

Biorremediación por landfarming de suelos contaminados por hidrocarburos.

Joan Sebastián Sierra Gómez

Universidad Nacional Abierta y a Distancia - UNAD

Escuela de ciencias agrícolas, pecuarias y medio ambiente - ECAPMA

Ingeniería ambiental

Bucaramanga 2021

Biorremediación por landfarming de suelos contaminados por hidrocarburos.

Joan Sebastián Sierra Gómez

Monografía presentada como requisito para optar al título de Ingeniería ambiental.

Diana Marcela Ibarra Mojica

Ingeniera Sanitaria y Ambiental, MSc. Ingeniería Química

Universidad Nacional Abierta y a Distancia - UNAD

Escuela de ciencias agrícolas, pecuarias y medio ambiente - ECAPMA

Ingeniería ambiental

Bucaramanga 2021

Resumen

El recurso suelo, es el resultado de la mezcla de material orgánico e inorgánico que están presentes en la superficie terrestre siendo un lugar en donde se alojan gran variedad de especies de fauna y flora, al igual que componentes como el agua y el aire que se filtran por los poros del suelo convirtiéndose es parte vital de un ecosistema que al verse expuesto a diferentes contaminantes de alta peligrosidad como los derrames de hidrocarburos en puntos específicos se debe optar, por alternativas de solución con alta efectividad que permita su recuperación parcial o total de este.

La biorremediación por el método landfarming nos ofrece una alternativa en donde se puede recuperar estos sitios con la ayuda de microorganismos propios del suelo presentes junto con el contaminante, mediante cepas identificadas; a los cuales se les garantiza unas condiciones necesarias de oxígeno, pH, humedad y nutrientes para que se desarrollen satisfactoriamente. En este sentido, se usan métodos como la bioestimulación y bioacumulación las cuales son dos técnicas aplicables con diferentes procesos y un mismo fin formando parte de este método a utilizar e investigar.

Palabras claves: Biorremediación, hidrocarburos del petróleo, landfarming, microorganismos, suelo contaminado.

Abstract

The soil resource is the result of the mixture of organic and inorganic material that are present on the earth's surface, being a place where a great variety of species of fauna and flora are housed, as well as components such as water and air that are filtered by the pores of the soil becoming a vital part of an ecosystem that, when exposed to highly dangerous pollutants such as hydrocarbon spills at specific points, must opt for highly effective solution alternatives that allow its partial or total recovery of it.

Bioremediation by the landfarming method offers us an alternative where these sites can be recovered with the help of microorganisms from the soil present together with the contaminant, by means of identified strains; to which the necessary conditions of oxygen, pH, humidity and nutrients are guaranteed for them to develop satisfactorily. Methods such as biostimulation and bioaccumulation are used, which are two applicable techniques with different processes and the same purpose, forming part of this method to be used and investigated.

Keywords: Bioremediation, petroleum hydrocarbons, landfarming, microorganisms, contaminated soil.

Contenido

Introducción	10
El recurso suelo	12
Perfil del suelo.....	12
Indicadores de la calidad del suelo.....	12
Biodiversidad del Suelo	15
<i>Microflora</i>	15
<i>Microfauna</i>	16
<i>Mesofauna</i>	16
<i>Macrofauna</i>	16
El Petróleo	18
Clasificación	18
<i>Hidrocarburos alifáticos saturados o alcanos o parafinas</i>	19
<i>Hidrocarburos cíclicos saturados, cicloalcanos o naftenos</i>	19
<i>Hidrocarburos aromáticos</i>	19
Contaminación de suelos por hidrocarburos	21
Límites permisibles	22
Landfarming	26

Microorganismos que intervienen en el proceso de biorremediación	30
Bioaumentación	32
Bioestimulación	34
Condiciones para el desarrollo adecuado de poblaciones microbianas	35
<i>pH</i>	35
<i>Nutrientes</i>	35
<i>Humedad</i>	36
<i>Temperatura</i>	36
Métodos de implementación del Landfarming	36
<i>Método “In situ”</i>	36
<i>Método “Ex situ”</i>	38
Plan de operaciones para un proceso de Landfarming	39
<i>Caracterización ambiental</i>	39
<i>Preparación del terreno</i>	39
Implementación de recolección de lixiviados para tratamiento ex situ	42
Implementación de cubiertas tipo invernadero	42
Seguimiento de actividades	43
Ventajas y desventajas	44

Conclusiones46

Bibliografía.....49

Lista de Tablas

Tabla 1. <i>Indicadores físicos, químicos y bioológicos de calidad del suelo</i>	14
Tabla 2. <i>Tipos de biodiversidad existente en el suelo y su función</i>	17
Tabla 3. <i>Constantes físicas y Rangos de algunos alcanos, Naftenos y Aromáticos</i>	20
Tabla 4. <i>Parámetros que influyen en el transporte de hidrocarburos a través del suelo</i> .	21
Tabla 5. <i>Artículos contenidos en la Constitución Política de Colombia</i>	22
Tabla 6. <i>Marco normativo colombiano</i>	23
Tabla 7. <i>Tipos de cepas utilizadas en el proceso de bioaumentación</i>	34
Tabla 8. <i>Aspectos relevantes en el emplazamiento de suelo para la implementación del landfarming</i>	38
Tabla 9. <i>Ventajas y desventajas del uso de la tecnología landfarming</i>	45

Lista de Figuras

Figura 1 13

Figura 2 27

Figura 3 40

Figura 4 43

Figura 5 44

Introducción

Desde hace más de 150 años el petróleo ha sido la fuente esencial de materia prima y energía para la mayoría de los sectores económicos e industriales a nivel mundial. Los diferentes procesos de explotación, transporte y refinación son esenciales para mantener un flujo constante de crudo y sus derivados que permiten el funcionamiento ininterrumpido de la sinergia económica entre la producción industrial y el consumo de productos. Las fallas de ingeniería en estos procesos producen, derrames accidentales de hidrocarburos al medio ambiente causando impactos ambientales en el factor abiótico, biótico y socioeconómico de un país (Lopez et al., 2010).

Estos impactos ambientales reflejados en la destrucción del recurso suelo no son más que efectos colaterales de la explotación petrolífera, los cuales deben ser reparados posteriormente por las empresas encargadas de dicha actividad, asumiendo así, su compromiso con el desarrollo sostenible y presentar ante la autoridad ambiental y la sociedad soluciones alternativas que permitan la recuperación de las propiedades naturales de los suelos afectados. Dentro de las posibles soluciones aplicables para la descontaminación y recuperación del suelo, los procesos de degradación biológica merecen especial atención ya que son útiles en la biodegradación de muchos tipos de residuos orgánicos y sus procesos naturales no producen un impacto adicional sobre los ecosistemas (Moreno et al., 2004).

El suelo es un recurso esencial en donde se desarrolla vida cuya vulnerabilidad es alta ante agentes contaminantes, que hacen que su resiliencia sea muy reducida y por ende el suelo se considere un recurso no renovable. La biorremediación representa una alternativa tecnológica que tiene como fin la descomposición de estos hidrocarburos presentes en el suelo, mediante procesos biológicos naturales usando microorganismos alóctonos y nativos, encargados de metabolizar el contaminante, convirtiéndolos posteriormente en agua y anhídrido carbónico

(CO_2). La recuperación satisfactoria del recurso suelo posibilita continuar su ciclo y función en el ambiente, de ahí el interés por investigar todo lo relacionado con la temática, para así contribuir en soluciones ambientales.

La presente monografía, presenta las diferentes características del proceso de la tecnología *Landfarming* como proceso de biorremediación, sus ventajas y desventajas, la metodología de aplicación, sus limitantes, los tiempos de ejecución aproximados y los organismos protagonistas en este proceso al ser aplicada sobre un suelo contaminado por hidrocarburos. Todo lo anterior, mediante una investigación bibliográfica de diferentes artículos científicos, revistas y libros.

El recurso suelo

El suelo es un recurso natural considerado como inactivo, que brinda las condiciones para el desarrollo de otras formas de vida, el cual está compuesto por materiales minerales meteorizados. La composición ideal está dada por: aire al 25% que se acondiciona en los microporos del suelo y permite la respiración de la flora y fauna presente en el mismo, la proporción de agua es de 25% ubicada en los macroporos del suelo, los minerales constituyen el 45% y es lo que se conoce, como verdadero suelo constituido por minerales (grava, arena, limo y arcilla) y finalmente, se encuentra la materia orgánica, con una representación del 5% que se da por materiales vegetales y animales descompuestos que mediante factores meteorológicos y el transcurrir del tiempo se convierten en humus. Los porcentajes de la composición del suelo pueden variar según las condiciones de este (Marconi, 2012).

Perfil del suelo

El perfil del suelo se representa mediante horizontes apilados de forma vertical, que se pueden clasificar según su color, estructura, textura, consistencia, tipo y cantidad de organismos, entre otros. La secuencia vertical del suelo se subdivide en el horizonte O (material orgánico), el horizonte A (minerales), el horizonte E (arena y partículas de limo), horizonte B (acumulación de arcilla), horizonte C (material no consolidado) y horizonte R (roca sólida) como se evidencia en la Figura 1 (Sposito, 2021).

Indicadores de la calidad del suelo

Los indicadores de calidad del recurso suelo dependen de la finalidad con que se use. Identificar estos aspectos permite evaluar el estado actual de un lugar determinado y con base a esta evaluación, adecuar y mejorar las condiciones biológicas, químicas y físicas según se

requiera, ya que estas pueden variar por sucesos naturales como la erosión, compactación, presencia de contaminantes, alteraciones de pH, pérdida de materia orgánica, entre otros (Navarrete Segueda, Armando; Vela Correa, Gilberto; Blanco Lopez, Jorge; Rodriguez Gamiño, Maria de lourdes, 2011) El estado en la que se encuentre el suelo determinara el grado de funcionabilidad para los factores alternos que se benefician del mismo (flora, fauna y seres humanos) ver **Tabla 1**.

Figura 1

Tipos de horizontes presentes en el suelo.



Fuente: (Sposito, 2021).

Según Kamt y Mey (2020) los organismos presentes en el suelo están correlacionados de manera directa con las condiciones climáticas y el alimento que se encuentre a disposición de ellos; su caracterización está dada de acuerdo con su función y estilo de alimentación en el suelo. La biomasa de cada suelo está representada por macro y microorganismos de especies específicas contemplando a los colémbolos, ácaros, artrópodos, lombrices, hongos y bacterias, como las

poblaciones más numerosas, en donde la presencia de cada uno de ellos se convierte en bioindicadores del estado del suelo.

Tabla 1

Indicadores físicos, químicos y biológicos de calidad del suelo.

