

EVALUACIÓN DE ESTRATEGIAS SOSTENIBLES PARA LA REMEDIACIÓN DE  
SUELOS CONTAMINADOS CON HIDROCARBURO PESADO

CAMILA ANDREA TORRES LÓPEZ

Proyecto integral de grado para optar el título de  
MAESTRÍA EN GESTIÓN AMBIENTAL PARA LA COMPETITIVIDAD

DIRECTOR

ANGIE TATIANA ORTEGA RAMÍREZ

MSC. GESTIÓN AMBIENTAL PARA LA COMPETITIVIDAD

CODIRECTOR

OSCAR SILVA MARRUFO

MSC. MANEJO AMBIENTAL

FUNDACIÓN UNIVERSIDA DE AMÉRICA

FACULTAD DE INGENIERÍAS

MAESTRÍA EN GESTIÓN AMBIENTAL PARA LA COMPETITIVIDAD

BOGOTÁ D.C

2022

## NOTA DE ACEPTACIÓN

---

---

---

---

---

---

---

Nombre del director

Firma del director

---

Nombre

Firma del presidente jurado

---

Nombre

Firma de jurado

---

Nombre

Firma de jurado

Bogotá, DC. Agosto de 2022

## **DIRECTIVAS DE LA UNIVERSIDAD**

Presidente de la universidad y rector del claustro

Dr. Mario Posada García Peña

Consejero Institucional

Dr. Luis Jaime Posada García Peña

Vicerrectora Académica y de investigaciones

Dra. Alexandra Mejía Guzmán

Vicerrector Administrativo y Financiero

Dr. Ricardo Alfonso Peñaranda Castro

Secretario General

Dr. José Luis Macías Rodríguez

Decano Facultad de ingenierías

Dra. Naliny Patricia Guerra Prieto

Directora programa

Ing. Nubia Liliana becerra Ospina

Las directivas de la Universidad de América, los jurados calificadores y el cuerpo docente no son responsables por los criterios e ideas expuestas en el presente documento. Estos corresponden únicamente a los autores.

## **DEDICATORIA**

Quiero dedicar este logro primeramente a Dios, ya que sin Él no sería posible el cumplimiento de mis sueños, también por acompañarme en este camino y permitirme tener tanto la paciencia como los recursos requeridos para estudiar y en algún momento poder obtener mi título de Magister.

Así mismo dedico este logro a mis padres Camilo Torres y Mónica López por apoyarme en mis estudios, no solo económicamente sino moral y personalmente, al no permitir que me rindiera de buscar mis sueños y animarme a seguir adelante cuando no creía poder.

## **AGRADECIMIENTOS**

Agradezco a mi directora y subdirector de tesis por impartir de manera asertiva sus conocimientos y tener paciencia para enseñarme a lo largo de este trabajo de grado, por la confianza que depositaron en mí y por el acompañamiento que me brindaron.

A mis profesores de la maestría por compartir sus conocimientos y llevarme cada día a un límite donde podía ser mejor estudiante y persona.

A mi familia por el apoyo que me brindaron y los ánimos que me dieron para obtener mi título.

## TABLA DE CONTENIDO

	<b>Pág</b>
INTRODUCCIÓN	15
1. OBJETIVOS	17
1.1 Objetivo general	17
1.2 Objetivos específicos	17
2. MARCO TEÓRICO	18
2.1 Generalidades del Suelo	18
2.1.1 <i>Características físicas del suelo</i>	19
2.1.2 <i>Características químicas del suelo</i>	20
2.1.3 <i>Características biológicas del suelo</i>	21
2.2 Calidad y Fertilidad del Suelo	22
2.3 Derrames Petroleros en Colombia	23
2.4 Química de los Hidrocarburos	25
2.5 Impactos del Hidrocarburo en el Suelo	27
2.6 Impacto del Hidrocarburo en los Ecosistemas	28
2.7 Técnicas de remediación para suelos contaminados	29
2.7.1 <i>Técnicas de contención</i>	30
2.7.2 <i>Técnicas de confinamiento</i>	30
2.7.3 <i>Técnicas de descontaminación</i>	30
2.7.4 <i>Técnicas físico-químicas</i>	32
2.7.5 <i>Técnicas Térmicas</i>	33
2.7.6 <i>Tratamientos mixtos</i>	34
2.7.7 <i>Técnicas biológicas</i>	35
2.8 Normatividad	40
2.8.1 <i>Protocolo de Lousiana 29B</i>	41
3. METODOLOGÍA	44
3.1 Primera Fase. Preparación de la muestra sintética de suelo contaminado con hidrocarburo	45
3.1.1 <i>Caracterización de suelos</i>	46

3.2	Segunda fase. Matriz de selección	51
3.3	Tercera fase. Técnica de biorremediación	58
3.3.1	<i>Biolabranza- Biocarbón</i>	58
3.3.2	<i>Fitorremediación</i>	63
3.4	Cuarta Fase. Estimación financiera	74
3.4.1	Costos operacionales	75
4.	DISCUSIÓN Y RESULTADOS	78
4.1	Análisis de matriz de selección	78
4.2	Análisis de caracterización del suelo y metodologías a escala laboratorio	78
4.2.1	<i>pH</i>	82
4.2.2	<i>Conductividad eléctrica</i>	83
4.2.3	<i>Zinc</i>	84
4.2.4	<i>Manganeso</i>	85
4.2.5	<i>Hierro</i>	85
4.2.6	<i>Molibdeno</i>	86
4.2.7	<i>Nitrógeno</i>	86
4.2.8	<i>Fósforo</i>	86
4.2.9	<i>Potasio</i>	87
4.2.10	<i>Porcentaje de remediación</i>	87
4.3	Análisis financiero	88
5.	CONCLUSIONES	93
	BIBLIOGRAFÍA	100
	ANEXOS	111





## LISTA DE FIGURAS

	<b>pág</b>
<b>Figura 1.</b> Barriles derramados por atentados en la infraestructura petrolera de Ecopetrol	24
<b>Figura 2.</b> Barriles derramados por incidentes y operación en Ecopetrol	25
<b>Figura 3.</b> Estructura del metano	26
<b>Figura 4.</b> Fases metodológicas del proyecto	44
<b>Figura 5.</b> Preparación de muestra sintética de suelo contaminado con hidrocarburo pesado	46
<b>Figura 6.</b> Diagrama de flujo medición de pH	48
<b>Figura 7.</b> Diagrama de flujo de medición de conductividad eléctrica	50
<b>Figura 8.</b> Obtención de biocarbón por pirolisis	60
<b>Figura 9.</b> Peso adecuado de biocarbón	61
<b>Figura 10.</b> Medición de pH	61
<b>Figura 11.</b> Medición de conductividad eléctrica	62
<b>Figura 12.</b> Proceso de remediación con biocarbón	63
<b>Figura 13.</b> Siembra de semilla de Calabacita Mayera a una profundidad de 2 cm	66
<b>Figura 14.</b> Contaminación con hidrocarburo pesado en contenedores de 5 L	67
<b>Figura 15.</b> Procedimiento experimental de fitorremediación	68
<b>Figura 16.</b> Mediciones de suelo húmedo	69
<b>Figura 17.</b> Análisis de las propiedades del suelo	69
<b>Figura 18.</b> Proceso obtención de cenizas	71
<b>Figura 19.</b> Determinación de cenizas	71
<b>Figura 20.</b> Preparación de solución (1) para medir metales en suelo	72
<b>Figura 21.</b> Elaboración de solución madre	73
<b>Figura 22.</b> Determinación de metales	74

## LISTA DE TABLAS

	Pág
<b>Tabla 1.</b> Parámetros de calidad del suelo	22
<b>Tabla 2.</b> Clasificación de crudo por número API y densidades	27
<b>Tabla 3.</b> Tratamientos de remediación para suelos contaminados con hidrocarburo pesado	30
<b>Tabla 4.</b> Costos, beneficios y limitantes de las técnicas de remediación de suelos	37
<b>Tabla 5.</b> Ventajas y desventajas de los métodos de remediación de suelos	38
<b>Tabla 6.</b> Normatividad aplicable en Colombia para la protección y uso de suelo	40
<b>Tabla 7.</b> Nivel de regulación de sustancia contaminante	42
<b>Tabla 8.</b> Evaluación de las técnicas de remediación de suelos contaminados con hidrocarburo pesado	52
<b>Tabla 9.</b> Evaluación matricial de los métodos de biorremediación de suelos contaminados con hidrocarburo pesado	55
<b>Tabla 10.</b> Adición de biocarbón cada 20 días	62
<b>Tabla 11.</b> Mecanismos en que las plantas actúan con los contaminantes	65
<b>Tabla 12.</b> Costos operacionales de la técnica de biocarbón a nivel laboratorio	75
<b>Tabla 13.</b> Costos operacionales de la técnica de fitorremediación	76
<b>Tabla 14.</b> Valores de minerales y metales en suelo optimo	79
<b>Tabla 15.</b> Resultados de análisis fisicoquímico con biocarbón y fitorremediación aplicada en el suelo contaminado	79
<b>Tabla 16.</b> Análisis precio de equipos y materias de gastos operativos	89
<b>Tabla 17.</b> Comparación en costos de alternativas seleccionadas	90

## LISTA DE ABREVIATURAS

°C =	Grados Celsius
O <sub>2</sub> =	Oxígeno
g =	Gramos
ml =	Mililitro
L =	Litro
mg ha <sup>-1</sup> =	Biomasa
Kg =	kilogramo
pH =	Potencial hidrógeno
API =	American Petroleum Institute
PET =	Tereftalato de polietileno
ppm =	Parte por millón
µS/cm =	micro Siemens
COV =	compuestos orgánicos volátiles
EPA =	Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos
C.E =	Conductividad eléctrica

## RESUMEN

Uno de los problemas ambientales que ha causado gran impacto es la contaminación del suelo por derrames de hidrocarburo, que pueden ocurrir por actividades como explotación, producción, transporte o voladuras en oleoductos. Existen diferentes métodos de tratamiento que buscan recuperar los suelos contaminados, por lo cual en el presente trabajo de grado se llevó a cabo una investigación descriptiva de los métodos de remediación de suelos contaminados por incidentes que se presentan en la industria petrolera.

Por medio de una valoración de expertos se logró identificar algunas estrategias sostenibles, según los criterios de evaluación, posteriormente se realizó un piloto a escala laboratorio de dos estrategias seleccionadas. Las tecnologías mencionadas fueron: remediación por biocarbón, la cual se obtuvo por medio de lignito mineral en un proceso de pirólisis, y la segunda fue fitorremediación, que se desarrolló con un miembro de la especie *Curcubita pepo* o calabacita mayera. Mediante la preparación de una muestra sintética de suelo se caracterizaron las propiedades físicas y químicas, las pruebas que se realizaron fueron pH, conductividad eléctrica, cantidad de hidrocarburos totales de petróleo y contenido de metales; posteriormente se hizo una estimación financiera de las tecnologías teniendo en cuenta los equipos y materiales utilizados.

Para la realización del proyecto se trabajó en conjunto con la Universidad Tecnológica de Rodeo (México), mientras que la tecnología de biocarbón se desarrolló en su totalidad en las instalaciones de la Universidad de América (Colombia).

Como resultado se logró una remoción de 47.86% de hidrocarburos totales de petróleo en 900 g de tierra para la técnica de biocarbón, con un costo total de COP \$8.091.013, en comparación con la técnica de fitorremediación donde se alcanzó un porcentaje de remoción de hidrocarburos totales de 29.81%, con un costo de COP \$6.076.397 para remediar 1.5 kg de tierra. Los dos tipos de técnicas empleadas lograron demostrar una

mejora en el proceso de degradación del hidrocarburo en el suelo, sin embargo la técnica de biocarbón fue más eficiente, dado que logró remover un 37% del contaminante por encima de la técnica de fitorremediación.

**Palabras clave:** Contaminación, fitorremediación, biocarbón, metales pesados, hidrocarburos totales de petróleo.

## INTRODUCCIÓN

La explotación de hidrocarburos puede provocar un vertido voluntario o involuntario de estas sustancias en el agua, suelo y aire. Se considera una problemática debido a que esta explotación y consecuentes derrames pueden afectar la salud de la flora, fauna y seres humanos, así mismo al no tratar estos derrames en el suelo pueden llegar a acuíferos hídricos o aguas subterráneas de las cuales se abastece la comunidad, pueden acumularse en la cadena trófica y presentar toxicidad por inhalación, contacto o ingestión, los hidrocarburos de alto peso molecular presentan potencial cancerígeno y mutagénico (Peluffo, 2016, p. 19).

Un derrame de hidrocarburo lleva cambios progresivos en las propiedades del suelo que pueden continuar indefinidamente. El crudo tiene comportamientos diferentes cuando entra en contacto con el medio ambiente, esta contaminación impide que el suelo sea utilizado para actividades de agricultura y urbanización (Wayens, 2004, p. 11). La necesidad de remediar los suelos genera el desarrollo de nuevas tecnologías que destruyan o eliminen los contaminantes. Dentro de la gama de técnicas se encuentra la biorremediación, la cual actúa mediante intervenciones de la diversidad biológica para mitigar los efectos nocivos del contaminante en el medio ambiente (Garzón, Rodríguez, & Hernández, 2017, p. 312).

Colombia un país en el cual se sufren graves derrames de hidrocarburo, siendo derramado más de un millón de barriles de crudo en los últimos 15 años, necesita encontrar una solución económica y amigable con el medio ambiente en la cual los suelos puedan ser reutilizados para agricultura, debido a que esta es una de las principales actividades económicas en el país (Pardo, 2018, p. 1).

Debido a la problemática ambiental, económica y social que generan los derrames de hidrocarburo en el suelo, esta investigación busca encontrar una estrategia efectiva y económicamente eficaz que facilite la remediación los suelos que han sufrido contaminación por hidrocarburos, esto se lleva a cabo con la recopilación de

información que permita conocer las propiedades del suelo, de los hidrocarburos, las leyes aplicables en Colombia y las técnicas de remediación, para así, poder realizar el diseño de los tratamientos a escala laboratorio en las instalaciones de la Fundación universidad de América con acompañamiento de la universidad tecnológica del Rodeo en México.



# 1. OBJETIVOS

## 1.1 Objetivo general

Evaluar la eficiencia de estrategias sostenibles para la remediación de suelos contaminados con hidrocarburos pesados. Estudios de caso.

## 1.2 Objetivos específicos

- Caracterizar suelos contaminados por hidrocarburos pesados
- Seleccionar las técnicas más sostenibles a evaluar para la remediación de suelos contaminados
- Determinar la eficiencia de remediación para el suelo contaminado según las técnicas seleccionadas a escala laboratorio
- Estimar los costos de remediación por cada una de las técnicas evaluadas

## **2. MARCO TEÓRICO**

El presente capítulo expone aspectos generales del suelo como las propiedades físicas, químicas y biológicas, además presenta las generalidades de los hidrocarburos, los efectos negativos de los derrames de hidrocarburo en el suelo y las técnicas de remediación que se pueden aplicar para mejorar la calidad de los suelos impactados.

Al conocer las desventajas y ventajas de cada técnica, con respecto al impacto en la calidad del suelo y ecosistemas, el costo de remediación, impacto en la sociedad y porcentaje de remediación en el suelo, es posible identificar cual es la mejor metodología a implementar.

### **2.1 Generalidades del Suelo**

El suelo es definido como una mezcla de minerales y compuestos orgánicos de diferente tamaño y composición, que es influenciado por factores ambientales, organismos, clima y topografía (Abdulkadir, 2017, p. 4). Proporciona soporte físico para plantas, animales y seres humanos, además que funciona como reservorio de agua y nutrientes para la vegetación. Se considera un sistema vivo, valioso e indispensable para obtención de alimentos y la manutención de ecosistemas de los cuales depende el funcionamiento de la vida (Burbano-Orjuela, 2016, p. 118).

El suelo tiene la capacidad de mantener actividades biológicas, diversidad, productividad, regula el flujo hídrico, sirve como amortiguador, inmovilizador, desintoxicante y es de gran apoyo en estructuras socioeconómicas. En este se distinguen tres fases, la sólida que conforman los granos y partículas del suelo, la líquida conformada por el agua y diferentes materiales disueltos que se encuentran en los poros o adheridos a las partículas sólidas y la gaseosa que ocupa los poros de suelo (Albornoz, 2014, p. 11).

Es importante que su estructura sea adecuada para crecimiento de vegetación, siendo la química del suelo una de las características de mayor importancia debido a que

constituye la fertilidad del suelo, de igual manera las propiedades físicas se ven afectadas por las químicas como en el caso de suelos con alto contenido de sodio intercambiable, y puesto que el suelo alberga gran cantidad de redes microbianas las propiedades biológicas llegan a afectar propiedades tanto físicas como químicas (Delgado & Gómez, 2016, p. 16).

### **2.1.1 Características físicas del suelo**

Las propiedades físicas del suelo son de vital importancia puesto que determinan numerosos procesos en el mismo, el porcentaje relativo de separación de suelo se conoce como textura, esta propiedad describe el tamaño de las partículas que conforman la fracción sólida, es la proporción de tres partículas como arena, limo y arcilla, las cuales se distinguen por el tamaño de sus partículas que pueden ir desde 2 a 2000 micrómetros (Balasubramanian, 2017, p. 1).

La disposición de las partículas de arena, limo y arcilla se denomina estructura del suelo, esta propiedad revela el color, textura y composición química, está influenciada por la humedad, materia orgánica, microorganismos y crecimiento de raíces (Balasubramanian, 2017, p. 2).

La distribución del espacio de los poros y la textura es la que determina propiedades como la retención de agua, que se caracteriza por la relación entre el contenido de agua y potencial hídrico del suelo (Villalobos & Fereres, 2017, p. 20).

La densidad aparente es otra propiedad importante, debido a que influye en la retención del agua, la aireación e infiltración, se define como la relación entre la masa de suelo seco y unidad de volumen, esta propiedad está ligada con el espacio poroso y volumen de partículas sólidas, así mismo sirve para determinar la calidad física y determinar la porosidad promedio del suelo (Salazar *et al.*, 2020, p. 6).

Algunas de las propiedades morfológicas del suelo son el color, estructura y profundidad. El color depende de los minerales encontrados, como el calcio o la materia orgánica, el color es de blanco al negro, mientras que si la tierra tiene buen drenaje y aireación el color es de rojo a amarillo, en las condiciones contrarias de baja aireación y poco drenaje el color es gris a azul (Barois *et al.*, 2018, p. 4).

### **2.1.2 Características químicas del suelo**

Las propiedades químicas son importantes para el crecimiento de las plantas, mantenimiento de ecosistemas y estabilidad del suelo, se relacionan con la calidad, disponibilidad de agua y disponibilidad de nutrientes para los organismos vivos del entorno. Entre las propiedades químicas del suelo se resaltan el pH, la conductividad eléctrica y la cantidad de materia orgánica (Calderón-Medina *et al.*, 2018, p. 143).

Una de las características de mayor relevancia en el suelo es el pH, dado que microorganismos como plantas superiores se ven afectados por el grado de acidez o alcalinidad; un suelo ácido es común en regiones de precipitación alta y posee deficientes propiedades físicas como baja permeabilidad y estabilidad, mientras que los suelos alcalinos son propios de zonas áridas y semiáridas (Córdova, 2018, p. 2).

Otra propiedad importante para el suelo es la capacidad de intercambio catiónico, esta es la responsable en gran parte de la fertilidad del suelo, la CIC se define como el número de cargas negativas y hace referencia al número de lugares en el suelo donde pueda ocurrir un intercambio de cationes. Entre mayor sea la cantidad de sitios de intercambio, mayor será la capacidad de almacenaje de cationes lo cual es indispensable para las reservas de nutrientes que necesita la vegetación del suelo (Bueno & Fernández, 2019, p. 9).

Los suelos salinos tienen mayores niveles de toxicidad en cuanto a cloruros y sulfatos de sodio, estas cantidades elevadas de sal pueden afectar el crecimiento y desarrollo de las plantas, los procesos biológicos como la germinación de la semilla, el

crecimiento del fruto y disminución de potencial hídrico (Rodríguez, Torres, & Chaman, 2019, p. 933).

### **2.1.3 Características biológicas del suelo**

La biología del suelo es compleja y dinámica, se puede encontrar una gran red de organismos como la micro, meso y macrobiota, estos organismos influyen en las propiedades químicas y físicas del suelo al desempeñar un papel elemental en la fragmentación, transformación y translocación de material orgánico (Calderon, Bautista, & Rojas, 2018, p. 143).

Los cambios que ocurren a nivel biológico son realizados por la flora y la fauna del lugar, donde aproximadamente el 80% de los procesos son dados por la microbiota, cambios como la degradación, el aporte de materia orgánica, los ciclos biogeoquímicos de elementos, el cambio en estructura y composición del suelo (Cho Chen, 2018, p. 7). Los organismos que actúan en el suelo son capaces de modificar su composición, estructura y funcionamiento la fauna se puede clasificar en:

2.1.3.a Macrofauna. Organismos mayores a 2 milímetros de diámetro, efectúan sobre el suelo cambios físicos y se pueden detectar a simple vista (Cho Chen, 2018, p. 8).

2.1.3.b Mesofauna. Tienen diámetros entre 0.1 y 2 milímetros producen cambios físicos y químicos siendo los de mayor importancia los nematodos (Cho Chen, 2018, p. 8).

2.1.3.c Microfauna. Los microorganismos del suelo son considerados los ingenieros de ecosistemas, debido a que están involucrados en las transformaciones químicas en el suelo como humidificación y mineralización de materia orgánica. La biodegradación es un proceso mediante el cual los microorganismos transforman sustancias tóxicas en sustancias inocuas (Neina, 2019, p. 3).

## 2.2 Calidad y Fertilidad del Suelo

La calidad del suelo se relaciona con la actividad que este posee para sostener la productividad biológica, funcionalidad de los ecosistemas y el mantenimiento de un balance ambiental biofísico. Las propiedades físicas, químicas y biológicas otorgan al suelo la calidad necesaria para sostener su capacidad productiva (Yáñez Díaz et al., 2018, p. 370).

La fertilidad depende del contenido de materia orgánica y la textura, ya que entre mayor contenido de materia orgánica posea un suelo su fertilidad es mayor. Los microorganismos son los encargados de la producción de materia orgánica y de otros elementos nutritivos para las plantas. La fertilidad química se refiere a la capacidad del suelo para proveer los nutrientes para un adecuado cultivo, la fertilidad física se relaciona con la capacidad que tiene el suelo para tener las condiciones adecuadas para el crecimiento de cultivos y la fertilidad biológica se refiere a la capacidad y desempeño de los procesos biológicos vinculados con los organismos. Para determinar esta fertilidad se debe vigilar la estructura, porosidad, retención de agua, densidad, penetración, entre otras. (INIA Tacuarembó, 2015, p. 1).

En la tabla 1 se observan los valores óptimos de calidad del suelo en clima frío.

