consiguiente a través del estudio de caso que plantea se observan sus alcances y formas de preparación para que pueda generar consecuencias óptimas.

El proyecto de Fabelo (2017) denominado como *Propuesta de metodología para la recuperación de suelos contaminados*, describe en sus conclusiones que la factibilidad económica y tecnológica son elementos claves para elegir uno u otro sistema de recuperación. Su contribución se ve expresada en la metodología que promueve con una secuencia de pasos para desarrollar el proceso de recuperación en función de las condiciones del suelo y sus contaminantes, eligiendo las técnicas más adecuadas y apostando por una implementación escalable que sea sostenible en el largo plazo.

Por su parte en el ámbito nacional, se encuentra el estudio de Martínez (2018) denominado *Biorremediación bacteriana de suelo contaminado con fluidos y residuos de perforación mediante diferentes métodos*, en sus resultados evidencia que la unión de los tratamientos de bioaumentación y bioestimulación favorece una gran eficiencia de los procesos biológicos, eso según cada tipo y situación del suelo, lo cual desde una perspectiva de experimentación, debe ser registrada para

seguir sus avances o retrocesos y poder llegar a recomendar determinadas formas de intervenir en la recuperación del suelo.

La investigación de Garzón, Rodríguez y Hernández (2017) titulada *Aporte de la biorremediación para solucionar problemas de contaminación y su relación con el desarrollo sostenible*, describe que existen dificultades en torno a la biorremediación del suelo en aspectos como: la variabilidad ambiental del sustrato, el potencial limitado de la biodegradación, la viabilidad de los microorganismos según la problemática, entre otros aspectos que deben ser analizados para llegar a los resultados esperados. El aporte del estudio consiste en relacionar las tecnologías de recuperación del suelo con el desarrollo sostenible, interesándose por la contaminación generada por las industrias y los desafíos que presenta para el uso estratégico de la biorremediación como alternativa a las técnicas físico-químicas tradicionales.

En el ámbito regional, en la investigación de Simanca (2017) denominada *Evaluación del desempeño de la biorremediación en suelos contaminados con hidrocarburos mediante el método de landfarming en la planta de tratamiento del municipio de Aguachica, Cesar*, en la cual el investigador destaca la modalidad *landfarming* porque permite evitar las alteraciones del suelo, sin generar desechos, contando con una adaptación a los suelos estériles, especialmente en la gestión de residuos peligrosos ayudando a reducir los tiempos de biorremediación, esto es importante al estudiar la recuperación del suelo por la contaminación que producen las actividades industriales en Colombia.

El estudio de Bernal (2014) titulado *Fitorremediación en la recuperación de suelos: una visión general*, refleja que la elección de una técnica determinada, dependerá por ejemplo, de la posible relación entre los procesos fisiológicos en la planta y los compuestos tóxicos presentes en el suelo. Debido a que en cada modalidad de la fitorremediación intervienen el tipo de contaminante, la

diversidad microbiana y las propiedades del suelo, aspectos que deben ser evaluados antes de optar por alguna forma de implementación.

En conjunto las investigaciones consultadas evidencian que este tema cuenta con avances y hallazgos significativos que dan cuenta de los aportes de la tecnología para trabajar en la recuperación del suelo, considerando sus características y problemáticas específicas, así mismo se identificaron metodologías de implementación que pueden ser tomadas como referencia.

2.2 Bases Teóricas

Los Suelos. En la perspectiva de Silva y Correa (2009) se define el suelo de manera general como “componente esencial del ambiente en el que se desarrolla la vida; es vulnerable, de difícil y larga recuperación (tarda desde miles a cientos de miles de años en formarse), y de extensión limitada, se considera un recurso natural no renovable” (p. 15). No obstante hay definiciones más complejas como aquellas que consideran sus procesos de transformación y desarrollo al señalar que por ser el suelo la capa más superficial de la corteza terrestre, también es el encargado de sustentar las diferentes formas de vida en el planeta (Ortiz, Sanz, Dorado y Villar, 2007).

Sin embargo uno de sus aspectos más relevantes es su proceso de formación, donde se evidencia la complejidad de su tratamiento, puesto que es el resultado de largos procesos en los que intervienen el clima, la superficie de la litosfera y los seres vivos. Primero las rocas son meteorizadas por la acción de los fenómenos meteorológicos y luego se van fragmentando para mezclarse con restos orgánicos para llegar a estratificarse, formando lo que se denomina como suelo (Echarri, 1998, citado en Silva y Correa, 2009).

Entre los servicios ambientales que presta el suelo como recursos natural, se encuentran los siguientes, los cuales han sido clasificados por Dorronsoro (2007):

Tabla 1 Servicios ambientales del suelo

Servicio Ambiental	Descripción
Generación de alimento y demás producción de biomasa.	Los alimentos y otros productos agrícolas, esenciales para la vida humana, así como la silvicultura dependen totalmente del suelo. Prácticamente toda la vegetación-pastos, cultivos y árboles, inclusive- necesitan del suelo para obtener tanto agua y nutrientes como soporte físico.
Almacenaje, filtración y transformación.	El suelo almacena minerales, materia orgánica, agua y varias sustancias químicas. Sirve de filtro natural de las aguas subterráneas, la principal reserva de agua potable, y libera dióxido de carbono, metano y otros gases a la atmósfera.
Hábitat y reserva genética.	El suelo es el hábitat de una cantidad ingente de organismos de todo tipo que viven tanto en el suelo como sobre él, cada uno con un genotipo irremplazable. Esta es una función ecológica esencial.
Entorno físico y cultural para la Humanidad.	El suelo sirve de base a las actividades humanas y es asimismo un elemento del paisaje y del patrimonio cultural.
Fuente de materias primas.	Los suelos proporcionan materias primas tales como las arcillas, las arenas y los minerales, entre otros, que son empleados en los diversos procesos productivos de las organizaciones.

Fuente: Dorronsoro (2007)

De la misma forma permite el esparcimiento de la población, hace parte de la identidad cultural de ciertas comunidades de acuerdo con los paisajes, también sirve como vertedero de desechos, y

así en general evoluciona tanto como lo hacen las diferentes formas de vida en el planeta, aunque a un ritmo que tiende a ser despacio, puesto que por ser el suelo un sistema abierto se transforma continuamente, pero de manera muy lenta, razón por la cual se le clasifica con un recurso natural no renovable (Cotler, Sotelo, Zorrilla y Quiñones, 2007).

Asimismo, dentro de su desarrollo surgen los fenómenos de degradación, los cuales disminuyen la capacidad del suelo para cumplir con sus funciones, en esa línea Oldeman (1998) los divide en dos: la primera se refiere al desplazamiento del material edáfico, propiciada por el agua o el viento y la segunda se enfoca en el deterioro interno que involucra procesos químicos como la acidificación, “resultado de un desequilibrio en la actividad biológica en el suelo, incluida la pérdida del banco de semillas y microorganismos de importancia en procesos de fertilidad y descontaminación” (1998, p. 32).

En ese orden de ideas los procesos no suceden de forma única o separada sino que varios de ellos pueden tener una incidencia conjunta sobre la degradación del suelo, por ejemplo la erosión hídrica puede generar un deterioro como la pérdida de la fertilidad, esto refleja su nivel de fragilidad porque en general “todo uso de la tierra, que modifica el tipo y la densidad de las poblaciones vegetales originales y/o que dejan al descubierto la superficie del suelo, propicia su degradación” (Cotler y otros, 2007, p. 7).

Entre las principales causas de la degradación se identifican las siguientes:

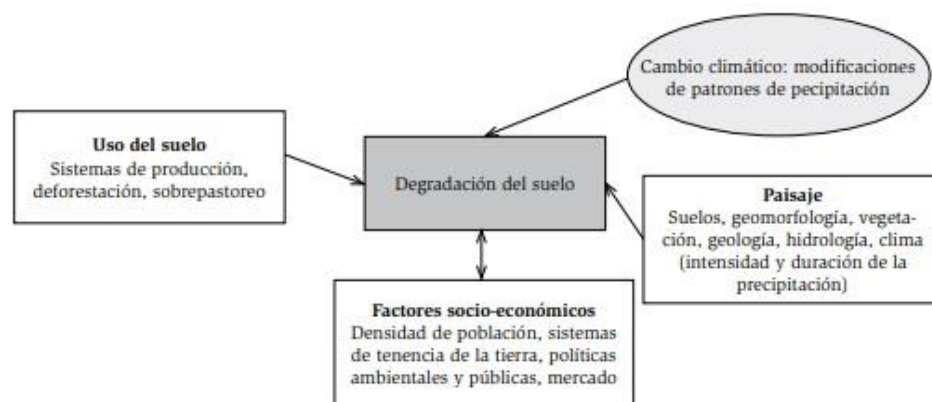


Figura 1 Causas degradación de suelos
Fuente: Cotler y otros (2007)

En los efectos de la degradación, se incluye la contaminación, la cual es descrita por Wagner (1996) como una acción que afecta el suelo, bien sea que se origine por el uso de químicos o por el crecimiento de las industrias económicas, como son “ el manejo de hidrocarburos, aplicación de plaguicidas, la mala planeación en rellenos sanitarios, la acumulación excesiva de desechos industriales, así como las grandes cantidades de desechos sólidos generados por asentamientos humanos” (p. 72).

De la misma manera para Ortiz y otros (2007) es necesario considerar los siguientes aspectos al momento de abordar la contaminación del suelo: más allá de identificar la sustancia que produce el desequilibrio, se debe verificar si su presencia supera la máxima cantidad soportable por este recurso, es decir si excede su capacidad de amortiguación. Por su parte, Uchique (2017), identifica cuatro factores claves para el estudio de la contaminación en el suelo: el primero es la vulnerabilidad que consiste en la sensibilidad mostrada por el suelo ante los agentes contaminantes, en especial cuando su capacidad de amortiguación sea baja, el segundo es la biodisponibilidad que habla de la asimilación del contaminante a través de los organismos, esta dependen también del sistema radicular de las plantas y de las fases solución y sólida del suelo, el

tercero es la movilidad que se encarga de regular la distribución y el transporte del suelo hacia otros medios, finalmente el cuarto factor es la pertinencia que controla la duración del efecto negativo en el suelo.

