

# VALIDACIÓN SINTÉTICA DE SUELOS CONTAMINADOS POR HIDROCARBUROS PESADOS. CASO DE ESTUDIO

## SYNTHETIC VALIDATION OF SOILS CONTAMINATED BY HEAVY HYDROCARBONS. CASE STUDY

Angie Tatiana Ortega-Ramírez<sup>1</sup>; Camila Andrea Torres-López<sup>2</sup>;  
Oscar Silva-Marrufo<sup>3\*</sup>; Luis Alejandro Moreno-Barriga<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Facultad de Ingeniería. Fundación Universidad de América, Bogotá, Colombia; Correo: angie.ortega@profesores.uamerica.edu.co, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6364-8432>, CvLAC: [https://scienti.minciencias.gov.co/cvlac/visualizador/generarCurriculoCv.do?cod\\_rh=0000136161](https://scienti.minciencias.gov.co/cvlac/visualizador/generarCurriculoCv.do?cod_rh=0000136161), Grupo de Investigación Gestión Ambiente y Sostenibilidad (GIGAS).

<sup>2</sup>Estudiante de Maestría en Gestión Ambiental para la Competitividad. Fundación Universidad de América, Bogotá, Colombia; Correo: camila.torres2@estudiantes.uamerica.edu.co, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2477-9891>

<sup>3</sup>Departamento de Ingenierías. Tecnológico Nacional de México. Instituto Tecnológico del Valle del Guadiana. Durango, México; Correo: oscar.sm@vguadiana.tecnm.mx, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2064-5298>

<sup>4</sup>Estudiante de Maestría en Gestión Ambiental para la Competitividad. Fundación Universidad de América, Bogotá, Colombia; Correo: luis.moreno3@estudiantes.uamerica.edu.co, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3993-6856>; CvLAC: [https://scienti.minciencias.gov.co/cvlac/visualizador/generarCurriculoCv.do?cod\\_rh=0001949417](https://scienti.minciencias.gov.co/cvlac/visualizador/generarCurriculoCv.do?cod_rh=0001949417)

\*Autor de contacto: oscar.sm@vguadiana.tecnm.mx

Recibido: 19 de enero, 2023. Aprobado: 26 de enero, 2023. Versión final: 11 de Julio, 2023.

---

**Cómo citar:** Ortega-Ramírez, A. T., Torres-López, C. A., Silva-Marrufo, O., & Moreno-Barriga, L. A. (2023). VALIDACIÓN SINTÉTICA DE SUELOS CONTAMINADOS POR HIDROCARBUROS PESADOS. CASO DE ESTUDIO. *Fuentes, el reventón energético*, 21(1), 83-93. <https://doi.org/10.18273/revfue.v21n1-2023006> 

## Resumen

Los derrames de petróleo son un problema ambiental importante en todo el mundo, derivados de la exploración, extracción, transporte o sabotaje de la infraestructura petrolera. Los avances científicos han llevado al desarrollo de diversas técnicas de remediación, incluida la fitorremediación y la aplicación de biocarbón. Este estudio involucró la recolección de muestras de suelo no contaminadas de las afueras del municipio de El Rodeo (México), la introducción de petróleo crudo y el tratamiento con la siembra de calabaza (*Cucurbita pepo*) o la aplicación de biocarbón. Luego de cuatro meses de tratamiento, se analizaron las características del suelo, incluyendo pH (7.50; 5.10), conductividad eléctrica (1.50 dSm<sup>-1</sup>; 0.20 dSm<sup>-1</sup>) y contenido de minerales: hierro (0.39 ppm; 0.59 ppm), nitrógeno (1.70 ppm; 1343 ppm), fósforo (0.35 ppm; 297 ppm), potasio (1.70 ppm; 1944 ppm), zinc (0.00 ppm; 23 ppm), calcio (0.00 ppm; 0.00 ppm) y plomo (36 ppm; 10 ppm). Si bien las técnicas utilizadas en el estudio no produjeron suelo fértil, redujeron efectivamente los niveles de hidrocarburos totales de petróleo (TPH) y permiten ser implementadas a escala industrial para reducir las concentraciones de hidrocarburos, mitigando así la toxicidad del ecosistema y mejorando el valor estético de las áreas afectadas. Estas medidas brindan beneficios económicos a las comunidades locales al apoyar el turismo y al mismo tiempo reducir la contaminación del agua y el suelo, así como los riesgos para la salud asociados con la exposición a los hidrocarburos.

**Palabras claves:** Calidad del suelo; Contaminación de suelo; Remediación del suelo; Hidrocarburos; Fitorremediación; Biocarbón; *Cucurbita pepo*.