**Tabla 1.**

*Parámetros de calidad del suelo*

Propiedad	Valor	Calidad
% Carbono orgánico	5.21-6.59	Óptima
Ph	6.1-7.3	Óptimo

Tabla 1. (Continuación)

Propiedad	Valor	Calidad
Fósforo (mg/Kg)	> 40	Muy alta
Potasio (Cmol/kg)	>0.40	Muy alta
Aluminio (Cmol/Kg)	>0.80	Muy alta
Densidad aparente (g/cm <sup>3</sup> )	>1.2	Muy alto
% Porosidad	55-60	Muy alto
Textura	Franca	Ideal

**Nota.** Se indican los valores óptimos de calidad del suelo cultivable en clima frío. Tomado de Tangarife, D., & Lasprilla, D. (2016). métricas de calidad de suelos y aguas como indicadores de desarrollo sostenible en las cabeceras del corregimiento la florida (municipio de pereira) y veredas mangas - volcanes (santa rosa de cabal) en un periodo de 10 meses. Retrieved November 6, 2021, from [https://repository.unilibre.edu.co/bitstream/handle/10901/16152/métricas de calidad de suelos y aguas .pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://repository.unilibre.edu.co/bitstream/handle/10901/16152/métricas%20de%20calidad%20de%20suelos%20y%20aguas.pdf?sequence=1&isAllowed=y) (Tangarife & Lasprilla, 2016).

### 2.3 Derrames Petroleros en Colombia

Colombia, un país que cuenta con una de las mayores diversidades biológicas del planeta se ve afectado por los cientos de ataques a oleoductos que ha sufrido en los últimos años, donde se han derramado miles de barriles de crudo. En los últimos 19 años el oleoducto Caño Limon Coveñas ha recibido más de 1000 ataques, lo cual equivale aproximadamente a 3 millones de barriles de hidrocarburo crudo que han ido a parar en diversos ecosistemas. Los oleoductos Transandino, San Miguel y Mansoyá han sido saboteados cerca de 600 veces en los últimos 14 años, produciendo la pérdida de 300.000 barriles de crudo y causando que la empresa ECOPETROL S.A, la cual es la responsable de la mayor parte de infraestructura pague por atención de emergencias alrededor de 70 millones de dólares, por reparaciones en los oleoductos casi 60 millones de dólares y pérdida en crudo derramado el equivalente a 80 millones de dólares (Miranda & Restrepo, 2005, p. 573).

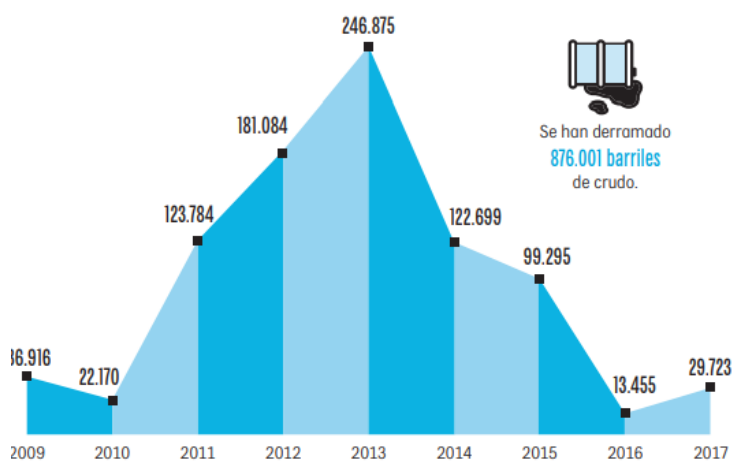
La red colombiana de oleoductos consta de 8954 kilómetros, en los cuales el flujo de crudo se puede ver interrumpido por eventos de remoción de masas, voladuras o rupturas de válvulas.

El suceso que en su mayoría afecta la industria del petróleo en Colombia es la interrupción en la cadena de suministro debido a voladuras en los oleoductos en zonas de difícil acceso. En el periodo de tiempo comprendido de 2009 a 2018 ocurrieron en total aproximadamente 984 voladuras en oleoductos (Guerrero Useda, 2018, p. 9).

En el 2018 ocurrió un derrame en Lizama, Colombia donde se derramaron 550 barriles de crudo, en 2015 un grupo al margen de la ley atentó contra un oleoducto y se derramaron más de 10.000 barriles de petróleo los cuales llegaron al océano pacífico y dejaron sin agua a los 160.000 habitantes del municipio de Tumaco en Nariño. Aunque es poco común, también en operaciones realizadas por Ecopetrol se han producido derrames, los cuales no son tan grandes en comparación con los ocurridos por atentados (Pardo, 2018, p. 1).

**Figura 1.**

*Barriles derramados por atentados en la infraestructura petrolera de Ecopetrol*

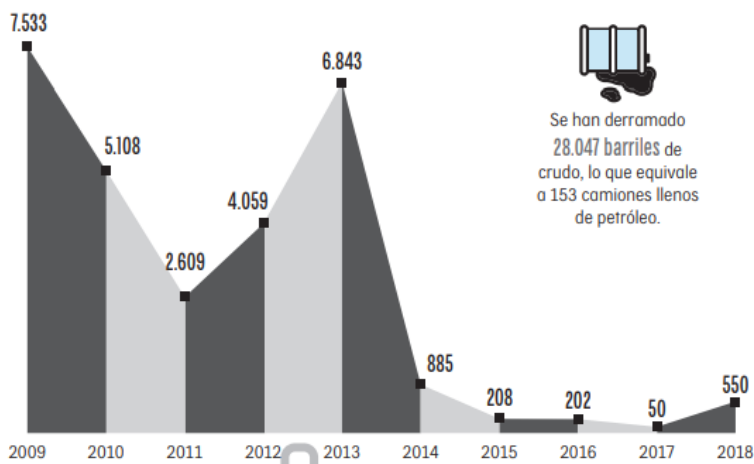


**Nota.** Los barriles derramados por atentados en los oleoductos superan los 876.000 barriles de crudo. Tomado de Pardo, L. (2018). Cifras de derrames de crudo en Colombia en los últimos años - Medio Ambiente - Vida - ELTIEMPO.COM. Retrieved October 21, 2020, from <https://www.eltiempo.com/vida/medio-ambiente/cifras-de-derrames-de-crudo-en-colombia-en-los-ultimos-anos-207664> (Pardo, 2018)



**Figura 2.**

*Barriles derramados por incidentes y operación en Ecopetrol*



**Nota.** Los barriles derramados por operaciones en la industria petrolera, específicamente en la empresa Ecopetrol han superado los 28.000 barriles de crudo. Tomado de Pardo, L. (2018). Cifras de derrames de crudo en Colombia en los últimos años - Medio Ambiente - Vida - ELTIEMPO.COM. Retrieved October 21, 2020, from <https://www.eltiempo.com/vida/medio-ambiente/cifras-de-derrames-de-crudo-en-colombia-en-los-ultimos-anos-207664> (Pardo, 2018).

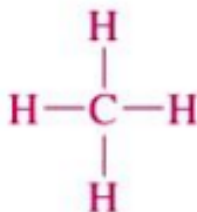
En la figura 1 se observa como en el lapso de tiempo de 2009 hasta 2017 se derramaron 876.001 barriles de crudo por voladuras en oleoductos, siendo el 2013 el año que reporto mayor pérdida con 246.875 barriles; la figura 2 muestra los barriles de crudo derramado por incidentes en transporte u operaciones en Ecopetrol en los años 2009 a 2018. En el año 2013 se reportó el derrame de 6.843 barriles de crudo, siendo el segundo año con mayor pérdida luego del 2009. Es decir que para el año 2013 se derramo un total de 253.718 barriles que en su mayoría fue por atentados en los oleoductos.

## 2.4 Química de los Hidrocarburos

Los hidrocarburos son compuestos orgánicos formados por carbono e hidrógeno, como se observa en el ejemplo de la figura 3, se considera el metano el hidrocarburo alcano más sencillo;

### Figura 3.

*Estructura del metano*



**Nota.** Representación de la estructura molecular de un alcano simple. Tomado de Elekalawy, M., & Alm Eldin, H. (2018). Organic Chemistry & Hydrocarbons Groups. Retrieved November 7, 2021, from [https://www.researchgate.net/publication/328124945\\_Organic\\_Chemistry\\_Hydrocarbons\\_Groups](https://www.researchgate.net/publication/328124945_Organic_Chemistry_Hydrocarbons_Groups) (Elekalawy & Alm Eldin, 2018).

Los hidrocarburos son compuestos orgánicos que pueden darse como una mezcla compleja de átomos de hidrogeno con átomos de carbono, por ejemplo 86% y 14% respectivamente, pero también pueden contener compuestos como azufre, nitrógeno y oxígeno. Se pueden clasificar de acuerdo a su cadena carbonada y sus enlaces (Cevallos & García, 2018, p. 5).

Los hidrocarburo totales de petróleo (TPH) pueden dividirse en dos categorías, la primera son los compuestos de la gama de gasolina que se componen en su mayoría de alcanos de cadena corta (C<sub>6</sub>-C<sub>10</sub>) y compuestos volátiles; y la segunda son los compuestos orgánicos de clase diésel que son de cadena larga (C<sub>10</sub>-C<sub>40</sub>), donde se puede encontrar compuestos hidrófobos como aromáticos policíclicos (Velásquez, 2016, p. 8).

Existen diferentes tipos de clasificación para los crudos, entre ella se encuentra la clasificación con respecto a su gravedad API (American Petroleum Institute). Los crudos con mayores grados API se consideran livianos, tienen bajo contenido de carbono, alto contenido de hidrogeno y son ricos en parafinas, mientras que los crudos pesados tienen bajo contenido de carbono e hidrogeno y son ricos en compuestos aromáticos. En la tabla 2 se observa la clasificación de los crudos con respecto a los grados API y la densidad (Cortés, 2017, p. 8).

**Tabla 2.**

*Clasificación de crudo por número API y densidades*

Tipo de Crudo	°API	Densidad (kg/m <sup>3</sup> )
Liviano	>31,1 y más	<870
Mediano	22,3-31,1	920-870
Pesado	10,0-22,3	1000-920
Extra Pesado	<10	>1000

**Nota.** Resumen de la clasificación de los diferentes crudos según su gravedad API. Tomado de Cortés, C. (2017). Técnicas para mejorar el transporte de crudos pesados por oleoductos. Retrieved July 2, 2022, from <https://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/18837/1/CD-8227.pdf> (Cortés, 2017).

Los crudos livianos tienen mayor cantidad de componentes volátiles que entran a través de las plantas afectando sus células, los hidrocarburos pesados por el contrario resultan menos tóxicos (Hernández-Valencia, Manuel Lárez, & García, 2017, p. 76). La contaminación por TPH sucede cuando la cantidad de hidrocarburo es superior a la capacidad que tienen los microorganismos autóctonos del lugar de degradarlos en sustancias inocuas, estas fracciones que no se degradan se adhieren al suelo y permanecen por un tiempo indeterminado (Cevallos & García, 2018, p. 9).

## **2.5 Impactos del Hidrocarburo en el Suelo**

El hidrocarburo genera en el suelo efectos adversos que llevan a cambios en sus propiedades físicas, químicas y biológicas. Estos cambios son atribuidos al proceso de meteorización que inicia cuando el hidrocarburo toca el suelo y puede seguir indefinidamente ya que el hidrocarburo no queda solo en la superficie, sino que se filtra hacia el interior se produce esta separación de los constituyentes del suelo y subsuelo (Riesco, 2012, p. 11).

Los minerales tóxicos que genera el hidrocarburo en el suelo conducen a un deterioro en su estructura, pérdida de materia orgánica y pérdida de nutrientes como el potasio, sodio, sulfatos, nitratos y fosfatos, por lo cual el suelo es expuesto a lixiviación y erosión. Así mismo los contaminantes hacen que el suelo pierda fertilidad, haya bajo

rendimiento en las cosechas y consecuencias perjudiciales para los humanos y los ecosistemas (Velásquez, 2016, p. 17).

Algunas de las propiedades químicas del suelo que se afectan es la disminución de pH, puesto que ocurre una gran acumulación de carbono orgánico, se generan ácidos por el aumento de los minerales tóxicos. La temperatura, humedad y oxígeno cambian debido a que el petróleo consume oxígeno y aumenta la demanda bioquímica de agua. Las propiedades físicas que se afecta son la estructura, aumento de retención de agua en la superficie, persistencia en el suelo entre otros (Ortínez *et al.*, 2003, p. 8).

## **2.6 Impacto del Hidrocarburo en los Ecosistemas**

Algunos de los efectos que el hidrocarburo puede tener en los ecosistemas es la eliminación de diferentes especies de flora y fauna, debido a que causa asfixia en las funciones fisiológicas de los animales y sofocación de las raíces en la vegetación.

La microfauna se comporta dependiendo el nivel de tolerancia que tengan hacia las sustancias derramadas, en este caso el hidrocarburo, las poblaciones resistentes pueden sobrevivir mientras que otras tienden a desaparecer, por otro lado un incremento en microorganismos que toleren el contaminante puede afectar el equilibrio de otras especies (Arenas, 2018, p. 28).

La supervivencia de la flora se vuelve nociva debido a que las partículas del suelo y el bloqueo por los hidrocarburos causan asfixia y causa el crecimiento en condiciones anaeróbicas, generando sofocación de los estomas y perturbando el intercambio de gases (Arenas, 2018, p. 66).

La fertilidad del suelo y la producción se ven afectados puesto que reduce el crecimiento de cultivos y plantas llevándolos a la muerte, al formar una barrera física que no permite que el suelo proporcione humedad y nutrientes a las plantas (Ahmed & Fakhruddin, 2018, p. 3).

La macrofauna tiene menos disponibilidad de hábitat lo cual hace que las especies migren a otros hábitats mientras algunos desaparecen y con ello la cadena trófica se ve afectada, por otro lado, los animales que han sido contaminados pueden sufrir muerte celular, desorientación, enfermedades, baja actividad y la muerte (Kuppusamy *et al.*; 2020, p. 110).

## **2.7 Técnicas de remediación para suelos contaminados**

La contaminación en los suelos se considera un problema de carácter mundial, por eso se vuelve necesario buscar una solución mediante la identificación de técnicas que permitan remediar los sitios impactados. Una técnica es el método que se implementa y la tecnología que se utilizara en la metodología, las técnicas para remediación de suelo se clasifican en *in situ* y *ex situ*, el primero actúa sobre los contaminantes en el mismo lugar donde se encuentra, mientras que el otro requiere excavación para ser tratado en otro lugar (Casallas & González, 2020, p. 23).

La implementación de técnicas *in situ* se consideran económicas, de bajo impacto ambiental, pero aún se encuentra dudas sobre los resultados que se obtienen, mientras que las técnicas *ex situ* se consideran efectivas, ya que el suelo contaminado se elimina y el suelo nuevo se incorpora, pero los costos son mayores (Coria, 2007, p. 2).

Para determinar el tipo de técnica a utilizar se realizó una investigación bibliográfica de cada una y de las características del suelo a remediar, posteriormente se realizó una matriz de expertos para determinar cuál es la tecnología más apropiada en la contingencia que se desea tratar.

La clasificación de las técnicas de remediación se puede dar de acuerdo con el principio de funcionamiento entre las cuales está:

### **2.7.1 Técnicas de contención**

Las cuales aíslan el contaminante sin actuar sobre él, se da mediante la aplicación de barreras físicas en el suelo, esta técnica reduce la migración de los contaminantes, no requiere excavación del suelo y es de bajo costo, sin embargo, requiere de inspecciones constantes (Casallas & González, 2020, p. 23).

### **2.7.2 Técnicas de confinamiento**

Reducen la movilidad de los contaminantes y así evitar que se dé una migración de los mismos, reteniéndolos en un lugar determinado. Esta técnica presenta limitaciones a la hora de tratar sustancias orgánicas y pesticidas (Roqueta, 2016, p. 4).

### **2.7.3 Técnicas de descontaminación**

Las técnicas de descontaminación consisten en disminuir la concentración de los contaminantes en el suelo (Instituto Nacional de Ecología, 2007, p. 2).

Debido a que se busca la disminución de los contaminantes en el suelo se trabajaron dos tratamientos asociados al grupo de descontaminación. A continuación, se explica en qué consiste cada una y su clasificación según el tipo de tratamiento.

#### **Tabla 3.**

*Tratamientos de remediación para suelos contaminados con hidrocarburo pesado*

Tipo de tratamiento		Tratamiento	Aplicación
Descontaminación	Físico-Químico	Extracción	In situ
		Lavado	Ex situ
		Flushing	In situ
		Electrocinética	In situ
		Adición de enmiendas	In situ
		Barreras permeables activas	In situ

Tabla 3. (Continuación)

Tipo de tratamiento		Tratamiento	Aplicación
	Biológico	Inyección de aire comprimido	In situ
		Pozos de recirculación	In situ
		Oxidación ultravioleta	Ex situ
		Biodegradación asistida	In situ
		Biotransformación de metales	In situ
		Fitorrecuperación	In situ
		Bioventing	In situ
		Landfarming	Ex situ
		Biopilas	Ex situ
		Compostaje	Ex situ
		Lodos Biológicos	Ex situ
	Térmico	Incineración	Ex situ
		Desorción térmica	Ex situ
	Mixto	Extracción multifase	In situ
Atenuación natural		In situ	
Contención		Barreras Verticales	In situ
		Barreras horizontales	In situ
		Barreras de suelo seco	In situ
		Sellado profundo	In situ
		Barreras hidráulicas	In situ
Confinamiento		Estabilización fisicoquímica	Ex situ
		Inyección de solidificantes	In situ
		Vitrificación	Ambos

**Nota.** La presente tabla resume las técnicas de remediación que existen y las subtécnicas en las que se divide. Tomado de Cortés, C. (2017). Técnicas para mejorar el transporte de crudos pesados por oleoductos. Retrieved July 2, 2022, from <https://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/18837/1/CD-8227.pdf> (Casallas & González, 2020).

En la tabla 3 se observa que en el grupo de descontaminación se trabaja cuatro subgrupos los cuales se explican a continuación para determinar cuáles técnicas son las más adecuadas para implementar en el presente trabajo.

#### **2.7.4 Técnicas físico-químicas**

En este tipo de tratamientos se utilizan las propiedades físicas o químicas de los contaminantes o del medio contaminado para destruir la contaminación, los contaminantes son estimulados mediante reacciones químicas o contacto físico lo cual facilita su eliminación (Roqueta, 2016, p. 6).

2.7.4.a Extracción. Esta técnica se aplica normalmente de manera in situ, los compuestos volátiles son removidos por vapor mediante la obtención de un gradiente de presión/concentración, a través de pozos de extracción, los gases y líquidos extraídos requieren tratamiento y disposición final (Coria, 2021, p. 2).

2.7.4.b Lavado. Tratamiento ex situ que consiste en lavar el suelo excavado con soluciones acuosas como agua, disoluciones con ácido, bases o disolventes. La infiltración de la solución se puede dar mediante zanjas, pozos o riegos. Para separar las partículas más gruesas que tienen poca capacidad de adsorción (>20mm) generalmente se utiliza tamizado. Los materiales finos se mezclan con un fluido lavador para ser aclarados mientras que los materiales que conserven alto contenido de contaminante se separan y se depositan en vertederos controlados (Yagual, 2020, p. 20).

La eficiencia depende de la adsorción del contaminante controlado por algunas propiedades del suelo como el pH, textura, capacidad de intercambio catiónico, contenido de materia orgánica y otros factores como la presencia de otras sustancias o elementos tóxicos y el tiempo de contaminación. El costo por volumen en m<sup>3</sup> está cerca de 250 euros (Carmen & Franco, 2018, p. 50).



2.7.4.c Electrocinética. La extracción electrocinética consiste en aplicar corriente eléctrica continua de baja densidad mediante electrodos insertados en el suelo, los cationes que se encuentran en la fase del suelo contaminado migran hacia el lado negativo, mientras que los aniones se mueven hacia el lado positivo (Liu, Li, Song, & Guo, 2018, p. 209).

2.7.4.d Adición de enmiendas. Esta técnica consiste en atrapar o reducir la movilidad de metales en el suelo, mediante agente estabilizadores, esto con el fin de solidificar el suelo o convertir las fracciones de contaminante móviles. Estas enmiendas aumentan la capacidad natural del suelo de retener metales pesados (Huaraca, Pérez, Bustinza, & Pampa, 2020, p. 143).

2.7.4.e Oxidación ultravioleta. Este proceso busca cambiar la estructura química de los contaminantes, mediante el uso de agentes con gran poder oxidante como peróxido de hidrogeno u ozono, en conjunto con luz ultravioleta (López Ramírez *et al.*, 2021, p. 78).

### **2.7.5 Técnicas Térmicas**

El calor aumenta la volatilización y descompone los contaminantes en los suelos. Estos tratamientos incluyen la destrucción, separación o inmovilización de los contaminantes, tiene como ventaja principal la rapidez de acción, sin embargo va ligada a un alto costo debido al uso de energía, equipos y la mano de obra. Los tratamientos térmicos se emplean en la descontaminación de aceites, hidrocarburos clorados y policlorobifenilos (Martínez & Casallas, 2018, p. 61). En esta tecnología se producen vapores o residuos que requieren tratamiento o disposición final (Sepúlveda & Velasco, 2002, p. 39).

2.7.5.a Desorción térmica. Técnica ex situ que busca la volatilización de los contaminantes calentando el suelo en rangos de temperaturas de 90 a 320°C o rangos altos de temperatura que van de 320 a 560°C. La desorción térmica se enfoca en descontaminar suelos que tienen compuestos orgánicos volátiles no halogenados, semivolátiles, hidrocarburos aromáticos y algunos contaminantes inorgánicos como plomo y mercurio (Pizarro *et al.*, 2017, p. 43).

Los tiempos de remediación son cortos, sin embargo los costos pueden superar los 400 USD/m<sup>3</sup> (Sepúlveda & Velasco, 2002, p. 47).

2.7.5.b Incineración. Técnica ex situ que implica la destrucción del contaminante mediante calor a altas temperaturas 600 a 1600 °C en presencia de oxígeno, los cuatro tipos de unidades de incineración son: hornos rotatorios, reactores, inyección de líquido o calentadores infrarrojos. Este procedimiento genera cenizas y gases orgánicos e inorgánicos que deben ser depurados eliminados en vertederos (Vidonish, Zygourakis, Masiello, Sabadell, & Alvarez, 2016, p. 427).

## **2.7.6 Tratamientos mixtos**

2.7.6.a Extracción multifase. Técnica in situ la cual consiste en extraer mediante zanjas o pozos las sustancias contaminantes en fase vapor como orgánicos volátiles, en fase líquida por disolución y compuestos no acuosos en fase libre. La extracción dual es un ejemplo de este tipo de técnica (FUNDACIÓN CHILE, 2019, p. 49).

2.7.6.b Atenuación natural. Técnica in situ que contiene y reduce la contaminación mediante procesos biológicos y fisicoquímicos, para este tratamiento se necesita un monitoreo constante para evitar riesgos en el medio ambiente y la salud humana (FUNDACIÓN CHILE, 2019, p. 49).

### **2.7.7 Técnicas biológicas**

Esta técnica utiliza agentes biológicos como plantas, hongos y bacterias (microorganismos) para eliminar los contaminantes o sustancias tóxicas del ambiente, consiste en favorecer los procesos que realizan los microorganismos autóctonos del lugar de convertir las sustancias tóxicas a sustancias inocuas mediante la transformación química (Castebianco, 2018, p. 27).

2.7.7.a Biotransformación de metales. Técnica in situ que consiste en aplicación de microorganismos resistentes a elevadas concentraciones de metales que reduzcan la movilidad de los contaminantes en el suelo mediante mecanismos como oxidación, reducción, metilación, biosorción y acumulación intracelular (Álvarez, 2019, p. 20).