En esa medida los principales agentes contaminantes derivados de las actividades industriales son los siguientes:

Tabla 2 Agentes contaminantes por las prácticas industriales

Agentes	contaminantes	Descripción
industriales		
Metales pesados		Estos elementos tienen su origen en el substrato litológico, apareciendo bien como elementos nativos o incorporados normalmente en las estructuras de sulfuros, silicatos, carbonatos, óxidos e hidróxidos. Los aportes dominantes se producen por deposición atmosférica y afectan de forma significativa a los primeros centímetros de suelo. Son fuentes importantes de metales en suelos las cenizas y escorias de los procesos de combustión de carbón fósil o derivados del petróleo, el aporte directo procedente de actividades agrícolas (adición de fertilizantes, pesticidas, lodos de depuradoras, compost, etc) y su acumulación a partir de residuos industriales, urbanos y mineros (metalurgia, fabricación de pinturas, barnices, disolventes, baterías, textiles, curtidos, etc).
Lluvias ácidas		Consisten en deposiciones húmedas (agua de lluvia, nieve y niebla) o secas (gases o partículas sólidas) de la atmósfera constituidas principalmente por SO ₂ y óxidos de nitrógeno, NO _x , que proceden fundamentalmente de actividades industriales, como las emisiones de centrales térmicas y las producidas por la combustión de hidrocarburos, la desnitrificación de fertilizantes añadidos en exceso a los suelos y otros procesos naturales similares que tienen lugar en zonas de manglares, marjales, arrozales, volcanes, etc.
Salinización		Para que se produzca esta acumulación de sales en el suelo es necesario que haya un fuerte aporte de sales y que su eliminación del suelo esté impedida por algún mecanismo, como malas

condiciones de drenaje y lavado. El hombre también contribuye en gran medida a la contaminación de los suelos por sales a través de prácticas agrícolas inadecuadas, como el riego con aguas salinas y el empleo de cantidades muy elevadas de fertilizantes solubles, de la sobreexplotación de acuíferos, que ocasiona un descenso de los mantos freáticos regionales y la intrusión de agua salina, y de actividades industriales y mineras que contaminan directamente los suelos o indirectamente a partir de deposiciones atmosféricas o de las aguas superficiales.

Fitosanitarias

El hombre, con objeto de proteger los cultivos frente al efecto pernicioso de múltiples organismos vivos (insectos, hongos, nemátodos, malas hierbas, etc.) y aumentar la producción viene utilizando desde hace décadas productos fitosanitarios como plaguicidas, herbicidas, fungicidas y fertilizantes. Una vez aplicados, son absorbidos por las plantas o sufren procesos de adsorción, volatilización, lavado y degradación biótica y abiótica en el suelo que conducen a la formación de nuevos productos, en ocasiones más móviles, persistentes y más peligrosos que los compuestos de partida, que son susceptibles de contaminar los suelos, las aguas y pasar a la cadena trófica.

Contaminantes orgánicos

La producción y el uso masivo de compuestos orgánicos los hace estar entre los contaminantes más frecuentes en suelos y aguas. Entre ellos podemos citar los hidrocarburos monoaromáticos, hidrocarburos policíclicos aromáticos, hidrocarburos alifáticos, hidrocarburos policlorados, fenoles, nitroaromáticos, alcoholes, éteres, disolventes clorados, isocianatos, cianuros orgánicos, carbonilos de metales, etc. La distribución y el comportamiento de los compuestos orgánicos contaminantes en suelos están gobernados por diferentes factores que incluyen las características del suelo (pH, contenido en materia orgánica y arcilla, potencial redox, contenido en nutrientes, actividad microbiológica, etc.), las propiedades específicas de cada compuesto (presión de vapor, solubilidad, estabilidad química, biodegradabilidad, características de sorción, etc.) y factores ambientales como la temperatura y la

precipitación. Así, estos compuestos pueden sufrir procesos de lavado, biodegradación, volatilización, foto descomposición e hidrólisis, inmovilización por adsorción y formación de enlaces con partículas de arcilla, óxidos, oxihidróxidos, etc., y transferencia a organismos.

Fuente: Ortiz y otros (2007)

Seguidamente para la recuperación de suelos contaminados se identifican tres grupos de técnicas: contención, confinamiento y descontaminación, esta última corresponde al enfoque dado a la presente monografía, especialmente en la modalidad llamada tratamientos biológicos los cuales se clasifican entre aquellos que se dan sobre el suelo directamente (*in situ*) y los que se dan desde el laboratorio tomando muestras (*ex situ*), entre los primeros se tiene la biorrecuperación, la biodegradación asistida, la biotransformación de metales, la fitorrecuperación, el bioventing. Mientras que en los segundos se reconoce el landfarming, el biopilas, el compostaje y los lodos biológicos, entre otros, los cuales van a ser desarrollados en los capítulos 4, 5 y 6 de este documento de investigación (Xiong, 2015).

2.3 Marco Legal

En la Constitución Nacional se destaca la importancia de contar con un medio ambiente sano:

Todas las personas tienen derecho a gozar de un ambiente sano. La ley garantizará la participación de la comunidad en las decisiones que puedan afectarlo. Es deber del Estado proteger la diversidad e integridad del ambiente, conservar las áreas de especial importancia ecológica y fomentar la educación para el logro de estos fines (Artículo 79, 1991).

Asimismo establece la responsabilidad de llevar un seguimiento al uso y aprovechamiento de los recursos naturales:

El Estado planificará el manejo y aprovechamiento de los recursos naturales, para garantizar su desarrollo sostenible, su conservación, restauración o sustitución. Además, deberá

prevenir y controlar los factores de deterioro ambiental, imponer las sanciones legales y exigir la reparación de los daños causados (Artículo 81, 1991).

Mientras resalta la necesidad de regular el uso del suelo:

Es deber del Estado velar por la protección de la integridad del espacio público y por su destinación al uso común, el cual prevalece sobre el interés particular. Las entidades públicas participarán en la plusvalía que genere su acción urbanística y regularán la utilización del suelo y del espacio aéreo urbano en defensa del interés común (Artículo 82, 1991).

En ese orden de ideas también aborda la relación entre la calidad de vida de los habitantes y el saneamiento ambiental:

El bienestar general y el mejoramiento de la calidad de vida de la población son finalidades sociales del Estado. Será objetivo fundamental de su actividad la solución de las necesidades insatisfechas de salud, de educación, de saneamiento ambiental y de agua potable. Para tales efectos, en los planes y presupuestos de la Nación y de las entidades territoriales, el gasto público social tendrá prioridad sobre cualquier otra asignación (Artículo 366, 1991).

Otra norma relevante es el Código Nacional de Recursos Naturales, es decir el Decreto 2811 de 1974, donde se reconoce el ambiente como un patrimonio común y en esa medida en el artículo 2 señala lo vital de “Lograr la preservación y restauración del ambiente y la conservación, mejoramiento y utilización racional de los recursos naturales”, en su artículo 8 define los “(...) factores que deterioran el ambiente, entre otros: La degradación, la erosión, el revenimiento de suelos y Las alteraciones nocivas de la topografía”.

También se tiene en cuenta el Conpes 3177 de 2002 sobre las acciones prioritarias y lineamientos para la formulación del plan nacional de manejo de aguas residuales. Del mismo modo se reconoce la normatividad presente en el Decreto 1713 de 2002 que reglamenta, entre otros temas, la Gestión Integral de Residuos Sólidos, inicialmente legislada a través de la Ley 99 de 1993.

Además el Decreto 4741 de 2005 que reglamenta parcialmente la prevención y el manejo de los residuos o desechos peligrosos para proteger la salud humana y del ambiente. Entretanto

también se tiene en cuenta la Ley 1333 de 2009 que regula las principales infracciones en materia ambiental. Por otro lado e igualmente se considera lo señalado en el Decreto 3930 de 2010 en cuanto a usos del agua y residuos líquidos y se dictan otras disposiciones.

En conjunto el marco normativo del país ofrece una guía importante frente a los riesgos y amenazas de los suelos, así como frente a los instrumentos o herramientas que se han habilitado para la prevención, tratamiento y recuperación de los mismos.

3. Metodología

3.1 Tipo de Estudio

El paradigma cualitativo con enfoque de análisis documental, es la metodología definida para la presente monografía, en ese sentido “da profundidad a los datos, la dispersión, la riqueza interpretativa, la contextualización del ambiente o entorno, los detalles y las experiencias únicas” (Hernández Sampieri y otros, 2014, p. 21).

Una situación que permite estudiar inductivamente el tema de la contaminación de los suelos y su recuperación para llegar a generalizaciones destinadas a diseñar alternativas de acción, así como describir los procesos asociados con la problemática y establecer interpretaciones holísticas.

Por su parte, el análisis de la revisión documental consiste en un “trabajo sistemático, objetivo, producto de la lectura, análisis y síntesis de la información producida por otros, para dar origen a una nueva información, con el sello del nuevo autor” mediante recolectar, organizar analizar e interpretar información de fuentes bibliográficas de un determinado tema” (Morales, 2003, p. 2).

En ese sentido se sistematizan los documentos para identificar los aportes de autores e investigadores respecto a los métodos de remediación, las especies vegetales locales potencialmente utilizables en tecnologías de biorremediación, entre otros aspectos de valor.

3.2 Unidad de Trabajo

Se plantea como unidad de trabajo el conjunto de investigaciones, artículos científicos e informes consultados sobre el estado del suelo en Colombia. En ese sentido los criterios de inclusión establecidos hacen alusión al uso de fuentes confiables en lo académico e institucional, las cuales desarrollen temas relacionados con los métodos de recuperación del suelo y con una visión actualizada a los nuevos avances en materia tecnológica. Por otra parte los criterios de exclusión se refieren a no emplear información de fuentes informales o sin autor, tampoco citar experimentos o datos que no sean resultado de un proceso de validación.

3.3 Procedimiento de Análisis Documental

Se definen las siguientes fases para la recolección y el análisis de la información:

Tabla 3 Procedimiento análisis documental

Fase	Descripción
Heurística	Corresponde a la definición de las fuentes bibliográficas, las cuales son las bases de datos científicas como Redalyc y Scielo, así como los repositorios con las investigaciones de las universidades y los documentos oficiales de Instituciones Públicas internacionales y nacionales.
Hermenéutica	Se refiere a la interpretación de los documentos consultados a partir del establecimiento de los siguientes temas claves: suelos contaminados, alternativas de tratamiento, métodos de remediación, tecnologías de biorremediación y especies vegetales locales.