## Abstract

Petroleum spills are a major environmental issue worldwide, arising from exploration, extraction, transportation, or sabotage of oil infrastructure. Scientific advancements have led to the development of various techniques for remediation, including phytoremediation and biochar application. This study involved collecting uncontaminated soil samples from the outskirts of El Rodeo municipality (Mexico), introducing crude oil, and treating with pumpkin (*Cucurbita pepo*) planting or biochar application. After four months of treatment, soil characteristics were analyzed, including pH (7.50; 5.10), electrical conductivity (1.50 dSm<sup>-1</sup>; 0.20 dSm<sup>-1</sup>) and mineral content: iron (0.39 ppm; 0.59 ppm), nitrogen (1.70 ppm; 1343 ppm), phosphorus (0.35 ppm; 297 ppm), potassium (1.70 ppm; 1944 ppm), zinc (0.00 ppm; 23 ppm), calcium (0.00 ppm; 0.00 ppm) and lead (36 ppm; 10 ppm). While the techniques used in the study did not produce fertile soil, they effectively reduced Total Petroleum Hydrocarbons (TPH) levels and they can be implemented on an industrial scale to lower hydrocarbon concentrations, thus mitigating ecosystem toxicity and enhancing the aesthetic value of affected areas. These steps provide economic benefits to local communities by supporting tourism while also reducing contamination in water and soil, as well as the health risks associated with hydrocarbon exposure.

**Keywords:** Soil quality; Soil contamination; Soil remediation; Hydrocarbons; Phytoremediation; Biochar; *Cucurbita pepo*.

## 1. Introducción

El petróleo crudo es una mezcla de compuestos químicos orgánicos (hidrocarburos) e inorgánicos, y su composición típica es 85.0% carbono (C), 12.0% hidrógeno (H), 8.0% azufre (S), 1.0% nitrógeno (N) y 0.5% oxígeno (O) (Vega et al., 2014). El petróleo crudo al estar en el subsuelo requiere extracción, lo que se consigue perforando el suelo; la profundidad media de un pozo oscila entre 800 y 7000 metros (Ecopetrol S.A., 2014). En cualquier caso, ya sea en la perforación, producción y/o transporte, puede ocurrir un derrame accidental o provocado en el suelo, afectando la calidad del mismo. Un derrame de petróleo genera impactos ambientales en el área dañada, afectando directamente al ecosistema. No solo se daña el suelo, sino que los vapores y lixiviados del derrame contaminan la atmósfera y el suministro de agua que rodea la región, deteriorando así la salud humana y la biodiversidad en los alrededores (Negreiros et al., 2022).

Para mitigar los impactos ambientales, la ciencia se ha enfocado en perfeccionar las técnicas de remediación para el tratamiento de suelos, las tecnologías se dividen en dos grupos de acuerdo al sitio de aplicación: in situ, aplicando el tratamiento directamente al suelo sin removerlo de su ubicación (Bai et al., 2022); ex situ, excavando el suelo para minimizar la dispersión del contaminante y luego aplicando el tratamiento designado (Hussain et al., 2022). Por otro lado, también se clasifican según el tipo de tratamiento a aplicar, biorremediación, que consiste en utilizar microorganismos vivos, como bacterias y hongos, para descomponer los contaminantes orgánicos del suelo (Gallego et al., 2022), tratamientos químicos, tales como estabilización de suelos, reducción de uso y oxidación para convertir suelos contaminados en suelos no peligrosos, y tratamientos físicos, tales como encapsulación, lavado de suelos y desorción térmica (Liao et al., 2022).

Por su parte, entre las nuevas técnicas de remediación de suelos se encuentra la fitorremediación, que además de tener un bajo costo, mejora las propiedades del suelo tanto a nivel estético como ambiental (Mudgal et al., 2023). Esta técnica se basa en el uso de plantas y su microbiota asociada para reducir los contaminantes del suelo, en concreto los compuestos de carbono. Al agregar hidrocarburo en el suelo, la actividad de los microorganismos aumenta a medida que encuentran una fuente de carbono y energía. Por otro lado, al contar con la presencia de plantas y una rizosfera, la actividad de los microorganismos es aún mayor (Hernández-Valencia et al., 2017).

Además, la calidad del suelo varía según su capacidad para funcionar dentro de los límites de un ecosistema, manteniendo su productividad biológica, preservando la calidad ambiental y promoviendo la capacidad de albergar flora y fauna, manteniendo la resiliencia de los sistemas biológicos (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2016). Se considera medio o alto al impacto ambiental de un derrame de hidrocarburos que se presente en el suelo, y para clasificarlo es necesario conocer el tipo de hidrocarburo y su toxicidad. También es necesario tener en cuenta la ubicación y las características del suelo donde ocurrió el derrame, ya que estos definen la capacidad de absorción del impacto que produjo el derrame (Morales-Bautista et al., 2019).