2.7.7.b Bioventing. Técnica in situ, el método consiste en estimular la microbiota autóctona del suelo mediante aireación (oxígeno) lo cual mejora la degradación aeróbica de contaminantes biodegradables y promueve la oxidación de contaminantes para precipitación de metales pesados (Smarte & Yusuf, 2021, p. 135).

2.7.7.c Compostaje. Técnica ex situ mediante la cual se estimula la actividad de los microorganismos nativos del suelo quienes actúan sobre la materia biodegradable, esto mejora la estructura y reduce la erosión en el suelo (Olarte, 2019, p. 72).

2.7.7.d Biolabranza. Técnica ex situ, variación de la técnica de compostaje, el suelo contaminado se mezcla con nutrientes y se remueve periódicamente mediante arado, lo cual favorece la aireación. Las condiciones del suelo como pH y temperatura deben ser controladas para optimizar la velocidad de degradación, la diferencia entre esta técnica y el compostaje consiste en que la primera se mezcla el suelo contaminado con suelo limpio, mientras que en la segunda se realiza sobre el suelo contaminado (Seguridad minera, 2017, p. 1).

2.7.7.e Lodos biológicos. Esta técnica consiste en mezclar el suelo contaminado con un líquido, la degradación se realiza en fase acuosa, donde se controla el agua y aditivos, los microorganismos se mantiene en suspensión o inmovilizados en la fase sólida. El tratamiento puede realizarse en piscinas o en reactores (Mafla, 2010, p. 10).

2.7.7.f Biopilas. Técnica en la cual se degradan los contaminantes mediante respiración microbiana, siendo similar a la biolabranza con la diferencia que la aireación no se da por arado sino por la inyección de aire (Casallas & González, 2020, p. 31).

2.7.7.g Fitoremediación. Tiene como objetivo restaurar las características y propiedades del suelo mediante la capacidad que poseen las plantas para contrarrestar los contaminantes, por medio de: acumulación, translocación y degradación, las plantas actúan como sumideros de residuos peligrosos (Méndez, 2020, p. 2).

2.7.7.h Bioaumentación. Consiste en utilizar y/o añadir microorganismos y nutrientes en la tierra que tengan la capacidad de disminuir el contaminante, contribuyendo a la recuperación del suelo sin alterar el equilibrio del ecosistema (Galindo *et al.*, 2021, p. 111).

En la tabla 4 se puede encontrar las principales ventajas y desventajas de los tres grupos base de tratamiento de suelos (físicos, químicos y biológicos), también se encuentra el costo-beneficio de cada uno de ellos, con este cuadro se busca obtener información de las técnicas que tienen poco o ningún impacto negativo con el ambiente, son eficientes a la hora de reducir los contaminantes del suelo y son económicamente realizables, mientras que en la tabla 5 se encuentran las ventajas y desventajas de los tratamientos biológicos en el suelo contaminado.

**Tabla 4.**

Costos, beneficios y limitantes de las técnicas de remediación de suelos

Estrategia de remediación	Costo (\$US/m <sup>3</sup> )	Beneficio	Limitantes
Física	405-1485	<ul style="list-style-type: none"><li>- Rápido</li><li>- Eliminación permanente de contaminantes</li><li>- Ideal para niveles altos de contaminación</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>- Costoso</li><li>- Destructivo</li><li>- Riesgo de contaminación secundaria</li></ul>
Química	80-440	<ul style="list-style-type: none"><li>- Rápido</li><li>- No genera volúmenes grandes de material desechable</li><li>- Ideal para niveles altos de contaminación</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>- Costoso</li><li>- Destructivo</li><li>- Riesgo de contaminación secundaria</li></ul>
Biológica	30-100	<ul style="list-style-type: none"><li>- Amigable con el medio ambiente</li><li>- Rentable</li><li>- Mínima interrupción del sitio</li><li>- Útil para niveles bajos de contaminante</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>- Requiere más tiempo</li><li>- Baja predictibilidad</li><li>- Dependencia de factores ambientales</li></ul>

**Nota.** La tabla muestra los limitantes y beneficios de las técnicas de remediación de suelo contaminado. Tomado de Koshlaf, E., & Ball, A. S. (2017). Soil bioremediation approaches for petroleum hydrocarbon polluted environments. *AIMS Microbiology*, 3(1), 25–49. <https://doi.org/10.3934/microbiol.2017.1.25> (Koshlaf & Ball, 2017).

**Tabla 5.***Ventajas y desventajas de los métodos de remediación de suelos*

Técnica	Ventajas	Desventajas
Bioestimulación	<ul style="list-style-type: none"> <li>- No requiere excavación de suelos</li> <li>- Tanto el agua subterránea contaminada y el suelo puede ser tratada simultáneamente</li> <li>- Bajos costos</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- La remediación puede verse limitada si no existe contacto microorganismo contaminante</li> <li>- La circulación de soluciones acuosas puede aumentar la movilidad del contaminante</li> <li>- Altas concentraciones de metales pesados, compuestos orgánicos clorados, hidrocarburos de cadena larga o sales inorgánicas son altamente tóxicos para los microorganismos.</li> </ul>
Biotransformación de metales	<ul style="list-style-type: none"> <li>- El sistema se auto restablece debido al aumento de microorganismos</li> <li>- Los metales pueden ser liberados fácilmente y recuperados</li> <li>- La actividad metabólica puede ser la única de degradar compuestos orgánicos no metálicos</li> <li>- Se puede utilizar dos o más organismos de manera sinérgica</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Solo trata metales a bajas concentraciones</li> <li>- Se necesita nutrientes para el crecimiento</li> <li>- Los productos metabólicos pueden formar complejos con los metales</li> <li>- La recuperación de metales por desorción es limitada ya que puede llegar a formar unión intracelular</li> </ul>
Bioventilación	<ul style="list-style-type: none"> <li>- No requiere introducir microorganismos exógenos</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Los suelos de baja permeabilidad reducen la eficiencia</li> <li>- La acumulación de vapor puede requerir extracción de aire</li> <li>- Baja humedad de suelo puede limitar la eficiencia</li> <li>- Puede ser requerido monitoreo de gases residuales</li> <li>- Bajas temperaturas pueden retardar la remediación</li> </ul>
Compostaje	<ul style="list-style-type: none"> <li>- El diseño y la construcción son fáciles</li> <li>- El suelo remediado no requiere ser confinado después y al degradarse aporta nutrientes al suelo</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Necesidad de espacio</li> <li>- Necesita excavación de suelo contaminado liberando COV</li> <li>- Incremento de material a tratar</li> <li>- No puede tratarse metales pesados</li> </ul>

**Tabla 5. (Continuación)**

Fitorremediación	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Bajo costo</li> <li>- Los metales pueden ser reciclados</li> <li>- Se puede aplicar a gran variedad de contaminante</li> <li>- Reduce la entrada de contaminante al ambiente y salida al sistema de aguas subterráneas</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Tipo de planta determina la profundidad a tratar</li> <li>- Altas concentraciones de contaminante pueden ser tóxica</li> <li>- Depende de la estación del año</li> <li>- No es efectiva en contaminantes fuertemente adsorbidos</li> </ul>
Biolabranza	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Bajo costo</li> <li>- No deja residuos posteriores</li> <li>- No provoca riesgo de contaminación</li> <li>- Puede realizarse en variedad de climas</li> <li>- Es simple para diseñar y operar</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Necesidad de gran espacio</li> <li>- No es recomendable para contaminantes diluidos</li> <li>- Las condiciones meteorológicas pueden afectar la degradación</li> <li>- Los contaminantes inorgánicos no son biodegradados</li> <li>- Se debe controlar el polvo en la labranza</li> <li>- Construcción de instalaciones recolectoras de escorrentía</li> </ul>
Lodos biológicos	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Alta eficiencia</li> <li>- Ocupa áreas reducidas</li> <li>- Reduce el tiempo de tratamiento en comparación con otras tecnologías</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Necesita un rígido control operacional</li> <li>- Inestabilidad en la sedimentación de lodos</li> <li>- Costos elevados</li> <li>- El suelo debe tamizarse previamente</li> <li>- Los productos intermedios pueden ser más tóxicos que el contaminante</li> <li>- Tratamiento de residuos</li> </ul>
Pilas biológicas	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Simple de diseñar e implementar</li> <li>- Costo competitivo</li> <li>- Efectivo sobre constituyentes orgánicos</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Baja efectividad en altas concentraciones</li> <li>- Altas concentraciones de metales pesados pueden inhibir el crecimiento</li> <li>- Requiere gran espacio</li> <li>- Los constituyentes volátiles tienden a evaporarse y no biodegradarse</li> <li>- Requiere excavación de suelos</li> </ul>

**Nota:** Resumen de ventajas y desventajas de las tecnologías biológicas de remediación de suelos. Tomado de FUNDACION CHILE. (2019). Manual de tecnologías de remediación de sitios contaminados . Retrieved March 30, 2021, from [https://fch.cl/wp-content/uploads/2019/10/manual-de-tecnologias-de-remediacion-de-sitios-contaminados\\_baja-1.pdf](https://fch.cl/wp-content/uploads/2019/10/manual-de-tecnologias-de-remediacion-de-sitios-contaminados_baja-1.pdf), FUNDACIÓN CHILE. (2019). Manual de tecnologías de remediación de sitios CONTAMINADOS . Retrieved March 30, 2021, from [https://fch.cl/wp-content/uploads/2019/10/manual-de-tecnologias-de-remediacion-de-sitios-contaminados\\_baja-1.pdf](https://fch.cl/wp-content/uploads/2019/10/manual-de-tecnologias-de-remediacion-de-sitios-contaminados_baja-1.pdf) y Ramirez, K., & Yarleque, V. (2021). "técnicas de biorremediación y su aplicación en suelos contaminados con hidrocarburos." (fundación chile, 2019). (Rodríguez, 2013). (Ramirez & Yarleque, 2021).

## 2.8 Normatividad

En diferentes normas, leyes o decretos de Colombia se constituyen parámetros para realizar limpieza y biorremediación en zonas que han sido contaminadas con hidrocarburo, también se mencionan otras normas basadas en la aplicación, protección y manejo ambiental con respecto a los hidrocarburos (Toro & Ramírez, 2012, p. 44).

**Tabla 6.**

*Normatividad aplicable en Colombia para la protección y uso de suelo*

Norma	Objetivo
Decreto ley 2811/1974	Código nacional de recursos naturales renovables y de protección al medio ambiente
Ley 99/1993	Se crea el ministerio de medio ambiente y se organiza el Sistema Nacional Ambiental SINA
Decreto 1753/1994	Se define la licencia ambiental, requisitos
Decreto 2150/1995	Reglamenta licencia ambiental, plan de manejo ambiental, estudio de impacto ambiental.
Ley 2/1959	Reserva forestal, protección del agua y suelos
Decreto 622/1977	Parques nacionales naturales
Ley 29/1986	Regula áreas de reserva forestal protegida
Decreto 1449/1977	Disposiciones sobre conservación y protección de agua, bosque y fauna
Decreto 1594/1984	Norma de vertimiento de residuos líquidos
Decreto 2655/1988	Código de minas
Ley 388/1997	Ley de ordenamiento territorial, reglamenta el uso de suelos
Directiva presidencial 33/1989	Responsabilidades de organismos y entidades
Decreto 969/1995	Crea la red nacional de reservas para caso de desastres
Decreto 321/ 1999	Se adopta el plan nacional de contingencia contra derrame de hidrocarburo y sustancias nocivas
Acuerdo 04/2012	Establece criterios de administración y asignación de áreas para exploración y explotación de hidrocarburos.
Acuerdo 03/2014	Reglamento de contratación para exploración t explotación de hidrocarburos, parámetros y normas.
Decreto 1073/2015	Expide el decreto único reglamento del sector administrativo de Minas y Energía de explotación y exploración de hidrocarburos



Tabla 6. (Continuación)

Norma	Objetivo
Decreto 2041/2014	Reglamenta el título VIII de la ley 99/1993 sobre licencias ambientales
Decreto 1076/ 2015	Expide el decreto único reglamentario del sector ambiente y desarrollo sostenible
Decreto 3930/2010	Los usuarios que exploren, exploten, refinen, procese, transporten o almacenen hidrocarburos, deberán diseñar un plan de contingencia y control de derrames.

**Nota:** La presente tabla resume parte de la normatividad aplicada en Colombia con respecto a derrames de hidrocarburo en el suelo. Tomado de Toro, A., & Ramírez, J. (2012). *Bioremediation in soil contaminated with hydrocarbons in Colombia*. Universidad de Chile. (2005). criterios de calidad de aguas o efluentes tratados para uso en riego y EITI Colombia. (2016). Marco Normativo del Sector de Hidrocarburos - EITI COLOMBIA. Retrieved July 4, 2022, from <https://www.eiticolombia.gov.co/es/informes-eiti/informe-2016/marco-legal-y-regimen-fiscal/marco-normativo-del-sector-de-hidrocarburos/> (Toro & Ramírez, 2012), (EITI Colombia, 2016).

En la tabla 6 se observan algunas las normas, decretos, acuerdos y leyes aplicables en Colombia con respecto al marco regulatorio sobre hidrocarburos, de igual forma el país cumple con normatividad internacional que regula el tema de biorremediación, el protocolo de Lousiana 29B el cual plantea la política para prevención y minimización de generación de residuos, reducción de la fuente de generación mediante planes de gestión (Toro & Ramírez, 2012, p. 46).

### **2.8.1 Protocolo de Lousiana 29B**

Es un protocolo estadounidense el cual establece las reglamentaciones dadas a las actividades industriales que pueden tener impactos negativos o afectar el medio ambiente. En este se instauran los parámetros que se deben tener en cuenta al momento de manejar y disponer de un residuo considerado contaminante, se debe tener en cuenta la contaminación, el almacenamiento, tratamiento y disposición final de residuos en actividades como explotación y producción de petróleo y gas generadas desde la perforación hasta la producción. Así mismo se aplica en tratamientos como la biorremediación, debido a que establece los parámetros que un suelo que va a ser

recuperado debe tener para posteriormente poder utilizarlo en otras actividades o ser enterrado. Se debe cambiar el material contaminado con un tratamiento previo para ser catalogado como reutilizable, los parámetros fisicoquímicos que establece el protocolo para la disposición final de residuos de petróleo se muestran en la tabla 7 (Albornoz, 2014, p. 2).

**Tabla 7.**

*Nivel de regulación de sustancia contaminante*

Parámetros	Valor
Ph	6.0-9.0
Conductividad eléctrica	<4.0 omhs/cm
Relación de absorción de sodio	<12.0
Porcentaje de sodio intercambiable	<15.0%
Grasas y aceites	1.0%
Arsénico	10.0 mg/Kg
Bario	20000 mg/Kg
Cadmio	10.0 mg/Kg
Plomo	500 mg/Kg
Mercurio	500 mg/Kg
Selenio	10.0 mg/Kg
Plata	200 mg/Kg
Zinc	500 mg/Kg
<b>LIXIVIADOS</b>	
Ph	6.0- 9.0
TPH	10 mg/l
Cloruros	250 mg/l
Arsénico	5 mg/l
Bario	100 mg/l
Cadmio	0.5 mg/l
Cromo	5 mg/l

Tabla 7 (Continuación)

Plomo	5 mg/l
Mercurio	0.1 m/l
Selenio	1 mg/l
Plata	5 mg/l

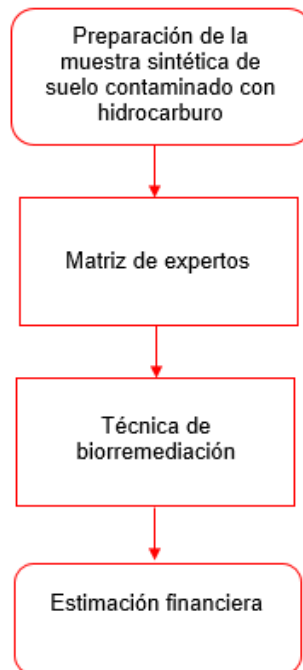
**Nota.** Niveles de contaminante permisible en la norma Louisiana 29B. Tomado de EITI Colombia. (2016). Marco Normativo del Sector de Hidrocarburos - EITI COLOMBIA. Retrieved July 4, 2022, from <https://www.eiticolombia.gov.co/es/informes-eiti/informe-2016/marco-legal-y-regimen-fiscal/marco-normativo-del-sector-de-hidrocarburos/> (Albornoz, 2014).

### 3. METODOLOGÍA

Para el cumplimiento de los objetivos, el desarrollo del proyecto se divide en cuatro fases: la primera consta de la preparación de la muestra sintética de suelo y la caracterización de esta muestra para la identificación de propiedades en el suelo y el contenido de hidrocarburo que posee, la segunda fase consiste en el desarrollo de una matriz de expertos para determinar los tratamientos a implementar y como desarrollarlos, teniendo como interés la eficiencia en la remediación de suelos contaminados con hidrocarburo, la tercera fase es la elaboración del procedimiento experimental a escala laboratorio y el desarrollo de cada proceso seleccionado, y la cuarta fase es la evaluación financiera de las técnicas escogidas, la figura 4 ilustra la metodología que se llevará a cabo para el desarrollo de los objetivos del presente proyecto.

**Figura 4.**

*Fases metodológicas del proyecto*



**Nota.** Resumen de las fases metodológicas del presente proyecto de investigación.

### **3.1 Primera Fase. Preparación de la muestra sintética de suelo contaminado con hidrocarburo**

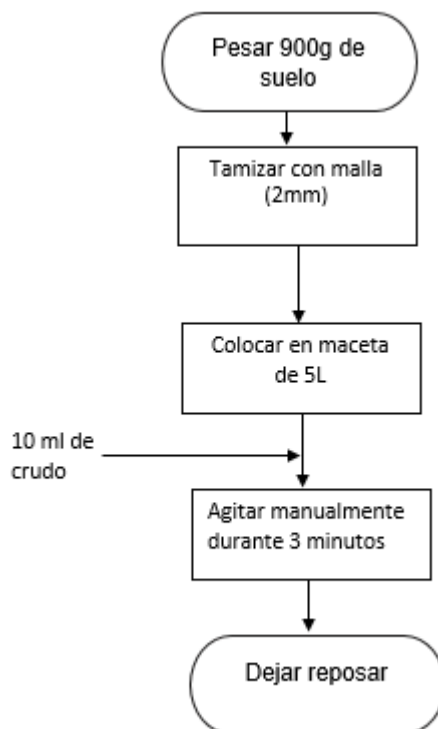
La tierra comercial es especial para jardinería escogida de las mejores superficies, adecuada con minerales de calidad, es una tierra apropiada para fortalecer y tener un adecuado crecimiento de las plantas, cuenta con un conjunto de componentes comunes, como lo son musgo, cascarilla de arroz y arena lavada se contamina con hidrocarburo de 15 grados API (American Petroleum Institute), el cual es un crudo pesado según la clasificación API.

Para este caso, una muestra sintética de suelo contaminado es el desarrollo de un modelo que presenta una composición fisicoquímica similar a un suelo que sufrió un vertido de hidrocarburo (Hernández & Martínez, 2019, p. 8).

Para la preparación de la muestra sintética de suelo contaminado con hidrocarburo, se pesó en una balanza analítica 900 g de suelo que se depositaron en una maceta con capacidad de 5L, posteriormente el suelo se pasó por un tamiz con malla de 2 mm para eliminar impurezas como piedras, raíces y otros sólidos. En un beaker se midieron 10 ml de crudo y se adicionó al suelo, posteriormente, se agitó manualmente durante tres minutos para contaminar todo el suelo, en la figura 5 se muestra el diagrama de flujo de las tareas realizadas para preparar la muestra sintética.

**Figura 5.**

*Preparación de muestra sintética de suelo contaminado con hidrocarburo pesado*



**Nota.** Preparación de muestra sintética de suelo contaminado con hidrocarburo pesado mostrado en un diagrama de flujo. **Fuente:** Elaboración propia, con datos tomados de EITI Colombia. (2016). Marco Normativo del Sector de Hidrocarburos - EITI COLOMBIA. Retrieved July 4, 2022, from <https://www.eiticolombia.gov.co/es/informes-eiti/informe-2016/marco-legal-y-regimen-fiscal/marco-normativo-del-sector-de-hidrocarburos/> (Pinto & Victor, 2018).

### **3.1.1 Caracterización de suelos**

Para la biorremediación de suelo es necesario caracterizarlo, puesto que la estrategia de limpieza puede cambiar o ser específica para diferentes suelos. Las propiedades más importantes que se deben definir son: pH y conductividad eléctrica, ya que estas características logran afectar la degradación de los compuestos xenobióticos (Hernández, Castorena, Panta, & López, 2006, p. 464).

Existen 11 clases de suelos en Colombia, el 58.11% son suelos poco evolucionados como entisoles e inceptisoles, el 28.79% de los suelos son muy evolucionados y poco fértiles. Los suelos agrícolas andisoles y misoles tienen el 7.5% del territorio (IDEAM, 2012, p. 1); el suelo que se recreo es un suelo agrícola, por esta razón la muestra se realiza la muestra sintética con tierra nutrida que puede mejorar el crecimiento de plantas y lograría determinar cómo quedaría un suelo inicialmente fértil después de un derrame de hidrocarburo y su respectiva remediación, para este caso todos los resultados se llevaron a cabo por triplicado.

3.1.1.a Ph Es importante obtener la información de pH del suelo, dado que las plantas al absorber los minerales disueltos en el agua se ven afectadas cuando el pH cambia la solubilidad de los minerales. Como se mencionó anteriormente el pH es la concentración de iones hidrógeno que varía en un rango de 0 a 14, presentando valores de 6,5 -7,5 en suelos ácidos presenta valores inferiores a 6,5 y en suelos alcalinos superiores a 7,5. La acidez proviene principalmente de gases como el dióxido de carbono que se disuelven con agua y confiere un pH bajo, mientras que la acumulación de sales solubles en suelo provee suelos alcalinos (Alba, 2011, p. 46).

Este parámetro químico se determinó mediante la norma técnica colombiana NTC 52964/2018 calidad del suelo, determinación de pH. La cual describe la determinación de pH en los suelos mediante el método potenciómetro aplicando el documento normativo NTC-ISO 11464, gestión ambiental. Calidad del suelo. Pre tratamiento de muestras de suelo para análisis fisicoquímicos (ICONTEC, 2018, p. 2).

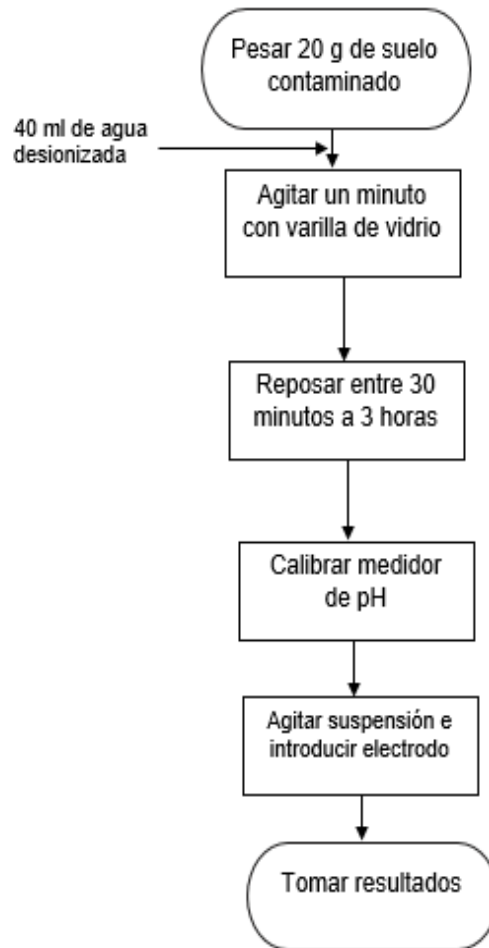
Para establecer el pH se pesaron 20 g de suelo en la balanza analítica, seguido se añadió 40 ml de agua des ionizada y se agitó con varilla de vidrio por un minuto, se dejó reposar 2 horas.