Consolidación	En esta fase se organizan los datos recopilados y se elabora un esquema conceptual del tema, lo cual permite definir la estructura de la monografía.
Validación	Corresponde a la evaluación de la monografía en dos instancias, la primera a cargo del asesor y la segunda en la sustentación final, por parte de los jurados.

Fuente: Zuñiga, Olga (2019)

3.4 Aspectos Éticos

La presente investigación se propone generar valor social y científico al abordar un tema de interés general como lo es la contaminación del suelo, usando fuentes académicas de validez, algunas de ellas aún con resultados no concluyentes, pero desarrolladas con responsabilidad y claridad al comunicar sus resultados (González, 2012).

4. Alternativas de Tratamiento para Suelos Contaminados por los Vertimientos

Industriales

A partir de la entrada en vigencia de la Resolución 1362 de 2007 en el país se crea el Registro de Generadores de Residuos Peligrosos que obliga a las industrias más contaminantes, hidrocarburos, fabricantes de piezas mecánicas, las acerías y las metalmecánicas a reportar cuando producen desechos de 10 toneladas o más (IDEAM, 2016), en esa línea los desechos industriales mayoritariamente generados a nivel nacional son: el mercurio, plomo, cadmio, cromo, arsénico y flúor, eso por el lado de los metales, en cuanto a los plaguicidas se destaca los organoclorados, piretroides, el glifosato y los organofosforados (Minambiente, 2012). Además del asbesto, cuyo uso fue recientemente prohibido con la aprobación de la Ley 1968 de 2019 que entrará en vigencia a partir de enero del 2021.

De los contaminantes generados por los procesos industriales en Colombia “alrededor del 39% fueron gestionadas adecuadamente, el 32% aprovechadas y el 28% restante llegó a los basureros sin ningún tipo de tratamiento” (IDEAM, 2016, p. 13). De esa manera se producen dos fenómenos principales en el suelo:

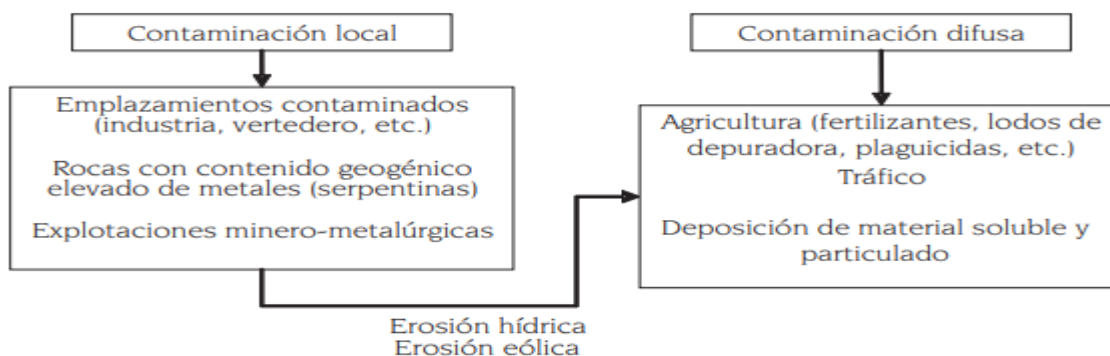


Figura 2 Formas de contaminación en el suelo causada por las actividades industriales

Fuente: Silva y Correa (2009)

En ese orden de ideas un ejemplo de contaminación local corresponde a la degradación edáfica que proviene de fuentes específicas como los vertederos de las fabricas con los lixiviados o la explotación minera con su de los reactivos químicos y la generación de aguas ácidas, los cuales pueden afectar al sustrato geológico. Mientras que la contaminación difusa ocurre por medio de sustancias contaminantes como aquellas que son empleadas para el desarrollo de los cultivos en la agricultura y también por el tratamiento dado a los residuos que pueden ser movilizados, sean solubles o particulados a zonas alejadas de las plantas de producción.

Un estudio de caso de Mojiri (2011) describe la contaminación del suelo con Cadmio y Plomo en una provincia del oeste de Irán, por causa de actividades industriales como el procesamiento de minerales metálicos o el uso de fertilizantes de fosfato, de tal forma se empleó la siembra de maíz para intervenir sobre las características físicas o químicas del suelo, logrando obtener que dicha planta ofrece una acumulación efectiva para la fitorremediación. La investigación realizó 9 experimentos o tratamientos con condiciones varias, aunque todas tenían en común muestras del suelo de 20 cm de profundidad: una era el suelo sin ningún metal, la segunda tenía 2mg/kg de cadmio, la tercera registraba 4 mg/kgde cadmio, la cuarta 8mg/kg de cadmio, la quinta con 16 mg/kg, la sexta incluía 6 mg/kg de plomo y así sucesivamente hasta llegar a la 9 muestra que tenía 24 mg/kg de plomo.

Después de 60 días el investigador estableció que el maíz actúa sobre la textura, la capacidad de intercambio catiónico, el pH, la conductividad eléctrica, la materia orgánica y en general reduce la cantidad de metales psados tóxicos en el suelo. En este experimento los microorganismos de la rizosfera intervinieron para acelerar el proceso de estabilidad del cadmio en el suelo, favoreciendo que este se transformara en materia orgánica. Asimismo el investigador aclara que “La capacidad del suelo para adsorber plomo aumenta con el aumento del pH, la capacidad de intercambio

catiónico (CEC), orgánica contenido de carbono, suelo / agua Eh (potencial redox) y niveles de fosfato” (2011, p. 6).

Otro caso de interés es el publicado por Coyago y Bonilla (2016) que también se enfoca en la contaminación causada por el plomo en actividades como la minería o la fundición en la región de Santa Catalina en Ecuador, en esa dirección se enfocaron en establecer la capacidad de absorción de tres especies vegetativas: “Amaranto Hybridus (amaranto), Beta Vulgaris (acelga) y Medicago sativa (alfalfa)” (2016, p. 33) a través de la construcción de semilleros, uno para cada grupo de plantas, en ese horizonte cuando las semillas germinaron convirtiéndose en plantas fueron trasplantadas hacia una matriz homogénea de suelo contaminado con Pb en concentraciones de 2,5, 5 y 10, del mismo modo “la cuantificación de plomo correspondió a plantas sin y con exposición de plomo y monitoreadas a 0, 20, 30, 45, 60 y 90 días, dicha cuantificación se llevó a cabo por triplicado (2016, p. 39).

Cada unidad experimental o semilleros contaban, por un lado una con tierra negra sin tratamiento alguno y la otra con tierra negra, abono orgánico y cascajo. Asimismo se empleó una dosis de fertilizante comercial que permitió mantener el vigor de las plantas durante los primeros 30 días. En esa medida tuvo un rendimiento del 100% la germinación en la tierra preparada y generó un mayor beneficio en el desarrollo del sistema radicular, el cual es vital para adelantar la fitorremediación.

Los resultados del estudio evidenciaban que la absorción en dichas plantas se ve influenciada por la cantidad de biomasa generada, donde el amaranto tuvo etapas dedicadas la desintoxicación, mientras que la alfalfa y la acelga desarrollaron absorción constante. En conjunto los procesos mencionados pueden afectar la materia orgánica que hace parte del suelo y le permite cumplir con sus ciclos biogeoquímico o su función de biofiltro. En esa medida es oportuno explorar las

alternativas de tratamiento para suelos contaminados que son desarrolladas en la actualidad en los ámbitos internacional y nacional, los cuales son identificados de manera general en la siguiente tabla:

Tabla 4 Clasificación alternativa de tratamiento suelos contaminados

Tratamientos EX SITU (Se excava el suelo)	Tratamientos IN SITU (No se excava el suelo)
Térmicas	
Desorción química	
Incineración	
Físico-químicas	Físico-químicas
Extracción con disolvente	Extracción con vapor
Lavado	Lavado
Oxidación/reducción	Solidificación/estabilización
Deshalogenación química	Electrorecuperación
Solidificación/estabilización	
Biológicas	Biológicas
Biodegradación en reactor	Biorremediación
Biopilas	Fitorremediación

Fuente: Alonso (2012)

En las investigaciones de Betancur (2013) se identifica que es posible aplicar varias técnicas a la vez para descontaminar el suelo, donde en algunos casos se inicia con un tratamiento físico-químico que van combinadas con alguna acción biológica. Los criterios para elegir alguna opción o varias de ellas dependen de “el grado de remediación que se espera conseguir, los parámetros del suelo, el contaminante a extraer y el presupuesto del que se dispone” (Alonso, 2012, p. 21).

Entre tanto para Morelli y otros (2015) las técnicas físico-químicas de descontaminación del suelo más utilizadas son:

Tabla 5 Técnicas físico- químicas descontaminación del suelo

Técnica	Características
Extracción	El proceso ocurre bajo la técnica ex situ, es decir fuera del hábitat natural e involucra 5 pasos: la preparación, donde se clasifica el material

contaminado, la extracción o separación de los contaminantes, la remoción de los residuos y la recuperación o reciclaje.

Permite buenos resultados al aplicarlas en compuestos orgánicos como PCBs, COVs, hidrocarburos derivados del petróleo, compuestos organometálicos y los disolventes halogenados, sin perder de vista que se debe considerar la posible toxicidad del disolvente y los sobrantes que genere.

Lavado

Se refiere al uso de líquidos, agua combinada con químicos, con la finalidad de usar el movimiento mecánico para limpiar el suelo. Al separar la tierra fina de la gruesa ayuda a retirar los contaminantes que representan algún peligro, reduciendo su volumen. Esto es cuando sucede ex situ.

Mientras que cuando es in situ usa una solución para arrastrar a los contaminantes donde posteriormente puedan ser bombeados. La solución química utilizada corresponde a una mezcla de agua con un ácido base o un agente tensioactivo, en otras ocasiones es solo agua. Esta opción es apropiada para suelos con bajo contenido de arcilla.