Entre las características físicas que se relacionan con la calidad del suelo se encuentran: capacidad de almacenamiento y suministro de agua, densidad aparente, infiltración, porosidad y permeabilidad (Calderón et al., 2018). Cuando los hidrocarburos entran en contacto con el suelo, varias de estas propiedades se ven afectadas, tales como: estructura y composición, mayor retención de agua en la capa superficial y potencial hídrico (Ramírez, 2010). Por otro lado, las propiedades químicas relacionadas con la calidad del suelo y los nutrientes que este aporta a la vegetación son: materia orgánica, pH y composición mineral, principalmente fósforo, nitrógeno y potasio (Calderón et al., 2018).

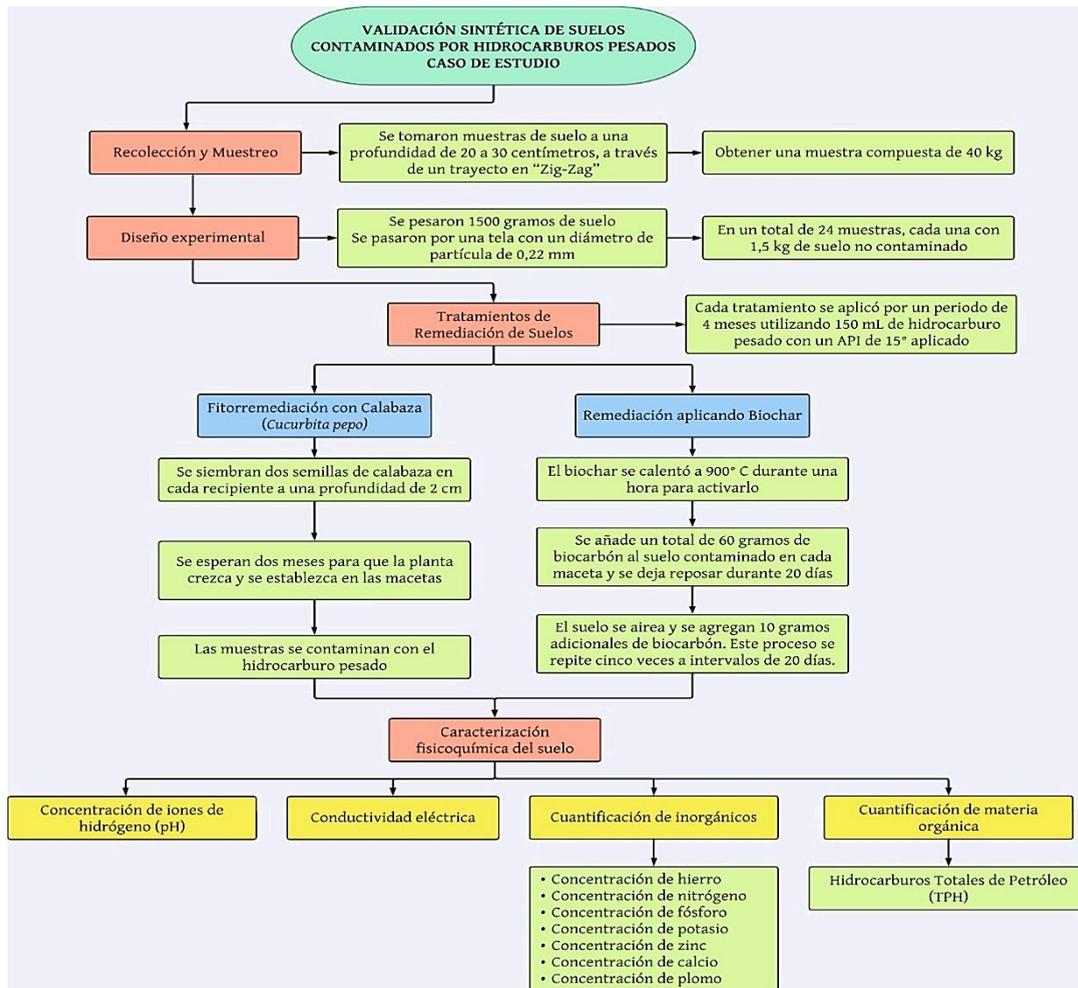
En suelos naturales el pH toma valores entre 3.0 y 12.0 mientras que en suelos cultivados los valores oscilan entre 4.5 y 10.0 (Casas, 2012). Cuando un suelo es impactado por hidrocarburos, el carbono orgánico en él aumenta y, en consecuencia, su valor de pH disminuye, acidificando el suelo. La acidificación del suelo se produce por la acumulación de iones de hidrógeno y la pérdida de cationes básicos como el calcio, el magnesio o el sodio, provocando problemas en el desarrollo del crecimiento de las plantas (Ramírez, 2010).