El pH-metro se calibró y se limpió el electrodo con agua des ionizada, posteriormente se agitó nuevamente la suspensión de suelo- agua y se introdujo el electrodo para leer el pH, En la figura 6, se ilustra la metodología con sus respectivas tareas para la

medición de PH con medidor con electrodo evitando fallas o errores en la toma que generen ruido en la medición.

**Figura 6.**

*Diagrama de flujo medición de pH*



**Nota.** Muestra de medición del pH de una sustancia en laboratorio mediante diagrama de flujo. Tomado de ICONTEC. (2018). Calidad del suelo. determinacion del ph. Retrieved June 16, 2021, from <https://tienda.icontec.org/gp-calidad-del-suelo-determinacion-del-ph-ntc5264-2018.html> (ICONTEC, 2018).



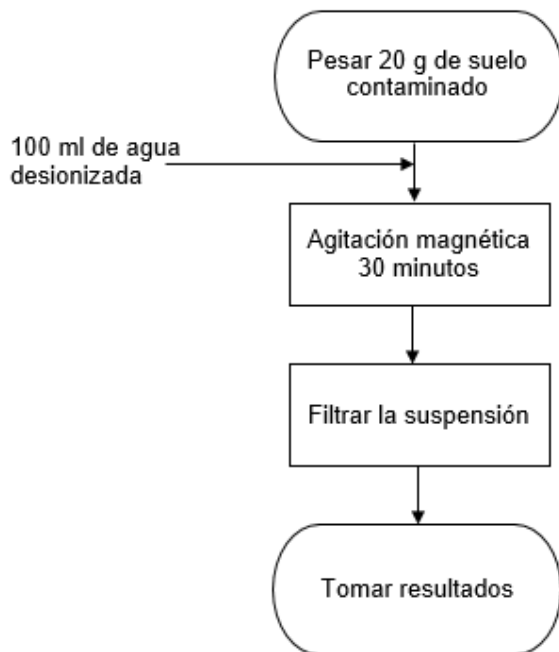
3.1.1.b Conductividad eléctrica La conductividad eléctrica depende de la concentración de iones en el agua, la movilidad de cada uno, su valencia y la temperatura. Este parámetro se utiliza para caracterizar el grado de salinidad en el suelo, debido a que está relacionado con la concentración de iones en disolución. La acumulación de sal afecta la calidad del ecosistema y productividad de las plantas (Gallart, 2017, p 4.).

Se determinó mediante la norma técnica colombiana NTC 5596/2008. Calidad del suelo, la cual describe la determinación de la conductividad eléctrica en laboratorio mediante métodos conductimétricos (ICONTEC, 2008, p. 2).

Para medir la conductividad eléctrica se pesó 20 g de suelo en la balanza analítica, consecutivamente se añadió 100 mililitros de agua des ionizada y se dejó agitar en plancha por media hora, posteriormente se filtró la suspensión y se introdujo el conductímetro para obtener resultados, como se muestra en la figura 7, donde se muestra el diagrama de flujo de las respectivas tareas.

**Figura 7.**

*Diagrama de flujo de medición de conductividad eléctrica*



**Nota.** Muestra de medición de la conductividad eléctrica de una sustancia en laboratorio mediante diagrama de flujo. Tomado de ICONTEC. (2008). Calidad de suelo. determinación de la conductividad eléctrica. Retrieved June 16, 2021, from <https://www.icontec.org/rules/calidad-de-suelo-determinacion-de-la-conductividad-electrica/> (ICONTEC, 2008).

3.1.1.c Toma de metales en la muestra Para medir los metales en la muestra se utilizó un analizador de fluorescencia de rayos-X (XFR), mediante el cual se pudo analizar la muestra en estado sólido, este equipo posee capacidad multielemental, un rango lineal amplio, elevado rendimiento y bajo costo por análisis. Es ampliamente utilizado para la aplicación de análisis y caracterización de muestras en suelos ya que determina rocas, minerales, metales etc. Otra ventaja es que permite obtener los resultados in situ de las áreas estudiadas, facilitando la toma de decisión para remediación de suelos. La Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA) tiene descrito el método de referencia para la determinación elemental de suelos mediante el uso de este equipo (Hidalgo, Pardini, Gonzalez, Margui, & Queralt, 2011, p. 273).

### **3.2 Segunda fase. Matriz de selección**

Una matriz o método de selección Regime consta de cuatro fases, la primera radica en listar o enumerar los conceptos a evaluar, el segundo es la elección de los criterios de selección, la tercera fase consiste en valorar el nivel de cumplimiento de los conceptos en relación con los criterios de selección, y por último, mediante un algoritmo se determina el mejor concepto (Lozano *et al.*, 2007, p. 563).

En este paso se realiza la matriz de selección que permita identificar la técnica y el método más efectivo con respecto a los criterios que se evaluarán. Primero se realiza una matriz para los tres tipos de técnica mencionados anteriormente (físicoquímicos, biológicos y térmicos) y posteriormente se realiza la matriz de selección para cada método o subgrupo de la técnica seleccionada en la primera matriz. Se utilizó el método Regime el cual facilita la toma de decisiones debido a que es un método multicriterio cuantitativo y cualitativo que se basa en dos tipos de datos de entrada, el primero consta de una matriz de selección/evaluación y un conjunto de pesos. Esta matriz se compone de elementos que miden el efecto de cada alternativa en consideración respecto a los criterios o indicadores seleccionados, los pesos son los que proporcionan la información que revela la importancia respecto al criterio evaluado (La Paix & López-Lambas, 2010, p. 7).

Los criterios utilizados para la matriz son propuestos por la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA) los cuales son planteados para evaluar las alternativas de remediación utilizadas para mejorar el suelo o ambiente en general (Chan-Quijano *et al.*, 2014, p. 133).

Por otra parte se utilizó la evaluación mediante el juicio de expertos, este es un método de validación en el cual se le solicita a una serie de personas la demanda de un juicio frente a un aspecto concreto (Robles & Rojas, 2015, p. 2). En este caso se realizó la evaluación a 10 expertos, de profesiones como: ingenieros de petróleo, ingenieros químicos, geólogos, ingenieros ambientales y gestores ambientales.

Dos criterios se evaluaron de manera cualitativa, este instrumento posibilita el sistematizar, analizar, comprender y codificar documentos, observaciones y entrevistas que se relacionan con los temas de evaluación. Mientras que los otros cinco criterios se evaluaron de manera cuantitativa, donde se recogieron los datos de investigación mediante recopilación numérica propuesta por los expertos (Giesecke & Lafosse, 2020, p. 398).

Se evaluarán en una escala del 1 a 5 siendo, 5 muy favorable, 4 favorable, 3 neutro, 2 desfavorable y 1 muy desfavorable.

**Tabla 8.**

*Evaluación de las técnicas de remediación de suelos contaminados con hidrocarburo pesado*

Criterios	Fisicoquímico		Biológico		Térmico	
	SI	NO	SI	NO	SI	NO
Protección a la salud humana y del ambiente	4		5		3	
Efectividad y permanencia de la remediación a corto y largo plazo	4		3		4	
Reducción de toxicidad, movilidad o volumen del contaminante por medio del tratamiento	3		4		4	
Implementación	4		4		3	
Bajo costo	3		5		2	
SUMA	18		21		16	
Matriz cualitativa de expertos	SI	NO	SI	NO	SI	NO
Compatibilidad con las leyes ambientales y aceptación por las autoridades ambientales	X		X		X	
Aceptación y visto bueno de la comunidad	X		X			X

**Nota.** Parámetros utilizados por la EPA para determinar la técnica con mayor eficiencia para el caso propuesto. Fuente: Elaboración propia

Para el parámetro de protección a la salud humana y del ambiente se asignó un valor numérico mayor a las técnicas por tratamiento de carácter biológico debido a que tecnologías como las fisicoquímicas y térmicas puede generar contaminación secundaria y ser destructiva para el ambiente, por otro lado el tratamiento biológico tiene una menor intrusión en el sitio y el daño significativo es menor en el proceso de

destrucción de los contaminantes, como es apreciable en la tabla 8 (Garzón, Rodríguez, & Hernández, 2017, p. 311).

En el segundo parámetro las técnicas fisicoquímicas y térmicas se calificaron como superiores sobre la biológica por el tiempo que demora en lograr la efectividad, las técnicas con mayor puntaje tienen tiempos rápidos de limpieza mientras que con técnicas biológicas si se logra efectividad a largo plazo el cual puede ser de meses o años (Beltran, 2013, p. 12).

En reducción de toxicidad, movilidad y volumen del contaminante las técnicas biológicas y térmicas obtuvieron el mismo puntaje debido a que una es fortaleza la otra es debilidad, es decir en técnicas térmicas se puede encontrar que existe movilidad del contaminante por los fluidos de extracción pero estas pueden remover los contaminantes más fácilmente por el contrario la técnica biológica no moviliza los contaminantes pero es dependiente del tipo de contaminante y el nivel del contaminante que los microorganismos puedan tolerar, sin embargo las tres técnicas reducen la toxicidad del suelo

En el parámetro de implementación se observa que la técnica biológica es más efectiva ya que no se necesita equipos ni maquinaria grande, por esta misma razón los costos que se necesita para la implementación son entre 30 y 100 dólares por metro cúbico mientras que las técnicas fisicoquímicas y térmicas necesitan equipos que a su vez consumen grandes cantidades de energía oscilando en un valor de 405-1485 y 440-1500 dólares por metro cúbico respectivamente, sin el uso de maquinaria y equipos la técnica biológica tiene una mayor aceptación de la comunidad. (FUNDACIÓN CHILE, 2019, p. 52-58).

En la tabla 8 se observa el resultado de la matriz de expertos, donde se indica que las técnicas biológicas son las más eficientes en cuanto a los parámetros establecidos para la hora de implementarlas en suelos contaminados con hidrocarburo, puesto que obtuvo un puntaje superior con respecto a las otras metodologías. Por tal razón se

evaluarán a continuación las ocho sub técnicas de la rama biológica, las cuales se evaluarán de la misma forma matricial para determinar las que se realizarán a nivel laboratorio.

**Tabla 9.** Evaluación matricial de los métodos de biorremediación de suelos contaminados con hidrocarburo pesado

Criterios	Biotransformación de metales		Bioventing		Compostaje		Biolabranza		Lodos biológicos		Biopilas		Fitorremediación		Bioaumentación	
	SI	NO	SI	NO	SI	NO	SI	NO	SI	NO	SI	NO	SI	NO	SI	NO
Protección a la salud humana y del ambiente	4		4		4		4		4		4		4		4	
Efectividad y permanencia de la remediación a corto y largo plazo	4		4		4		4		3		4		4		4	
Reducción de toxicidad, movilidad o volumen del contaminante por medio del tratamiento	4		4		4		4		4		4		4		4	
Implementación	4		4		4		4		3		3		4		3	
Bajo costo	2		2		4		4		3		4		4		4	
SUMA	18		18		20		20		17		19		20		19	
Matriz cualitativa de expertos	SI	NO	SI	NO	SI	NO	SI	NO	SI	NO	SI	NO	SI	NO	SI	NO
Compatibilidad con las leyes ambientales y aceptación por las autoridades ambientales	X		X		X		X		X		X		X		X	
Aceptación y visto bueno de la comunidad	X		X		X		X		X		X		X		X	

**Nota.** Parámetros utilizados por la EPA para definir la mejor tecnología de las técnicas biológicas para implementar.

Para el parámetro de protección a la salud y medio ambiente, a todas las técnicas se les otorgó un valor de favorable.

- Para la técnica biotransformación de metales se indica que el proceso no libera contaminantes secundarios y tiene la ventaja de recuperar los metales.
- La técnica de biolabranza no provoca riesgo de contaminación, sin embargo, es necesario controlar el polvo de labranza y se requiere un aislamiento de base y sistema de recolección de agua y lixiviados (Bedoya, 2004, p. 126).
- La Bioestimulación consiste en estimular los microorganismos autóctonos del suelo y por ende no representa un mayor riesgo para la salud humana y ambiental.
- Bioventing puede generar gases residuales, el compostaje al necesitar excavación libera COV (compuestos orgánicos volátiles) y tiene incrementos de materiales que deben ser tratados (Chatterjee, Kumari, Rath, & Das, 2022, p. 20).
- las biopilas generan componentes volátiles los cuales no degradan sino que son evaporados siendo perjudicial en el aire (Delgadillo, Ferrera, & Hernández, 2016, p. 25).
- Lodos biológicos puede tener los productos intermedios pueden llegar a ser más tóxicos que el mismo contaminante.

En el parámetro de efectividad y permanencia de la remediación a corto y largo plazo, todas las herramientas resultaron efectivas.

- lodos biológicos obtuvo un valor neutro, dado que necesita largos periodos de tiempo para obtener un resultado duradero (Amador, Bataller, & Venta, 2015, p. 6).



- El valor de efectividad fue para las técnicas de :compostaje, fitorremediación y bioaumentación ya que el primero aporta nutrientes al suelo además de ser fácil acceso, la fitorremediación se puede aplicar a gran variedad de contaminantes mostrando eficacia además en remoción de metales radioactivos y tóxicos reduciendo la entrada de los contaminantes al ambiente aunque es a largo plazo la eficacia es importante, la bioaumentación se puede utilizar en suelos contaminados con herbicidas, insecticidas, clorofenoles y nitrofenoles, de igual manera muestra eficacia en la remoción de metales y metaloides realizando biotransformación de estos.

Para el tercer parámetro de reducción de toxicidad, movilidad o volumen del contaminante por medio del tratamiento, todas las técnicas se clasificaron como favorables, debido a que todas en mayor o menor medida reducen el contaminante del suelo, sin embargo algunas metodologías como biotransformación de metales y biopilas no son adecuadas para altas concentraciones de contaminante, lo cual genera restricción en su uso.

En la implementación de las técnicas, bioaumentación, lodos biológicos y biopilas obtuvieron un valor neutro, debido a que para la primera se necesita tener un control abiótico (Arevalo & Ortiz, 2017, p. 35), y la técnica de lodos biológicos necesitan gran control operacional y uso de reactores lo que aumenta los costos.

Los costos en las técnicas biológicas no son altos, la técnica de bioaumentación se relacionan con la Nota. de carbono que se utilizara pero de igual manera no implica costos grandes de inversión, biotransformación de metales tiene un costo que varía entre 25 y 105 dólares por metro cúbico de suelo, aunque como la técnica anterior también depende de la fuente de carbono, bioventilación tiene costos de operación entre 10 y 70 dólares por metro cúbico aunque los costos pueden variar en función de la permeabilidad de suelo, el espacio, número de pozos y velocidad del bombeo, para compostaje depende de varias variables pero los costos varían de 130 a 260 dólares por metro cúbico.

Fitorremediación es la técnica más económica variando entre 24.000 y 40.000 dólares por hectárea, los costos de biolabranza para aplicación en desechos peligrosos es de 30 a 70 dólares por metro cúbico, como se mencionó anteriormente los birreactores utilizados en lodos biológicos varían entre 130 y 200 dólares por metro cúbico y para biopilas el costo se encuentra entre 25 y 150 dólares por metro cúbico (FUNDACIÓN CHILE, 2019, p. 52-58).

El resultado de la matriz expresada en la tabla 9 indica que la técnica de fitorremediación, biolabranza y compostaje son las mejores metodologías de biorremediación según la evaluación de expertos.

### **3.3 Tercera fase. Técnica de biorremediación**

#### **3.3.1 *Biolabranza- Biocarbón***

El biocarbón posee capacidad de mejorar las propiedades físicas, biológicas y químicas del suelo, además por su naturaleza ecológica y al obtenerse de materias primas de bajo valor es de gran interés. El biocarbón actúa como un bioestimulador o un sorbente, en primera ayuda o estimula los microorganismos del suelo mientras que en segundo lugar el biocarbón es capaz de inmovilizar los contaminantes, reducir el transporte químico y lixiviado. La pirólisis es un factor determinante en la remediación del biocarbón ya que la capacidad de desorción y el estado de los nutrientes dependen de esta, a temperaturas altas el biocarbón posee mayor cantidad de desorción, mientras que los nutrientes disminuyen (Chinyere, Shahsavari, Surapaneni, Shah, & Ball, 2021, p. 2).

Es una forma de carbono obtenido mediante pirólisis de la biomasa a temperaturas entre 300 y 700°C en condiciones bajas de oxígeno, es utilizado para la remediación del suelo agrícola, aumentando el carbono orgánico y mejorando el suelo, dada su naturaleza porosa e hidrófoba a menudo absorbe eficazmente productos químicos orgánicos naturales y sintéticos como los hidrocarburos pesados y metales, por otro lado, es considerado un sustrato favorable para la colonización de hongos y bacterias.

Se ha demostrado que la adición de biocarbón en el suelo favorece la absorción de compuestos orgánicos como pesticidas, hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP) (Mukome *et al.*, 2020, p. 5).

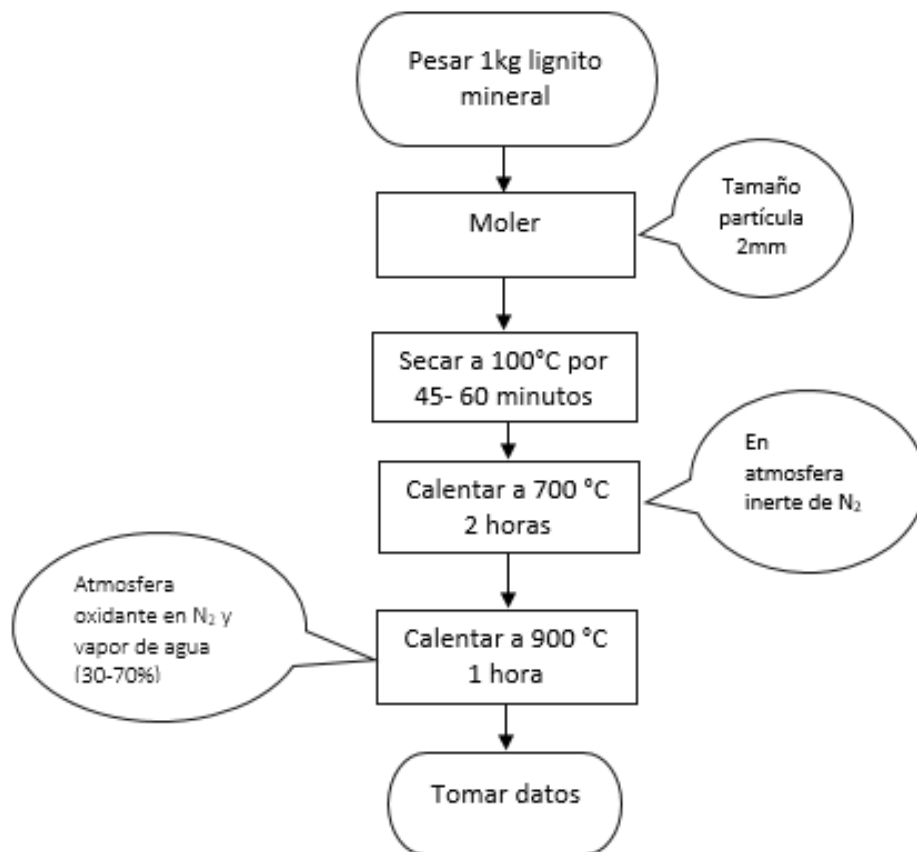
Esta técnica tiene extensas ventajas sobre otras técnicas de remediación ya que posee capacidad de inmovilizar los hidrocarburos y metales pesados, tiene una aplicación y efecto rápido, no requiere un lugar espacioso, su aplicación es de fácil acceso, no consume demasiada energía, se puede preparar mediante residuos orgánicos que se generan en diferentes actividades agrícolas y los costos e inversión o implementación no son altos (Romero, 2017, p. 12).

Cuando se incorpora biocarbón al suelo se puede ver alteradas sus propiedades como textura, estructura, distribución de tamaño de poro, densidad entre otras esto a su vez repercute en la aireación, retención de humedad y crecimiento de plantas. Las partículas muy pequeñas de biocarbón pueden bloquear la porosidad del suelo y disminuir el flujo de agua. El biocarbón aumenta la capacidad de intercambio catiónico y la retención de algunos elementos como potasio, calcio y magnesio. Las mejoras que produce en el suelo son el incremento de retención de humedad y permeabilidad del aire. Es importante considerar la capacidad de carga con biocarbón, es decir la cantidad máxima de carbono que puede ser adicionado en el suelo sin comprometer otras funciones del suelo o del ambiente, sin embargo determinar esa cantidad específica resulta complicado, en algunos trabajos se menciona cargas mayores a 140 Mg ha<sup>-1</sup> mientras que en otros cargas superiores a 50 Mg ha<sup>-1</sup> (Escalante *et al.*, 2015, p. 5).

3.3.1.a Procedimiento experimental de biocarbón. Para la obtener biocarbón se pesó 1 kg de lignito mineral y se pasó por molino centrífugo hasta obtener un tamaño de partícula de 2 mm pasado por tamiz, luego se dejó secar a 100 °C por una hora para retirar la humedad del lignito mineral, inmediatamente la materia prima se calentó por dos horas a 700 °C en una atmósfera inerte de nitrógeno esto con el fin de carbonizar y eliminar la materia volátil presente en el lignito y finalmente se calentó a 900 °C por una hora para activar el carbón (Fernández, 2014, p.39). Como se muestra en la figura 8 donde se observa el proceso adecuado para la obtención de biocarbón a partir de lignito.

**Figura 8.**

*Obtención de biocarbón por pirolisis*



**Nota.** Resumen mediante diagrama de flujo de la obtención de biocarbón en laboratorio. Tomado de Fernández, L. (2014). Síntesis de carbón activado peletizado a partir de carbón mineral del Cerrejón. Retrieved November 14, 2021, from <https://repositorio.unal.edu.co/bitstream/handle/unal/54724/1032417226.2015.pdf?sequence=1&isAllowed=y> (Fernández, 2014).

3.3.1.b Preparación de la muestra sintética de suelo con biocarbón Se pesó 900 g de la muestra sintética de suelo contaminado en una balanza analítica y 60 g de biocarbón, se adicionaron en una maceta con capacidad de 5L y se mezcló manualmente, finalmente se dejó reposar durante 20 días (Herrera, 2018, p. 15).

Al finalizar los 20 días, se realizó aireación del suelo y se adiciono 10 g de biocarbón, este proceso se realizó cada 20 días por cinco veces como se muestra en la tabla 10 y finalmente se realizó aireación de la tierra cada 20 días hasta terminar el procedimiento experimental (aproximadamente 5 meses), en la figura 12 se muestra el diagrama de flujo del procedimiento.