Indicador	Relación con las funciones y condiciones del suelo
Indicadores físicos	Las características físicas del suelo son tomadas como indicadores de su calidad, se caracterizan por ser parte esencial del suelo y no son fáciles de recuperar.
Textura del suelo	Retención y transporte de agua y minerales; erosión del suelo a partir de su influencia en el tipo de estructura, la cantidad y tamaño de poros.
Profundidad del suelo	Estimación del potencial productivo y de erosión, profundidad fisiológica.
Infiltración y densidad aparente	Potencial de lixiviación, productividad y erosión.
Capacidad de agua disponible	Agua disponible para las plantas.
Porosidad y compactación	Retención y transporte de agua y nutrimentos, erosión del suelo.
Estabilidad de agregados	Erosión potencial, infiltración de agua.
Indicadores químicos	Hacen referencia a las condiciones que afectan de manera directa a el funcionamiento del suelo-planta.
Materia orgánica (C y N)	Disponibilidad de nutrimentos, fertilidad del suelo, estabilidad de agregados, a mayor cantidad: disminución de la erosión y aumento del potencial productivo.
pH	Actividad química y biológica, límites para el crecimiento de las plantas y actividad microbiana.
Conductividad eléctrica	Actividad microbiológica y de las plantas. Limitante para el crecimiento de las plantas y la actividad microbiológica.
N, P y K extraíble	Disponibilidad de nutrimentos para las plantas y pérdida potencial de N, indicadores de productividad y calidad ambiental.
Capacidad de intercambio catiónico	Almacén de nutrimentos para las plantas, retención de contaminantes y amortiguación de pH.
Indicadores biológicos	Este aspecto se basa principalmente en la degradación de materia orgánica (residuos vegetales y animales) que se da gracias a la actividad de comunidades microbianas presentes en el suelo; la degradación de este material aporta elementos importantes a las propiedades físicas y químicas del recurso.
Biomasa microbiana (C y N)	Actividad biológica, flujo de nutrimentos, potencial catalizador microbiano y reposición de C y N.
N potencial mineralizable	Productividad del suelo y aporte potencial de N.
respiración del suelo	Medición de la actividad microbiana, cantidad de C en el suelo.
Riqueza y abundancia de fauna	Relacionado con los procesos de descomposición y mineralización de residuos orgánicos y alerta temprana ante perturbaciones.
Indicadores de relieve	
Pendiente	Condiciones permisivas para la presencia de la erosión.

Orientación del terreno	Diferencias en parámetros estructurales (biomasa, distribución de frecuencias), y comportamiento hídrico del suelo
Altitud	Patrones de distribución de especies vegetales.
Unidad geomorfológica (posición en el relieve)	Forma del flujo del agua a lo largo de la ladera (zonas donadoras-zonas receptoras).

Nota. Adaptado y recuperado de (Navarrete Segueda, Armando; Vela Correa, Gilberto; Blanco Lopez, Jorge; Rodriguez Gamiño, Maria de lourdes, 2011)

Biodiversidad del Suelo

Todos estos organismos necesitan garantizar su supervivencia, por lo cual el adaptarse a diferentes circunstancias como la dificultad de movimiento en un suelo compacto, recursos alimenticios de baja nutrición y en algunos casos el exceso de agua y otros factores, conllevan a clasificarlos dependiendo de sus estrategias de supervivencia (Lavelle, 2019).

De acuerdo con Zerbino & Altier (2006) a continuación, se presentan cuatro grupos principales en la biodiversidad del suelo:

Microflora

Este grupo está compuesto por bacterias y hongos. Las bacterias se caracterizan por ser organismos unicelulares con un tamaño aproximado de 1 micra, que se subdividen en tres grupos: descomponedores primarios, que degradan compuestos orgánicos simples; mutualistas que ejercen una interacción biológica con las raíces de las plantas para realizar una simbiosis entre compuestos de C y la fijación de N al suelo; y patógenos, que se incorporan a las plantas y les causan afectaciones.

Los hongos son organismos pluricelulares que se subdividen en tres grupos: *Descomponedores*, que degradan compuestos orgánicos complejos como la celulosa y lignina en compuestos simples que son utilizados por otros organismos; *mutualistas* que se benefician de

las plantas en la toma de carbono mediante sus raíces y estos a su vez le permiten la absorción de fósforo y otros nutrientes a la planta y los *patógenos* causantes de afectaciones a las plantas.

Microfauna

Son los organismos invertebrados con un tamaño menor a 100 micras, cuyos movimientos están directamente relacionados a el estado en que se encuentre el suelo (textura, poros y distribución del agua) ya que son incapaces de realizar alguna modificación al mismo para su desplazamiento. La microfauna se alimenta de raíces o microorganismos (microflora) convirtiéndose en determinantes del crecimiento o reducción de estos.

Mesofauna

Son micro artrópodos con un tamaño entre 0,2 micras y 2 mm, cuentan con múltiples estrategias de alimentación clasificándose, como bacteriófagos hasta depredadores llegando a afectar la descomposición de materia orgánica, el proceso de mineralización y la porosidad del suelo.

Macrofauna

Grupo de organismos de 2 y 20 mm, creadores de grandes poros en el suelo y tienen un ciclo biológico largo, en donde sus formas de alimentación pueden variar entre fitófagos, detritívoros, depredadores, geófagos y demás.

En la **tabla 2** se resumen las funciones de la biodiversidad del suelo.

Tabla 2*Tipos de biodiversidad existente en el suelo y su función.*

Categoría	Ciclado de nutrientes	Estructura del suelo
Microflora	Catabolizan material orgánico	Produce compuestos orgánicos que unen los agregados.
Bacterias	Mineralizan e inmovilizan nutrientes	Las hifas unen partículas y agregados.
Hongos		
Microfauna	Regulan las poblaciones de bacterias y hongos	Pueden afectar la estructura de los agregados mediante sus interacciones con la microflora
Nematodos	Intervienen en el reciclado de nutrientes	
Protozoarios		
Ácaros (pequeños)		
Mesofauna	Regulan las poblaciones de hongos y de la microfauna	Producen pelotas fecales
Ácaros	Intervienen en el reciclado de nutrientes	Crean bioporos.
Colémbolos	Fragmentan restos vegetales	Promueven la humificación.
Artrópodo (pequeños)		
Enquitreidos (lombrices pequeñas)		
Macrofauna	Fragmentan restos vegetales	Mezclan partículas orgánicas y minerales
Lombrices	Estimulan la actividad microbiana	Redistribuyen la materia orgánica y los microorganismos
Enquitreidos (grandes)		Crean bioporos
Bicho bolita		Promueven la humificación
Diplópodos		Producen pelotas fecales.
Quilópodo		
Moluscos		
Insecto (larvas a adultas)		

Nota. Fuente: La biodiversidad del suelo (Zerbino & Altier, 2006).

El Petróleo

El petróleo es un recurso natural no renovable de alto valor energético, formado por hidrocarburos y otros componentes derivados de la descomposición de microorganismos, plantas y animales en un periodo de tiempo extenso; este está compuesto por elementos como el Carbono con un 84-87 % en peso, el hidrógeno con un 11-14 %, el azufre con un 0-2 % y de Nitrógeno con un 0,2 % (Ecopetrol S. A., 2014).

Clasificación

El Instituto Americano de Petróleo (API por sus siglas en inglés) clasifica este recurso natural en grados, en donde a mayor grado API menos refinamiento se necesita, a partir de este concepto se tienen 3 grupos principales: los hidrocarburos livianos, que son aquellos cuya densidad es menor que la del agua, con una calificación superior a 31,1 ° API, los cuales se mueven sobre el nivel freático de manera horizontal siguiendo el flujo del agua subterránea; los hidrocarburos intermedios con una calificación entre 22,3 y 31,1° API y finalmente los denominados hidrocarburos pesados, cuya densidad es superior a la del agua con una calificación por debajo de 22,3° API, se mueven de manera vertical formando columnas en la base de los acuíferos y moviéndose en dirección al flujo del agua. Existe una clasificación adicional denominada “dulces” por su contenido de azufre con un porcentaje inferior a 0,5 y “agrios” con un porcentaje de azufre superior a 1% (Ministerio de Minas y Energía, 2021)

Según, Wauquier (2007) a continuación se describen algunos tipos de hidrocarburos con algunos de sus ejemplos y rangos más relevantes.

Hidrocarburos alifáticos saturados o alcanos o parafinas

Están constituidos por una cadena de átomos de carbono enlazados cada uno a 0 o 3 átomos de hidrógeno excepto en el más sencillo, el metano (CH_4). Cada carbono está ligado siempre a otros cuatro átomos de carbono o hidrógeno, estos hidrocarburos presentan algunas propiedades físicas que varían según algunos factores, por ejemplo, su punto de ebullición aumenta con relación al número de átomos de carbonos como se evidencia en los rangos presentados en la **Tabla 3**, con una ecuación general $\text{C}_n\text{H}_{2n+2}$ y una ecuación específica como $\text{CH}_3 - (\text{CH}_2)_n - \text{CH}_3$.

Hidrocarburos cíclicos saturados, cicloalcanos o naftenos

Son hidrocarburos con una ciclación de carbono presente en su estructura química, en donde los más comunes son de 5 o 6 átomos de carbono, cada átomo de hidrógeno puede ser reemplazado por cadenas ramificadas denominadas alquinos, los cuales poseen una temperatura de ebullición y densidad superior a la de los alcanos con su misma cantidad de carbonos, en donde algunos ejemplos se representan en la **Tabla 3**.

Hidrocarburos aromáticos

Estos hidrocarburos están en gran proporción presentes en el petróleo, son cíclicos poliinsaturados y tienen una base elemental que es el anillo bencénico, cuentan con un hidrógeno en cada vértice del hexágono pero que no se refleja en su forma representativa, de ahí se derivan múltiples representaciones de este hidrocarburo que varía según su composición química (ver **Tabla 3**).

Tabla 3*Constantes físicas y Rangos de algunos alcanos, Naftenos y Aromáticos.*

Tipos de Hidrocarburos		Rango de Peso molecular g/mol	Rango de Temperatura ebullición °C (1 atm)	Rango de densidades kg/cm ³ (liquido)
Alcanos	Metano - n-Hexano $CH_4 - C_6H_{14}$	16,0 -100,2	-161,5 -(+98,4)	0,260 - 0,688
Naftalenos	Ciclopentano – Metilciclohexano $C_5H_{10} - C - H_{12}$	70,1-98,2	49,3 -100,9	0,750 - 0,774
Aromáticos	Benceno - p-Xileno $C_6H_6 - C_3H_{10}$	78,1-106,2	80,1-138,4	0,884 - 0,865

Nota. Fuente tomada y adaptada de (Wauquier, 2007).

Contaminación de suelos por hidrocarburos

El comportamiento de los hidrocarburos vertidos en el suelo depende de múltiples características tanto internas como externas. Para determinar su grado de afectación, intervienen sus aspectos físicos, químicos y principalmente las características del medio (suelo) al igual que los aspectos relacionados con el clima circundante, los cuales se resumen en la **Tabla 4**.

Tabla 4

Parámetros que influyen en el transporte de hidrocarburos a través del suelo.

Parámetros del contaminante.	Solubilidad Presión de vapor Número y tipo de grupos funcionales. Polaridad
Parámetros del suelo.	Contenido y retención de agua. Porosidad, densidad y permeabilidad. Contenido de arcilla Contenido de materia orgánica Profundidad de agua subterránea
Parámetros del Ambiente.	Temperatura Precipitación Evapotranspiración

Nota. Tomado de (Ortinez et al., 2003).