Este estudio evaluó los cambios producidos por la fitorremediación con la germinación de semillas de *Cucurbita pepo* (calabaza) en un suelo contaminado con petróleo pesado a 15° API. La semilla de calabaza (*Cucurbita pepo*) es un cultivo vegetal económicamente importante de la familia *Cucurbitaceae*, que incluye hortalizas como la calabaza, la sandía, el melón y el pepino. El grupo de las calabazas incluye las hortalizas más cotizadas a nivel mundial (Formisano et al., 2012) ya que esta especie crece y se reproduce con facilidad, debido a su adaptabilidad en diversos ambientes, desde las regiones tropicales hasta las templadas, por lo que es un modelo ideal para el objeto de este estudio (Qu et al., 2022). Asimismo, el cultivo es de baja inversión y se adapta a cualquier tipo de suelo, prefiriendo aquellos ricos en materia orgánica, moderadamente salinos (2,560 – 3,840 ppm) y con pH ácido entre 5.50 y 6.80 (Delgado-González., 2022).

Actualmente, la fitorremediación con (*Cucurbita pepo*) se emplea para la descontaminación de compuestos de bifenilos policlorados (PCB) (Otani et al., 2010). Se descubrió que algunos miembros de esta especie de calabaza acumulan una variedad de contaminantes orgánicos persistentes (COP) hidrófobos, incluidos los PCB (Whitfield Åslund et al., 2008). Se ha demostrado que estos contaminantes son absorbidos por las raíces de las plantas y transportados en la savia a través de la xilema hasta las hojas (Low et al., 2011).

## 2. Metodología

El proyecto se llevó a cabo utilizando una metodología de investigación cuantitativa reflejada en cuatro fases, comenzando por la recolección y muestreo; aplicación de hidrocarburos pesados; tratamiento remedial: a) Fitorremediación con Calabaza (*Cucurbita pepo*), b) Aplicación de Biochar; finalizando con la caracterización del suelo mediante ensayos de laboratorio antes y después de aplicar los tratamientos como se muestra en la Figura 1.



**Figura 1.** Metodología validación sintética de suelos contaminados por hidrocarburos pesados. Fuente: Elaborada por autores.

## 2.1 Recolección y muestreo

El diseño experimental y preparación de la muestra se realizó dentro de las instalaciones de la Universidad Tecnológica del Rodeo en el área de laboratorio de Tecnología del Agua en el Estado de Durango, México. Se utilizó suelo no contaminado (SNC), recolectado en las afueras del Municipio de Rodeo en la ubicación: 25°11'24.8"N 104°33'46.5"W. Se tomaron muestras de suelo a una profundidad de 20 cm a 30 cm, a través de un trayecto en "Zig-Zag", y posteriormente se homogeneizaron para obtener una muestra compuesta de 40 kg.

## 2.2 Diseño experimental

El procedimiento se maneja en envases de PET (Polietileno Tereftalato) de 5 L. Se pesaron 1500 g de suelo y se pasaron por una tela con diámetro de partícula de 0.22 mm con el fin de tamizar y remover las impurezas presentes en el suelo, como rocas, tallos o cualquier material vegetal. En total se obtuvieron 12 contenedores para cada tratamiento, dando como resultado un total de 24 muestras, cada una conteniendo 1.5 kg de suelo no contaminado.

## 2.3 Tratamientos de remediación de suelos

Cada tratamiento se aplicó por un período de 4 meses utilizando 150 mL de hidrocarburo pesado con un API de 15° aplicado a 1.5 kg de suelo no contaminado en cada una de las 24 muestras:

### Fitorremediación con calabaza (*cucurbita pepo*):

Se sembraron dos semillas de calabaza en cada recipiente a una profundidad de 2 cm. Al transcurrir 2 meses, la planta crece y se establecen en macetas para ser contaminadas con el hidrocarburo pesado.

### Remediación aplicando biochar:

El biocarbón utilizado en el experimento está hecho de lignito mineral, el cual se sometió a un proceso de calentamiento de 2 horas a 700 °C en una atmósfera de nitrógeno inerte para carbonizar y eliminar cualquier materia volátil presente en el lignito. Luego, el biocarbón se calentó nuevamente a 900 °C durante 1 hora para activarlo (Fernández et al., 2014). Se agregó un total de 60 g de biocarbón al suelo contaminado en cada maceta, dejando reposar durante 20 días. Pasado este tiempo, se aireó la tierra añadiendo 10 g adicionales de biocarbón. Este proceso se repite 5 veces a intervalos de 20 días.

## 2.4 Caracterización fisicoquímica del suelo

Para el análisis de suelo se consideraron propiedades como pH, conductividad eléctrica y cuantificación de materia orgánica y de metales. Estos análisis se realizaron en el suelo no contaminado y en el suelo contaminado. Se pesaron 200 g de suelo no contaminado y con ayuda de un potenciómetro manual Hana Hi 98 121 se midió el pH, la temperatura y la conductividad eléctrica.