**Figura 10.**

*Medición de pH*



**Figura 9.**

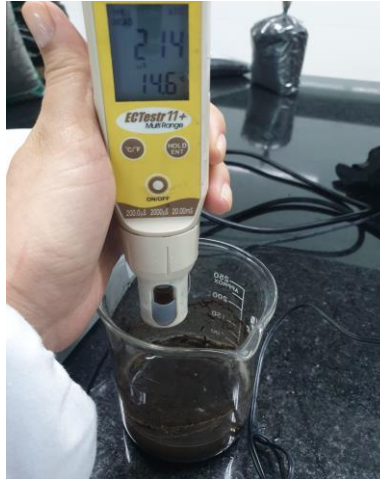
*Peso adecuado de biocarbón*



**Nota.** Representación de las muestras tomadas en laboratorio.

**Figura 11.**

*Medición de conductividad eléctrica*



**Nota.** Medición de la conductividad eléctrica en el laboratorio.

**Tabla 10.**

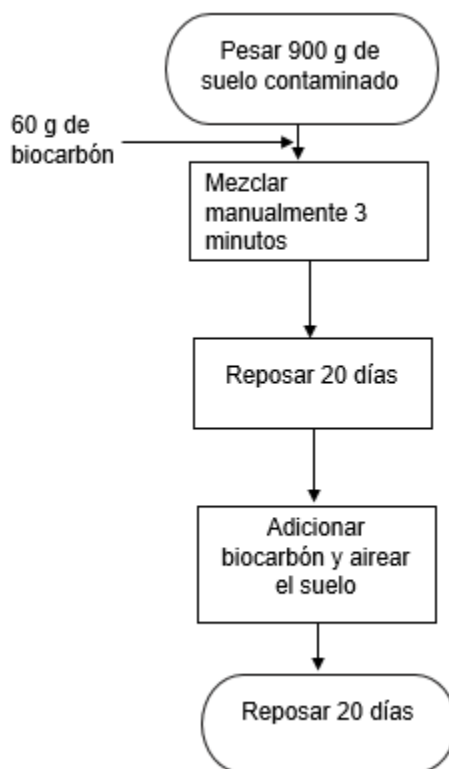
*Adición de biocarbón cada 20 días*

Días transcurridos desde la realización de la muestra	Adición de biocarbón
20 días	10 g
40 días	10 g
60 días	5 g
80 días	5 g
100 días	5 g

**Nota.** Adición de biocarbón los días siguientes a realizar la muestra.

**Figura 12.**

*Proceso de remediación con biocarbón*



**Nota.** Representación mediante diagrama de flujo del proceso de remediación mediante la tecnología de biocarbón

### **3.3.2 Fitorremediación**

Esta tecnología utiliza especies de plantas para extraer, inmovilizar, contener y/o degradar los contaminantes que se encuentran en el suelo, agua o aire. Se puede implementar de manera *in situ* o *ex situ* para eliminar contaminantes como hidrocarburos totales de petróleo, hidrocarburos aromáticos, bifenilos policlorados, disolventes y otros contaminantes (Gerhardt, Gerwing, & Greenberg, 2017, p. 5).

Esta técnica tiene bajos costos operacionales y bajo impacto ambiental ya que los subproductos que se obtienen son dióxido de carbono y agua, sin embargo, los tiempos de degradación pueden ser de meses o años, lo cual depende de la especie de planta que se utilice, el suelo que se tratara y las condiciones ambientales que se presenten.

Una de las ventajas que tiene la fitorremediación sobre la biorremediación es que la principal fuente de energía es la solar lo cual limita perturbaciones en el ambiente reduciendo costos, puede mejorar estéticamente el entorno donde se ubica y presenta producción de biomasa no obstante esta técnica solo puede ser in-situ.

Por otro lado los tiempos de remediación dependen de la especie y el estado de madurez de la planta al momento de ser utilizada en el proceso de remediación, sin embargo estudios indican que este proceso puede ser factible si se implementa un mínimo de cuatro meses (Castaño, 2018, p. 18). Los costos y tiempos de remediación pueden variar dependiendo de la profundidad del suelo y el contaminante un ejemplo es a 50 cm de suelo y contaminante plomo está entre 24000 y 40000 USD/ha (Instituto Nacional de Ecología, 2007, p. 7).

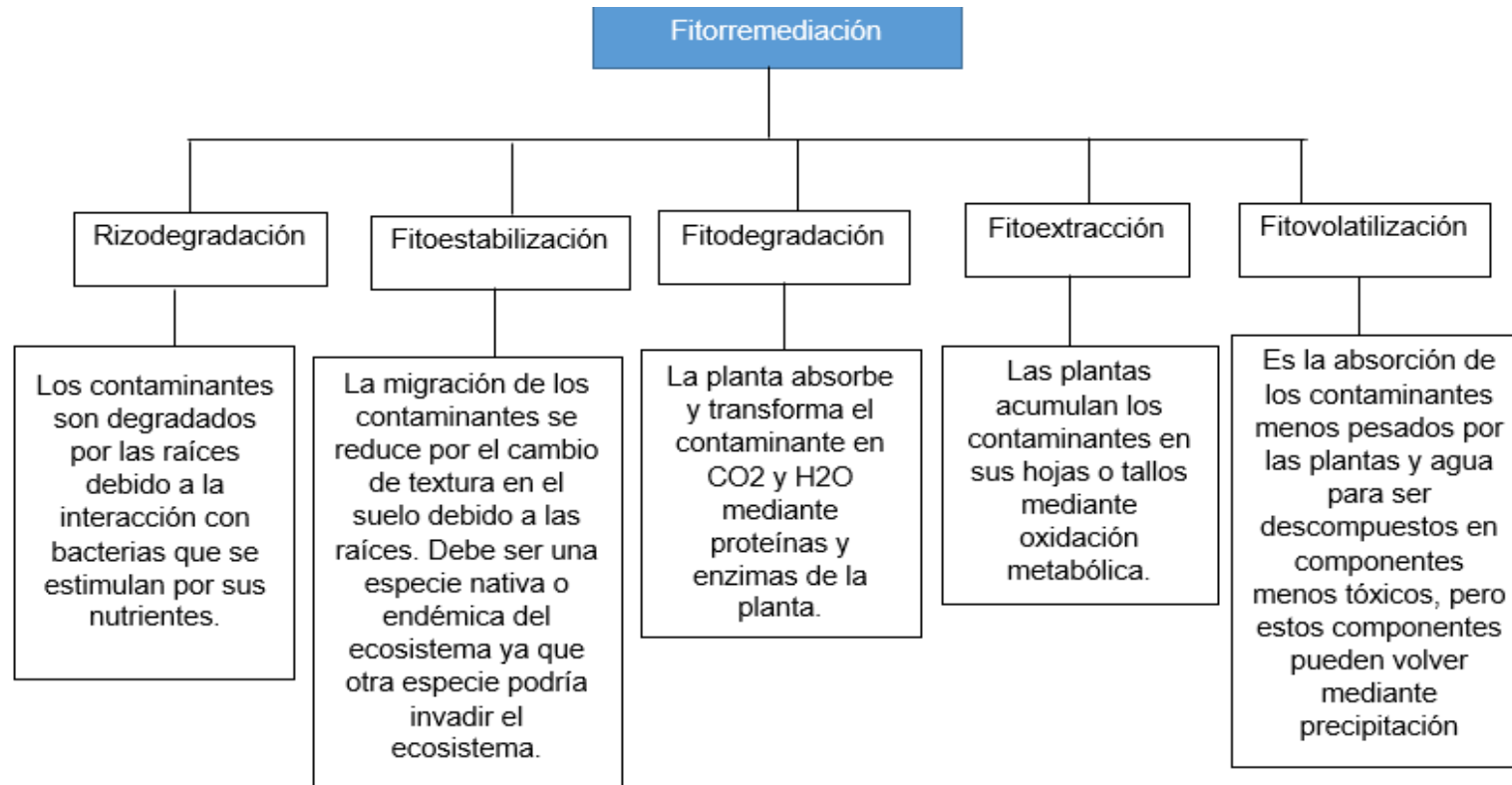
Con esta técnica se pueden tratar grandes zonas contaminadas, las plantas ayudan a confinar el contaminante y permiten el ingreso de oxígeno lo cual ayuda a los microorganismos. Esta técnica permite mejorar la calidad del suelo cambiando la estructura, aumento de porosidad y la infiltración de agua, acelerando el ciclo y aumentando el carbono orgánico. Al no requerir instrumentos mecánicos, favorece con la disminución de gases (Pulgarin, 2012, p. 28).

En la tabla 11 se encuentran los mecanismos que se pueden utilizar en el proceso de fitorremediación. Y en qué consiste cada uno de ellos.



**Tabla 11.**

*Mecanismos en que las plantas actúan con los contaminantes*



**Nota.** Resumen de las tecnologías que se utilizan en la técnica de fitoremediación. Tomado de Castaño, J. (2018). Evaluación técnico-financiera del proceso de fitorremediación con plantas gramíneas para mitigar derrames de crudo en el departamento del Meta, Colombia. Retrieved July 10, 2022, from <https://repository.uamerica.edu.co/bitstream/20.500.11839/6742/1/5131584-2018-1-IP.pdf> (Castaño, 2018)

3.3.2.a Procedimiento experimental de fitorremediación. El procedimiento de fitorremediación se llevó a cabo en colaboración del grupo de investigación Biotecnología de los recursos naturales de la Universidad Tecnológica de Rodeo, Durango México.

La calabacita mayera se escogió para este procedimiento debido a las cualidades que posee como las características nutritivas de sus frutos, su crecimiento en corto tiempo, debido a que en 50 o 60 días después de la siembra ya genera frutos, tiene gran contenido mineral y proteico y el cultivo es de poca inversión, así mismo la calabacita puede adaptarse a cualquier tipo de suelo, prefiriendo los ricos en materia orgánica, con pH ácido 5.5 - 6.8, y medianamente salinos (2.560- 3.840 ppm) (Martinez, 2001, p. 14).

El procedimiento se manejó en contenedores de PET (Tereftalato de polietileno) de 5 L, en cada contenedor se sembró dos semillas de calabaza mayera a una profundidad de 2 cm, en total fueron 6 contenedores.

**Figura 13.**

*Siembra de semilla de Calabacita Mayera a una profundidad de 2 cm*



**Nota.** Representación de la siembra de la semilla de calabacita. Fuente: Universidad Tecnológica de Rodeo

Se pesó 1500 Kg de suelo en una báscula gramera y posteriormente se pasó por una tela mosquitera de calibre 0.22 mm que sirvió como tamiz para eliminar las impurezas presentes en el suelo, consecutivamente se pesó 1.5 Kg de suelo para cada contenedor.

Posteriormente se contaminaron todas las muestras con hidrocarburo pesado de 15 grados API, donde se realizó dos repeticiones por cada tratamiento. El primero se contaminó con 100 mL de hidrocarburo, el segundo con 150 mL y el tercero con 300 mL, dando en total tres muestras con su réplica.

**Figura 14.**

*Contaminación con hidrocarburo pesado en contenedores de 5 L*

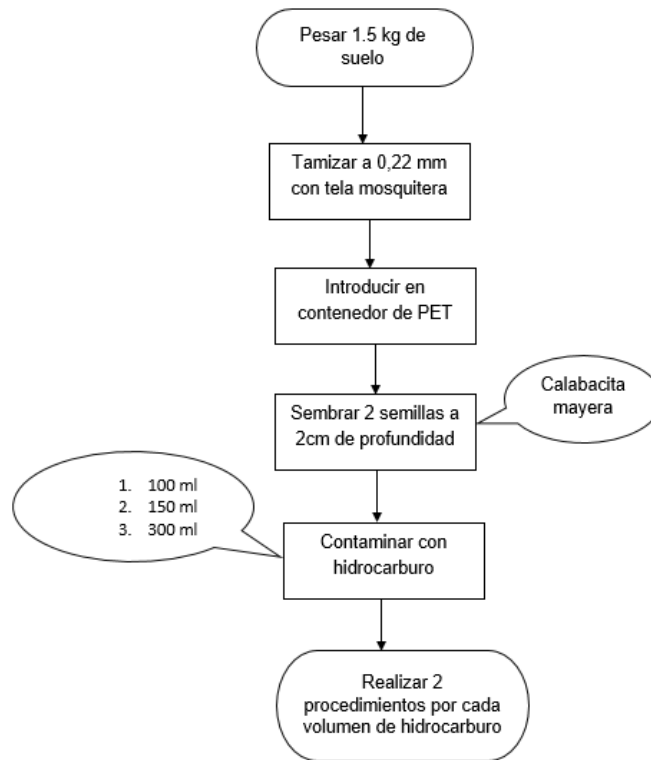


**Nota.** Representación de la contaminación con hidrocarburo en el suelo. Fuente:  
Universidad Tecnológica de Rodeo

En la figura 15 se describe el procedimiento en un diagrama de flujo, para mejor síntesis.

**Figura 15.**

*Procedimiento experimental de fitorremediación*



**Nota.** Resumen del procedimiento experimental con la técnica de fitorremediación. Fuente: Universidad Tecnológica de Rodeo)

3.3.2.b Análisis fisicoquímicos del suelo Para los análisis del suelo se tomaron propiedades como pH, conductividad eléctrica, temperatura y cuantificación de la materia orgánica, estas muestras se hicieron en el suelo sin contaminar y el suelo contaminado.

Materiales y equipo:

- Medidor de pH tipo Hana manual hi 98-121
- Crisoles de cerámica
- Balanza analítica
- Mufla
- Disecador de vidrio
- Suelo húmedo

Se pesaron 200 g de suelo no contaminado y con ayuda de un potenciómetro tipo Hana manual hi 98-121 se obtuvo el pH, la temperatura y la conductividad eléctrica.

**Figura 16.**

*Mediciones de suelo húmedo*

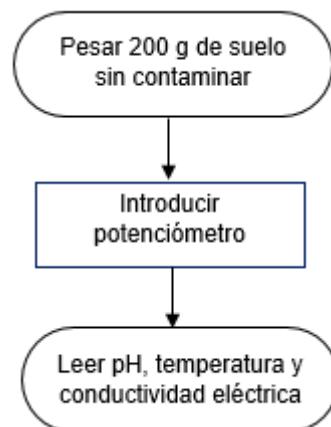


**Nota.** Representación de la medición de las propiedades en suelo húmedo. Fuente: Universidad Tecnológica de Rodeo

En la figura 17 se describe el procedimiento en un diagrama de flujo.

**Figura 17.**

*Análisis de las propiedades del suelo*



**Nota.** Resumen mediante diagrama de flujo del análisis de las propiedades del suelo Fuente: Universidad Tecnológica de Rodeo

Para obtener la materia orgánica contenida en el suelo se pesó en cuatro crisoles de cerámica con 10 g de suelo en cada uno, posteriormente se introdujeron en la mufla por dos horas a una temperatura de 600 °C, pasadas las dos horas los crisoles se dejaron en el desecador de vidrio, luego se volvieron a pesar para obtener el peso de la ceniza, con ayuda del potenciómetro se obtuvo el pH, temperatura y conductividad eléctrica de la ceniza (Ruiz, 2018, p. 23).

Para hallar la materia orgánica se utiliza la ecuación 1, donde describe que, el peso inicial de la muestra menos el peso de las cenizas en la muestra final dividido 1000 es igual a la materia orgánica, en la figura 18 se encuentra el diagrama de flujo del proceso de obtención de cenizas.

*P1: peso muestra inicial*

*P2: peso cenizas*

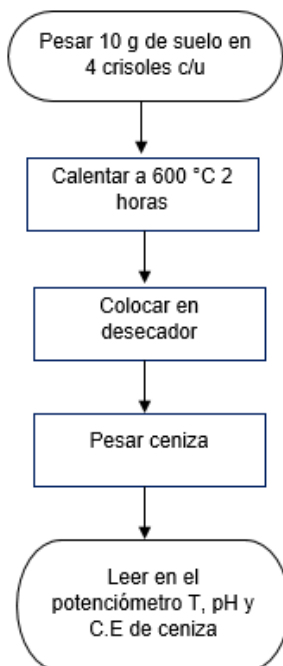
**Ecuación 1.**

*Medición de materia orgánica en el suelo*

$$\frac{P1-P2}{1000} = M.O$$

**Figura 18.**

*Proceso obtención de cenizas*



**Nota.** Representación mediante diagrama de flujo del proceso para cuantificar las cenizas.

Fuente: Universidad Tecnológica de Rodeo

**Figura 19.**

*Determinación de cenizas*

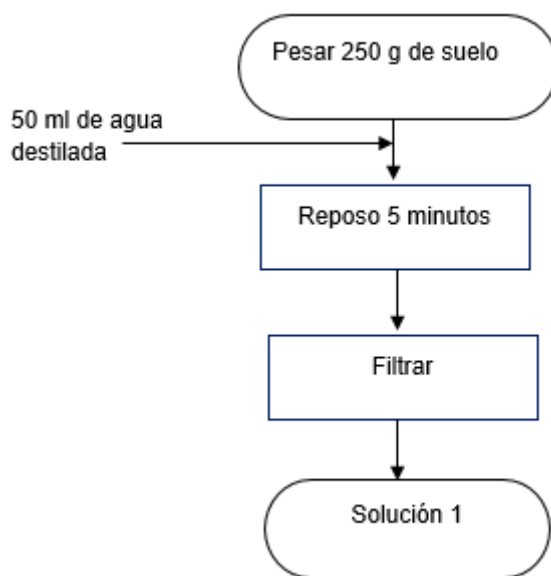


**Nota.** Representación de la determinación de cenizas en laboratorio. Fuente: Universidad Tecnológica de Rodeo

Para determinar el contenido de metales pesados en el suelo se utilizó un espectrofotómetro. Inicialmente en un vaso de plástico se pesó 250 g de suelo y se le añadió 50 mL de agua destilada, posteriormente se dejó reposar por 5 minutos, en seguida se utilizó una red de tela para filtrar el suelo y se extrajo la alícuota del mismo en otro recipiente previamente desinfectado, en la figura 20 se observa el diagrama de flujo del procedimiento.

**Figura 20.**

*Preparación de solución (1) para medir metales en suelo*



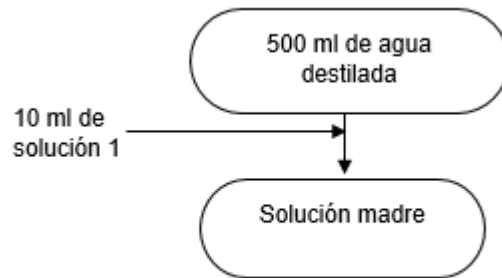
**Nota.** Representación mediante diagrama de flujo del modelo de preparación de la solución para medir metales pesados en el suelo. Fuente: Universidad Tecnológica de Rodeo).

En una bureta de 500 mL se vertió agua destilada hasta alcanzar el punto de 500 mL y con ayuda de una jeringa se depositó 10 mL de la alícuota tomada del suelo en la bureta, obteniendo la solución madre, como me muestra en la figura 21.



**Figura 21.**

*Elaboración de solución madre*



**Nota.** Representación mediante diagrama de flujo de la elaboración de la solución madre.

Fuente: Universidad Tecnológica de Rodeo

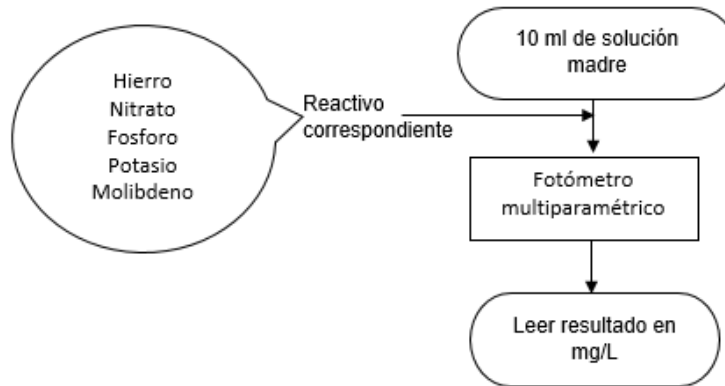
De la solución madre se tomaron muestras de 10 mL con ayuda de una jeringa y se le añadió un sobre de reactivó para evaluar los componentes y tomar las lecturas en el equipo portátil fotómetro multiparamétrico en un tiempo de 4 minutos, como se explica en la figura 22 donde se observan los pasos correspondientes del proceso.

Los reactivos correspondientes son el nitrato, fósforo, potasio, molibdeno y hierro, para el caso de calcio y magnesio se utilizó un medio de un búfer donde se agregaron 5 gotas y 1 mL de sustancia, para ingresarlo a las lecturas.

En el Fotómetro multiparamétrico se elige el método dependiendo de las sustancias que se introduzcan, así mismo esta herramienta proporciona diferentes tipos de opciones de lectura, una de ellas da el resultado instantáneamente, mientras que la otra toma un tiempo de 4 minutos para brindar los resultados expresados en unidades de mg/L.

**Figura 22.**

*Determinación de metales*



**Nota.** Representación mediante diagrama de flujo de la determinación de metales en laboratorio. Fuente: Universidad Tecnológica de Rodeo

### 3.4 Cuarta Fase. Estimación financiera

Una de las grandes ventajas que tienen las técnicas biológicas son los costos operacionales que maneja, como se mencionó en el capítulo anterior, la fitorremediación debido a que aprovecha la luz solar puede reducir los costos hasta en un 80% en comparación de los procesos convencionales, los costos dependiendo de la concentración de los contaminantes y el área a remediar, un costo promedio de fitorremediación es de 17.000 a 21.000 dólares por hectárea remediada (Bravo & Olivera, 2020)., sin embargo también se encuentran datos donde el precio varían de 24.000 a 40.000 dólares por hectárea (González, 2010, p. 6). Mientras que la técnica de biocarbón tiene costos promedio son de 114 USD/ton y como implementación puede tener costos de 4000 dólares por hectárea (Bravo & Olivera, 2020, p. 32).

La evaluación financiera se realiza a los tratamientos de biocarbón y fitorremediación en un tiempo de cuatro meses y dos meses respectivamente teniendo como unidad monetaria de valor corriente el peso colombiano (COP).

### 3.4.1 Costos operacionales

Los costos de operación se refieren a los gastos que conlleva la operación de un componente, equipo, instalación o negocio. Es el costo de los recursos que se utilizan en una organización para continuar existiendo. Los costos que se verán a continuación son de pruebas realizadas a escala laboratorio, en la tabla 12 y 13 se expresan los costos de implementación de la tecnología de biocarbón y fitorremediación respectivamente.

3.4.1.a Biocarbón. En este caso se llevará a cabo una descripción de los costos de inversión y operación de la técnica de biocarbón aplicada a escala laboratorio, para la remediación de 900 g de suelo, los análisis fisicoquímicos se realizaron dos veces en la muestra, al inicio de la remediación y al finalizar los cuatro meses, en la tabla 12 se desglosan los costos de los insumos y equipos utilizados en la técnica del biocarbón.