Esta técnica en general se emplea con suelos contaminados por compuestos orgánicos semivolátiles, sustancias inorgánicas como cianuros y metales pesados, hidrocarburos derivados del petróleo, siendo menos apropiado para trabajar con los compuestos orgánicos volátiles y pesticidas.

En general su eficacia depende de cuánto se absorba el contaminante y de otras características presentes en el medio como el PH, el intercambio catiónico, el contenido en materia orgánica (mineralogía), la textura, el paso del tiempo y la presencia de otros contaminantes.

Flushing

Consiste en un tratamiento in situ que se enfoca en anegar los suelos contaminados con una solución que permite transportar los contaminantes a una zona localizada donde puedan ser eliminados. De esa forma son extraídos del suelo cambiando su consistencia por una líquida usando el sistema de inyección e infiltración.

	<p>En el caso del agua que es subterránea se captura y bombea hasta la superficie para generar un pozo de extracción que permita tratar o reciclar a los contaminantes. Esta técnica responde bien a todo tipo de contaminantes, esencialmente a los inorgánicos y radioactivos. Trabaja bien de forma complementaria con otros tratamientos como la biodegradación y el pump & treat.</p>
Inyección de aire comprimido	<p>Tiene como objeto reducir los contaminantes volátiles en la zona saturada también denominada Air sparging e insaturada conocida como extracción suelo-vapor, la primera se emplea para mejorar el agua subterránea y la segunda se enfoca en el suelo.</p> <p>En líneas generales se produce con la inyección de aire a través de bombas que al producir contacto con el agua generan burbujas donde se acumulan los contaminantes. Posteriormente se convierten en vapor que es eliminado por medio de los pozos de extracción para ser intervenido. En algunos casos se ha evidenciado que el flujo de aire estimula la biorremediación, puesto que si usa aire con ozono se oxidan los contaminantes y si usa vapor aumenta la volatilidad de los contaminantes.</p>
Electrocinética	<p>Funciona al aplicar una corriente de electricidad con poca intensidad que permite a los electrodos in situ mover el agua, los iones y las partículas pequeñas en el suelo contaminado. En ese sentido los cationes avanzan hacia el electrodo negativo y los aniones hacia el positivo. Cuando se llega a la oxidación el ánodo produce protones H⁺ que llegados al cátodo configuran un fuente de ácidos, el cual ayuda la desorción de los cationes presentes en el suelo e incrementa la disolución de hidróxidos, carbonatos, todos contaminantes.</p>
Adición de enmiendas	<p>Recupera suelos contaminados in situ al añadir sustancias orgánicas e inorgánicas que al ser mezcladas con los horizontes del suelo pueden transformar los contaminantes.</p> <p>En los suelos de naturaleza salina se añaden compuestos químicos o agua con aditivos que contengan calcio para sustituir al sodio (Na) o los residuos orgánicos, puesto que si fueran usados podrían acelerar el lavado de Na, disminuir el porcentaje de sodio intercambiable y la conductividad eléctrica e incrementar la infiltración de agua, la capacidad de retención de agua, la</p>

estabilidad estructural, la biomasa del suelo y diversas actividades enzimáticas.

Fuente: Alonso (2012) y Ortiz (2007)

Por su parte las técnicas biológicas, son de gran interés en la actualidad por sus atributos como son el uso de tecnologías más simples y accesibles, puesto que representan una menor inversión respecto a las físico-químicas, también son más responsables a nivel ambiental porque aprovechan los ciclos y funciones del suelo en sí mismo (Morelli et al, 2015).

Tabla 6 Técnicas biológicas descontaminación del suelo

Técnica	Características
Biorrecuperación	<p>Es descrita como todos los tratamientos de recuperación que permiten degradar los contaminantes orgánicos y disminuyen la toxicidad de los contaminantes inorgánicos (metales pesados) por medio de la actividad biológica natural, tal y como sucede con los microorganismos que forman reacciones a partir de sus procesos metabólicos.</p> <p>En la biorremediación se emplean hongos, plantas y bacterias para desintoxicar los contaminantes y las demás sustancias de riesgo que afectan al ser humano, pero sin duda también al medio ambiente.</p> <p>Para que resulten efectivos esta clase de tratamientos hay que tener en cuenta los factores biológicos, incluidas las poblaciones microbianas presentes en el medio, las cuales contribuyen a la transformación de los contaminantes. Además se deben considerar la presencia de oxígeno, nutrientes, los aceptores de electrones alternativos y los factores ambientales como la temperatura, el Ph y el tipo de suelo.</p>
Fitoremediación	<p>Esta técnica aprovecha las plantas y los árboles para depurar las aguas y los suelos contaminados. Las medidas fitocorrectivas son pasivas y pueden ser usadas con otras técnicas químicas o mecánicas de limpieza. Asimismo</p>

tiene un valor estético porque contribuye al paisaje y al hacer uso de la luz solar es ambientalmente sostenible.

Según el desarrollo de las plantas es posible descomponer o degradar contaminantes, así como estabilizar los contaminantes de naturaleza metálica. Son apropiados en entornos donde la contaminación no es demasiado profunda ni muy extensa.

Fuente: Alonso (2012) y Ortiz (2007)

Los tratamientos in situ tienen una serie de ventajas frente a los ex situ y que al no tener que trasladar el material sus costos son más baratos, sin embargo enfrentan retos específicos como conllevar un tiempo mayor para su implementación, depende de los organismos y condiciones biológicas del suelo, así como requerir mayor seguimiento para verificar su nivel de efectividad (Medrano, 2006).

5. Métodos de Remediación de Suelo Aplicable Acorde al Tipo de Contaminación

Generados por las Industrias

Los métodos de remediación implican la realización de unas actividades previas que favorecen su elección e implementación, la primera consiste en la identificación de los contaminantes más comunes, entre esos se encuentran “metales pesados, hidrocarburos no halogenados, hidrocarburos halogenados, aceites minerales y pesticidas” (Vidal, 2010, p. 114). La segunda se refiere a conocer el estado del suelo, especialmente la capacidad de amortiguar la contaminación:

Ácido-base	<ul style="list-style-type: none"> • La respuesta dependerá del grado de saturación y de su capacidad de intercambio catiónico. Si la adición de ácido es grande, la capacidad de neutralización del suelo dependerá del contenido en minerales que tenga.
Precipitación- disolución	<ul style="list-style-type: none"> • Dependerá de su capacidad de reacción con los compuestos para precipitar como fosfatos, arseniatos y seleniatos; si son metales, precipitarán como sulfuros.
Adsorción-desorción	<ul style="list-style-type: none"> • Dependerá de las propiedades del suelo, si contiene caliza activa se verá favorecida la adsorción.
Complejación	<ul style="list-style-type: none"> • Dependerá de la capacidad de los metales presentes en el suelo para formar complejos.

Figura 3 Estado del suelo y procesos de degradación

Fuente: Coria y De La Vega (2011)

También es oportuno realizar una evaluación de riesgos, considerando los siguientes factores:

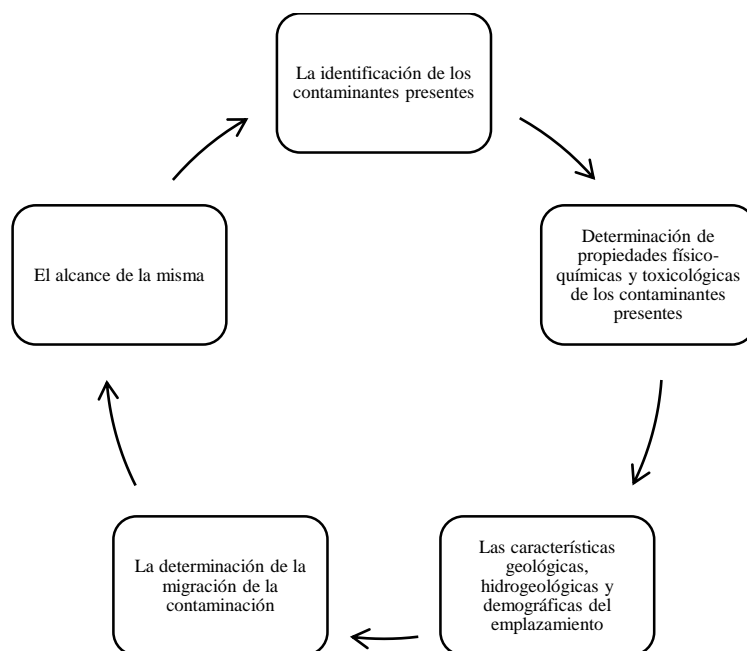


Figura 4 Factores evaluación riesgo del suelo contaminado

Fuente: Coria y De La Vega (2011)

En consecuencia, según los tipos de contaminantes generados por las industrias, se identifica la pertinencia de los métodos biológicos para actuar en su recuperación, esto se debe a su efectividad en cuanto a los costos, sus aportes al beneficio del medio ambiente, su efectividad al destruir los contaminantes y que no requieren de tratamientos posteriores. Sin embargo en sus desventajas se señala que requieren mayor tiempo de desarrollo y solo se pueden aplicar en suelos que favorecen el crecimiento microbiano (Martínez y Casallas, 2018). No obstante se establecen a continuación las mejores opciones:

Biorremediación. Es utilizada para reducir el impacto ambiental de los hidrocarburos, pesticidas o metales pesados en bajas concentraciones. En sus formas más tradicionales o de primera generación se desarrolla a través del compostaje y el *landfarming* y en la segunda generación se emplean por ejemplo reactores que son usados para la degradación de materia

orgánica, así como otras formas de tecnología que incluyen unidades de tratamiento especial para aguas residuales (Martínez y Casallas, 2018).

En líneas generales es definida como “la descontaminación de la matriz por medio de los microorganismos, ya que, debido a la capacidad degradadora que tengan, se van a llevar a cabo distintos procesos” (Delgadillo y otros, 2011, p. 24). En ese sentido la biodegradación del contaminante a partir de microorganismos activos depende de factores como la biodisponibilidad, pH, temperatura, humedad y nutrientes.