Al momento del contacto con el suelo, los hidrocarburos pueden tomar 4 rutas diferentes. La primera es quedar retenidos en el complejo de cambio, lo que significa que al fusionarse con el punto receptor (suelo) entran en contacto con un conjunto de componentes coloidales (estado, líquido, sólido y gaseoso) los cuales gracias a su carga eléctrica pueden absorber cationes e intercambiarlos interactuando directamente con el tipo de suelo, pH, componentes orgánicos, entre otros factores capaces de asociar o disociar el compuesto con el suelo. La segunda opción es que pueden ser adsorbidos por la superficie del suelo en donde este limitaría el proceso natural del mismo, para lo cual se convierte en una capa que no permite el acceso de otras sustancias para el control biológico y limita la actividad enzimática del suelo. La tercera se da

cuando estos compuestos son biodegradados por microorganismos y convertidos en subproductos que no contaminan como lo son el CO₂, O₂, H₂. La cuarta opción es la permanencia en la disolución del suelo en donde permanecería a disposición de la flora y fauna de este, sujeto a perderse por factores climáticos, por lavado, por erosión o por volatilización, cualquiera de ellas dependerá del comportamiento de los factores ya mencionados (Juarez et al., 2006).

Límites permisibles

La Constitución Política de Colombia de 1991, considera como norma el manejo y conservación de los recursos naturales y el medio ambiente mediante principios fundamentales en donde se contempla el aspecto sobre contaminación de hidrocarburos, como se evidencia en la **Tabla 5** (Trujillo & Ramirez, 2012).

Tabla 5

Artículos contenidos en la Constitución Política de Colombia.

ARTÍCULOS	CONTENIDO
Artículo 8: Riquezas culturales y naturales de la Nación.	Establece la obligación del Estado y de las personas para con la conservación de las riquezas naturales y culturales de la Nación.
Artículo 9: Atención de la salud y saneamiento ambiental.	Consagra como servicio público la atención de la salud y el saneamiento ambiental y ordena al Estado la organización, dirección y reglamentación de estos.
Artículo 58: Función ecológica de la propiedad privada.	Establece que la propiedad es una función social que implica obligaciones y que, como tal, le es inherente una función ecológica.
Artículo 79: Ambiente sano.	Consagra el derecho de todas las personas residentes en el país de gozar de un ambiente sano.
Artículo 80: Planificación del manejo y aprovechamiento de los recursos naturales.	Establece como deber del Estado la planificación del manejo y aprovechamiento de los recursos naturales, para garantizar su desarrollo sostenible, su conservación, restauración o sustitución.
Artículo 95: protección de los recursos culturales y naturales del país.	Establece como deber de las personas, la protección de los recursos culturales y naturales del país, y de velar por la conservación de un ambiente sano.

Nota. Fuente adaptado de (Trujillo & Ramirez, 2012).

En Colombia han existido múltiples desastres ambientales naturales y antrópicos a lo largo del tiempo sin ningún tipo de plan de contingencia con eventos dados desde 1970 hasta 1988 en donde se crea la ley 46 y se organiza el Sistema Nacional para la Prevención y Atención de Desastres (SNPAD) la cual, es una legislación proyectada para dar solución a estos eventos bajo un reglamento establecido. Su principal función es establecer la gestión, prevención y atención del riesgo de las actividades que puedan conllevar a generar inconvenientes ambientales en el país, siendo la mayor autoridad nacional en esta área y cuyos protocolos involucran designar funciones a otros entes para el apoyo en emergencias en sus diferentes lugares regionales (Unidad Nacional para la Gestion del Riesgo de Desastres-Colombia [UNGED], 2018).

A nivel normativo desde el año 1990, se establecieron convenios internacionales en la búsqueda de trabajar conjuntamente en la preparación y lucha contra aspectos relacionados a la contaminación por hidrocarburos. Colombia mediante la ley 885 del 2004 aprueba dichos convenios que se ven reflejados en la ley 45 de 1985, ley 55/1989 y la ley 257/1996 en donde su mayoría, están enfocados en la protección del recurso hídrico, sin embargo, existen fragmentos dentro de ellas enfocados al cuidado del recurso suelo frente a los hidrocarburos (**Tabla 6**).

Existe también, el Decreto 4741 del 2005 que se aplica a nivel nacional con el fin de proteger el medio ambiente y la salud humana de desechos peligrosos.

Tabla 6

Marco normativo colombiano

NORMATIVIDAD	CONTENIDO
Ley 885 del 2004	Mediante esta ley se aprueba un convenio internacional contra la contaminación por hidrocarburos el 30/11/1990 con un enfoque marítimo.
Ley 29 de 1986	Ley encargada de disponer el tipo de uso del recurso suelo

Ley 388 de 1997	Esta ley establece los usos del suelo.
Principio 16 de Rio de Janeiro	Utilizado en caso de no poder prevenir daños ambientales se estipula como regla que los causantes de esta contaminación deberán asumir un costo por contaminar, reflejadas por medio de tasas retributivas, tasas de utilización del recurso agua, multas y comparendos.
Decreto 1609 de 2002	Artículo 1. tiene como objetivo establecer reglas en el manejo y transporte terrestre de mercancías peligrosas por el territorio nacional para garantizar la seguridad y la protección de la vida y medio ambiente.
Norma técnica 1692 y 4532	Se establece la clasificación y condiciones para el desarrollo del Decreto 1609 de 2002.
Ley 1523 del 2002	Ley aprobada por el congreso colombiano el 24 de abril del 2002 para adoptar la PNGRD Y establece SNGRD con un enfoque de ampliación y mejora de algunos campos normativos en cuanto a hidrocarburos para mejor seguridad y control de los procesos.
Norma técnica 3656 de 1994	Norma en la que se establece la toma de suelos para la determinación de contaminación.
Decreto 321 de 1999	“Por el cual se adopta el Plan Nacional de Contingencia contra derrames de Hidrocarburos, Derivados y Sustancias Nocivas”. (Ministerio de Interior., 1999)
Decreto 4741-2005	Tiene como objetivo reglamentar de manera parcial la prevención y el manejo de residuos de desechos peligrosos generados.

Nota. Adaptado y tomado de (Ministerio de Medio Ambiente [Minambiente], 2021).

Para la realización de un tratamiento de tierra contaminada de manera local o fuera del área se debe solicitar permisos que permitan regular el cumplimiento de normas establecidas, mediante resoluciones aprobadas por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo que tienen como guía la norma internacional Louisiana que reglamenta el almacenamiento, tratamiento y disposición de residuos producidos por el sector petrolero mediante parámetros y límites

permisibles establecidos en donde el ente a cargo de su regulación y cumplimiento es la entidad ambiental del lugar determinado a tratar.

Internacionalmente, existen los siguientes ítems que regulan y protegen el recurso suelo:

- La carta europea de los suelos aprobada en 1972 (Estocolmo)
- La carta mundial de los suelos adoptada por la FAO, en Roma 1981 y la política mundial del suelo (PNUMA 1982).
- En al marco de la cumbre de Río de Janeiro de 1992 se desarrolló el convenio sobre la diversidad biológica.
- La importancia de los ecosistemas terrestres queda recogida en la convención y marco sobre el cambio climático de 1992.
- La convención de lucha contra la desertificación y la sequía (1994).
- La comunicación de la comisión europea COM (2002) 179.
- La red europea de información y observación del medio ambiente (EIONET).

Landfarming

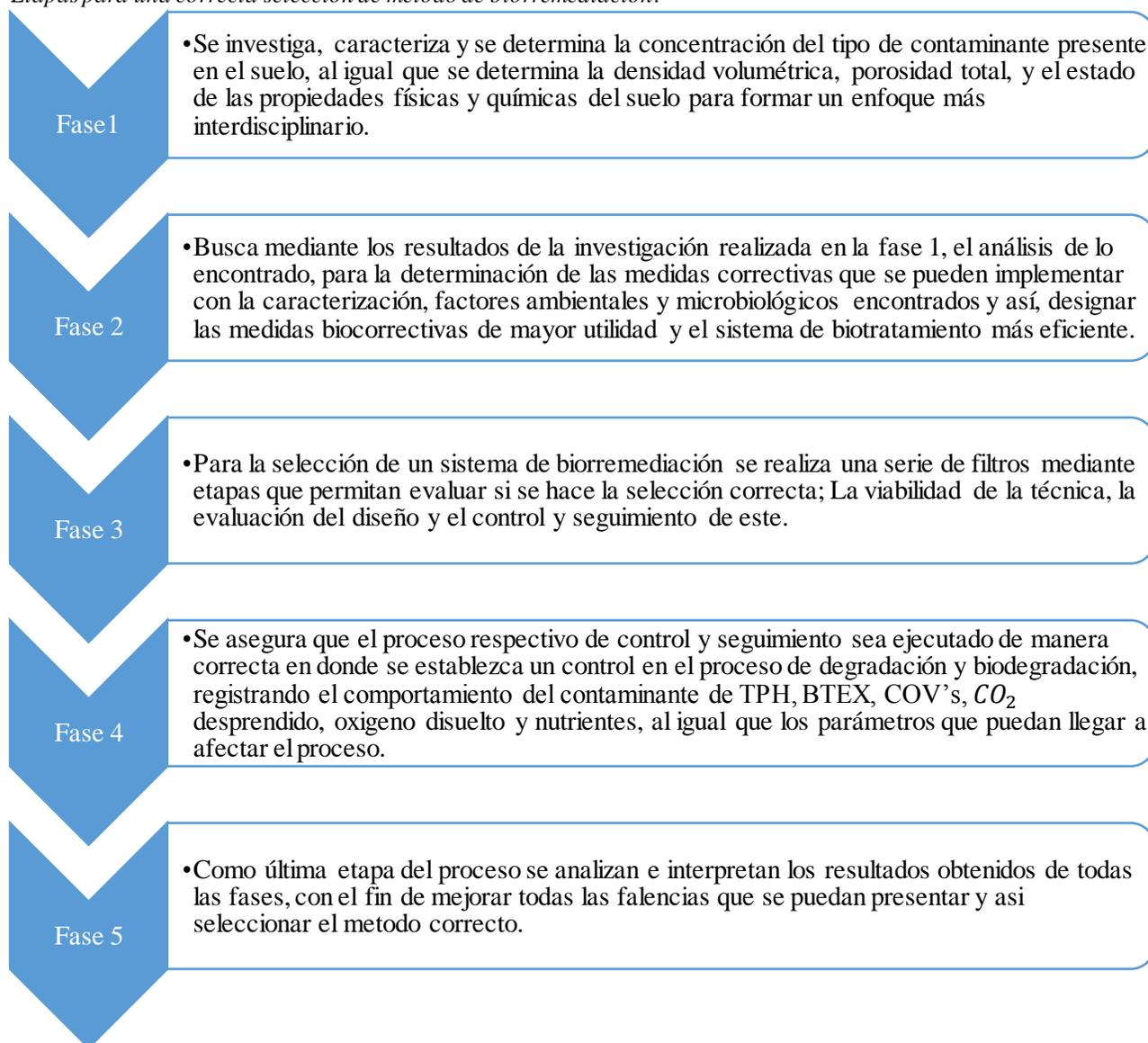
Actualmente, a nivel mundial se reconoce ampliamente la contaminación de suelo como una amenaza constante para los seres humanos y su salud, lo que ha llevado a la búsqueda constante de alternativas tecnológicas pertinentes, en donde se puede resaltar la biorremediación como uno de los grandes potenciales en la solución a la presencia de hidrocarburos derramados sobre el recurso suelo como consecuencia del desarrollo industrial. En las diferentes tecnologías utilizadas se puede hacer uso de microorganismos, hongos, plantas y enzimas de manera individual o conjunta que permita una restauración del medio ambiente favorable (Garzon , Rodriguez Miranda, & Hernandez Gomez, 2017).