**Tabla 12.**

*Costos operacionales de la técnica de biocarbón a nivel laboratorio*

<b>Pruebas de laboratorio</b>	Costo en pesos Colombianos
pH	29.000
Conductividad Eléctrica	33.600
Metales	800.000
TPH	120.000
<b>Muestra sintética</b>	
Suelo (900 g)	3.926
Crudo (50 ml)	49.164
Macetas (3)	39.266
biocarbón ( Kg)	18.000
<b>Laboratorio Materiales</b>	
Vasos de precipitados (1000 mL)	32.986
Varilla de vidrio	9.585
Agitador magnético	52.000
plancha de agitación	923.403

Tabla 12. (Continuación)

<b>Pruebas de laboratorio</b>	Costo en pesos Colombianos
Tamiz	115.333
Balanza analítica	5.864.750
<b>Total</b>	<b>8.091.013</b>

**Nota.** Presupuesto en pesos Colombianos para la implementación de la técnica de biocarbón a escala laboratorio. Fuente: Elaboración propia.

3.4.1.b Fitorremediación. En este caso se llevará a cabo una descripción de los costos de inversión y operación de la técnica de fitorremediación aplicada a escala laboratorio, para la remediación de 1.5 Kg de suelo, los análisis fisicoquímicos se realizaron dos veces en la muestra al inicio de la remediación y al finalizar los dos meses, en la tabla 13 se desglosan los costos de los insumos y equipos utilizados para la técnica de Fitorremediación.

**Tabla 13.**

*Costos operacionales de la técnica de fitorremediación*

<b>Pruebas de laboratorio</b>	Costo en pesos Colombianos
Ph	29.000
Conductividad eléctrica	33.600
Metales	800.000
TPH	120.000
<b>Muestra sintética</b>	
Crudo (50 ml)	49.164
semillas (1Kg)	88.458
Agua destilada 20L	80.116
Riego (2 meses)	335.000
<b>Laboratorio materiales</b>	
Mufla	3.673.661
vasos de precipitado (1000 mL)	32.986
Bureta (500 mL)	137.247
Crisol	118.983
Desecador	326.849

Tabla 13. (Continuación)

<b>Pruebas de laboratorio</b>	<b>Costo en pesos Colombianos</b>
Tamiz	115.333
Gramera	136.100
Total	6.076.502

**Nota.** Presupuesto en pesos Colombianos para la implementación de la técnica de Fitorremediación a escala laboratorio.

## **4. DISCUSIÓN Y RESULTADOS**

En este capítulo se lleva a cabo la discusión de resultados por parte de las pruebas realizadas de biocarbón y fitorremediación vistas en el anterior capítulo y el análisis de la factibilidad de poder implementarse a gran escala.

### **4.1 Análisis de matriz de selección**

De acuerdo a la metodología donde se desarrolló la matriz mediante el sistema Regime, se obtuvo que las tecnologías más eficientes en cuanto a los parámetros establecidos para la hora de implementarlas en suelos contaminados con hidrocarburo fueron fitorremediación y biolabranza en este caso con biocarbón, debido a que estas técnicas protegen el medio ambiente y la salud, tiene compatibilidad con las leyes ambientales, son efectivas y su permanencia es a largo plazo, reducen la toxicidad y son de bajo costo; en la matriz se observa que el método de compostaje está en el mismo nivel de aplicabilidad que el método biolabranza, sin embargo en el presente trabajo no se realizara esta técnica. Las biopilas es un método que implica excavar el suelo contaminado, lo que a futuro puede generar daño ambiental por la liberación de vapores o gases contaminantes a la atmósfera, así mismo el costo de este método varia de 130 a 260 USD/ m<sup>3</sup> (Araujo, 2021, p. 9). Por lo tanto en la matriz se evalúa como un método poco viable de implementar.

### **4.2 Análisis de caracterización del suelo y metodologías a escala laboratorio**

En la tabla 14 se observan los valores óptimos para suelo cafetaleros siendo este considerado uno de los alimentos más exportados y de mejor calidad en Colombia, estos valores se van a tomar como referencia con el fin de comparar los resultados obtenidos en las dos técnicas implementadas.

**Tabla 14.***Valores de minerales y metales en suelo óptimo*

	Unidades	Bajo	Medio	Óptimo	Alto
pH		<5	5-6	6-7	>7
Ca	Meq/100g	<4	4-6	6-15	>15
Mg	Meq/100g	<1	1-3	3-6	>6
K	Meq/100g	<0.2	0.2- 0.5	0.5- 0.8	>0.8
P	PPM	<12	12-20	20-50	>50
Fe	PPM	<5	5-10	10-50	>50
Cu	PPM	<0.5	0.5-1	1-20	>20
Zn	PPM	<2	2-3	3-10	>10
Mn	PPM	<5	5-10	10-50	>50
B	PPM	<0.2	0.2-0.5	0.5-1	>1
S	PMM	<12	12-50	20-50	>50
Mo	%	<2	2-5	5-10	>10

**Nota.** La Presente tabla muestra el rango de valores en los cuales se puede encontrar el suelo y la calidad que representa. Tomado de Martínez, J. (2002). Manual técnico para el manejo Manual técnico para el manejo de la fertilización de suelos cafetaleros . (Martínez, 2002).

La tabla 15 indica los parámetros fisicoquímicos para la caracterización del suelo contaminado que se evaluaron para las diferentes técnicas y los resultados obtenidos.

**Tabla 15.***Resultados de análisis fisicoquímico con biocarbón y fitorremediación aplicada en el suelo contaminado*

TÉCNICA	FITORREMEDIACIÓN		BIOCARBÓN		
Parámetro	Muestra inicial	Muestra final	Parámetro	Muestra inicial	Muestra final
PH	5,4	7,5	PH	5,6	5,1
Conductividad eléctrica	1,25	1,5	C.E	1,4	0,2
Fe (ppm)	0,4	0,39	Fe (ppm)	7639	5866
N (ppm)	5	1,7	N (ppm)	773	1343
Mn (ppm)	-	-	Mn (ppm)	74	90
P (ppm)	0,9	0,35	P (ppm)	30	297
K (ppm)	0,8	1,7	K (ppm)	916	1944

Tabla 16. (Continuación)

TÉCNICA	FITORREMEDIACIÓN		BIOCARBÓN		
Zn (ppm)	-	-	Zn (ppm)	30	23
Ca (ppm)	1,2	0	Ca (ppm)	-	-
Mo (ppm)	-	-	Mo (ppm)	14	16
Pb (ppm)	104,5	36	Pb (ppm)	12	10
TPH	2,09	1,61	TPH	7,96	4,15

**nota:** la presente tabla se realizó con resultados obtenidos en este estudio y otros valores de referencia. tomado de arenas, d. (2018). proceso de biodegradación para el tratamiento de derrames de petróleo por medio de pseudomonas. retrieved July 4, 2022, from <https://repository.uamerica.edu.co/bitstream/20.500.11839/7130/1/392273-2018-i-ga.pdf> y arenas, d. (2018). proceso de biodegradación para el tratamiento de derrames de petróleo por medio de pseudomonas. retrieved July 4, 2022, from <https://repository.uamerica.edu.co/bitstream/20.500.11839/7130/1/392273-2018-i-ga.pdf> fuente: (arenas, 2018) y (casas & pineda, 2021).

Para poder estandarizar el cambio generado en el suelo por las técnicas de remediación estudiadas en el presente proyecto, el cual se tomará basado en el cambio total de algunas de las propiedades, lo que será indicio de la pérdida de minerales o ganancia de estos:

- PH:

En el caso de la fitorremediación se presenta el siguiente cambio total del valor o porcentaje de variación:

$$PH = \frac{7.5 - 5.4}{5.4} \times 100 = 38.88\%$$

Es posible observar cómo en esta técnica se presenta un cambio positivo, ahora comparando por biolabranza se obtiene el siguiente resultado:

$$PH = \frac{5.1 - 5.6}{5.1} \times 100 = -9.80\%$$



Los resultados del cambio en PH, presentan una leve disminución lo que ha acidificado el suelo posterior al tratamiento.

Respecto a los minerales se pueden observar los siguientes resultados:

- Hierro:

Por fitorremediación se obtiene:

$$Fe = \frac{0.39 - 0.4}{0.4} \times 100 = -2.5\%$$

- Nitrógeno

$$N = \frac{1.7 - 5}{5} \times 100 = -66\%$$

- Fósforo

$$P = \frac{0.35 - 0.9}{0.9} \times 100 = -61\%$$

- Potasio:

$$K = \frac{1.7 - 0.8}{0.8} \times 100 = 112.5\%$$

- Calcio

$$Ca = 100\%$$

Respecto a biolabranza se obtiene:

- Hierro

$$Fe = \frac{5866 - 7639}{7639} \times 100 = -23.20\%$$

- Manganeseo

$$Mn = \frac{90 - 74}{74} \times 100 = 21.62\%$$

- Zinc

$$Zn = \frac{23 - 30}{30} \times 100 = -23.3\%$$

- Molibdeno

$$Mo = \frac{16 - 20}{20} \times 100 = -20\%$$

- Plomo

$$Pb = \frac{10 - 12}{12} \times 100 = -16.6\%$$

Los valores obtenidos para algunos metales negativos, esto se debe a que el hidrocarburo o la tecnología de remediación disminuyó el valor de los mismos, a continuación, se relaciona la cantidad de los metales que el suelo necesita para considerarse un suelo con calidad óptima.

En el caso de la técnica de fitorremediación los índices en las muestras iniciales fueron menores debido al tipo de suelo manejado, puesto que en la región donde fue tomado, los suelos se caracterizan por ser pedregosos, compactados, erosionados, etc., además este suelo cuenta con menor disponibilidad de materia orgánica, por ende no se contó con la nutrición adecuada al momento de replicar la técnica fitorremediadora, que pueda ayudar a la planta a absorber el crudo, por otro lado el tiempo de remediación no fue largo lo cual disminuyó la posibilidad de obtener resultados prometedores, a continuación, se profundizará en los diferentes en los diferentes componentes.

#### **4.2.1 pH**

Para el resultado de pH en biocarbón, se obtuvo como muestra inicial valores cercanos a 5, el pH del suelo utilizado tenía tendencia neutra, puesto que se trataba de una tierra abonada y adecuada para plantación, es decir que al ocurrir el derrame de hidrocarburo el pH disminuyó drásticamente a 5.6.

Esto se debe a que el hidrocarburo en el suelo hace que el pH disminuya, debido a que facilita la oxidación de cadenas carbonadas y en el proceso de biodegradación libera ácidos grasos y compuestos de cadena larga que actúan como ácidos débiles, esta acidez es un limitante para los procesos de biodegradación (Castellanos, Isaza, & Torres, 2015). Para la técnica de biocarbón el pH disminuyó 4 décimas de 5.6 a 5.1,

esto se pudo deber a la concentración del biocarbón la cual no fue la apropiada para este tipo de suelo, saturándolo y no cumpliendo la función.

Por otra parte, el valor de pH obtenido se encuentra por debajo del rango aceptable para suelos en óptimas condiciones que es de 6.1 a 7.3 y también está por debajo del rango que se propone en la normatividad Luisiana la cual oscila entre 6.0 y 9.0.

Para la técnica de fitorremediación, se observa como paso de un pH levemente ácido 5.4 a un pH cercano a la neutralidad 7.5, que favorece el crecimiento de la plantación, a diferencia de la técnica de biocarbón, la cual en primera medida acidificaría el suelo, lo que provocaría la liberación de cuerpos libres de H y aumento de agentes oxidantes, afectando los canales de intercambio iónico en minerales (Durán, 2017, p. 14).

#### **4.2.2 Conductividad eléctrica**

La conductividad eléctrica por otro lado, para el caso del biocarbón pasó de ser un suelo salino a no salino, esta propiedad disminuyó drásticamente en presencia del hidrocarburo lo cual se debe a la ausencia de sales y bases fuertes en la composición de los hidrocarburos, que al entrar en contacto con el suelo reduce la concentración de sales y genera disminución en la conductividad eléctrica. Así mismo el biocarbón puede generar una mayor reducción de la conductividad eléctrica, puesto que al adicionar materia orgánica se acumulan nutrientes y se retiene el agua, por tanto la reducción de la conductividad eléctrica que presentan una baja salinidad y en términos normativos son conformes a lo reglamentado en la Norma Louisiana 29B, en donde se establece una conductividad máxima permisible de 4000  $\mu\text{S}/\text{cm}$  (Santamaria, Rossignoli, Sierra, & Ramírez, 2021, p.19).

Para el caso de fitorremediación la conductividad eléctrica aumentó, sin embargo se sigue considerando como suelo poco salino y se encuentra dentro del rango permisible según la norma Louisiana 29B.

Así mismo la acumulación de sales afecta la productividad de las plantas o de cualquier cultivo, por ende la calidad ambiental del ecosistema, debido a que modifican la variación del potencial hídrico en ese suelo, inhibe el crecimiento de las plantas, aumenta la concentración de iones que afectan la fisiología de la flora, mientras que en suelos no salinos o ligeramente salinos los efectos en los cultivos o plantaciones son imperceptibles (Gallart-Martinez, 2017, p. 4).

Para el proceso de biocarbón algunos metales disminuyeron, mientras que otros aumentaron, los hidrocarburos tienen la capacidad de aumentar metales como el manganeso y el hierro intercambiable.

Algunos metales pesados como el plomo, zinc y titanio disminuyeron por causa del biocarbón, según la agencia de protección ambiental (EPA) el límite permisible de plomo en suelos es de 10mg/kg lo cual establece que el plomo está dentro de los límites según la EPA, según la normatividad Luisiana también se encuentra dentro del límite permisible que es 500 mg/kg

El plomo en el suelo es absorbido por las plantas, llegando a la cadena trófica, poniendo en peligro el ambiente y al ser humano ya que al entrar en contacto con el organismo daña los diferentes órganos, provocando malformaciones, inmunotoxicidad, deficiencia renal entre otras (Londoño, 2020, p.27).

#### **4.2.3 Zinc**

Este elemento interviene en el metabolismo celular y esencial en el desarrollo de diferentes especies vegetales y animales. El zinc en suelos agrícolas varía de 10 a 100 mg/kg, lo que indica que es un elemento esencial para las plantas. En concentraciones superiores a 400 mg/kg se considera tóxico, en estas concentraciones causa problemas de crecimiento reducido e inhibición de la fijación del CO<sub>2</sub>. En el suelo causa deterioro en la estructura física cambiando la textura, compactación y consistencia (Rebaza & Valverde, 2019, p. 19).

Para la técnica de biocarbón el nivel de zinc disminuyó de 30 a 23, por lo cual se encuentra en el rango de límite permisible dentro de la norma Louisiana que está por debajo de 500 mg/Kg.

#### **4.2.4 Manganese**

El manganeso es un elemento fundamental para las plantas, puesto que ayuda en el proceso de fotosíntesis y en funciones enzimáticas, en deficiencia de manganeso disminuye la producción de materia seca, clorofila y fotosíntesis. La concentración crítica puede variar en los distintos cultivos, sin embargo en términos generales, los problemas de toxicidad debido al exceso se dan cuando las concentraciones exceden los 500 mg/kg. En las especies de plantas se puede asociar con aparición de manchas café, necrosis o deformación foliar (Valdivia, 2020, p. 11).

El biocarbón aumentó la concentración de manganeso llevándolo por fuera de los valores óptimos para suelo de 10 a 50 ppm.

#### **4.2.5 Hierro**

Con respecto a los micronutrientes como el hierro, el cual es fundamental para el crecimiento de las plantas ya que interviene en el proceso de síntesis de clorofila, encargado de la coloración adecuada de plantas y funcionamiento adecuado de la fotosíntesis. En los resultados para la fitorremediación al inicio y final se obtuvieron resultados similares de 0.4 ppm, con respecto a la técnica del biocarbón, se observa la disminución de la concentración del mineral, el cual presentaba niveles elevados provocando toxicidad en el suelo, lo cual conlleva a necrosis en la planta. Por lo que al llevar a cabo la técnica de biocarbón, este disminuye de 7639 ppm a 5866 ppm, este valor fue alto ya que el biocarbón seca el suelo y el hierro en suelos secos es alta por la presencia de óxidos de hierro (Noguera & Armado, 2010, p. 7). El hierro óptimo para un suelo fértil se encuentra en un rango de 10-50 ppm por lo cual ninguna de las técnicas se acercó al valor correspondiente.

#### **4.2.6 Molibdeno**

La toxicidad del molibdeno se manifiesta mayormente en suelos alcalinos orgánicos, el molibdeno es esencial en la vida, su función en las plantas y suelos es estimular la fijación de nitrógeno y reducir el nitrato, la concentración promedio de molibdeno en suelos óptimos es de 5 a 10 ppm y las altas concentraciones se asocian con material sedimentario, sin embargo el resultado final fue de 16 ppm que se encuentra dentro del límite de la norma Louisiana que es de 500 ppm como valor máximo (Universidad de Chile, 2005, p. 24).

El protocolo de Louisiana indica que el límite de aceites y grasas es de 1 %, para la muestra se obtuvo un valor de 4,7 % lo que determina que se encuentra por encima de la norma, sin embargo, comparándola con el resultado de la primera muestra que fue de 7.2 % se evidencia que el biocarbón funcionó para disminuir los niveles de TPH en la muestra.

#### **4.2.7 Nitrógeno**

El nitrógeno favorece el desarrollo de la masa foliar, produciendo buena captación de luz y mejorando la capacidad fotosintética, las plantas con deficiencia de nitrógeno muestran crecimiento lento y retrasado, decoloración amarilla en las hojas y muerte prematura de las mismas, con niveles de nitrógeno altos se produce un desbalance entre el área y el radio foliar, provocando mayor transpiración y baja absorción de agua provocando estrés hídrico causando podredumbre (Quispe & Zavaleta, 2020, p. 14-15). El nitrógeno obtuvo un nivel inicial de 5 ppm, el cual disminuyó a 1.7 ppm.

#### **4.2.8 Fósforo**

El fósforo desempeña un papel importante para el crecimiento y desarrollo de organismos vivos, ayuda en la construcción de biomasa, obtención de nutrientes,

participa en procesos fisiológicos de la planta y en el proceso de fotosíntesis. La deficiencia de este elemento, genera retraso en el crecimiento vegetal y coloración purpura en las hojas. Igualmente, la vegetación presenta disminución en la eficiencia fotosintética lo que sugiere un retraso en el proceso de maduración (Palomares, 2021, p. 24).

El nivel óptimo de fósforo se encuentra de 20 a 50 ppm, en la técnica se observó el que la concentración de fósforo en el suelo disminuyó de 0.9 a 0.35 ppm esto indica que el nivel está muy por debajo del rango óptimo.

#### **4.2.9 Potasio**

El potasio es indispensable para la vegetación, debido a que está involucrado en el crecimiento, desarrollo, defensa y señalización de las plantas, también mejora la absorción de agua y nutrientes. Este elemento está involucrado en aproximadamente 60 reacciones enzimáticas como fotosíntesis, respiración, translocación y síntesis de proteínas. Las plantaciones con deficiencia de potasio presentan disminución fotosintética, enanismo y necrosis (Soler, 2017, p. 22).

El nivel de potasio en el suelo óptimo se encuentra 195-312 ppm, mientras que cuando ocurrió el derrame bajó a 0.8 ppm, con el proceso de fitorremediación el potasio pudo subir a 1.7 ppm.

#### **4.2.10 Porcentaje de remediación**

La cuantificación de disminución de TPH indica el porcentaje de remediación del suelo, debido a que entre menor sea este valor, la cantidad de hidrocarburo será menor y por lo tanto la contaminación se dará en una mínima medida.

### **Ecuación 2.**

*Porcentaje de remediación*

$$\% \text{ Remediación} = 100 - \frac{\text{TPH final} * 100\%}{\text{TPH inicial}}$$

Nota.: (Casas & Pineda, 2021).

% Remediación para biocarbón

$$\% \text{ Remediación} = 100 - \frac{4.15 * 100\%}{7.96} = 47,86\%$$

% Remediación para Fitorremediación

$$\% \text{ Remediación} = 100 - \frac{1.61 * 100\%}{2.09} = 29.81\%$$

La remediación fue más efectiva para el caso de biocarbón con un porcentaje de 47.8% que demuestra que removió aproximadamente la mitad del hidrocarburo que había en un principio, mientras que en el caso de fitorremediación el porcentaje de remediación fue de 29.8%, esto indica que las dos técnicas de remediación lograron disminuir el porcentaje de hidrocarburos en el suelo.

### **4.3 Análisis financiero**

Para el respectivo análisis se realizó un cuadro comparativo, en el cual se fijaron tres referencias de valores para las pruebas de laboratorio y equipos solicitados. En la tabla 16 se observan las referencias tomadas para la selección de los insumos.



**Tabla 16.**

Análisis precio de equipos y materias de gastos operativos

Costo operacional	Opción 1	Opción 2	Opción 3
<b>Pruebas de laboratorio</b>			
PH	\$12.169,59 Acueducto	\$17.000 Univerisdad nacional	\$36.000 BAC Engineering
Conductividad electrica	\$14.602,92 Acueducto	\$125.000 Universidad Nacional	\$28.307 Universidad Javeriana
Metales	\$216.000 Iuniversidad Jorge Tadeo Lozano (4 metales pesados)	\$417.203 Caracterización 5 a 8 metales universidad Javeriana	\$98.000 Por metal universidad nacional
TPH	\$395.480,29 Acueducto	\$142.861 Universidad Javeriana	
<b>Muestra sintetica</b>			
Semillas (1kg)	\$80.000 PriceSmart	\$122.000 Hydro Environment	\$63376.47 Mercado libre
Agua destilada 20 L	\$55.000 Mercado libre	\$89.000 Vadequimica	\$96.350 Arquimi
Suelo (900 g)	\$ 3.800 Homecenter	3.078 Mercado libre	\$4.900 tumatera.com
Crudo (50 ml)	\$81.225 Ibex	\$34.885 Eurostoxx	\$31.384 Dow Jones
Macetas (3)	\$32.900 Homecenter	\$39.900 Éxito	\$45.000 Sembramos
Riego (s meses)	\$450.000 Durman	\$300.000 prestación de servicios	\$255.000 Cronoshare
Bicarbon (kg)	\$25.700 Detercol	\$17.800 ECOQUIM	\$10.500 Mercado libre
<b>Laboratorio materiales</b>			
Vasos de precipitado (1000 ml)	\$34.034 Marca Duran	\$21.901,11 Grupo didacta	\$43.024 Instrumentalia
Mufla	\$3.479.985,84 Mercado libre	\$2.980.000 QUIMICOMPANY	\$4.561.000 ARDER
Varilla de vidrio	\$7.354,97 Pyrex	\$19.214,12 mercado libre	\$2.186,14 merca lab
Bureta (500 ml)	\$257.100 Blamis	\$74.198,39 Labotienda	\$80.444 Lbpro
Crisol	\$40.848 Amazon	\$110.402 Terriza	\$205.700 Mercado libre
Agitador magnetico	\$11.000 mercado libre	\$90.750 Amazon	\$54.250 Hash Colombia
Desecador	\$566.200 Normax	\$103.116 HUAOU	\$311.231 Instrumentalia
Plancha de agitación	519.900 liberty lab	\$999.999 Mercado libre	\$1.250.312 Kassel Group
Tamiz	\$70.000 Mercado libre	\$153.334,30 Amazon	\$122.667,44 Kasalab
Gramera	\$50.000 Homecenter	\$74.300 Badecol	\$284.000 Silver Max
Balanza analitica	\$3.225.000 ADB/ADJ	\$5.850.000 BOECO	\$8.519.250 Dakks

Nota. Los valores consultados han sido mediante vía internet o formularios en línea tomados de las referencias observada en la tabla 16. Fuente:

En la tabla 16 se observa que equipos como la balanza y mufla tienen variación entre una referencia y otra, esto se debe a los accesorios de cada equipo, el rango, la precisión con la que cuenta y la marca o precios de importación al país, por lo que hay una gran variedad de estos equipos en el mercado que puedan ser considerados.