Tabla 7 Factores biodegradación del contaminante

Factor	Descripción
Biodisponibilidad	Este factor necesita de la capacidad de transporte, la transferencia de masas y el metabolismo de la población bacteriana tomada como referencia. En conjunto a los factores mencionados se les denomina biodisponibilidad. Por ejemplo en la transferencia de masas los microorganismos que permanecen expuestos a los contaminantes de origen orgánico tiene mayores capacidades de promover la degradación. De la misma forma el paso del tiempo que causa el envejecimiento o la pérdida de la biodegradabilidad es otro aspecto limitante.
pH	Los cambios y fluctuaciones en el Ph afectan seriamente la actividad biológica e incidir en el proceso de solubilización del contaminante en la matriz. Asimismo afecta la biodisponibilidad de la energía y de las fuentes de carbono, puesto que si está alcalino o ácido en extremo puede generar una degradación lenta.
Temperatura	Se le clasifica como un factor ambiental de gran importancia porque afecta la actividad biológica y la tasa de degradación. En ese sentido los procesos de biorremediación pueden realizarse en un rango de temperatura que va desde los 20 hasta los 40° centígrados, aunque

si se trata de una zona con clima tropical se recomienda una oscilación de entre 30 y 35° centígrados.

Humedad	Es un factor que puede afectar la biodegradación en los suelos que se ven determinados por la cantidad de agua, sin embargo existen diferentes requerimientos de humedad de acuerdo con el tipo de suelo, la clase de contaminantes a tratar y las condiciones de la degradación que pueden ser aerobias o anaerobias.
Nutrientes	<p>Son analizados de acuerdo a su contribución o afectación del crecimiento bacteriano, por ejemplo el nitrógeno (N) y el fósforo (F) lo limitan y resultan vitales para el incremento en la actividad de los microorganismos, así como para su metabolismo, de tal manera que deben estar disponibles para ser asimilados y posteriormente sintetizados.</p> <p>Las concentraciones de nutrientes deben ser objeto de seguimiento porque si superan las cantidades necesarias puede disminuir la eficiencia y el desarrollo efectivo de los procesos de biorremediación.</p>

Fuente: Martínez y Casallas (2018)

En el proceso de biorremediación se dan unos pasos claves que exigen la presencia de un equipo interdisciplinario con biólogos, químicos e ingenieros. El primero se refiere a identificar el tipo de suelo y las características del contaminante, el segundo se refiere al montaje de pruebas y ensayos a la escala del laboratorio, posteriormente en el tercero se hace el montaje de pruebas y hacia el final se implementa la tecnología elegida (Delgadillo y otros, 2011).

En esa línea una actividad importante es la que consiste en la realización de pruebas microbiológicas que cuantifican la población de microorganismos en determinado suelo por tratar, además se debe tener en cuenta si dichos microorganismos son metabólicamente activos o podrían serlo bajo condiciones de bioestimulación, en esa medida se profundiza en las características del

suelo, el contaminante y los seres vivos para establecer posibles ensayos de biodegradabilidad (Viñas, 2005).

De la misma forma se encuentra representado en el siguiente diagrama de flujo:

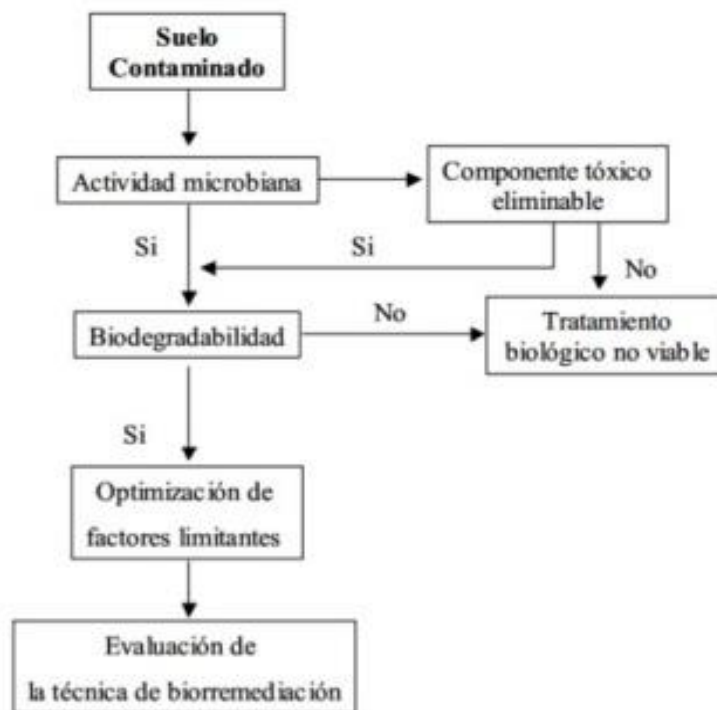


Figura 5 Diagrama de flujo pasos previos aplicación de la biorremediación en el suelo contaminado

Fuente: Delgadillo y otros (2011)

Fitorremediación. Esta técnica es conceptualizada como “el uso de plantas u hongos para remover, contener o transformar un contaminante, además una de sus ventajas de implementación es el bajo costo” (Ortiz y otros, 2007, p. 41). Se clasifica en dos modalidades: directa e indirecta, en la primera las plantas u hongos inciden sobre el suelo, mientras que en la segunda estimulan el crecimiento de los microorganismos, aunque en “la gran mayoría de los casos, se lleva a cabo una simbiosis entre las especies vegetales y los microorganismos presentes en la zona de la rizósfera” (Martínez y Casallas, 2018, p. 12).

Este método es implementado a través de cinco procesos básicos:

Tabla 8 Procesos básicos de la fitorremediación

Proceso	Descripción
Fitoestabilización	Permite reducir la biodisponibilidad de los contaminantes, eso a través de la revegetación usando especies vegetales que sean tolerantes a los niveles de toxicidad encargados de desactivar a los contaminantes, de esa manera reduce los riesgos para la salud humana y el medio ambiente. Entre sus consecuencias se identifica una mejora en las propiedades físicas del suelo, un mayor transporte de contaminantes y de protección respecto a la erosión.
Fitoextracción	También recibe el nombre de Fitoacumulación y en este proceso se destaca la capacidad de la plantas para extraer y acumular los contaminantes, especialmente en el caso de los metales que pueden ser hiperacumulados en la raíz, el tallo o las hojas. Una vez finalizado el proceso las plantas deben ser retiradas para aislar, destruir o reciclar el contaminante.
Fitodegradación	Se enfoca en la degradación de los contaminantes gracias a la acción de las plantas y la intervención de los microorganismos presentes en el medio. En ese orden de ideas cuando los contaminantes son metabolizados en el interior de los tejidos vegetales y la planta produce nuevas enzimas, entre esas se encuentran la dehalogenasa y la oxigenasa, eso propicia la catalización de la degradación. Asimismo en los procesos denominados Rizorrecuperación o Rizodegradación la degradación sucede en las raíces de las plantas, eso con la ayuda de las estructuras rizomicrobianas, donde las raíces se encargan de liberar sustancias naturales que nutren a los hongos, levaduras o bacterias, estimulando la funcionalidad y utilidad de la actividad biológica.
Fitovolatilización	Tiene lugar cuando la planta incentiva y favorece la volatilización de los contaminantes presentes en el suelo.

Fuente: Ortiz y otros (2014)

Esta técnica cuenta entre sus limitaciones como que las sustancias contaminantes se encuentren a una mayor profundidad de la alcanzada por la raíz de la planta, los tiempos de implementación tienden a ser extensos, se pueden contaminar las cadenas alimentarias de algunos hongos, plantas y seres vivos que en general asimilen los elementos nocivos (Ortiz y otros, 2014).

Según los tipos de contaminantes aplican más algunos procesos que otros, en ese orden de ideas cuando se trata de metales pesados o compuestos hidrofóbicos recomiendan la fitoextracción con plantas acuáticas como los sauces o los álamos y el pasto, en el caso de los Compuestos orgánicos biodegradables (BTEX, HTP, HAP, PCB, pesticidas) se puede optar por la rizodegradación con plantas acuáticas emergentes y subemergentes, en cuanto a los metales pesados también se identifica el papel cumplido por la fitoestabilización, entretanto con los herbicidas o los compuestos alifáticos clorinados se promueve la fitodegradación y finalmente la fitovolatilización atiende las situaciones donde intervienen metales (Se, As, Hg) o compuestos orgánicos volátiles (BTEX, MTBE) (Martínez y Casallas, 2018).

Los niveles de impacto de esta técnica también están relacionados si el contaminante es orgánico e inorgánico, así funciona el proceso:

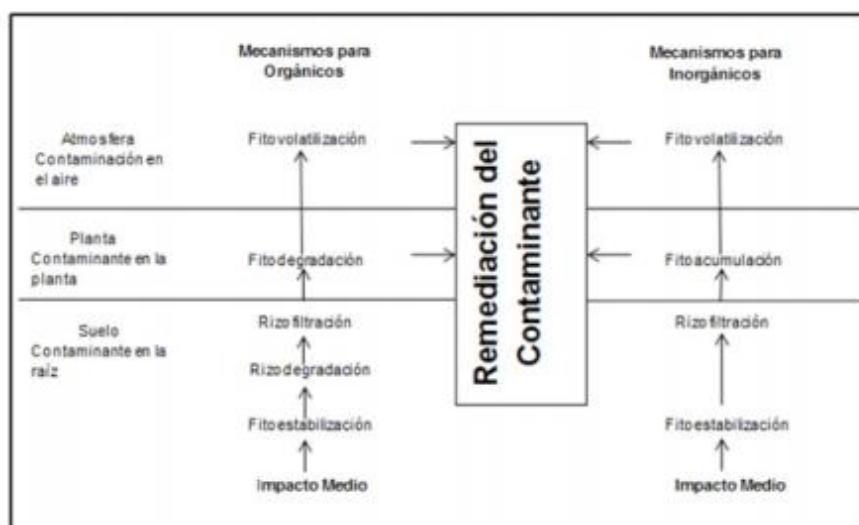


Figura 6 Tipos de fitorremediación

Fuente: Viñas (2005)

6. Análisis Especies Vegetales Locales Potencialmente Utilizables en Tecnologías de Biorremediación

Colombia tiene uno de los índices de mayor biodiversidad en el mundo con más de 22.840 tipos de plantas, 45 plantas sin flor, 4.270 tipos de orquídeas, 1.642 helechos, 289 palmas o 1.649 musgos y afines (Instituto Humboldt Colombia, 2017), en ese sentido y frente a la problemática de contaminación del suelo debido a las prácticas de las industrias, se propone en este apartado identificar las especies vegetales que son potencialmente utilizables para reducir el impacto ambiental gracias a la aplicación de una de las modalidades de biorremediación, la fitorremediación.