Para el análisis de la materia orgánica contenida en el suelo, se pesaron 10 g de suelo en cuatro crisoles de cerámica, posteriormente se introdujeron en la mufla por 2 horas a una temperatura de 600 °C, luego de 2 horas se procedió a la preparación de los crisoles (Ruiz., 2018). Se dejaron en el desecador de vidrio y se pesaron nuevamente para obtener el peso de la

ceniza, posteriormente se midió el pH, la temperatura y la conductividad eléctrica (Andriulo et al., 2017). Para determinar el contenido de metales pesados en el suelo se utilizó la técnica descrita por (Meseguer et al., 1998), para ello se pesaron 250 g de suelo en un vaso plástico y se añadieron 50 mL de agua destilada dejándolo reposar por 5 minutos, luego se utilizó una red de tela para filtrar el suelo extrayendo la alícuota. Se vertió agua destilada en una bureta hasta llegar al punto de 500 mL y con ayuda de una jeringa se depositaron en la bureta 10 mL de la alícuota tomada del suelo, obteniendo la solución madre.

De la solución madre se tomaron muestras de 10 mL con ayuda de una jeringa, agregando un sobre reactivado para evaluar los componentes y tomar las lecturas en el fotómetro multiparamétrico portátil (HANNA) en un lapso de 4 minutos. Los reactivos son disoluciones de nitrato, fósforo, potasio, molibdeno y hierro. En el caso del calcio y magnesio, se utilizó un medio tampón donde se agregaron 5 gotas y 1 mL de sustancia para ingresarlos en las lecturas. En el fotómetro multiparámetro se elige el método dependiendo de las sustancias que se introduzcan, así mismo este instrumento brinda diferentes tipos de opciones de lectura, una de ellas da el resultado al instante, mientras que la otra tarda 4 minutos en dar los resultados, expresado en unidades de mg/L.

## 3. Resultados

En la Tabla 1 se muestran los resultados obtenidos del tratamiento de fitorremediación utilizando la especie *Cucurbita pepo*, la caracterización de la muestra inicial se realizó 2 meses después de sembradas las semillas y justo antes de la contaminación con el hidrocarburo pesado. Del mismo modo, se realizó la caracterización de las muestras finales después de aplicar el tratamiento.

**Tabla 1.** Resultados del análisis fisicoquímico con fitorremediación aplicada a suelos contaminados.

Parámetro	Muestra inicial	Muestra final
pH <sup>1</sup>	5.40	7.50
Conductividad eléctrica (dSm <sup>-1</sup> )	1.25	1.50
Hierro (ppm)	0.40	0.39
Nitrógeno (ppm)	5.00	1.70
Fósforo (ppm)	0.90	0.35
Potasio (ppm)	0.80	1.70
Zinc (ppm)	ND <sup>3</sup>	ND
Calcio (ppm)	1.20	ND
Plomo (ppm)	104.5	36.00
TPH <sup>2</sup>	2.09	1.61

<sup>1</sup> pH = Concentración de iones de hidrógeno

<sup>2</sup> TPH = Hidrocarburos Totales de Petróleo

<sup>3</sup> ND = No Detectado

En la Tabla 2, se muestran los resultados obtenidos del tratamiento con biocarbón. La caracterización de la muestra inicial se realizó antes de aplicar el tratamiento

y después de la contaminación con hidrocarburo pesado. De igual forma se realizó la caracterización de las muestras finales luego de aplicar el tratamiento.

**Tabla 2.** Resultados del análisis fisicoquímico con biocarbón aplicado a suelo contaminado.

Parámetro	Muestra inicial	Muestra final
pH <sup>1</sup>	5.60	5.10
Conductividad eléctrica (dSm <sup>-1</sup> )	1.40	0.20
Hierro (ppm)	0.76	0.59
Nitrógeno (ppm)	773	1,343
Fósforo (ppm)	30	297
Potasio (ppm)	916	1,944
Zinc (ppm)	30	23
Calcio (ppm)	ND <sup>3</sup>	ND
Plomo (ppm)	12	10
TPH <sup>2</sup>	7.96	4.15

<sup>1</sup> pH = Concentración de iones de hidrógeno

<sup>2</sup> TPH = Hidrocarburos Totales de Petróleo

<sup>3</sup> ND = No Detectado

## 4. Discusión

### Concentración de iones de hidrógeno (pH)

Para el resultado de pH en biocarbón se obtuvieron valores cercanos a 5 como resultado inicial, el pH del suelo utilizado tuvo una tendencia neutra, ya que era un terreno abonado y apto para la siembra, es decir, cuando se produjo el derrame de hidrocarburo, el pH descendió drásticamente a 5.6.