Al tener en cuenta el costo de ambos tipos de ensayo, se observa cómo la tecnología del biocarbón presenta mayor cantidad en sus costos, para remediar 900 g de suelo contaminado, esto se debe a que incluye como proceso adicional la producción del biocarbón, siendo una de las etapas fundamentales el correcto pesaje del lignito para la producción adecuada del mismo, además el proceso de pirólisis requiere de altos gastos energéticos en forma de calor para secar el lignito y transformarlo en este material, al modificar su red de transición vitria, siendo necesario incluir como gasto adicional la compra de una balanza analítica aumentado en exceso el costo operacional. En el caso de la fitorremediación para la remediación de 1.5 kg de suelo contaminado, el uso de mufla representa el mayor costo para llevar a cabo dicha técnica representando el 35 % sobre el total de costos, siendo relativamente económico al ser comparado con el gasto en equipo registrado por la balanza analítica.

**Tabla 17.**

*Comparación en costos de alternativas seleccionadas*

<b>COMPRACIÓN POR PRUEBA</b>		
<b>COSTOS</b>	<b>Técnica de biocarbón</b>	<b>Técnica de fitorremediación</b>
<b>Pruebas de laboratorio</b>		
pH	\$ 29.000	\$ 29.000
Conductividad Eléctrica	\$ 33.600	\$ 33.600
Metales	\$ 800.000	\$ 800.000
TPH	\$120.000	\$120.000
<b>Muestra sintética</b>		
Semillas (1kg)		\$ 88.458
Agua destilada		\$ 80.116
Suelo (900 g)	\$ 3.926	
Crudo (50 ml)	\$ 49.164	\$ 49.164

Tabla 17. (Continuación)

Macetas (3)	\$ 39.266	
Riego (2 meses)		\$ 335.000
Biocarbón (100 kg)	\$ 18.000	
<b>Laboratorio materiales</b>		
Vasos de precipitado (1000 ml)	\$ 32.986	\$ 32.986
Mufla		\$ 3.673.661
Varilla de vidrio	\$ 9.585	
Bureta (500 ml)		\$ 137.147
Crisol		\$ 118.983
Agitador magnético	\$ 52.000	
Desecador		\$ 326.849
Plancha de agitación	\$ 923.403	
Tamiz	\$ 115.333	\$ 115.333
Gramera		\$ 136.100
Balanza analítica	\$ 5.864.750	
<b>TOTAL</b>	\$ 8.091.013	\$ 6.076.397

**Nota.** Para el cálculo de los anteriores precios, se utiliza la media o promedio entre los valores comerciales consultados en la tabla 16, siendo los establecidos para la compra de equipos, reactivos y pago de servicios asignados para el proyecto.

En la tabla 17 se observa la comparación de precios de las técnicas seleccionadas, donde el método más costoso fue el de biocarbón con un valor de \$ 8.091.013 millones de pesos Colombianos, en comparación con el costo de la técnica de Fitorremediación que fue \$6.076.397 millones de pesos Colombianos.

Con respecto a los gastos térmicos, en el secado por plancha del biocarbón se considera un costo aproximado de \$923.405 de pesos Colombianos, que representa sobre el total un 11.75%, el cual no requiere una fuente térmica o gasto en forma de calor elevados como ocurre en la mufla por fitorremediación.

Referente a los gastos operacionales, para ambos casos hay una misma distribución ya que el número de técnicos y profesionales es el mismo que ha realizado cada proceso de estudio y no se ha contratado mano de obra adicional fuera de este.

Como gasto adicional el proceso de utilización de agua por riego de \$335.000 pesos Colombianos y las semillas son exclusivos para la fitorremediación, cosa contraria a lo que ocurre con el exuberante gasto en la compra de la balanza analítica en la producción de biocarbón, ya que este equipo de laboratorio puede ser usado en ambos casos siendo una inversión a largo plazo más que un gasto.

Finalmente, dentro de los gastos por servicios públicos, se ha analizado la cantidad de agua gastada durante el desarrollo de las presentes técnicas al igual que el gasto incurrido en electricidad por el uso de equipos durante el proceso tanto de secado, como de medición de masa y en el desecador, quienes representarán en gastos administrativos, que para el valor total del proyecto no representan una alta influencia en el cambio para la decisión del tipo de técnica.

Sin embargo, al obtener los equipos en un laboratorio externo los costos pueden variar bajando un 70%, debido a que los insumos necesarios como las semillas, el agua, el biocarbón, la tierra, el crudo, las macetas no generan gran costo.

## 5. CONCLUSIONES

Las técnicas seleccionadas fitorremediación y Biocarbón cumplen con los parámetros establecidos por la EPA (Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos).

Al momento de escoger una técnica de remediación, teniendo en cuenta los costos se puede afirmar que son técnicas económicamente viables para la realización de remediación.

Se observa que la biorremediación con biocarbón presenta un cambio controlado del intercambio catiónico o de regulación de metales y minerales en suelos, lo cual puede ser de amplia importancia al momento de encontrar suelos con leves daños por derrames de hidrocarburos, sin embargo, al obtener grandes cantidades como lo observado a escala laboratorio en el presente proyecto, puesto que aunque presenta mayores controles de limpieza comparado con la fitorremediación, la acidificación del suelo pasado el tiempo de estudio, conlleva al daño en canales de transporte de cationes y aniones, por lo que muchos minerales de interés para el óptimo crecimiento en plantas se verán afectados, presentando un crecimiento lento o muerte de hojas en la planta, daños en el tallo y muerte de las semillas.

Al no adicionar la cantidad adecuada de biocarbón el suelo presentó pérdida de humedad, disminuyendo su capacidad de retención de agua y minerales, aumentando elementos tóxicos en gran medida como el hierro, sin embargo, este método logró reducir el nivel de hidrocarburo en el suelo en los cuatro meses, se podría concluir que en un periodo mayor de tiempo el biocarbón absorbería todo el hidrocarburo presente en el suelo.

El proceso de fitorremediación, aunque aumentó el pH siendo este un parámetro importante para las diferentes propiedades del suelo, algunos minerales necesarios se vieron afectados como en el caso del calcio el cual desapareció por completo del suelo,

para este método la mayoría de elementos estuvo por debajo de los niveles óptimos en suelo fértil, esto pudo haber sido por corto tiempo del experimento y por el suelo que se utilizó, suelo pedregoso, compactados, y erosionados. Como se mencionó anteriormente para que sea factible el proceso de fitorremediación se debe establecer mínimo en un lapso de 4 meses.

Ninguna de las tecnologías utilizadas fue satisfactoria para conseguir un suelo fértil, sin embargo en ambas se lograron reducir los niveles de hidrocarburo siendo posible realizarlas a escala industrial para disminuir la concentración de metales e hidrocarburo en el suelo reduciendo la toxicidad de los ecosistemas y dando un aspecto favorable a los lugares, esto con el fin de reducir el nivel de contaminación en aguas y suelos, además de disminuir el riesgo de sufrir enfermedades provenientes de la interacción con el hidrocarburo.

El hierro óptimo para un suelo fértil se encuentra en un rango de 10-50 ppm por lo cual se concluye que ninguna de las técnicas se acercó al valor correspondiente durante la implementación, puesto que se obtuvieron resultados entre un rango de 7639 - 5866 ppm, esta concentración alta en futuro generará toxicidad en el suelo; caso contrario en el fósforo donde se evidencia baja concentración de 0.9 a 0.35 ppm y el rango óptimo es de 20 a 50 ppm esto indica que el nivel está muy por debajo del rango óptimo y en futuro generará deformación en frutos, por lo se puede afirmar que ninguna de las técnicas generó una acertada concentración respecto al fósforo.

Financieramente las técnicas en pesos colombianos fueron costosas para la cantidad de suelo contaminado que se trató, sin embargo los costos elevados se dieron por los equipos de laboratorio utilizados, mas no por los insumos requeridos para llevar a cabo las técnicas correspondientes, si se comparan con otras técnicas, las técnicas fitorremediación y biocarbon son de menor costo.

El precio más elevado encontrado en fitorremediación es la mufla, la cual representa el 64.61% del costo total, sin embargo es inferior al costo que representa la

adquisición de una balanza analítica para la técnica de biocarbón, la cual representa el 74.60% del total.

La técnica de fitorremediación logro la remoción de 29.81% del hidrocarburo en 1500 g de suelo, mientras que el biocarbón removió el 47.86% de hidrocarburo en 900 g de suelo.

El uso de biocarbón para remediar suelo contaminado con hidrocarburo pesado resulto tener una mayor efectividad, remediando un 37% del suelo por encima de la técnica de fitorremediación.

## BIBLIOGRAFIA

- Abdulkadir, M. (2017). Introduction to soil. En Fundamental of soil science. Thelemon productions. [https://www.researchgate.net/publication/312220368\\_chapter\\_one-introduction\\_to\\_soil](https://www.researchgate.net/publication/312220368_chapter_one-introduction_to_soil)
- Ahmed, F., & fakhruddin, A. (2018). A review on environmental contamination of petroleum hydrocarbons and its biodegradation. *Environmental Sciences & natural Resources*. 11 (3), pp. 1-7. doi.org/10.19080/IJESNR.2018.11.555811.
- Alba, G. (2011). Estudio comparativo de tres diferentes métodos de remediación de suelo tipo gleysol contaminado con hidrocarburo. (Trabajo de grado.) Cidetec. [https://cidetec.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1021/221/1/comparación de la electrorremediación de suelo tipo gleysol contaminado con hidrocarburo con el método de lavado con tritón x-114 y la biorremediación con cultivo sólido\\_reees.pdf](https://cidetec.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1021/221/1/comparación_de_la_electrorremediación_de_suelo_tipo_gleysol_contaminado_con_hidrocarburo_con_el_método_de_lavado_con_tritón_x-114_y_la_biorremediación_con_cultivo_sólido_reees.pdf)
- Albornoz, I. (2014). Evaluación de la biorremediación por biopilas para la descontaminación de suelos con hidrocarburos – estudio de caso planta el recreo vereda la patagonia municipio de sancarlos de guaroa. (Trabajo de grado.) Universidad del bosque. [https://www.academia.edu/36642249/evaluación\\_de\\_la\\_biorremediación](https://www.academia.edu/36642249/evaluación_de_la_biorremediación)
- Álvarez, I. (2019). Tratamiento de suelos contaminados por metales mediante combinación de técnicas de fitorremediación con adición de biochar. (Tesis doctoral.) Universidad politecnica de Madrid. [https://oa.upm.es/55865/1/marisa\\_alvarez\\_calvo.pdf](https://oa.upm.es/55865/1/marisa_alvarez_calvo.pdf)
- Amador, a., bataller, e., & venta, m. (2015). Tratamiento de lodos, generalidades y aplicaciones. *Revista cenic ciencias químicas*, 46, pp 1-10 <https://www.redalyc.org/pdf/1816/181642434003.pdf>
- Andrades, m., moliner, a., & masaguer, a. (2015). Prácticas de edafología : métodos didácticos para análisis de suelos. *Material didáctico. Agricultura y alimentación*, 15(7), 82.



- Araujo, j. (2021). Modelización de sistemas de tratamiento biológico (biopilas y landfarming) de suelos con hidrocarburos de petróleo. (Trabajo de grado.) Universidad Central de Ecuador. Repositorio Digital. <http://www.dspace.uce.edu.ec/handle/25000/24388>
- Arenas, d. (2018). Proceso de biodegradación para el tratamiento de derrames de petróleo por medio de pseudomonas. (Trabajo de grado.) Fundación Universidad de América. Repositorio Institucional Lumieres. <https://repository.uamerica.edu.co/bitstream/20.500.11839/7130/1/392273-2018-i-ga.pdf>
- Arevalo, j., & ortiz, y. (2017). Evaluación de la efectividad de la técnica de bioaumentación en sedimentos contaminados con hidrocarburos de una estación de servicio de combustibles del municipio de san francisco putumayo. (Trabajo de grado.) Instituto Tecnológico del Putumayo. Repositorio Digital, [https://itp.edu.co/web2016/phocadownload/investigacion/semilleros/conservemos\\_nuestros\\_suelos/investigacion\\_bioaumentacion\\_sibundoy\\_\(2017\).pdf](https://itp.edu.co/web2016/phocadownload/investigacion/semilleros/conservemos_nuestros_suelos/investigacion_bioaumentacion_sibundoy_(2017).pdf)
- Balasubramanian, a. (2017). Physical properties of soils. [https://www.researchgate.net/publication/314501391\\_physical\\_properties\\_of\\_soils](https://www.researchgate.net/publication/314501391_physical_properties_of_soils)
- Barois, i., contreras, s., hernández, b., de los santos, m., martínez, f., & garcía, d. (2018). El suelo y el petróleo. Instituto de Ecología. [https://www.inecol.mx/inecol/images/pdf/folleto\\_suelo\\_petroleo\\_verfinal.pdf](https://www.inecol.mx/inecol/images/pdf/folleto_suelo_petroleo_verfinal.pdf)
- Bedoya, r. (2004). Implementación de un sistema landfarming para untratamiento de lodos contaminados con hidrocarburos refinería esmeraldas. (Tesis de Maestría.) Escuela Superior Politécnica de Chimborazo. Dirección de bibliotecas y recursos para el aprendizaje y la investigación . <http://dspace.esPOCH.edu.ec/handle/123456789/4310>
- Beltran, r. (2013). Guía de métodos de biorremediación para la recuperación de suelos contaminados por hidrocarburos. (Trabajo de grado.) Universidad Libre. Repositorio Unilibre.

<https://repository.unilibre.edu.co/bitstream/handle/10901/10607/TRABAJO%20FINAL%20cd.pdf>

- Bravo, d., & olivera, j. (2020). Revisión sistemática de las técnicas biológicas in situ para la remediación de suelos contaminados por metales pesados: biochar y fitorremediación. (Trabajo de grado.) Universidad César Vallejo. Repositorio USV. <https://hdl.handle.net/20.500.12692/63854>
- Bueno, r., & fernández, j. (2019). La capacidad de intercambio catiónico del suelo: una bóveda de nutrición clave en la producción de alimentos. *Ambito investigativo*. 4 (1), pp 8-12 <https://ciencia.lasalle.edu.co/ai>
- Burbano-orjuela, h. (2016). El suelo y su relación con los servicios ecosistémicos y la seguridad alimentaria. *Cienc. Agr. Julio-diciembre*, 33 (2), 117–124. <https://doi.org/10.22267/rcia.163302.58>
- Calderón-medina, c. L., bautista-mantilla, g. P., rojas-gonzález, s., calderón-medina, c. L., bautista-mantilla, g. P., & rojas-gonzález, s. (2018). Propiedades químicas, físicas y biológicas del suelo, indicadores del estado de diferentes ecosistemas en una terraza alta del departamento del meta. *Orinoquia*, 22(2), 141–157. <https://doi.org/10.22579/20112629.524>
- Casallas, s., & gonzález, m. (2020). Evaluación técnica de la recuperación ambiental del suelo por derrame de petróleo crudo mediante la aplicación de la tecnología oil spill eater ii en un pozo de un bloque en el casanare. (Trabajo de grado.) Fundación Universidad de América. Repositorio Lumieres. <http://repository.uamerica.edu.co/bitstream/20.500.11839/7816/1/5151163-2020-1-ip.pdf>
- Casas, s., & pineda, j. (2021). Evaluación de la fitorremediación de suelos contaminados con petróleo mediano por medio del pasto megathyrsus maximus, el girasol heliantbus annuus l y el trigo triticum aestivum en el campo velasquez de mansarovar energy ubicado en puerto boyacá. (Trabajo de grado.) Fundación Universidad de América. Repositorio Lumieres. <https://repository.uamerica.edu.co/bitstream/20.500.11839/8638/1/5161478->

2021-2-ip.pdf

Castaño, j. (2018). Evaluación técnico-financiera del proceso de fitorremediación con plantas gramíneas para mitigar derrames de crudo en el departamento del meta, colombia. (Trabajo de grado.) Fundación Universidad de America. Repositorio Lumieres.

<https://repository.uamerica.edu.co/bitstream/20.500.11839/6742/1/5131584-2018-1-ip.pdf>

Castebianco, j. A. (2018). Heavy metals remediation with potential application in cocoa cultivation. *Granja*, 27(1), 21–35. <https://doi.org/10.17163/lgr.n27.2018.02>

Castellanos, m., isaza, r., & torres, j. (2015). Evaluación de los hidrocarburos totales de petróleo (tph) sobre suelos urbanos en maicao, colombia. Retrieved december 8, 2021, from <http://www.scielo.org.co/pdf/rcq/v44n3/v44n3a02.pdf>

Cevallos, t., & garcía, j. (2018). "evaluación de la biodegradación de suelos contaminados con hidrocarburos utilizando aspergillus niger, pleurotus ostreatus y pseudomonas aeruginosa. (Trabajo de grado.) Universidad Politécnica Salesiana Sede Quito. Repositorio Digital. <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/15681/1/ups-qt12819.pdf>

Chan-quijano, j., sánchez, a., ochoa, s., martínez, p. (2014). Directrices para la remediación de suelos contaminados con hidrocarburos. *Teoría y praxis*. 17, pp 123-144. Retrieved from <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=456144902006>

Chatterjee, s., kumari, s., rath, s., & das, s. (2022). Prospects and scope of microbial bioremediation for the restoration of the contaminated sites. En *Microbial biodegradation and bioremediation*, 3–31. <https://doi.org/10.1016/b978-0-323-85455-9.00011-4>

Chinyere, c., shahsavari, e., surapaneni, a., shah, k., & ball, a. (2021). Can biochar be an effective and reliable biostimulating agent for the remediation of hydrocarbon-contaminated soils?. <https://reader.elsevier.com/reader/sd/pii/S0160412021001781?token=16a0705c989bcad2a4ae721819861e4e06ea750a18a2c836b450e66c162ff5ca5eee07a5931>

99270a50e3faaed831266&originregion=us-east-1&origincreation=20210609203646

- Cho chen, o. (2018). Comparación de la diversidad de la meso y macrofauna edáfica en un bosque natural de pino candelillo (*pinus maximinoi* h. M.), y de un área sometida a tala rasa; san juan chamelco, alta verapaz. (Trabjado de grado.) Universidad Rafael Landívar. Repositorio digital. <http://biblio3.url.edu.gt/publijrcifuentes/tesis/2018/06/22/cho-obdulio.pdf>
- Córdova cajas, e. S. (2018). Propiedades químicas de los suelos. (Trabajo de grado.) Universidad de las Américas. Repositorio digital [https://www.academia.edu/36956245/propiedades\\_quimicas\\_de\\_los\\_suelos](https://www.academia.edu/36956245/propiedades_quimicas_de_los_suelos)
- Coria, i. (2021). Remediación de suelos contaminados con hidrocarburos . Estructplan. <https://estrucplan.com.ar/remediacion-de-suelos-contaminados-con-hidrocarburos-4/>
- Coria, d. (2007). *Remediación de suelos contaminados con hidrocarburos*. <http://sustentabilidad.uai.edu.ar/pdf/ing/UAIIS-IGA-600-001%20-%20Remediacion.pdf>
- Cortés, c. (2017). Técnicas para mejorar el transporte de crudos pesados por oleoductos. (Trabajo de grado.) Escuela politécnica Nacional. Biblioteca digital. <https://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/18837/1/cd-8227.pdf>
- Delgadillo, j., ferrera, r., & hernández, h. (2016). Compostaje en biopilas para la limpieza de suelos contaminados con hidrocarburos del petróleo. *Agroproductividad*. 9 (8), pp 24-30. <https://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:3qqdwn4fp-8j:https://revista-agroproductividad.org/index.php/agroproductividad/article/download/797/662/1469+&cd=1&hl=es&ct=clnk&gl=co>
- Delgado, a., & gómez, j. A. (2016). The soil. Physical, chemical and biological properties. In *principles of agronomy for sustainable agriculture* (pp. 15–26). Springer international publishing. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-46116-8\\_2](https://doi.org/10.1007/978-3-319-46116-8_2)

- Durán, e. (2017). Arcillas y biocarbones para la eliminación de contaminantes de origen agrícola en aguas : ensayo en filtro a escala precomercial arcillas y biocarbones para la eliminación de contaminantes de origen agrícola en aguas : ensayo en filtro a escala precomercial. (Trabajo de grado.) Instituto de Recursos Naturales y Agrobiología de Sevilla. Repositorio CSIC. <http://hdl.handle.net/10261/161986>
- Eiti colombia. (2016). Marco normativo del sector de hidrocarburos - eiti colombia. <https://www.eiticolombia.gov.co/es/informes-eiti/informe-2016/marco-legal-y-regimen-fiscal/marco-normativo-del-sector-de-hidrocarburos/>
- Elekalawy, m., & alm eldin, h. (2018). Organic chemistry & hydrocarbons groups. [14]. ResearchGate [https://www.researchgate.net/publication/328124945\\_organic\\_chemistry\\_hydrocarbons\\_groups](https://www.researchgate.net/publication/328124945_organic_chemistry_hydrocarbons_groups)
- Escalante, a., pérez, g., hidalgo, c., lópez, j., campo, j., valtierra, e., & etchevers, j. (2015). *Biocarbón (biochar) i: naturaleza, historia, fabricación y uso en el suelo biocarbon (biochar) i: nature, history, manufacture and use in soil.*
- Fernández, I. (2014). Síntesis de carbón activado peletizado a partir de carbón mineral del cerrejón. (Trabajo de grado.) Universidad Nacional de Colombia. Repositorio Unal. <https://repositorio.unal.edu.co/bitstream/handle/unal/54724/1032417226.2015.pdf?sequence=1&isallowed=y>
- Fundación chile. (2019). Manual de tecnologías de remediación de sitios contaminados . Retrieved march 30, 2021, from [https://fch.cl/wp-content/uploads/2019/10/manual-de-tecnologias-de-remediacion-de-sitios-contaminados\\_baja-1.pdf](https://fch.cl/wp-content/uploads/2019/10/manual-de-tecnologias-de-remediacion-de-sitios-contaminados_baja-1.pdf)
- Galindo, I., mantilla, d., moncada, d., orjuela, e., romano, k., & rincón, j. (2021). Técnicas de biorremediación de suelos contaminados por hidrocarburos con fines de uso en el municipio de tibú, norte de santander. Retrieved july 3, 2022, from <https://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:jjmvfqhrciyj:https://dial>

net.unirioja.es/descarga/articulo/8234914.pdf+&cd=11&hl=es&ct=clnk&gl=co

Gallart, f. (2017). La conductividad eléctrica del suelo como indicador de la capacidad de uso de los suelos de la zona norte del parque natural de la albufera de valencia. (Trabajo de grado.) Universidad Politécnica de València. Repositorio Digital. [https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/94368/gallart\\_la\\_conductividad\\_eléctrica\\_del\\_suelo\\_como\\_indicador\\_de\\_la\\_capacidad\\_de\\_uso\\_de\\_los\\_suelos....pdf?sequence=1](https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/94368/gallart_la_conductividad_eléctrica_del_suelo_como_indicador_de_la_capacidad_de_uso_de_los_suelos....pdf?sequence=1)

Garzón, j., rodríguez, j., & hernández, c. (2017). Aporte de la biorremediación para solucionar problemas de contaminación y su relación con el desarrollo sostenible. Retrieved July 14, 2022, from <http://www.scielo.org.co/pdf/reus/v19n2/0124-7107-reus-19-02-00309.pdf>

Gerhardt, k. E., gerwing, p. D., & greenberg, b. M. (2017). Opinion: taking phytoremediation from proven technology to accepted practice. *Plant science*, 256, pp. 170–185. <https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2016.11.016>

Giesecke, m., & lafosse, s. (2020). Elaboración y pertinencia de la matriz de consistencia cualitativa para las investigaciones en ciencias sociales. *Desde el sur*, 12(2), 397–417. <https://doi.org/10.21142/des-1202-2020-0023>

González, j. (2010). Fitorremediación: una herramienta viable para la descontaminación de aguas y suelos. (Trabajo de grado.) Universidad de los Andes. Repositorio Uniandes. <http://hdl.handle.net/1992/19276>

Guerrero useda, m. E. (2018). Rupture of oil pipelines due to external interference, environmental damage and sustainability in colombia. *Produccion y limpia*, 13(2), 7–13. <https://doi.org/10.22507/pml.v13n2a1>

Hernández-valencia, i., manuel lárez, l., & garcía, j. V. (2017). Evaluación de la toxicidad de un suelo contaminado con diferentes tipos de crudos sobre la germinación de dos pastos tropicales. *Bioagro*. 29 (2), pp. 73-82.