Especialmente cuando se ha reconocido por parte del Programa Evaluación y Monitoreo de la Biodiversidad del Instituto Humboldt que las especies vegetales más afectadas por la contaminación industrial son las de baja densidad poblacional, es decir las menos comunes, entre las cuales mencionan “el almendro (*Dipteryx oleífera*), los laureles almanegra (*Magnolia* spp.), el comino (*Aniba perutilis*), los cedros (*Cedrela* spp.) y la palma *Reinhardtia koschnyana*” (Instituto Humboldt Colombia, 2016, p. 23). No obstante a continuación se enuncian las especies que son más comunes en el país y que pueden apoyar la descontaminación de los suelos.

Heliconia (Psittacorum). Colombia es el país con mayor variedad de Heliconias con aproximadamente 94 especies, estas al ser usadas dentro de procesos de fitorremediación ofrecen mejores resultados en las zonas del Pacífico y los Andes en un promedio de altura de entre los 500 y los 1500 m.s.n.m. Es potencialmente utilizable porque “muestra cierta tolerancia a un amplio espectro de condiciones ambientales y puede disponer una buena capacidad para proveer oxígeno

al sistema radicular, beneficiando el proceso de nitrificación” (Peña, Madera, Sánchez y Medina, 2013, p. 23).

En un trabajo experimental realizado por Peña, Madera, Sánchez y Medina (2013) se identificó que considerando las variables de materia orgánica como la demanda biológica de oxígeno (DBO₅) y la demanda química de oxígeno (DQO), los nutrientes como nitrógeno y fósforo, así como los metales pesados: el cadmio (Cd), el mercurio (Hg), el plomo (Pb) o el cromo (Cr) la heliconia logra una eficiencia considerable, donde la asimilación de nitrógeno ocurre mayoritariamente en las hojas con el 65.7% y en las raíces con el 35.9%, mientras que los porcentajes más altos de desasimilación ocurrieron en el tallo con -1.6%, en ese sentido favorece la eliminación de dichos metales hasta en un 90%, traslocalizando las sustancias contaminantes de la raíz hacia los tallos y hojas.

Por otra parte, en un proyecto de Aulestia (2012) se estudiaron tres especies vegetales expuestas a la acción de lixiviados, una de ellas fue la heliconia, usando como unidad experimental un recipiente plástico con grava de 15 a 30 mm de diámetro y con tierra abonada con cascarilla de arroz para garantizar la nutrición de la planta. El lixiviado usado tuvo una concentración de amonio de entre 500 y 800 mg/L. En la primera fase la Heliconia fue cuidada y aclimatada, en la segunda fase fue expuesta durante 5 semanas al lixiviado. De tal forma obtuvo buenos resultados en cuanto a su potencial hídrico con un nivel de estrés medio, sin llegar a florecer debido a la excesiva acumulación de metales pesados. En general mostró adaptabilidad y tolerancia al riego de lixiviado, la planta no murió durante todo el proceso, ni hacia el final.

En conjunto la Heliconia es considerada una planta con gran capacidad para iniciar y desarrollo procesos de fitorremediación, así se ha visto demostrado en diferentes investigaciones y también es de gran utilidad para la descontaminación de humedales.



Figura 7 Heliconia (Psittacorum), permite la formación de nitratos a partir de la materia orgánica
Fuente: Google Imágenes

El Maíz (Zea Mays). Las condiciones climáticas en la que muestra mejor adaptación el maíz requieren 12° como mínimo para su germinación, temperaturas más bajas que eso reducen el desarrollo radicular, estructuras que cumplen un papel esencial en el proceso de fitorremediación. En las raíces del maíz se presentan los mayores valores de extracción de las sustancias contaminantes, puesto que esta planta extrae una mayor cantidad cuando el suelo presenta mayor contenido de compost y estimulación, asimismo se encuentra influenciado por características del suelo; en base a los valores de los factores de Bioconcentración (FBC) y Translocación (FT) la planta de maíz se comporta como una planta exclusora o estabilizadora (Munive, Loli, Azabache y Gamarra, 2018). Asimismo por ser una planta que también tiene propósito agrícola no debe usar la biomasa como fuente de alimentación.

En un bioensayo adelantado por Pastor, Gutiérrez y Hernández (2012) con condiciones controladas de entre 15° y 25° de temperatura, así como con el 70% de humedad en el mesocosmos formado por un recipiente plástico con las dimensiones de 30 cm x 21 cm x 6 cm, donde se sembraron 5 plantas de maíz, utilizando a modo de suelo las muestras tomadas de minas abandonadas: “Al finalizar el bioensayo, las plantas se lavaron con agua desionizada, separadamente la parte aérea de la radicular, se secaron en estufa (70°C , 48 h), y se analizaron los metales mediante ICP-OES previa digestión con HNO_3 y HCl ” (2012, p. 178). En los resultados

evidenció que los metales predominantes en el suelo como cinc (Zn) y plomo (Pb) son mayoritariamente acumulados en las raíces del maíz, pero con una incidencia del 30% también llegan hasta las hojas, lo cual representa un riesgo para los animales herbívoros como el ganado.

Otro estudio de interés es el de Ruiz y Armienta (2012) en el cual se aborda el impacto fitorremediador del maíz en suelos próximos a las actividades mineras, en esa línea se tomaron dos muestras, una con suelo lejano y otra con suelo cercano de las minas, asimismo se formaron unidades experimentales con macetas de 750 g de capacidad y se sembraron las semillas en condiciones de invernadero donde crecieron durante 70 días. Posteriormente los suelos empleados fueron secados al aire y tamizados con una malla 230 de 0.063 mm, para después ser “digeridas con HCl-HNO₃ en horno de microondas (CEM, MARSX press) y las concentraciones de Pb, Zn, Cu, Fe, y Cd se determinaron mediante espectrofotometría de absorción atómica por llama” (2012, p. 107). Con las plantas se procedió a dividir las en raíz y parte aérea, siendo lavadas y secada a 60° y luego se tomaron 0.5 g de muestra para ser fragmentados en trozos pequeños que fueron digeridos con HNO₃ concentrado y HClO₄.

En esa dirección los resultados mostraron que los suelos más contaminados eran aquellos más cercanos a las minas, de la misma forma se presentó en las plantas, pues aquellas sembradas en dichos suelos reflejaron mayor nivel de concentración de Zn y Pb. También se muestra que los factores de traslocación (FT) y bioconcentración (FBC) del maíz es baja durante los primeros 30 días, ya hacia el día 70 se evidenciaba una efectiva transferencia de la raíz hacia el tallo y las hojas.



Figura 8 El Maíz (*Zea Mays*), planta excluyente o estabilizadora frente a los metales pesados
Fuente: Google Imágenes

Tomate (*Solanum lycopersicum*). Es una de las hortalizas con mayor importancia a nivel nacional debido a su productividad y consumo, debido a lo rústico de la planta es poco exigente frente a las condiciones del suelo, aunque requiere de materia orgánica para garantizar su drenaje. En cuanto a sus requerimientos climáticos debe contar con una temperatura mínima de entre 17° y 19° C, pero lo óptimo son entre 23° y 25° C. Cumple una función descontaminadora cuando se acompaña su cultivo de biorremediadores comerciales o naturales como la levadura, la gallinaza o el ácido láctico (Leonel y Moreno, 2018). Del mismo modo, debido a su finalidad agrícola, no puede emplear la biomasa como alimento.

En la investigación de Cartaya, Guridi, Cabrera, Moreno y Hernández (2017) se encontró que en la contaminación generada por el cobre (Cu) usado por las industrias las plantas de tomate permiten su absorción, en ese sentido se realizó un experimento con semillas germinadas en macetas de 9 cm x 7 cm y con una capacidad de 0,2 kg de suelo denominado como Ferralítico Rojo Lixiviado. Después de 35 días de haber germinado fueron extraídas, lavadas y colocadas en una solución con CaCl_2 y luego fueron lavadas nuevamente con agua desionizada. La digestión fue realizada con un microondas a 70°. Al ser evaluadas se notó que estas plantas pueden “participar en el proceso de fitoextracción en suelos contaminados por su tolerancia e

hiperacumulación de metales y formación de biomasa en el tiempo; siempre y cuando se lleve a cabo una disposición final ambientalmente adecuada y se prevenga su consumo” (2017, p. 23).

En otro estudio desarrollado por Leonel y Moreno (2019) realizó una siembra por fases acompañada de biorremediadores orgánicos como la levadura o la gallinaza, mientras se buscaba combatir un contaminante a base de residuos de hidrocarburos como la gasolina. En los resultados se describe que los cultivos que emplean los biorremediadores no solo logran una mayor capacidad de absorción sino que además tiene un mejor crecimiento en tallos y hojas, desarrollo de biomasa, entre otros.



Figura 9 Tomate (*Solanum lycopersicum*), en actuación con otros biorremediadores permite descomponer la estructura de los hidrocarburos, minimizando su toxicidad

Fuente: Google Imágenes

Alfalfa (*Medicago sativa*). Considera una planta hiperacumuladora por su gran sistema radicular y capacidad para concentrar metales en su absorción y tolerancia “cuenta con ventajas fisiológicas y mejora la fertilidad de los suelos por su aporte de nitrógeno” (OEI, 2017, p. 1). Permite la fijación de nitrógeno y fosforo, siendo tolerante a bajas temperaturas de 15° o menos, es tolerante a la sequía y sensible frente al exceso del agua y la acidez por debajo de 6,4 (Guerrero, 1999). Esta funciona en compañía del compuesto, glutatión, el cual limita la toxicidad “dado que

esos metabolitos contienen azufre orgánico, se aumenta la tolerancia de la alfalfa a los metales mediante la fertilización con sulfato” (OEI, 2017, p. 2).

Tampoco puede tomar la biomasa presente en el suelo y sustratos como principio de alimentación o energía, así lo explican Coyago y Bonilla (2016) al destacar que “la alfalfa y acelga presentaron una absorción continua, este factor involucra un problema potencial en seguridad alimentaria ya se evidencia una retención del contaminante en la estructura vegetativa” (p. 35).