Esto se debe a que el hidrocarburo del suelo hace que disminuya el pH, porque facilita la oxidación de las 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 factor limitante para procesos de biodegradación (Castellanos et al., 2015). Para la técnica del biocarbón el pH disminuyó 4 décimas de 5.6 a 5.1, esto se debe a que la concentración de biocarbón no era la adecuada para este tipo de suelo, saturándolo y no cumpliendo la función.

Por otro lado, el valor de pH obtenido está por debajo del rango aceptable para suelos en condiciones óptimas que es de 6.1 a 7.3, y también está por debajo del rango propuesto en la normativa de Luisiana que oscila entre 6.0 y 9.0 (Santamaria et al, 2021).

Para la técnica de fitorremediación se observa un cambio de un pH ligeramente ácido de 5.4 a un pH cercano a la neutralidad (7.5), lo que favorece el crecimiento de la plantación, a diferencia de la técnica del biocarbón que acidificará el suelo, lo que provocará la liberación de iones  $H^+$  y un aumento de los agentes oxidantes, afectando los canales de intercambio iónico en los minerales (Durán., 2017).

### Conductividad eléctrica

En el caso del biocarbón, la conductividad eléctrica indicó que se pasa de un suelo salino a uno no salino. La conductividad disminuye porque el biocarbón adsorbe los iones solubles, disminuyendo la concentración de sales en la muestra analizada después del tratamiento y en términos regulatorios están de acuerdo con lo establecido en el Louisiana Standard 29B, donde se fija una conductividad máxima permisible de 4000  $\mu S/cm$  (Santamaria et al., 2021).

En el caso de la fitorremediación se incrementó la conductividad eléctrica, sin embargo, se sigue considerando como suelo de baja salinidad y se encuentra dentro del rango permisible según la norma Louisiana 29B. La acumulación de sales afecta la productividad de las plantas, por ende, la calidad ambiental del ecosistema, pues modifican la variación del potencial hídrico en el 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 poco salinos los efectos sobre los cultivos o plantaciones son imperceptibles (Gallart., 2017).

Para el proceso con biocarbón, algunos metales disminuyeron mientras que otros aumentaron, los hidrocarburos tienen la capacidad de aumentar los metales como el hierro intercambiable. Algunos metales pesados como el plomo y el zinc disminuyeron debido al biocarbón. Según la agencia de protección ambiental (EPA), el límite permisible de plomo en suelos es de 10 ppm, lo que indica que este metal está dentro de los valores no peligrosos. Así mismo, el valor obtenido se encuentra dentro del límite permisible por Louisiana Standard 29B, que es de 500 ppm (Santamaria et al, 2021).

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

### Concentración de hierro

En el caso del hierro, los resultados de fitorremediación inicial y final fueron similares teniendo valor de 0.4 ppm. Realizando la técnica del biocarbón se observa la disminución en la concentración del mineral, pasando de 0.76 ppm a 0.59 ppm, lo que no favorece de ninguna manera la fertilidad del suelo, puesto que la concentración óptima en un suelo fértil debe ser de 10 ppm a 50 ppm (Noguera et al., 2010).

### Concentración de nitrógeno

El nitrógeno favorece el desarrollo de la masa foliar, produciendo una buena captación de luz y mejorando la capacidad fotosintética, las plantas con deficiencia de nitrógeno presentan un crecimiento lento y retardado, decoloración amarilla en las hojas y muerte prematura de las mismas. Con altos niveles de nitrógeno se

produce un desequilibrio entre el área y el radio de la hoja, provocando mayor transpiración y baja absorción de agua provocando estrés hídrico lo que ocasiona pudriciones (Quispe & Zavaleta., 2020). El nitrógeno tuvo un nivel inicial de 5 ppm, que disminuyó a 1.7 ppm.

### Concentración de fósforo

El fósforo juega un papel importante para el crecimiento y desarrollo de los 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 de las plantas y coloración morada en las hojas. Asimismo, la vegetación presenta una disminución en la eficiencia fotosintética, lo que representa un retraso en el proceso de maduración (Palomares., 2021). El nivel óptimo de fósforo es de 20 ppm a 50 ppm. Se observó que la concentración de fósforo en el suelo disminuyó de 0.9 ppm a 0.35 ppm, esto indica que el nivel está muy por debajo del rango óptimo.

### Concentración de potasio

El potasio es esencial para la vegetación, ya que interviene en el crecimiento, desarrollo, defensa y señalización de las plantas, además mejora la absorción de agua y nutrientes. Este elemento está involucrado en aproximadamente 60 reacciones enzimáticas como la fotosíntesis, la respiración, la translocación y la síntesis de proteínas. Las plantaciones con deficiencia de potasio presentan disminución fotosintética, enanismo y necrosis (Soler., 2017). El nivel óptimo de potasio en el suelo es de 195 ppm a 312 ppm, Sin embargo, cuando se produjo el derrame, el nivel fue bajo (0.8 ppm), pero con proceso de fitorremediación aumentó a 1.7 ppm.