El landfarming es una tecnología de biorremediación que al igual que otros deben llevar consigo un sistema de directrices para lograr un desarrollo exitoso, en donde se contemplen todos los factores que intervienen en el proceso y así se selecciona la tecnología más eficiente a aplicar como se evidencia en la **Figura 2**.

La biorremediación se caracteriza por ser un proceso que utiliza habilidades catalíticas de los organismos vivos para degradar y transformar contaminantes tanto en ecosistemas terrestres como acuáticos, presentando un enorme potencial en la mitigación de la contaminación ambiental (Garbisu, Amézaga, & Alkorta, 2002). La efectividad de este proceso radica en la capacidad de las enzimas producidas por las células presentes en los microorganismos para aumentar su velocidad de reacciones químicas, y a su vez reducir la masa o lodo contaminante en menos tiempo de manera natural, quedando como material inofensivo o menos tóxico para los seres humanos y el medio ambiente.

Figura 2

Etapas para una correcta selección de método de biorremediación.

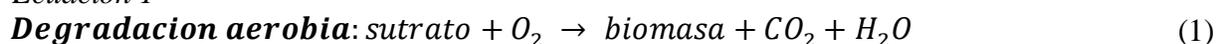


Fuente: Tomado y adaptado de (Mogollon, 2018).

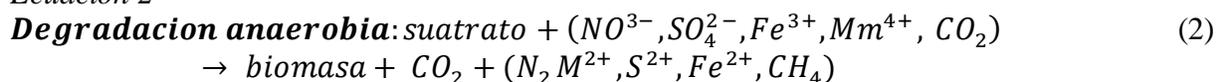
Este fundamento de reducción del contaminante se centra en la cadena respiratoria mitocondrial de los microorganismos, cuya función es el transporte de electrones y protones de las células para convertirlo en energía ATP (adenosín trifosfato) a partir de ADP (adenosín difosfato) y fosfato inorgánico mediante un proceso de oxidorreducción en donde se involucra el compuesto contaminante u orgánico externo a la célula, cumpliendo el papel de dador de

electrones, que posteriormente es metabolizado por la célula que termina degradando y consumiéndola. Los aceptores más comunes utilizados por los microorganismos son el oxígeno, en cuyo caso se daría mediante el proceso de degradación aerobia como se describe en la *Ecuación 1*. Los elementos como el nitrato, el hierro, los sulfatos y el dióxido de carbono se degradan mediante el proceso anaerobio como se demuestra en la *Ecuación 2*. (Mogollon Véliz, 2018).

Ecuación 1



Ecuación 2



La tecnología Landfarming no tuvo un uso de alta calidad por parte de la industria del petróleo en sus inicios, pese a esto y al transcurrir de los años se fue tecnificando mediante estudios científicos; su descubrimiento se dio gracias a observaciones por parte de trabajadores de refinerías, quienes al desechar una proporción de lodo y otros residuos no tan gruesos en un terreno cercano a su punto de trabajo, observaron que después de transcurrido algunos meses, la mancha de lodo de hidrocarburos había desaparecido, posteriormente fue usada de manera empírica esta técnica, a la que llamaron “landfarming” sin un conocimiento científico del porque sucedía este proceso de eliminación de residuos de hidrocarburos (King et al., 1992).

Esta técnica perdió popularidad en el año 1984 cuando la US EPA (siglas en inglés) emitió restricciones para su uso debido a los problemas de contaminación que derivaban del proceso, posteriormente en 1992 gracias a la nueva normatividad creada en el registro federal (57 FR 37194, 37252) se establece un tratamiento estándar bajo el programa de disposición en

tierra para desechos peligrosos que incluyen derivados del petróleo, dando paso nuevamente al uso de la técnica, principalmente para productos derivados del petróleo (Cloete & Maila, 2004).

La tecnología landfarming es un proceso que se realiza a gran escala y cumple la función de degradar contaminantes de hidrocarburos, mediante procesos biológicos naturales. Existe el método *in situ* de bajo costo y que no requiere la remoción del suelo aplicándose la tecnología directamente en el lugar afectado y el método *ex situ*, que requiere la remoción del suelo para reubicar los residuos contaminados en un sitio que se encuentre nivelado, con una aireación óptima y buen control de las condiciones del suelo, para evitar filtraciones y contaminación por lixiviados (Colombano et al., 2010).

Estos procesos utilizan bacterias nativas del lugar afectado cuya función específica es la toma del material orgánico (contaminante), convirtiéndola mediante enzimas producidas por las células en dióxido de carbono y agua. Los microorganismos se desarrollan bajo condiciones óptimas que permiten a la población de bacterias un crecimiento exponencial favorable y así su descomposición de material contaminante sea más eficiente. (Bravo Basantes & Arboleda Jacome, 2008).

La técnica de bioestimulación y bioaugmentación son factores principales para fortalecer el proceso del landfarming, cada una se puede desarrollar de manera individual o conjuntamente para suplir falencias químicas, físicas y microbianas del suelo contaminado, si este, no cumple con los estándares elementales para su proceso. En la implementación del proceso del landfarming a los suelos contaminados por hidrocarburos se puede encontrar la presencia de petróleo clasificado como liviano, cuya concentración es suprimida en gran magnitud por medio de la propiedad de volatilización del compuesto, dejando en el suelo las fracciones más pesadas para ser biodegradadas por los microorganismos nativos. Por otro lado, se pueden encontrar

petróleo de clasificación pesada, que requiere la actuación de los microorganismos degradadores en mayor proporción, con características específicas en su proceso de metabolización debido a la complejidad de la estructura molecular del contaminante (Agencia de Protección Ambiental [EPA], 2014).

Se ha demostrado que la tecnología de landfarming es efectiva en productos químicos orgánicos como el benceno, tolueno, etilbenceno y xilenos (BTEX), en hidrocarburos totales de petróleo (TPH) y en hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP) como el naftaleno y fenantreno si no se requiere una biorremediación inmediata (EPA, 2014). Se practica en países como Estados Unidos de América, Canadá, Reino Unido, Holanda, Suiza, Nueva Zelanda y otros países en donde se realiza a gran escala y su costo de aplicación por m^3 esta en un promedio entre 30 y 70 USD, con un proceso de implementación que varía de mediano a largo plazo dependiendo del nivel de contaminación (Fundación de Chile [FCH], 2021).

Microorganismos que intervienen en el proceso de biorremediación

Los suelos contaminados por derrames de petróleo por diversas causas son caracterizados por albergar poblaciones nuevas de microorganismos superiores a la cantidad de un suelo sin afectación alguna. El cambio existente les permite mejorar su supervivencia ante un entorno hostil, no obstante, su diversidad es más pequeña a diferencia de un suelo normal y natural sin influencia humana, ya que estos pueden albergar a más de 600 millones de bacterias con diversidad de especies, como *pseudomonas sp*, *Achromobacter*, *Acinetobacter*, *Alcaligenes*, *Arthrobacter*, *Bacillus*, *Flavobacterium* y *Norcadia*. La eficacia de los microorganismos varía según la composición del hidrocarburo presente en el suelo, ya que pueden ser más o menos resistentes a su degradación según sea el caso. Existen factores ambientales que influyen en el proceso para aumentar considerablemente los resultados, tales como: la temperatura, la humedad,

el oxígeno, nutrientes y algunos otros aspectos mezclados con surfactantes que mejoran los resultados de biodegradación (Riojas et al, 2010).

Los *Bacillus* y *Pseudomonas* son algunas de las bacterias aerobias más comunes observadas en el suelo al igual que los Actinomicetos los cuales se desempeñan favorablemente en rangos de pH entre 4 y 10 y son capaces de sobrevivir ante una inundación de terreno. (Arboleda & Bravo, 2008).

Los microorganismos endógenos (provenientes del lugar de tratamiento mismo) cumplen un papel vital, ya que forman parte del ecosistema en estado de contaminación y son biorremediadores que coexisten con el entorno a los cuales se les establece condiciones óptimas para mantener la población microbiana y así desarrollar su capacidad máxima para la descomposición del contaminante. Cuando el entorno que está contaminado no presenta actividad biológica para su recuperación, se recurre a traer microorganismos exógenos estudiados previamente capaces de degradar el material en particular, bajo condiciones específicas como temperatura, pH y nutrientes (Moreno, Gonzales Becerra, & Blanco Santos, 2004).

Según Álvarez (2015) existen 3 niveles a analizar en el proceso de una correcta biorremediación, dados por una escala microscópica, media y alta como se describen a continuación.

El nivel microscópico (sistemas celulares con una escala de dimensión en nanómetros), procede a identificar los múltiples microorganismos presentes en el suelo contaminado, con la capacidad de degradar el contaminante y el nivel en que hacen esa degradación. Cuando existen mezclas complejas de hidrocarburo, se da una simbiosis entre estas comunidades de

microorganismos en donde mientras unas son las encargadas de metabolizar parte complejas del hidrocarburo, las otras se encargan de degradar el residuo del material orgánico restante que los ayuda en su crecimiento.

El nivel medio (interacción con partículas del suelo con una dimensión en micrómetros), es donde se desarrolla una interacción entre los fenómenos fisicoquímicos, partículas y poros del suelo, convirtiéndose en los determinantes de la efectividad del proceso y de la capacidad de los microorganismos para el acceso al hidrocarburo. Si se presentara el caso de que los compuestos contaminantes no estuvieran accesibles entre las partículas de suelo, su eliminación no ocurriría, independientemente si hubiese microorganismos con capacidad de degradarlos.

El nivel alto (dimensión dada en metros), es la escala donde se trabajan aspectos como nutrientes, humedad, minerales pH y demás, distribuidos de manera heterogénea teniendo incidencia en los resultados al momento de la biorremediación. Existe un nivel aún mayor, en unidades de kilómetros, abarcando extensiones de ecosistemas completos.

Bioaugmentación

Es un proceso que consiste en la incorporación de poblaciones microbianas especializadas exógenas a un suelo contaminado que no posee microorganismos en su microflora necesarios para eliminar el contaminante presente, ya que existen compuestos como los policlorobifenilos (PCB), trinitrotolueno (TNT), poli aromático, los hidrocarburos (HAP), entre otros, incapaces de ser degradados por la microflora presente en el suelo nativo (Buddolla, 2007).