En el proyecto experimental de Bonilla (2013) se exponía que al exponer la alfalfa a suelos contaminados con plomo, es decir sustrato de 100 g combinado con plomo en concentraciones del 5% y 10%. Posteriormente se aplicó la técnica de espectrofotometría de absorción atómica que implicó las siguientes acciones: ingreso de la muestra, su conservación refrigerada, lavar, secar, pesaje y digestión de la muestra, extracción, filtración y lectura. Los hallazgos señalaron que “existe un incremento paulatino en la concentración de plomo en la planta a concentraciones bajas y medias, mientras que existe un decremento cuando la concentración de plomo aumenta” (2013, p. 51).

En otra investigación de Gonsales, Aponte, Bustamante y Chomba (2016) se identificó que la alfalfa es efectiva en suelos contaminados con cobre, en esa línea fueron sembradas en un suelo franco arenoso contaminado artificialmente con “con 0,53 gr CuS04 /kg de suelo (tratamiento 1) y 0.66 gr CuS04 /kg de suelo (tratamiento 2)” (2016, p. 2). Los resultados dos meses después reflejaron que la siembra de alfalfa disminuyó los niveles de “278 ppm a 124 ppm y de 293 ppm a 143 ppm respectivamente en el tratamiento T1y T2” (2016, p. 3). En el proceso se detectó mayor acumulación en la raíz que en el tallo, evidenciando que en ambos tratamientos fue una planta indiferente a los niveles de cobre.



Figura 10 Alfalfa (*Medicago sativa*), apropiada para suelos contaminados con plomo
Fuente: Google Imágenes

Peniseto (*Pennisetum setaceum*). Es denominada como una hierba de estación cálida y seca, su crecimiento óptimo sucede con temperaturas entre 24° y 30 °C. Aunque es una planta originaria de Africa su uso en Colombia es extendido, se caracteriza por su flor gris y en espiga, plumosa en su parte inferior, es útil para proteger el suelo, puesto que aporta estabilidad y evita la erosión. Ha sido probada con péptidos metálicos y con la acumulación de Cadmio entregando buenos resultados (Pajoy, 2017).

Asimismo Pajoy (2017) en su investigación demuestra que la hiperacumulación del peniseto es una buena alternativa en terrenos contaminados con cadmio y plomo, la metodología del estudio consistió en sembrar en una parcela 33 plantas con 20 cm de diferencia entre unas y otras, recibiendo riego para minimizar el estrés hídrico. Seguidamente se realizó el muestreo de en los 2, 5, 10 y 12 meses posteriores hasta que fueron retirados las plantas, lavadas y separadas (raíz y parte aérea) para ser analizadas en el laboratorio. En sus resultados se destacó que la planta es efectiva para acumular Cd y Pb en sus raíces.

Otro proyecto fue el de López y Contreras (2017) que empleó la planta en un terreno destinado como relleno sanitario, tomando dos muestras, una del botadero es decir afectada por los lixiviados y la otra en blanco, sin contaminación antrópica. El montaje de las semillas tuvo lugar en una

maceta plástica llevando registros semanales durante 90 días. Posteriormente se avanzó hacia la extracción y el análisis del laboratorio donde se estableció que con las hojas concreta un 60% de la absorción de metales como el cinc o el cobre.



Figura 11 Penisetto (*Pennisetum setaceum*), planta ornamental que favorece el tratamiento de contaminación por metales pesados

Fuente: Google Imágenes

En general las plantas identificadas, hasta este punto, tienen las características para desarrollar procesos de biorremediación que favorecen la descontaminación de los suelos, así lo describe la siguiente figura:

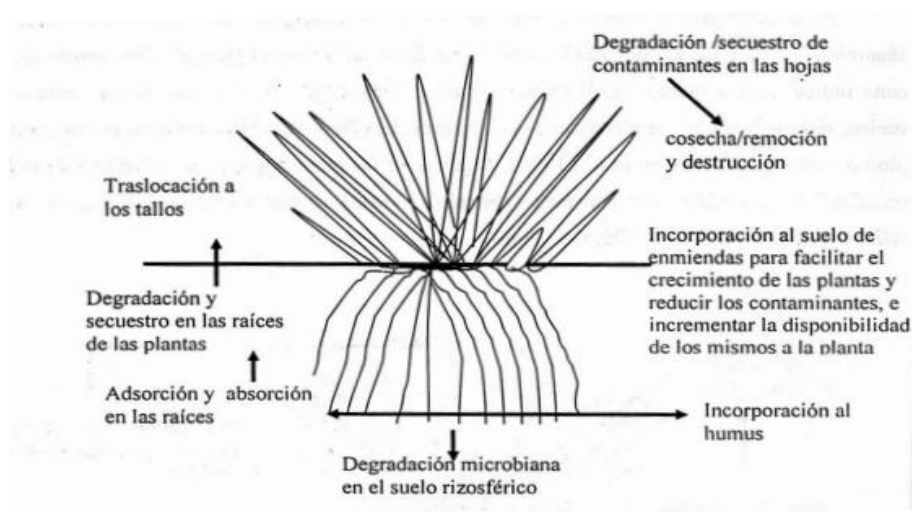


Figura 12 Proceso de descontaminación del suelo

Fuente: Ortega (2018)

Todas actúan bajo la modalidad *In Situ* y promueven paulatinamente, puesto que aunque no muestran resultados con velocidad, pero si de manera permanente y consistente, la recuperación de uno de los recursos esenciales para el desarrollo del planeta y de la humanidad.

Conclusiones

Las técnicas de tratamiento identificadas para los suelos contaminados por los vertimientos industriales se determinan a partir del tipo de contaminación, la cual dependiendo de si es local o difusa, abre distintas oportunidades. En Colombia los desechos más comunes son los metales y plaguicidas. De esa forma la aplicación y desarrollo de la descontaminación se clasifica en Ex Situ (fuera del lugar) e In situ (en el lugar) y se dividen entre térmicos, biológicos y físico-químicos.

En el contexto de esta investigación se priorizaron las técnicas biológicas de biorremediación y fitorrecuperación porque permiten la degradación de los contaminantes sin alterar la composición del recurso, sino que en realidad emplean sus mismos componentes orgánicos para incentivar la descontaminación. Asimismo se definió la pertinencia de los tratamientos In situ para hacer frente a la problemática, sin perder de vista la protección de la seguridad alimentaria, en los casos de las plantas agrícolas.

En lo referente a los métodos de remediación se reconoce que estos también responden al tipo de contaminación causado por las industrias, así como al estado del suelo, de esa forma se recomienda primero conocer y profundizar sobre sus características para elegir la opción más apropiada, utilizando una metodología que se interese por la evolución de cada uno de los factores de riesgo involucrados.

En ese sentido, la biorremediación permite identificar los factores de biodegradación del contaminante como la biodisponibilidad, el pH, la temperatura, la humedad y los nutrientes para conseguir un efecto duradero y beneficioso en el suelo. Del mismo modo se ve complementada por la técnica de la fitorremediación que usa las plantas a través de una serie de procesos claves para absorber los metales, uno de los elementos más nocivos generados por la actividad industrial.

Finalmente para consolidar la información presentada se recomiendan algunas especies vegetales que se encuentran disponibles en Colombia que son potencialmente útiles para desarrollar los procesos de biorremediación, entre esas: la heliconia, el cultivo del maíz y el tomate, la alfalfa, el peniseto y el girasol, los cuales pueden contribuir activamente a la solución paulatina del problema de la contaminación.

En conjunto se estableció un documento de comprensión ágil y sencilla que sirve como punto de partida para seguir profundizando en las condiciones nacionales que pueden ser aprovechadas para convertir al país en un líder de los tratamientos de descontaminación basados en los componentes orgánicos y tecnológicos.

Referencias Bibliográficas

- Alonso, R. (2012). Proyecto de recuperación de suelos contaminados por hidrocarburos. Recuperado de https://ddd.uab.cat/pub/trerecpro/2012/hdl_2072_206396/PFC_RaquelAlonsoRiesco.pdf
- Aulestia, K. (2012). Respuestas fisiológicas de tres especies vegetales nativas sometidas a tratamiento con lixiviado de relleno sanitario. Recuperado de <http://bibliotecadigital.univalle.edu.co/bitstream/10893/3903/4/CB-0463669.pdf>
- Bernal, A. (2014). Fitorremediación en la recuperación de suelos: una visión general. Recuperado de <http://hemeroteca.unad.edu.co/index.php/riaa/article/view/1340>
- Betancur-Corredor, B., & Pino, N., & Peñuela, G., & Cardona-Gallo, S. (2013). Biorremediación de suelo contaminado con pesticidas: caso DDT. *Gestión y Ambiente*, 16 (3), 119-135.
- Bonilla, S. (2013). Estudio para tratamientos de biorremediación de suelos contaminados con plomo, utilizando el método de fitorremediación. Recuperado de <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/4400/6/UPS-ST000985.pdf>
- Cartaya, Omar, Guridi, Fernando, Cabrera, Adriano, Moreno, Ana M., & Hernández, Yenisei. (2017). Efecto de la aplicación foliar de oligogalacturónidos a plántulas de tomate (*Solanum Lycopersicum L.*) en la fitoextracción de cobre de suelo contaminado. *Cultivos Tropicales*, 38(3), 142-147.
- Chan-Quijano, J., & Jarquín-Sánchez, A., & Ochoa-Gaona, S., & Martínez-Zurimendi, P., & López-Jiménez, L., & Lázaro-Vázquez, A. (2015). Directrices para la remediación de suelos contaminados con hidrocarburos. *Teoría y Praxis*, (17), 123-144.