### Concentración de zinc

Este elemento está implicado en el metabolismo celular y es fundamental en el desarrollo de diferentes especies vegetales y animales. El zinc en suelos agrícolas varía de 10 ppm a 100 ppm, lo que indica que es un elemento esencial para las plantas. En concentraciones superiores a 400 ppm se considera tóxico; en estas concentraciones provoca problemas de reducción del crecimiento e inhibición de la fijación de CO<sub>2</sub>. En el suelo provoca deterioro en la estructura física al cambiar la textura, compactación y consistencia (Rebaza & Valverde., 2019).

Para la técnica del biocarbón, el nivel de zinc disminuye de 30 ppm a 23 ppm, estando dentro de los rangos permisibles establecidos por el estándar de Luisiana (Santamaria et al, 2021)., que establece valores por debajo de 500 ppm.

### Porcentaje de remediación

La cuantificación de TPH permite calcular el porcentaje de remediación del suelo. El cálculo se realiza siguiendo la Ecuación 1 (Casas & Pineda., 2021).

$$\% \text{ Remediación} = 100 - \frac{TPH_{final} \cdot 100\%}{TPH_{inicial}} \quad (1)$$

La remediación mostró mayor efectividad en el caso del biocarbón, con un porcentaje de 47.86%, lo que demuestra que removió aproximadamente la mitad del hidrocarburo que inicialmente estaba presente, mientras que en el caso de la fitorremediación el porcentaje de remediación fue de 29.81%. Esto indica que las dos técnicas de remediación lograron reducir el porcentaje de hidrocarburos en el suelo.

## 5. Conclusiones

Se observa que la biorremediación con biocarbón presenta un cambio controlado en el intercambio catiónico o regulación de metales y minerales en los suelos, siendo de gran importancia al encontrar suelos contaminados a causa de derrames de hidrocarburos. Sin embargo, al utilizar el proceso de biorremediación en el proyecto por sus controles de limpieza en comparación con la fitorremediación y la acidificación de suelo, se presentaron altos niveles de concentración de metales en el suelo estudiado. Así mismo afecta muchos minerales de interés para el óptimo desarrollo de la planta en desarrollo, lo que lleva a un crecimiento lento o muerte de las hojas, daño al tallo y muerte de las semillas.

Al no agregar la cantidad adecuada de biocarbón, el suelo presentó pérdida de humedad, disminuyendo su capacidad de retención de agua y minerales. Sin embargo, este método logró reducir el nivel de hidrocarburos en el suelo después de 4 meses, se concluye que en un período de tiempo más largo posiblemente el biocarbón absorba todo el hidrocarburo presente en el suelo.

El proceso de fitorremediación, si bien aumentó el pH, siendo este un parámetro importante para las diferentes propiedades del suelo, se afectaron algunos minerales necesarios, como el calcio, el cual desapareció por completo del suelo. Para este método, la mayoría de los elementos estuvieron por debajo de los niveles óptimos en suelo fértil, esto se debe al poco tiempo del experimento y al suelo que se utilizó: suelo pedregoso, compactado y erosionado. Como se mencionó anteriormente, para que el proceso de fitorremediación sea factible, se debe establecer por lo menos en un plazo de 4 meses.

Ninguna de las tecnologías utilizadas fue satisfactoria para lograr un suelo fértil, sin embargo, ambas lograron reducir los niveles de hidrocarburos, lo que permitió llevarlas a cabo a escala industrial para reducir la concentración de metales e hidrocarburos en el suelo, disminuyendo la toxicidad de los ecosistemas y dar un aspecto favorable a los lugares para minimizar el nivel de contaminación en agua y suelo, además del riesgo de sufrir enfermedades por la interacción con el hidrocarburo.

## 6. Agradecimientos

Los autores agradecen a la Universidad Tecnológica del Rodeo (Durango – México) y a la Fundación Universidad de América (Bogotá Colombia) por el apoyo suministrado en la presente investigación.