Hernández, c., & martínez, g. (2019). Desarrollo de un sustrato sintético que simula agua residual doméstica para fines de investigación. (Trabajo de grado.) Universidad del Valle. Biblioteca digital Univalle

<https://bibliotecadigital.univalle.edu.co/bitstream/handle/10893/17802/cb-0592161.pdf?sequence=1>

Hernández, e., castorena, m., panta, j., & lópez, j. (2006). Characterization of soils and plants in a site polluted with petroleum. *Terra Latinoamericana*. 24 (4), pp. 463-470.

Herrera, j. (2018). Pirólisis de biomasa para la obtención de biocarbón y su efecto en el rendimiento de tomate. (Trabajo de grado.) Universidad Rafael Landívar. <http://recursosbiblio.url.edu.gt/tesisjrkd/2018/06/17/herrera-jaqueline.pdf>

Hidalgo, m., pardini, g., gonzalez, o., margui, e., & queralt, i. (2011). Aplicación de la técnica de espectrometría de fluorescencia de rayos-x en el estudio de la dispersión de metales en áreas mineras. *Boletín Geológico Minero*, 122 (2), pp. 273-286

[https://www.researchgate.net/publication/228095224\\_aplicacion\\_de\\_la\\_tecnica\\_de\\_espectrometria\\_de\\_fluorescencia\\_de\\_rayos-x\\_en\\_el\\_estudio\\_de\\_la\\_dispersion\\_de\\_metales\\_en\\_areas\\_mineras](https://www.researchgate.net/publication/228095224_aplicacion_de_la_tecnica_de_espectrometria_de_fluorescencia_de_rayos-x_en_el_estudio_de_la_dispersion_de_metales_en_areas_mineras)

Huaraca, j. N., pérez, l., bustinza, l. S., & pampa, n. (2020). Enmiendas orgánicas en la inmovilización de cadmio en suelos agrícolas contaminados: una revisión. *Información tecnológica*, 31(4), 139–152. <https://doi.org/10.4067/s0718-07642020000400139>

Icontec. (2008). Calidad de suelo. Determinacion de la conductividad electrica. . Retrieved june 16, 2021, from <https://www.icontec.org/rules/calidad-de-suelo-determinacion-de-la-conductividad-electrica/>

Icontec. (2018). Calidad del suelo. Determinacion del ph. Retrieved june 16, 2021, from <https://tienda.icontec.org/gp-calidad-del-suelo-determinacion-del-ph-ntc5264-2018.html>

Ideam. (2012). Suelos colombia. Retrieved april 2, 2022, from <http://www.ideam.gov.co/web/siac/sueloscolombia>

Inia tacuarembó. (2015). *Semana de la ciencia y tecnología jornada de puertas abiertas*

- Instituto nacional de ecología. (2007). Tecnologías de remediación. Retrieved october 21, 2020, from <http://www2.inecc.gob.mx/publicaciones2/libros/372/tecnolog.html>
- Justel lozano, d., pérez bartolomé, e., vidal nadal, r., gallo fernández, a., & val jauregui, e. (2007). Estudio de métodos de selección de conceptos .
- Kuppusamy, s., maddela, n. R., megharaj, m., & venkateswarlu, k. (2020). Ecological impacts of total petroleum hydrocarbons. In *total petroleum hydrocarbons* (pp. 95–138). Cham: springer international publishing. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-24035-6\\_5](https://doi.org/10.1007/978-3-030-24035-6_5)
- Koshlaf, e., & ball, a. S. (2017). Soil bioremediation approaches for petroleum hydrocarbon polluted environments. *Aims microbiology*, 3(1), 25–49. <https://doi.org/10.3934/microbiol.2017.1.25>
- La paix, l., & lópez-lambas, m. E. (2010). Desarrollo de una metodología multicriterio para la evaluación de la investigación del transporte desarrollo de una metodología multicriterio para la evaluación de la investigación del transporte.
- Liu, l., li, w., song, w., & guo, m. (2018). Remediation techniques for heavy metal-contaminated soils: principles and applicability. *Science of the total environment*, 633, 206–219. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.03.161>
- Londoño, i. (2020). Biorremediación como estrategia para la recuperación de suelos mineros contaminados con mercurio, cadmio y plomo (hg, cd, pb). (Trabajo de grado.) Universidad de Córdoba. Repositorio Digital Unicordoba. <https://repositorio.unicordoba.edu.co/bitstream/handle/ucordoba/3831/iveth%2520londo%25c3%25b1o.pdf%3fsequence%3d1%26isallowed%3dy+%&cd=2&hl=es&ct=clnk&gl=co>
- López ramírez, m. A., castellanos onorio, o. P., lango reynoso, f., castañeda chávez, m. Del r., montoya mendoza, j., sosa villalobos, c. A., & ortiz muñoz, b. (2021). Oxidación avanzada como tratamiento alternativo para las aguas residuales. Una revisión. *Enfoque ute*, 12(4), 76–87. <https://doi.org/10.29019/enfoqueute.769>
- Mafla, s. (2010). Análisis y mejora de los procesos biológicos para la rehabilitación de



la piscina de lodos activados (pla) de la refinería estatal esmeraldas (ree). (Trabajo de grado.) Universidad de Córdoba. Repositorio Digital. [https://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:kbcwSO-\\_gkcJ:https://repositorio.unicordoba.edu.co/bitstream/handle/ucordoba/3831/lveh%2520Londo%25C3%25B1o.pdf%3Fsequence%3D1%26isAllowed%3Dy+&cd=2&hl=es&ct=clnk&gl=co](https://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:kbcwSO-_gkcJ:https://repositorio.unicordoba.edu.co/bitstream/handle/ucordoba/3831/lveh%2520Londo%25C3%25B1o.pdf%3Fsequence%3D1%26isAllowed%3Dy+&cd=2&hl=es&ct=clnk&gl=co)

Martínez, j., & casallas, m. (2018). *Contaminación y remediación de suelos en colombia aplicación a la minería de oro*. Universidad EAN.

Martínez, j. (2002). Manual técnico para el manejo manual técnico para el manejo de la fertilización de suelos cafetaleros. <https://jorgemartinezrayo.files.wordpress.com/2013/07/manual-de-fertilidad-de-suelos.pdf>

Martinez, m. (2001). El cultivo de la calabacita (cucurbita pepo l.) En México. (Trabajo de grado.) Universidad Autónoma Agraria. Repositorio Uaaan. <http://repositorio.uaaan.mx:8080/xmlui/handle/123456789/1201?show=full>

Méndez, n. (2020). Procesos de fitorremediación en suelos contaminados con cadmio: revisión de literatura. (Trabajo de Grado.) Escuela Agrícola Panamericana. Repositorio digital. <https://bdigital.zamorano.edu/handle/11036/6760>

Miranda, d., & restrepo, r. (2005). Los derrames de petróleo en ecosistemas tropicales - impactos, consecuencias y prevención. La experiencia de Colombia. *2005 international oil spill conference, iosc 2005* (1), pp. 10554–10558. <https://doi.org/10.7901/2169-3358-2005-1-571>

Mukome, f. N. D., buelow, m. C., shang, j., peng, j., rodriguez, m., mackay, d. M., ... parikh, s. J. (2020). Biochar amendment as a remediation strategy for surface soils impacted by crude oil. *Environmental pollution*, 265, 115006. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.115006>

Neina, d. (2019). The role of soil ph in plant nutrition and soil remediation. *Applied and environmental soil science*, 2019. <https://doi.org/10.1155/2019/5794869>

Noguera, s., & Armado, a. (2010). Evaluación de metales en suelos contaminados por

- derrames de crudo en yaracal, estado falcón, venezuela. *Avances en Química*, 5 (3), pp. 167-175 [www.saber.ula.ve/avancesenquimica](http://www.saber.ula.ve/avancesenquimica)
- Olarte, a. (2019). La biorremediación como técnica para la descontaminación de suelos contaminados por hidrocarburos en los municipios del bloque cpo9. (Trabajo de grado.) Universidad Nacional Abierta y a Distancia. Repositorio UNAD. <https://repository.unad.edu.co/handle/10596/27737>
- Ortínez, o., Lema, i., & Gavilán, a. (2003). La restauración de suelos contaminados con hidrocarburos en méxico. *Gaceta ecológica*. 69, pp. 83-92 <https://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:krjd3tako4oj:https://www.redalyc.org/pdf/539/53906906.pdf+&cd=1&hl=es&ct=clnk&gl=co>
- Palomares, y. (2021). Análisis del nutriente vegetal fosforo en los suelos amazónicos del departamento del caquetá. (Trabajo de grado.) Universidad Nacional Abierta y a Distancia. Repositorio UNAD. <https://repository.unad.edu.co/bitstream/handle/10596/43181/dypalomaresc.pdf?sequence=1&isallowed=y>
- Pardo, I. (2018). Cifras de derrames de crudo en colombia en los últimos años - medio ambiente - vida - eltiempo.com. Retrieved october 21, 2020, from <https://www.eltiempo.com/vida/medio-ambiente/cifras-de-derrames-de-crudo-en-colombia-en-los-ultimos-anos-207664>
- Peluffo, m. (2016). Remediación de suelos contaminados con hidrocarburos policíclicos aromáticos mediante oxidación química. (Tesis doctoral.) Universidad Nacional de la Plata. Repositorio institucional de la UNLP. <https://doi.org/10.35537/10915/57661>
- Pinto, d., & victor, s. (2018). Biorremediación de suelos contaminados por hidrocarburos mediante la utilización de diferentes cepas bacterianas a escala de laboratorio. (Trabajo de grado.) Universidad Libre. Repositorio Unilibre. <https://hdl.handle.net/10901/15451>
- Pizarro, p., sierra, m., rodríguez, m., cabrales, c., rodríguez, r., velado, s., millán, r. (2017). Nuevo equipo de desorción térmica de contaminantes en suelos a new

- device for thermal desorption. *Técnica Industrial*, 317, pp. 42-49
- of soil pollutants green oil energy systems slp. <https://doi.org/10.23800/8863>
- Pulgarin, m. D. P. (2012). *Evaluación de la fitoremediación como alternativa de tratamiento de sedimentos contaminados con hidrocarburos procedentes de las estaciones de servicio en risaralda*. (Trabajo de grado.) Universidad Tecnológica de Pereira. Repositorio UTP. <https://hdl.handle.net/11059/2781>.
- Quispe, y., & zavaleta, f. (2020). Eficiencia fitorremediadora de gramíneas forrajeras en suelos con exceso de nitrógeno proveniente de abonamientos frecuentes, baños del inca. (Trabajo de grado.) Universidad Privada Antonio Guillermo Urrelo. repositorio UPAGU. [http://repositorio.upagu.edu.pe/bitstream/handle/upagu/1680/yadira lucy arli quispe cabrera\\_fiorela milagros zavaleta vasquez.pdf?sequence=3&isallowed=y](http://repositorio.upagu.edu.pe/bitstream/handle/upagu/1680/yadira_lucy_arli_quispe_cabrera_fiorela_milagros_zavaleta_vasquez.pdf?sequence=3&isallowed=y)
- Ramirez, k., & yarleque, v. (2021). “técnicas de biorremediación y su aplicación en suelos contaminados con hidrocarburos.” (Trabajo de grado.) Universidad provada del Norte. Repositorio institucional UPN. <https://hdl.handle.net/11537/30432>.
- Rebaza, d., & valverde, k. (2019). “evaluación del potencial fitorremediador de la especie brassica juncea (mostaza) en suelos contaminados con zinc y arsénico provenientes de relaves mineros.” (Trabajo de grado.) Universidad Nacional de Trujillo. Repositorio UNT. <http://dspace.unitru.edu.pe/handle/UNITRU/13782>.
- Riesco, r. A. (2012). *Proyecto de recuperación de suelos contaminados por hidrocarburos*. (Trabajo de grado.) Universidad Autónoma de Barcelona. Repositorio digital. [https://ddd.uab.cat/pub/trerecpro/2012/hdl\\_2072\\_206396/PFC\\_RaquelAlonsoRiesco.pdf](https://ddd.uab.cat/pub/trerecpro/2012/hdl_2072_206396/PFC_RaquelAlonsoRiesco.pdf)
- Robles, p., & rojas, m. (2015). La validación por juicio de expertos: dos investigaciones cualitativas en lingüística aplicada validation by expert judgements: two cases of qualitative research in applied linguistics.
- Rodríguez, i. (2013). Reciclado en suelos de lodos de refinería: nuevas aproximaciones

- para la biodegradación de hidrocarburos mediante el manejo de enmiendas orgánicas. (Trabajo de grado.) Universidad de Murcia. Digitum. <http://hdl.handle.net/10201/36685>.
- Rodríguez, n., torres, c., & chaman, m. (2019). Efecto del estrés salino en el crecimiento y contenido relativo del agua en las variedades ir-43 y amazonas de oryza sativa "arroz" (poaceae). *Arnaldoa* 26 (3): 931-942. <https://doi.org/10.22497/arnaldoa.263.26305>
- Romero, j. (2017). *Eficiencia en la inmovilización de plomo en el suelo mediante la aplicación de cantidades de biocarbón en el distrito san mateo, lima*. (Trabajo de grado). Universidad César Vallejo. Repositorio UCV. <https://hdl.handle.net/20.500.12692/3598>
- Roqueta, d. (2016). "estudio bibliográfico de los criterios base para la selección del método de recuperación de un suelo. (Trabajo de grado.) Universidad Politecnica de Valencia. Repositorio Institucional UPV. <http://hdl.handle.net/10251/72603>
- Ruiz, k. (2018). "optimización del proceso etanosolv para la obtención de celulosa biomásica y valoración de diferentes rutas de acetilación del material."(Tesis Doctoral.) Centro de Investigación en Materiales Avanzados, s.c. Posgrado. Repositorio Institucional. <https://cimav.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1004/2243/1/Tesis%20Karla%20Ruiz%20Culity.pdf>
- Salazar, c., gonzález, j., corrales, d., lacayo, j., carrillo, k., & montero, h. (2020). Comparación de dos métodos para la determinación de la densidad aparente del suelo. *Alcances Tecnológicos*. 13(1), pp. 05-12 [http://revista.inta.go.cr/index.php/alcances\\_tecnologicos/article/view/164/142](http://revista.inta.go.cr/index.php/alcances_tecnologicos/article/view/164/142)
- Santamaria, a., rosignoli, c., sierra, a., & ramírez, h. (2021). Efecto de la aplicación de biocarbón sobre propiedades químicas de suelo y desarrollo y rendimiento de lechuga. (Trabajo de grado). Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano. <https://bdigital.zamorano.edu/server/api/core/bitstreams/10aee542-dca5-4fdd->

a99f-

20136f95c5bf/content#:~:text=Estudios%20indican%20que%20la%20aplicaci%C3%B3n,para%20el%20establecimiento%20de%20microorganismos.

Seguridad minera. (2017). Biorremediación: técnicas empleadas para la recuperación de suelos. Retrieved July 3, 2022, from <https://www.revistaseguridadminera.com/operaciones-mineras/biorremediacion-y-tipos-de-tecnicas-para-recuperar-los-suelos/>

Sepúlveda, t., & velasco, j. (2002). Tecnologías de remediación para suelos contaminados. Instituto Nacional de Ecología. [www.ine.gob.mx](http://www.ine.gob.mx)

Smarte, m., & yusuf, i. (2021). Comparative evaluation of wastewater and bioventing system for the treatment of acid mine drainage contaminated soils. *Water-energy nexus*, 4, 134–140. <https://doi.org/10.1016/j.wen.2021.08.001>

Soler, c. (2017). Respuesta fisiológica de plantas de tomate de árbol (*solanum betaceum cav*) bajo deficiencias y diferentes niveles de nitrógeno, fósforo y potasio. (Trabajo de grado.) Universidad Nacional de Colombia. repositorio UNAL. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/59898>

Tangarife, d., & lasprilla, d. (2016). Métricas de calidad de suelos y aguas como indicadores de desarrollo sostenible en las cabeceras del corregimiento la florida (municipio de pereira) y veredas mangas - volcanes (santa rosa de cabal) en un periodo de 10 meses. (Trabajo de grado.) Universidad Libre Seccional Pereira. Repositorio Unilibre [https://repository.unilibre.edu.co/bitstream/handle/10901/16152/métricas de calidad de suelos y aguas .pdf?sequence=1&isallowed=y](https://repository.unilibre.edu.co/bitstream/handle/10901/16152/métricas%20de%20calidad%20de%20suelos%20y%20aguas.pdf?sequence=1&isallowed=y)

Toro, a., & ramírez, j. (2012). *Bioremediation in soil contaminated with hydrocarbons in colombia. Revista de Investigación Agraria y Ambiental*. 3 (2), pp. 37-59

Universidad de chile. (2005). Criterios de calidad de aguas o efluentes tratados para uso en riego.

Valdivia, s. (2020). Efecto de la fertilización nitrogenada y aplicación de carbonato de calcio sobre la toxicidad por hierro y manganeso en plantas de lentejas (lens

culinaris medik). Retrieved July 9, 2022, from <http://dspace.utalca.cl/bitstream/1950/12495/5/2020a000219.pdf>

Velásquez, j. (2016). Contaminación de suelos y cuerpos de agua por hidrocarburos en Colombia fitorremediación como estrategia biotecnológica de recuperación.(Trabajo final.) Universidad de Chile. [http://siar.minam.gob.pe/puno/sites/default/files/archivos/public/docs/tesis\\_contaminacion\\_de\\_suelos\\_y\\_cuerpos\\_de\\_agua\\_por\\_hidrocarburos\\_en\\_colombia.pdf](http://siar.minam.gob.pe/puno/sites/default/files/archivos/public/docs/tesis_contaminacion_de_suelos_y_cuerpos_de_agua_por_hidrocarburos_en_colombia.pdf)

Vidonish, j. E., zygourakis, k., masiello, c. A., sabadell, g., & alvarez, p. J. J. (2016). Thermal treatment of hydrocarbon-impacted soils: a review of technology innovation for sustainable remediation. *Engineering*, 2(4), 426–437. <https://doi.org/10.1016/j.eng.2016.04.005>

Villalobos, f., & fereres, e. (2017). Fitotecnia: principios de agronomía para una agricultura sostenible. *Mundiprensa* from <https://books.google.com.co/books?id=daekdwaaqbaj&pg=pa20&lpg=pa20&dq=la+distribución+del+espacio+de+los+poros+y+la+textura+es+la+que+determina+propiedades+como+la+retención+de+agua,+que+se+caracteriza+por+la+relación+entre+el+contenido+de+agua+y+potencia>

Wayens, c. (2004). *Estudio del potencial de degradación de los hidrocarburos por acinetobacter sp. Y pseudomonas putida para su aplicación en la biorremediación de suelos contaminados*. (Trabajo de grado.) Instituto Tecnológico de costa Rica. Repositorio TEC <https://hdl.handle.net/2238/206>

Yagual, k. (2020). “técnicas de recuperación de suelos contaminados por hidrocarburos aplicables en el cantón salinas.” (Trabajo de grado.) Retrieved July 10, 2022, from <https://repositorio.upse.edu.ec/bitstream/46000/5345/1/upse-tip-2020-0006.pdf>

Yáñez díaz, m. l., cantú silva, i., gonzález rodríguez, h., yáñez díaz, m. l., cantú silva, i., & gonzález rodríguez, h. (2018). Efecto del cambio de uso de suelo en las propiedades químicas de un vertisol. *Terra latinoamericana*, 36(4), 369–379. <https://doi.org/10.28940/terra.v36i4.349>

Zaid, a. (2018). *Tecnologías físico-químicas en la regeneración de suelos contaminados*. (Trabajo de grado.) Escuela Técnica Superior de Ingeniería. Repositorio Digital.

## **ANEXOS**



## ANEXO 1

### RECOMENDACIONES

Hacer énfasis en los parámetros de la normatividad Louisiana 29B para establecer los datos que se tomarán como referencia, si se tiene en cuenta en el momento de iniciar las caracterizaciones del suelo contaminado y luego de la remediación, se identificara cuando los macronutrientes están en un rango fuera de lo establecido y se podrá saber con certeza cuál de las técnicas estudiadas fue más efectiva.

Para que la fitorremediación pueda ser efectiva, garantizando la recuperación del suelo, es necesario aumentar los tiempos de remediación en un lapso mayor a cuatro meses con monitoreo continuo, teniendo en cuenta las características del suelo.

En suelos pedregosos y áridos como el utilizado en fitorremediación se recomienda utilizar fertilizantes que ayuden al crecimiento de la planta y garanticen la efectividad del proceso de remediación, por eso es importante conocer las propiedades físicas y químicas del suelo y así poder implementar los fertilizantes adecuados.

Establecer la cantidad exacta que se debe utilizar de biocarbón, la cual no genere pérdida en humedad en el suelo y aumenta la acidez del mismo.

Investigar a profundidad las propiedades de la *Calabaza mayera* para la remediación de suelos, así como el crecimiento o madurez óptima, el tipo de suelos y el clima que favorece a su crecimiento.

Se tendrá que realizar un análisis costo - beneficio sobre el método de remediación adecuado a implementar, teniendo en cuenta que esta tesis se basa en pruebas de laboratorio y en la mayoría de los casos la contaminación es de kilómetros, si se quiere remediar un suelo en el menor tiempo posible estas técnicas no son las más viables por el tiempo de aplicabilidad, si se habla de una empresa que quiere

remediar el suelo en días sería poco viable, ya que hay muchos factores a estudiar, como, la reacción del suelo con el biocarbon, la semilla adecuada a utilizar, y sobre él todo el tiempo, ya que varía dependiendo de la técnica sea utilizando biocarbón o fitorremediación.

Se recomienda realizar estudios acerca de la combinación de técnicas térmicas, físico químicas y biológicas, de qué manera, cada una de ellas podrían aportar en la creación de un nuevo método de remediación con el fin de adquirir más alternativas en esta problemática ambiental.