- Coyago, E. y S. Bonilla. (2016). Absorción de plomo de suelos altamente contaminados en especies vegetativas usadas para consumo animal y humano. *La Granja: Revista de Ciencias de la Vida*. Vol. 23(1): 35–46. ISSN: 1390-3799.
- Coria, I., De la Vega, M. (2011). Determinación de la Efectividad de la Remediación de Suelos Accidentalmente Contaminados con Ácido Sulfúrico mediante Métodos Geofísicos. *Información tecnológica*, 22(1), 3-8.
- Cotler, H., & Sotelo, E., & Domínguez, J., & Zorrilla, M., & Cortina, S., & Quiñones, L. (2007). La conservación de suelos: un asunto de interés público. *Gaceta Ecológica*, (83), 5-71.
- Dorronsoro, C. (2007). *Edafología y química agrícola*. España: Universidad de Granada.
- Delgadillo-López, A., González-Ramírez, C., Prieto-García, F., Villagómez-Ibarra, J., Acevedo-Sandoval, O. (2011). Fitorremediación: una alternativa para eliminar la contaminación. *Trop. subtrop. agroecosyt*; 14(2): 597-612.
- Echarri, L. (1998). *Ciencias de la Tierra y del Medio Ambiente*. Barcelona: Ed. Teide.
- Fabelo Falcón, J. (2017). Propuesta de metodología para la recuperación de suelos contaminados. *Centro Azúcar*, 44(1), 53-60.
- FAO. (2015). 5 razones por las que el suelo es clave para el futuro sostenible del planeta. Recuperado de <http://www.fao.org/sustainable-development-goals/news/detail-news/es/c/277124/>
- FAO. (2018). La contaminación de los suelos está contaminando nuestro futuro. Recuperado de <http://www.fao.org/fao-stories/article/es/c/1126977/>
- Garzón JM, Rodríguez-Miranda JP, Hernández-Gómez C. Revisión del aporte de la biorremediación para solucionar problemas de contaminación y su relación con el desarrollo sostenible. *Rev Univ. Salud*. 2017; 19 (2):309-318.

- González, M. (2012). Aspectos éticos de la investigación cualitativa. Recuperado de <http://www.redalyc.org/pdf/800/80002905.pdf>
- Gonsales, J., Aponte, M., Bustamante, E., Chomba, J. (2016). Fitorremediación de un suelo contaminado con dos niveles de cobre, mediante el uso del cultivo de la alfalfa “Medicago sativa”. Recuperado de <https://revista.uct.edu.pe/index.php/SCIENCE/article/download>
- Hernández Sampieri, R., Fernández Collado, C., & Baptista Lucio, P. (2014). Metodología de la investigación (6.ª ed.). México: McGraw-Hill Interamericana.
- IDEAM. (2016). Informe de generación y manejo de residuos peligrosos en Colombia. Recuperado de http://www.andi.com.co/Uploads/RESPEL_2016_636567285350504800.pdf
- IGAC. (2017). 30 prácticas que evitarían el deterioro del suelo, recurso natural del que pocos hablan. Recuperado de <https://noticias.igac.gov.co/es/contenido/30-practicass-que-evitarian-el-deterioro-del-suelo-recurso-natural-del-que-pocos-hablan>
- IGAC. (2018). El estado de los suelos en Colombia es ‘crítico’. Recuperado de <https://noticias.igac.gov.co/>
- Instituto Humboldt. (2017). Biodiversidad colombiana: números para tener en cuenta. Recuperado de <http://www.humboldt.org.co/es/boletines-y-comunicados/item/1087-biodiversidad-colombiana-numero-tener-en-cuenta>
- Instituto Humboldt. (2016). Evaluación y Monitoreo de la Biodiversidad. Recuperado de <http://www.humboldt.org.co/es/investigacion/programas/evaluacion-y-monitoreo-de-la-biodiversidad>
- Jara-Peña, Enoc, Gómez, José, Montoya, Haydeé, Chanco, Magda, Mariano, Mauro, & Cano, Noema. (2014). Capacidad fitorremediadora de cinco especies altoandinas de suelos contaminados con metales pesados. *Revista Peruana de Biología*, 21(2), 145-154.

- Leonel, Moreno, D. (2018). Biorremediación de Suelos Contaminados con Hidrocarburos en Cultivo de Tomate. Recuperado de https://www.researchgate.net/publication/329629665_ARTICULO_FINAL_BIORREMEDIA_CIONBiorremediacion_de_Suelos_Contaminados_con_Hidrocarburos_en_Cultivo_de_Tomate_Leonel_Maria_Moreno_Daniela_a
- López, J., Contreras, E. (2017). Estudio de factibilidad del uso de la fitorremediación como alternativa para la remoción de metales pesados en el suelo usado como botadero a cielo abierto en Utopía-Yopal. Recuperado de http://repository.lasalle.edu.co/bitstream/handle/10185/22413/41121153_2017.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Martínez, A. (2018). Biorremediación bacteriana de suelo contaminado con fluidos y residuos de perforación mediante diferentes métodos. Recuperado de <http://bdigital.unal.edu.co/63776/1/1090435809.2018.pdf>
- Martínez, J., Casallas, A. (2018). Contaminación y remediación de suelos en Colombia. Recuperado de <http://editorial.universidadean.edu.co/acceso-abierto/contaminacion-y-remediacion-de-suelos-en-colombia.pdf>
- Medrano Roldán, H. (2006). Biorremediación para la contaminación ambiental agropecuaria. Revista Chapingo Serie Zonas Áridas, V (2), 117-130.
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2012). Diagnóstico Nacional de Salud Ambiental. Recuperado de <https://www.minsalud.gov.co/sites/rid/Lists/BibliotecaDigital/RIDE/INEC/IGUB/Diagnostico%20de%20salud%20Ambiental%20compilado.pdf>

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2015). Política para la gestión sostenible del suelo. Recuperado de

http://www.minambiente.gov.co/images/AsuntosambientalesySectorialyUrbana/pdf/suelo/Pol%C3%ADtica_para_la_gesti%C3%B3n_sostenible_del_suelo_FINAL.pdf

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2018). Suelo en Colombia. Recuperado de <http://www.minambiente.gov.co/index.php/component/content/article/158-plantilla-asuntos-ambientales-y-sectorial-y-urbana-11>

Mojiri, A. (2011). The Potential of Corn (*Zea mays*) for Phytoremediation of Soil Contaminated with Cadmium and Lead. Recuperado de <https://pdfs.semanticscholar.org/aff2/241c65bb8a3395e02090aea2c61473e98b28.pdf>

Morales, O. A. (2003). Fundamentos de la investigación documental y la monografía. Recuperado de <http://www.saber.ula.ve/handle/123456789/16490>

Morelli, I., & Coppotelli, B., & Madueño, L., & Del Panno, M. (2015). La biorremediación en la era post-genómica. *Química Viva*, 14 (1), 26-35.

Munive, R., Loli, O., Azavache, A., Gamarra, G. (2018) titulado Fitorremediación con Maíz (*Zea mays* L.) y compost de Stevia en suelos degradados por contaminación con metales pesados. Recuperado de <http://revistas.unitru.edu.pe/index.php/scientiaagrop/article/view/2186/2063>

OEI. (2017). Buscan usar plantas de alfalfa para descontaminar suelos. Recuperado de <https://www.oei.es/historico/divulgacioncientifica/?Buscan-usar-plantas-de-alfalfa-para-descontaminar-suelos>

Oldeman, L. R. 1988. Guidelines for general assessment of the status of human-induced soil degradation. Working paper 88/4. International Soil Reference and Information Centre (ISRIC), Wageningen, 151 pp.

- Ortega, E. (2018). Fitorremediación con girasol. Recuperado de https://www.researchgate.net/publication/324888633_fitirremediacion_con_girasol
- Ortiz, I., Sanz, J., Dorado, M., Villar, S. (2007). Técnicas de recuperación de suelos contaminados. http://www.madrimasd.org/uploads/informacionidi/biblioteca/publicacion/doc/VT/vt6_tecnicas_recuperacion_suelos_contaminados.pdf
- Pajoy, H. (2017). Potencial fitorremediador de dos especies ornamentales como alternativa de tratamiento de suelos contaminados con metales pesados. Recuperado de <http://bdigital.unal.edu.co/61056/1/10307327.2017.pdf>
- Pastor, J., Gutiérrez, M., Hernández, A. (2012). Respuesta del maíz (*Zea mays*) en suelos contaminados por metales pesados después de crecer una comunidad de pasto. <https://digital.csic.es/handle/10261/66296>
- Peña-Salamanca E. J., C. A. Madera-Parra, J.M. Sánchez, J. Medina-Vásquez, M. (2013). Bioprospección de plantas nativas para su uso en procesos de biorremediación: caso *Heliconia psittacorum* (heliconiaceae). *Rev. Acad. Colomb. Cienc.* 37 (145): 469-481.
- Ruiz, E., Armienta, M. (2012). Acumulación de arsénico y metales pesados en maíz en suelos cercanos a jales o residuos mineros. Recuperado de <https://www.revistascca.unam.mx/rica/index.php/rica/article/view/31629/29243>
- Silva Arroyave, S., & Correa Restrepo, F. (2009). Análisis de la contaminación del suelo: revisión de la normativa y posibilidades de la regulación económica. *Semestre Económico*, 12 (23), 13-34.
- Simanca, Y. (2017). Evaluación del desempeño de la biorremediación en suelos contaminados con hidrocarburos mediante el método de landfarming en la planta de tratamiento del municipio de

Aguachica,

Cesar.

Recuperado

<http://repositorio.ufpso.edu.co:8080/dspaceufpso/bitstream/123456789/1545/1/30048.pdf>

Wagner, P. (1996). Contrasting the underlying patterns of active trends in morphologic evolution.

Recuperado de <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/j.1558-5646.1996.tb02341.x>

Uchique, A. (2017). Características de los Contaminantes del Suelo. Recuperado de

https://www.academia.edu/33598728/CARACTERISTICAS_DE_LOS_CONTAMINANTES_DEL_SUELO

UDCA. (2017). Estudio nacional de la degradación de suelos por erosión. Recuperado de

documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/023648/Sintesis.pdf

Viñas, M. 2005. Biorremediación de suelos contaminados con hidrocarburos: caracterización, microbiología, química y ecotoxicológica. Facultad de biología. Universidad de Barcelona.

Xiong, J. (2015). Recuperación y rehabilitación de suelos contaminados con elementos traza mediante la aplicación de enmiendas y el establecimiento de una cubierta vegetal natural o de una planta de crecimiento rápido (*Paulownia fortunei*). Recuperado de <https://idus.us.es/xmlui/bitstream/handle/11441/39861/Tesis%20Jian%20Xiong.pdf?sequence=1&isAllowed=y>