Según Samer (2012), los microorganismos utilizados en este proceso son mantenidos bajo condiciones ideales en un laboratorio como sepas individuales o en asociaciones para la realización del proceso de bioaumentación, cumpliendo con 3 enfoques de uso:

- *Bioaumentación autóctona*, busca retirar los microorganismos con la capacidad de degradar las moléculas del contaminante, enriquecerlos e inyectarlos nuevamente al entorno en dado caso que la concentración del contaminante presente sea alta.
- *Bioaumentación alóctona*, busca introducir microorganismos de otros y así complementar o reemplazar la población microbiana nativa del suelo contaminado formando parte del hábitat y desarrollando su función específica, siendo capaces de subsistir y competir con los demás microorganismos presentes en donde a diferencia de la primer enfoque estos microorganismos no son capaces de adaptarse al medio por las condiciones presentes en él ya que son muy diferentes a el entorno en que fueron desarrollados.
- *Bioaumentación genética*, que busca introducir microorganismos modificados genéticamente que cumplan el papel de biocatalizadores cumpliendo la función de generar reacciones bioquímicas de los microorganismos para ayudar a la degradación de un contaminante específico mediante enzimas por un tiempo antes de que estas mueran y pierdan su capacidad de actuar .

Existen diferentes tipos de cepas utilizadas en el proceso de bioaumentación, cada una con características específicas en donde se utilizan bacterias u hongos lignolíticos como se puede ver en la **Tabla 7**.

Tabla 7

Tipos de cepas utilizadas en el proceso de bioaumentación.

CEPAS	CONTENIDO
Cultivo mixto	Son aquellas bacterias nativas extraídas de un suelo contaminado y posteriormente llevadas al laboratorio para adaptarlas en la degradación de un contaminante específico. Sin embargo, la identificación de estos microorganismos se da mediante el estudio de cepas aisladas o cultivos puros.
Cultivo Puros	Son aquellos con una inoculación con una única cepa, son capaces de degradar un contaminante específico.
Microorganismos genéticamente modificados	Es un proceso de incorporación de material genético a bacterias nativas mejorando sus rendimientos y capacidad de supervivencia. El resultado son bacterias modificadas genéticamente para actuar en la degradación de contaminantes que, no obstante, representan riesgos para el medio ambiente y salud humana si no son controlados de manera adecuada.

Nota. Adaptada de (Izquierdo, 2013)

Bioestimulación

Es un proceso en el cual se realiza la estimulación y acondicionamiento de los microorganismos nativos endógenos presentes en un suelo contaminado específico, en donde se realiza un proceso que implica el aporte de nutrientes como lo son el Nitrógeno (N) y el Fosforo (P), condiciones de humedad y adición de aire, entre otros, para generar un aumento en el proceso de degradación de contaminantes presentes en el subsuelo y aguas contaminadas (Daugulis et al., 2013).

Para el uso de esta técnica, se deben aplicar estimulantes compatibles con el medio circundante de manera controlada, evitando el exceso de estos para no causar alteraciones en el comportamiento de algunas bacterias que pueden llevar consigo una afectación directa al crecimiento microbiano y a una posible inhibición de estas (Goswami et al., 2018).

La bioestimulación se puede dar mediante la técnica aerobia que se realiza en presencia de oxígeno suficiente y otros elementos esenciales, degradando el contaminante para convertirlo en agua (O_2) y dióxido de carbono (CO_2). La técnica anaerobia, también aplica para este proceso

la cual se realiza en ausencia de oxígeno, en donde los componentes orgánicos son metabolizados hasta convertirse en metano, obteniendo cantidades limitadas de CO_2 , H_2 y amoníaco.

Condiciones para el desarrollo adecuado de poblaciones microbianas

La concentración de las poblaciones microbianas y su eficiencia en la biodegradación de contaminantes depende de algunos factores o condiciones que contribuyan a este desarrollo, permitiendo que su influencia determine en sus comunidades la estabilidad y la efectividad de sus procesos.

pH

El rango del pH para el crecimiento óptimo de bacterias que actúan en el proceso de landfarming está entre 6 y 8, si este se encuentra por fuera de estos límites, tienen que ser ajustados para una optimización del proceso de biorremediación (EPA, 2014).

Nutrientes

Los organismos presentes en el suelo tienen un metabolismo que requiere algunos componentes químicos como el fósforo y el nitrógeno para optimizar sus procesos de biodegradación, de reproducción, de crecimiento manteniendo un equilibrio constante. Los balances de estos compuestos deben estar dados dependiendo del tratamiento que se quiera realizar teniendo como base un balance de C:N:P igual a 100:10:1. Cuando no existe la disponibilidad suficiente de nutrientes se opta por incorporar los para mejorar las condiciones del suelo y de los microorganismos presentes en él (Lukic et al., 2017).

Humedad

El crecimiento de los microorganismos está ligado de manera directa a la cantidad de humedad presente en el suelo ya que ellos requieren unas condiciones específicas para esto. El agua forma parte del protoplasma bacteriano sirviendo como medio de transporte de compuestos orgánicos y nutrientes que son llevados hasta el interior de las células. El exceso de humedad inhibirá el crecimiento bacteriano reduciendo la concentración de oxígeno en el suelo. El rango varía en función de la técnica (Mogollon, 2018).

Temperatura

Generalmente, la temperatura que utilizan las diferentes especies bacterianas se dan en condiciones mesófilas que oscilan entre 15 y 45° siendo un rango moderado para un óptimo crecimiento, cuando su temperatura empieza a elevarse con un valor superior a 45 ° las bacterias empiezan a perder su función biológica en donde las enzimas dejan de funcionar de manera correcta y cuando se es una temperatura menor a 0° estas se inhiben (EPA, 2017).

Métodos de implementación del Landfarming.

El proceso de biorremediación busca reducir los niveles de concentración de contaminantes por hidrocarburos el cual se puede implementar de manera “*in situ*” y “*ex situ*” dependiendo del grado de contaminación presente en el suelo y su profundidad.

Método “In situ”

Este proceso se desarrolla en el sitio puntual de contaminación por derrame de hidrocarburos, se realiza “*in situ*” únicamente si su límite de contaminación no supera los 50cm de profundidad y en los casos que no requieran una intervención inmediata. Este método se

realiza mediante el acondicionamiento de las necesidades que se requieran para mantener la vida y desarrollo de los microorganismos autóctonos presentes en el suelo contaminado. En el proceso que se desarrolla se deben tener en cuenta los factores del clima, la adición de nutrientes, la adición de agua de manera eventual y de oxígeno de manera constante en donde este último solo llega a un suministro a 30 cm de profundidad (Daugulis, 2013), convirtiéndose en un limitante en este método, por lo cual, se recurre al suministro de agentes de carga que son ayudantes en el transporte de aire para asegurar su incorporación a los espacios en los que se limita su presencia. La estrategia operativa de manera *in situ* requieren un nivel tecnológico mínimo, poco profunda y no requiere remoción de tierra. El método *in situ* es de bajo costo y se utilizan microorganismos nativos en su proceso de biorremediación tomando un poco más de tiempo con un alcance difícil de predecir, tiene un porcentaje de eficacia alto sobre el contaminante presente, pero se ve afectado cuando la concentración del contaminante es alta (tóxicas) para lo cual se debe recurrir al uso de microorganismos exógenos que posean una mayor tolerancia (Benavides Lopez de Mesa , y otros, 2006).

El tratamiento *in situ* reduce la generación de material volátil por remoción de tierra, se efectúa de manera exitosa dependiendo de la textura del suelo la cual permite calcular el nivel de filtración de los lixiviados producidos por los microorganismos, determinando si hay afectación directa a la capa freática del suelo, en algunos casos si los suelos son muy permeables se deben acondicionar para evitar la filtración, mediante la implementación de un geotextil o membranas impermeables. Factores como el pH, humedad y cantidad de microorganismos, aseguran un desarrollo exitoso de este método “*in situ*” de biorremediación (Lukic et al., 2017).

Método “Ex situ”

Para la realización de este método se requiere la excavación y transporte del suelo contaminado a un lugar cerca al área con las condiciones necesarias, para la implementación del proceso, en donde de manera inicial esto representa un costo adicional y un riesgo de contaminación en el trayecto de desplazamiento. Es un método muy competitivo, altamente efectivo al momento de la biodegradación de contaminantes y los equipos que se requieren en su implementación son mínimos (Daugulis et al., 2013).

El método ex situ del landfarming requiere la implementación de múltiples condiciones que se desarrollan por etapas, iniciando con la identificación del lugar u área contaminada para evaluar los pasos a seguir, algunos de estos factores se ven reflejado en la **Tabla 8**.

Tabla 8

Aspectos relevantes en el emplazamiento de suelo para la implementación del landfarming.

ASPECTOS	ESPECIFICACIONES.
Distancia de la zonificación residencial	500 m a partir del límite establecido
Distancia desde la masa de agua superficial (potables, no potables)	500 m a partir del límite establecido
Distancia desde la masa de agua subterránea potable	500 m a partir del límite establecido
Restricción de áreas sensibles	Es pertinente establecer las limitaciones que se puedan presentar en el área a trabajar para que no involucre afectaciones indirectas a especies determinadas u resguardos de indígenas.
Inclinación o grado del sitio	Lugar con una pendiente natural de 5% de lo contrario se tiene que nivelar.
Hidrología	La ubicación del sitio debe tener un nivel freático superior a 3 m y esta no debe desarrollarse en un sitio con llanura aluvial de 50 años.

Nota Tomado y adaptado de (Plan de Acción Federal para Sitios Contaminados [FCSAP], 2013)

Plan de operaciones para un proceso de Landfarming

Este plan se debe colocar como prioridad en el ámbito de establecer una identificación de los factores que actúan dentro del proceso de biorremediación escogido como el medio físico, biótico, antrópico, entre otros; en donde se realizara un proceso de identificación, evaluación y valoración de las diferentes etapas que se implementaran. Se determinará mediante este plan de operaciones el correcto seguimiento de la tecnología, su cronograma de actividades para la ejecución del proceso, sus correspondientes análisis de posibles impactos ambientales y como solucionarlos de manera oportuna para no generar inconvenientes mayores al actual (EPA, 2017).

Caracterización ambiental

Es esta etapa inicial se realiza la descripción del área de trabajo en el ámbito ambiental y se tendrán en cuenta aspectos geomorfológicos y aspectos meteorológicos como la temperatura, la precipitación, el viento, la humedad relativa, los factores bióticos y antrópicos, entre otros. Son parámetros de importante criterio para el proceso y desarrollo de la tecnología del landfarming (FCSAP, 2013).

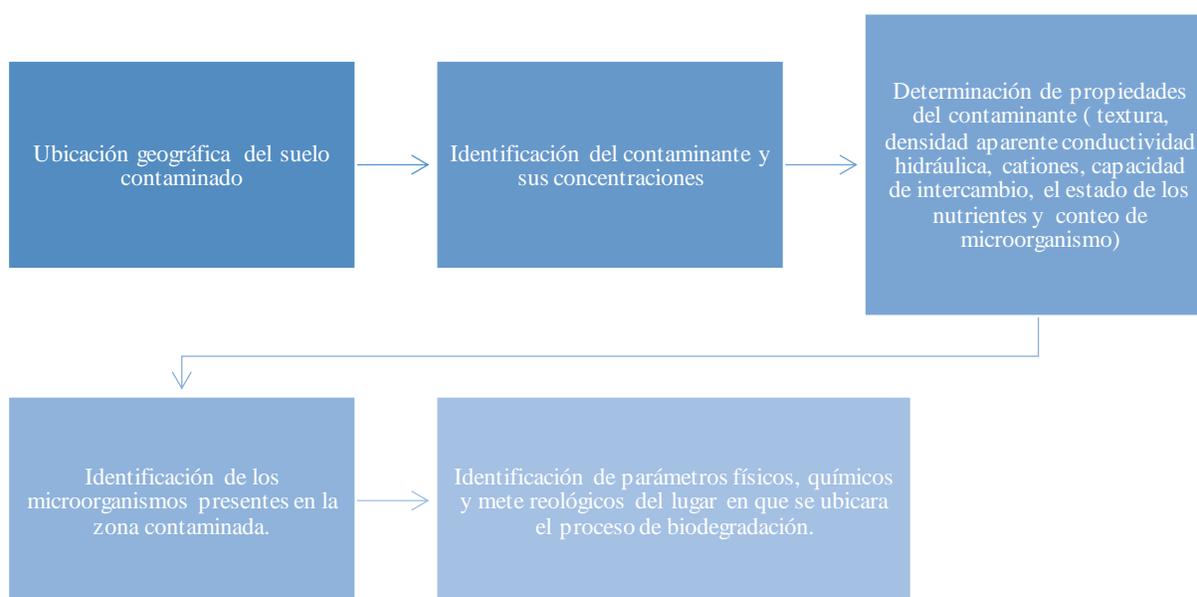
Preparación del terreno

En esta etapa se realiza la aplicación de los principios básicos de biorremediación como se ve en la **Figura 3**, en donde se obtiene información necesaria para determinar las condiciones del terreno donde se va a realizar el landfarming, teniendo en cuenta la implementación de análisis microbiológico, químico y estadístico.

Una vez se haya dado inicio al tratamiento ex situ, se procede a extender la tierra retirada en una capa delgada aproximadamente de 30 a 45 cm de espesor sobre el terreno dispuesto para su tratamiento, y de ahí empezar con el proceso de estimulación a la actividad microbiana existente con base en los resultados obtenidos de los análisis respectivos. Para aumentar el proceso de descomposición, se usa la aireación y volteo contante adicionando nutrientes, minerales y agua según sea sus necesidades, manteniendo un equilibrio constante en donde el suelo cumple el papel de biorreactor (FCSAP, 2013).

Figura 3

Principios básicos de biorremediación.



Fuente: Tomado y adaptado de (Vidali, 2001).

Análisis Químico. En este se realiza un estudio químico para evaluar el estado de los contaminantes existentes y su variación. Se mide el pH y la conductividad eléctrica utilizando elementos especializados en el proceso. Se analizan también la presencia de hidrocarburos de

petróleo totales, aromático, policíclico y policlorobifenilo, entre otros, para así tener un análisis sobre el estado del suelo contaminado (Macci et al., 2021).

Análisis microbiológico. El fin de este análisis de laboratorio es identificar las poblaciones bacterianas presentes en las muestras tomadas del sitio contaminado. El proceso requiere un recuento de las bacterias heterótrofas, teniendo como guía que un análisis de un suelo normal esta entre 10^4 a 10^7 UFC (unidades formadoras de colonias) por gramo de tierra. Para que se desarrolle el proceso de biorremediación se debe contar con un mínimo de 10^3 UFC/gramo en el conteo respectivo, si se encuentra por debajo de este nivel se puede determinar que hay sustancias toxicas en el suelo que impiden su crecimiento y densidad, en donde se tendría que implementar alternativas para mejorar este aspecto. Para los analistas la importancia de los microorganismos radica principalmente en cuantificar los organismos que contribuyen a la disminución del riesgo u contaminante más que a su variedad de especies, no obstante, solo un 0,1 y 0,01% son cultivables en el laboratorio y los que cumplen con estos parámetros no son suficientes para realizar el proceso de degradación total del hidrocarburo a lo cual se debe recurrir al proceso de bioaumentación logrando la cantidad suficiente para poder degradar el contaminante (EPA, 2017).

El proceso realizado por el laboratorio consiste en la toma de muestras de suelo contaminado mediante frascos ámbar esterilizados por un lapso de 24 horas que posteriormente son llevados al laboratorio para realizar una selección, un acondicionamiento y una nutrición a las cepas encontradas, teniendo como fuente de carbono y energía el hidrocarburo. El proceso se implementa bajo condiciones ideales para su desarrollo y así llegar al punto de aislamiento de las colonias más aptas, estableciendo la velocidad de su crecimiento y realizando un análisis del contaminante al cual están expuestos para así determinar las cepas con mayor aceptación en la

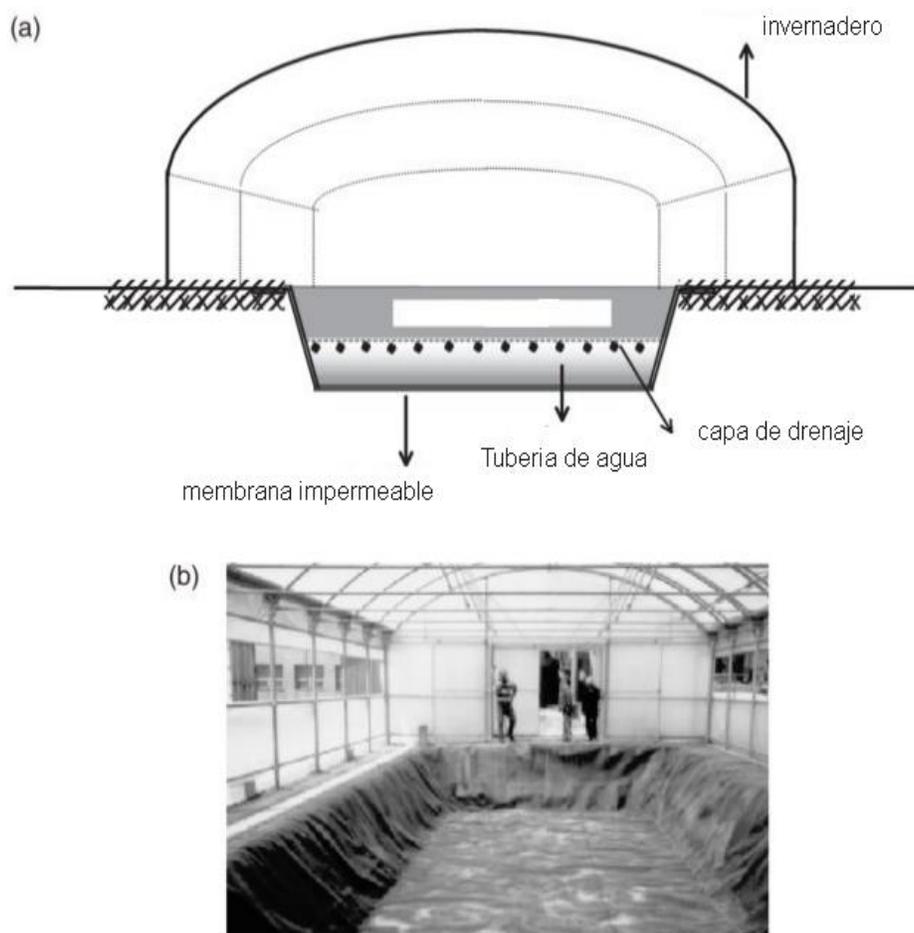
biodegradación de este y así ser implementadas en el sitio contaminado (Perez Silva, y otros, 2008).

Implementación de recolección de lixiviados para tratamiento ex situ

El proceso requiere de la implementación de geomembranas impermeables y un sumidero que se encarga de recoger todos los lixiviados para posteriormente ser tratados en un lugar diferente y así evitar la contaminación de las aguas subterráneas. El proceso de recolección se da mediante un bombeo desde el pozo hasta un tanque de almacenamiento donde el lixiviado es llevado a través de una capa de arena gruesa o grava, quedando almacenada para ser tratado de acuerdo con el contaminante (Lukic Borislava, Davis Huguenot, Hullebusch, & Esposito, 2017).

Implementación de cubiertas tipo invernadero

La implementación de estas cubiertas ayuda a minimizar la erosión, la escorrentía por lluvia, la volatilización y el polvo de algunos compuestos contaminantes, siendo aspectos inevitables debido a la remoción y volteo permanente que se aplica representando una afectación a la salud humana de manera potencial convirtiéndose en un elemento necesario para minimizar esta problemática **Figura 4**. Los controles de emisiones a la atmosfera son necesarios para el cumplimiento de la normatividad de calidad de aire, los cuales son indispensables los primeros meses de implementación del sistema para garantizar que este no sobrepase los límites de emisiones atmosféricas (EPA, 2017).

Figura 4*Cubierta tipo Invernadero*

Fuente: (Picado et al., 2001).

Nota. Instalación de tratamiento de tierras agrícolas: a) Diagrama; b) Aspecto de la instalación que muestra el invernadero y la membrana impermeable, antes de instalar el drenaje y las capas de suelo.

Seguimiento de actividades

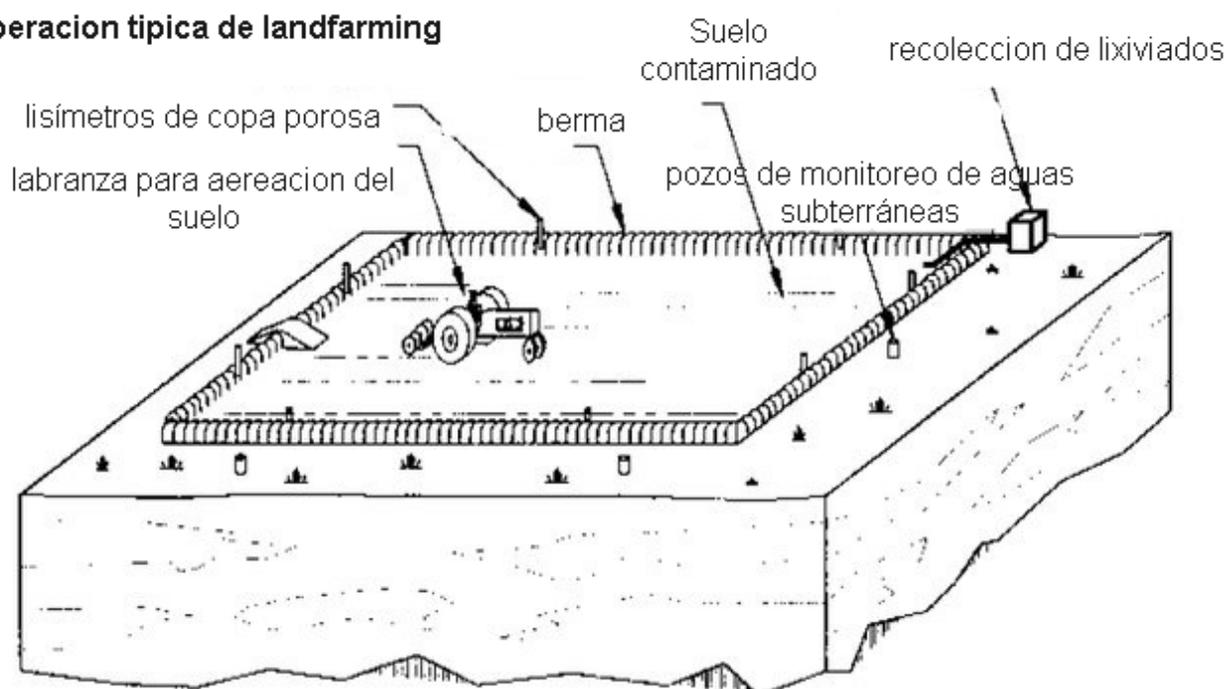
La implementación de operaciones de landfarming requiere de un control y monitoreo constante para evaluar el comportamiento de los microorganismos y las condiciones a las cuales

son expuestos contantemente. El seguimiento se realiza a los diferentes factores químicos, físicos y ambientales necesarios en el proceso, corrigiendo cualquier factor que pueda afectar el paso del tiempo, la **Figura 5** representa el plan de operación del landfarming en donde se llevará a cabo el control y seguimiento del proceso.

Figura 5

Landfarming método "Ex situ"

Operacion tipica de landfarming



Fuente: (Tecnología de Remediación Federal Mesa resonada [FRTR], 2000).

Ventajas y desventajas

En el desarrollo de la tecnología del landfarming se puede determinar aspectos negativos y positivos en su proceso, los cuales son determinados en la **Tabla 9**.

Tabla 9*Ventajas y desventajas del uso de la tecnología landfarming.*

ASPECTOS GENERALES	
Ventajas	<p>Posee un sistema sencillo de diseño e implementación.^a</p> <p>En condiciones óptimas esta tecnología tiene duraciones cortas con promedios entre 6 y 24 meses.^a</p> <p>Cumple con requisitos para competir con otros métodos de biorremediación.^b</p> <p>Alta efectividad en suelos contaminados por hidrocarburos con niveles de degradación bajas.^b</p> <p>Cumple con los requerimientos legales y gubernamentales de regulación.^b</p> <p>Compatibilidad de implementación con los factores climáticas. Geográficas entre otros.^b</p> <p>Utilización de equipos sencillos.^b</p> <p>Competitividad en términos de costes y rendimiento.^c</p> <p>Técnica probada que hay demostrado alta fiabilidad y resultados extremadamente efectivos.^c</p> <p>Mejora de cualidades físicas de los suelos.^c</p> <p>Puede ser aplicado a muchos contaminantes.^c</p> <p>Técnica que permite mayor control en tratamientos biológicos in situ.^c</p>
Desventajas	<p>Aun no cumple una biorremediación superior al 95% y por debajo de 0.1 ppm..^a</p> <p>Mínimo éxito con concentraciones de contaminantes mayores a 50000 ppm.^b</p> <p>Si el proceso se realiza “ex situ” se requiere el uso de una alta extensión de terreno para la disposición del suelo contaminado para el proceso de arado.^b</p> <p>Requiere el uso de una geomembrana de polietileno como barrera de contención de los lixiviados producidos en el proceso.^b</p> <p>Genera polvo y vapor durante la aireación y puede llegar a causar problemas de calidad de aire.^a</p> <p>Requiere excavación del suelo.^c</p> <p>Requiere que el porcentaje de humedad, la relación C/N/P/K, la temperatura y aireación se mantengan de manera óptima lo que involucra una revisión constante para mantener estas condiciones.^c</p> <p>Las bajas temperaturas reducen considerablemente la eficiencia del proceso.^c</p> <p>El suelo excavado debe ser examinado exhaustivamente siendo considerados como residuos.^c</p> <p>Es preferible el uso del landfarming clásico sin cobertura en casos en los que los contaminantes sean fáciles de degradar y de baja volatilidad.^c</p>

Nota. Tomado y adaptado de (Pavel & Gavrilescu, 2008).^a, (EPA, 2017).^b, (Colombano et al., 2010).^c

Conclusiones

Los derrames de hidrocarburos generan en el suelo una obstrucción del ciclo de vida natural. Generando así un ambiente hostil que impide que los diferentes ecosistemas que conviven y que trabajan en sinergia en el suelo puedan desarrollar sus actividades. Las alteraciones de las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo debido a la contaminación por hidrocarburos generan que este pierda calidad e importancia para procesos naturales y socioeconómicos. Por tal motivo la implementación del *landfarming* como método de biorremediación hace que los suelos puedan recuperar sus características esenciales para que el ciclo natural de vida se dé de manera normal nuevamente.

El *landfarming* es un proceso de biorremediación que necesita cumplir con criterios esenciales y una serie de factores que son evaluados para determinar su conveniencia, como lo son: los tipos de contaminantes, la concentración del hidrocarburo, el volumen del suelo contaminado, el área del sitio, la topografía, la geología del lugar, la hidrogeología, la meteorología, la distancia a los receptores, el tiempo que puede tomar el proceso y finalmente el costo que dependerá de todas las condiciones anteriores. Un solo factor primordial puede llegar a ser el causante de que el proceso sea inadecuado para un sitio determinado.

Las condiciones que se requieren en el desarrollo del *landfarming* están dadas por parámetros como la densidad de la población microbiana (10^3 UFC/g como mínimo), un pH (6-8), un contenido de humedad (40-85%), nutrientes (100:10:1 – 100:1:0.1 de C-NP) y un

tipo de suelo que permita un control equilibrado de permeabilidad con el fin de poder garantizar los niveles de humedad y de presencia de oxígeno óptimos que permitan el desarrollo eficiente del proceso de biorremediación.

El *landfarming* se puede implementar de manera *in situ* y *ex situ*. La primera es adecuada para un suelo contaminado poco profundo, su éxito depende de las características del suelo y de las condiciones climáticas del lugar, con la desventaja de que es un proceso largo con baja efectividad en suelos impermeables. Por otro lado, la segunda, requiere un corto tiempo gracias a que es un proceso controlado y acondicionado según las necesidades de los microorganismos encargados de la biodegradación del contaminante, como desventaja requiere gastos de excavación, de transporte del suelo, inversión en equipos, en estructuras físicas, en mano de obra, entre otros.

Para mejorar las condiciones en el proceso de biorremediación *landfarming*, se aplican técnicas como la bioaumentación y la bioestimulación que ayudan a mantener el control de aspectos como: los contaminantes recalcitrantes, las poblaciones microbianas presentes, la toxicidad de los contaminantes, la volatilización, los lixiviados, los tratamientos a largo plazo y las reacciones bioquímicas que no son fácilmente controlables. La aplicación de estas técnicas de ayuda permite reducir el tiempo del proceso y aumentan la velocidad con que los microorganismos degradan los contaminantes.

Para que el desarrollo del *landfarming* sea exitoso, se deben llevar a cabo etapas de trabajo que permitan el análisis interpretativo en cada una de ellas. La investigación, la caracterización del contaminante, la determinación de las medidas biocorrectivas pertinentes, la evaluación de efectividad y la evaluación de control y seguimiento son las que, al cumplirse durante el desarrollo de implementación del *landfarming*, lograrán el éxito esperado al final del proceso.

El *landfarming* es una alternativa tecnológica que brinda múltiples beneficios a nivel económico, social y ambiental. Su eficiencia radica en acelerar el proceso natural de biorremediación por medio de implementación de procesos sencillos y con pocos materiales.

El *landfarming* utiliza microorganismos capaces de biodegradar el hidrocarburo presente en el suelo con bajas repercusiones significativas al ambiente, pues en este se toman medidas preventivas como la implementación de cubiertas tipo invernadero y el método de almacenamiento de lixiviados. Comparado con otras técnicas, requiere menos recursos para su implementación y seguimiento.

Bibliografía

- Alvarez, H. M. (1 de 04 de 2015). Biorremediación de ambientes contaminados con hidrocarburos: un proceso complejo que involucra múltiples variables. *Química viva*, 14(1), 18-25. Recuperado el 13 de 05 de 2021, de <https://www.redalyc.org/pdf/863/86340672004.pdf>
- Arboleda Jacome, V. G., & Bravo Basantes, V. M. (2008). *biorremediación del suelo contaminado con hidrocarburos de la central hidroeléctrica del campamento Secoya mediante landfarming*. Tesis de grado no publicada, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Riobamba Ecuador. Recuperado el 05 de 21, de <http://dspace.esoch.edu.ec/bitstream/123456789/222/1/236T0006.pdf>
- Benavides Lopez de Mesa , J., Quintero , G., Guevara Vizcaino, L. A., Jaimes Caseres, D. C., Gutiérrez Riaño, S. M., & Garcia, J. M. (2006). Bioremediación de suelos contaminados con hidrocarburos derivados del petróleo. *Nova*, 4(5).
- Bravo Basantes, V. M., & Arboleda Jacome, V. G. (2008). *biorremediación de suelo contaminado con hidrocarburos de la central hidroeléctrica del campamento Secoya mediante landfarming*. Riobamba, Ecuador.
- Buddolla, V. (2007). *Environmental Biotechnology: Basic Concepts and Applications*. Alpha Science International Limited.
- Cloete, T. E., & Maila, M. (2004). Bioremediation of Petroleum Hydrocarbons through Land Farming: Are Simplicity and Cost-Effectiveness the Only Advantages? *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*. doi:10.1007 / s11157-004-6653-z

- Daugulis, M. C. (2013). Ex Situ Bioremediation of Contaminated Soils An Overview of Conventional and Innovative Technologies. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 2107-2139. doi: 10.1080 / 10643389.2012.672056
- Ecopetrol S. A. (2014). *El petroleo y su mundo*. Obtenido de file:///D:/Downloads/el-petroleo-y-su-mundo-comprimido.pdf
- Ecopetrol S.A. (2005). Los Derrames de Petroleo en Ecosistemas Tropicales - Impactos, Consecuencias y Prevencion. La Experiencia de Colombia. 6. Santander, Colombia. Obtenido de https://watermark.silverchair.com/2169-3358-2005-1-571.pdf?token=AQECAHi208BE49Ooan9kkhW_Ercy7Dm3ZL_9Cf3qfKAc485ysgAAAsswggLHBgkqhkiG9w0BBwagggK4MIICtAIBADCCAq0GCSqGSIB3DQEHATAeBgIghkgBZQMEAS4wEQQMH8f-fHkhc4npgUIAgEQgIICfIPWLEPUziqBQSSW68Vj-hOfkZ53fNhlBy
- EPA. (2014). *Best Practice Note: Landfarming*. Environment Protection Authority. Obtenido de <https://www.epa.nsw.gov.au/-/media/epa/corporate-site/resources/clm/140323landfarmbpn.pdf>
- EPA. (Octubre de 2017). *Agencia de Proteccion Ambiental de los Estados Unidos*. Obtenido de
Cómo evaluar tecnologías de limpieza alternativas para sitios de tanques de almacenamiento subterráneos: una guía para los revisores del plan de acción correctiva: https://www.epa.gov/sites/production/files/2014-03/documents/tum_ch5.pdf
- FAO. (05 de 2021). *Organizacion de las Naciones Unidas de la Alimentacion y la Agricultura*. Obtenido de <http://www.fao.org/soils-portal/about/definiciones/es/>

FRTR. (2000). *Tratamiento Biológico In situ (imagen)*, 4.0. Obtenido de Matriz de selección de tecnologías de remediación y guía de referencia:

www.frtr.gov/matrix2/section4/4_1.html.2004/04/07

Fundacion de Chile. (2021). *Manual de tecnologias de remediacion de sitios contaminados*.

Obtenido de https://fch.cl/wp-content/uploads/2019/10/manual-de-tecnologias-de-remediacion-de-sitios-contaminados_baja-1.pdf

Garbisu, C., Amézaga, I., & Alkorta, I. (2002). Biorremediacion y Ecología. *Ecosistemas Revista científica y tecnica de ecologia y medio ambiente*. Obtenido de

<http://www.aeet.org/ecosistemas/023/opinion1.htm>

Garzon , J. M., Rodriguez Miranda, J. P., & Hernandez Gomez, C. (11 de Agosto de 2017).

Aporte de la biorremediacion para solucionar problemas de contaminacion y su relacion con el desarrollo sostenible. *Scielo*, 313. Obtenido de

<http://www.scielo.org.co/pdf/reus/v19n2/0124-7107-reus-19-02-00309.pdf>

Goswami M, C. P. (28 de 11 de 2018). Bioaumentación y bioestimulación. *una estrategia*

potencial para la remediación ambiental. *J Microbiol Exp*, 6(5), 223-231. doi:10.15406 / jmen.2018.06.00219

Izquierdo Romero, A. R. (2013). *Biodegradacion de HAPs durante la biorremediacion aeróbica de suelos contaminados con hidrocarburos del petróleo. Analisis de poblaciones*

bacterianas y genes funcionales. Tesis doctoral, Universitat de Barcelona, Barcelona.

Obtenido de http://diposit.ub.edu/dspace/bitstream/2445/53361/1/ARIR_TESIS.pdf

- Juarez Sanz, M., Sánchez Andreu, J., & Sánchez Sánchez, A. (2006). *Química del suelo y medio ambiente*. Digitalia.
- Kamt Quezada, M. L. (29 de 11 de 2020). *Efecto del clorpirifos en la micro y macro fauna del suelo*. Obtenido de <https://repositorio.cientifica.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12805/1434/TB-Kamt%20M.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- King, R. B., Sheldon, J. K., & Long, G. M. (1992). *Practical environmental bioremediation*. Boca Raton, Florida: Lewis Publishers.
- Lavelle, P. (06 de 11 de 2019). Servicios ecosistémicos y fauna del suelo. *Ciren catalogo de Recursos Naturales*, 9. Obtenido de <http://bibliotecadigital.ciren.cl/handle/123456789/29048>
- Lopez, E., Montes, E., Garavito, A., & Collazos, M. M. (2010). *La economía petrolera en Colombia (parte 1)*.
- Lukic Borislava, A. P., Davis Huguenot, M. F., Hullebusch, E. D., & Esposito, G. (2017). A review on the efficiency of landfarming integrated with composting as a soil remediation treatment. *Environmental Technology Reviews*, 94-116.
doi:10.1080/21622515.2017.1310310
- Macci, C. P. (2021). Landfarming as a sustainable management strategy for fresh and phytoremediated sediment. *Environmental Science and Pollution Research* .
doi:<https://doi.org/10.1007/s11356-021-13134-y>

- Marconi, J. (2012). *El suelo*. El cid editor. Obtenido de <https://elibro-net.bibliotecavirtual.unad.edu.co/es/ereader/unad/97983>
- Ministerio de Ambiente. (2021). *Ministerio de Ambiente y Desarrollo*. Obtenido de Normatividad Ambiental: <http://buscadorjuridico.minambiente.gov.co/search/by-word>
- Ministerio de Interior. (1999). *DECRETO 321 DE 1999*. Bogota DC. Obtenido de https://www.minambiente.gov.co/images/normativa/app/decretos/25-dec_0321_1999.pdf
- Ministerio de Minas y Energía. (2021 de 07 de 2021). *Colombia*. Obtenido de Iniciativa para la Transparencia de las industrias Extractivas: <https://www.eiticolombia.gov.co/es/informes-eiti/informe-2077/perfiles-hidrocarburos/perfiles-crudo/>
- Ministerio de Transporte. (2002, 31 de Julio). *DECRETO 1609 DE 2002*. Presidencia de la Republica de Colombia. Obtenido de https://www.minambiente.gov.co/images/BosquesBiodiversidadyServiciosEcosistemicos/pdf/Normativa/Decretos/dec_1609_310702.pdf
- Mogollon Véliz, R. A. (2018). *APLICACIÓN DE SISTEMAS DE BIOREMEDIACION DE SUELOS Y AGUAS CONTAMINADAS POR HIDROCARBUROS*. Bio toxico.
- Moreno, C. M., Gonzales Becerra, A., & Blanco Santos, M. J. (2004). Tratamientos biológicos de suelos contaminados: contaminacion por hidrocarburos. Aplicaciones de hongos en tratamiento de biorrecuperacion. *Revista Iberoamericana de micologia*, 103-120. Recuperado el 05 de 2021, de <http://www.reviberoammicol.com/2004-21/103120.pdf>

- Navarrete Segueda, Armando; Vela Correa, Gilberto; Blanco Lopez, Jorge; Rodriguez Gamiño, Maria de lourdes. (2011). Naturaleza y utilidad de los indicadores de calidad del suelo. *ContactoS* 80, 29-37. Obtenido de <http://www2.izt.uam.mx/newpage/contactos/anterior/n80ne/suelo.pdf>
- Olivo, E. F. (2005). *Introduccion a la ciencia del suelo* (2da ed.). segunda edicion. Obtenido de <https://books.google.com.co/books?id=k4FXuHW1ozQC&lpg=PP1&dq=el%20suelo%20es&pg=PA17#v=onepage&q&f=true>
- Ortinez Brito, O., Ize Lema, I., & Gavilan Garcia, A. (2003). La restauración de suelos contaminados con hidrocarburos en México. *Gaceta Ecológica [en línea]*, 83-92. Recuperado el 01 de 07 de 2021, de <https://www.redalyc.org/pdf/539/53908301.pdf>
- Pavel, L. V., & Gavrilesu, M. (12 de 2008). OVERVIEW OF EX SITU DECONTAMINATION TECHNIQUES. *Environmental Engineering and Management Journal*, 7(6), 815-834. Obtenido de <http://omicron.ch.tuiasi.ro/EEMJ/>
- Perez Silva, R. M., Camacho Pozo, M. I., Gomez Montes de Oca, J. M., Ábalos Rodríguez, A., Viñas, M., & Cantero Moreno, D. (2008). Aislamiento y selección de una cepa bacteriana degradadora de hidrocarburos a partir de suelos contaminados con petroleo. *Revista CENIC Ciencias Biológicas*, 44-46.
- Picado, A. N.-H. (2001). Cultivo de tierras en un suelo contaminado con HAP (imagen). *Journal of Environmental Science and Health*. doi:10.1081/ESE-100106243
- Plan de Acción Federal para Sitios Contaminados (FCSAP). (marzo de 2013). *Directrices federales para la agricultura en tierraSuelos contaminados con hidrocarburos de*

petróleo. Obtenido de https://www.canada.ca/content/dam/eccc/migration/fcs-scf/B15E990A-C0A8-4780-9124-07650F3A68EA/Landfarming_en.pdf

Riojas Gonzales, H. h., Torres Bustillos, L. G., Mondaca Fernandez, I., Balderas Cortes, J. J., & Gortáres Moroyoqui, P. (2 de Diciembre de 2010). Efectos de los surfactantes en la biorremediación de suelos. *Revista Química Viva*. Obtenido de <https://www.redalyc.org/pdf/863/86315692003.pdf>

S. Colombano, A. S. (2010). *¿Qué técnicas para qué tratamientos - Análisis de costo-beneficio*. BRGM-RP-58609-FR. Obtenido de <file:///D:/Downloads/aaaaaaaaaa/RP-58609-FR.pdf>

Samer Semrany, L. F. (2012). Bioaugmentation: Possible solution in the treatment of Bio-Refractory Organic Compounds (Bio-ROCs). *Biochemical Engineering Journal*, 75-86. doi:doi.org/10.1016/j.bej.2012.08.017

Schlegel, F. M. (1996). *Ecología y enseñanza rural*. Roma, Italia. Obtenido de <http://www.fao.org/3/ap440s/ap440s.pdf>

Shroeder, A., H. R., y Dominguez Rodriguez, I. V., & y Garcia Hernández, L. (1999). Potencial de la biorremediación de suelo y agua impactados por petróleo en el trópico mexicano. *Terra Latinoamericana*, 159-174. Recuperado el 2021 de 05 de 12

Sposito, G. (2021). Suelo. *Enciclopedia Británica*. Recuperado el 29 de 07 de 2021, de <https://www.britannica.com/science/soil>

Trujillo Toro, M. A., & Ramirez Quirama, J. F. (2012). Biorremediación en suelos contaminados con hidrocarburos en Colombia. *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*, 37-48. doi:<https://doi-org.bibliotecavirtual.unad.edu.co/10.22490/21456453,952>

UNGED . (2018). *Atlas de Riesgo de Colombia: revelando los desastres latentes*. Obtenido de
Unidad Nacional para la Gestion del Riesgo de Desastres-Colombia:

https://www.preventionweb.net/files/62193_atlasriesgo1.pdf

USDA. (2014). *Claves para la taxonomia de suelos*. Obtenido de

https://www.nrcs.usda.gov/Internet/FSE_DOCUMENTS/nrcs142p2_051546.pdf

Vidali, M. (2001). Bioremediacion An o. *Pure and Applied Chemistry*, 73(7), 1163-1172.

doi:<https://doi.org/10.1351/pac200173071163>

Wauquier, J. P. (2007). *El refinio del petroleo: petroleo crudo, productos petroliferos, esquemas
de fabricacion*. Ediciones Diaz de santos. Obtenido de <https://elibro->

[net.bibliotecavirtual.unad.edu.co/es/ereader/unad/53067](https://elibro-net.bibliotecavirtual.unad.edu.co/es/ereader/unad/53067)

Zerbino, S., & Altier, N. (23 de 08 de 2006). *Instituto Nacional de Innovación Agraria*.

Obtenido de INIA: http://www.inia.org.uy/publicaciones/documentos/ara/ara_186.pdf