## Referencias

- [1] Andriulo, A. E.; Irizar A. B. (2017). La materia orgánica como indicador base de calidad del suelo. Manual de indicadores de calidad del suelo para las ecorregiones de Argentina Marcelo G. Wilson [et al.]. 1a ed. *Entre Ríos: Ediciones INTA*, Digital Book, PDF. ISBN 978-987-521-826-0
- [2] Bai, Y.; Wang, Z.; Van der Hoek, J. P. (2022). Remediation potential of agricultural organic micropollutants in *in-situ* techniques: A review. *Ecological Informatics*, 68, 101517. <https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2021.101517>
- [3] Calderón-Medina, C. L., Bautista-Mantilla, G. P., y 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://orinoquia.unillanos.edu.co/index.php/orinoquia/article/view/524>
- [4] Casas, R. (2012). El suelo de cultivo y las condiciones climáticas, 1er ed.; *Paraninfo*, Colombia. <https://www.paraninfo.co/catalogo/9788428332873/el-suelo-de-cultivo-y-las-condiciones-climaticas>
- [5] Casas, S.; Pineda, J. (2021). Evaluación de la fitorremediación de suelos contaminados con petróleo mediano por medio del pasto megathyrus maximus, el girasol helianthus annuus L y el trigo triticum aestivum en el campo Velásquez de Mansarovar Energy ubicado en Puerto Boyacá. Grade Thesis in Chemical and Petroleum Engineering. *Fundación Universidad de América*, Bogotá. <https://repository.uamerica.edu.co/handle/20.500.11839/8638>
- [6] Castellanos, M.; Isaza, R.; Torres, J. (2015). Evaluación de los hidrocarburos totales de petróleo (TPH) sobre suelos urbanos en Maicao, Colombia. *Rev. Colomb. Quim*, 44 (3) 11-17. <http://www.scielo.org.co/pdf/rcq/v44n3/v44n3a02.pdf>
- [7] Delgado-González, C. R.; Rodríguez-Laguna, R.; Capulín-Grande, J.; Madariaga-Navarrete, A.; Islas-Pelcastre, M. (2022). Caracterización fisicoquímica de suelos salinos agrícolas, en la localidad de Chicavasco, estado de Hidalgo, México. *South Florida Journal of Development*, 3(1), 335-344. <https://ojs.southfloridapublishing.com/ojs/index.php/jdev/article/view/1065>
- [8] Durán, E. (2017). Arcillas y biocarbones para la eliminación de contaminantes de origen agrícola en aguas: ensayo en filtro a escala precomercial. Doctoral Thesis. PhD in Natural Resources and Environment. *CSIC - Instituto de Recursos Naturales y Agrobiología de Sevilla (IRNAS)*. <http://hdl.handle.net/10261/161986>
- [9] Ecopetrol S.A. (2014). El petróleo y su mundo. <https://www.ecopetrol.com.co/wps/wcm/connect/aafcca72-30ac-4320-9294-177abfcde944/el-petroleo-y-su-mundo-comprimido.pdf?MOD=AJPERES&attachment=false&id=1588040270272>
- [10] Fernández, L. (2014). Síntesis de carbón activado peletizado a partir de carbón mineral del cerrejón. Master's Thesis. Master in Environmental Engineering. *National University of Colombia*, Bogotá. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/54724>

- [11] Formisano, G.; Roig, C.; Esteras, C.; Ercolano, M. R.; Nuez, F.; Monforte, A. J.; Picó, M. B. (2012). Genetic diversity of Spanish Cucurbita pepo landraces: An unexploited resource for summer squash breeding. *Genetic Resources and Crop Evolution*, 59(6), 1169–1184. <https://link.springer.com/article/10.1007/s10722-011-9753-y>
- [12] Gallart, F. 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. *Grade Thesis Agro-food engineering and rural environment. Universidad Politécnica de Valencia* 2017. <https://riunet.upv.es/handle/10251/94368>
- [13] Gallego, J. L. R.; Peña-Álvarez, V.; Lara, L. M.; Baragaño, D.; Forján, R.; Colina, A.; Prosenkov, A.; Peláez, A. I. (2022). Effective bioremediation of soil from the Burgan oil field (Kuwait) using compost: A comprehensive hydrocarbon and DNA fingerprinting study. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 247, 114267. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2022.114267>
- [14] Hernández-Valencia, I.; Navas, G.; Infante, C. (2017). Fitorremediación de un suelo contaminado con petróleo extra pesado con *Megathyrus maximus*. *Rev. Int. Contam. Ambie*, 33(3), 495–503. <https://doi.org/10.20937/RICA.2017.33.03.12>
- [15] Hussain, A.; Rehman, F.; Rafeeq, H.; Waqas, M.; Asghar, A.; Afsheen, N.; Rahdar, A.; Bilal, M.; Iqbal, H. M. N. (2022). In-situ, Ex-situ, and nano-remediation strategies to treat polluted soil, water, and air - A review. *Chemosphere*, 289, 133252. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.133252>
- [16] Liao, X.; Li, Y.; Miranda-Avilés, R.; Zha, X.; Anguiano, J. H. H.; Moncada Sánchez, C. D.; Puy-Alquiza, M. J.; González, V. P.; Garzon, L. F. R. (2022). *In situ* remediation and *ex situ* treatment practices of arsenic-contaminated soil: An overview on recent advances. *Journal of Hazardous Materials Advances*, 8, 100157. <https://doi.org/10.1016/j.hazadv.2022.100157>
- [17] Londoño, I. (2020). Biorremediación como estrategia para la recuperación de suelos mineros contaminados con mercurio, cadmio y plomo (hg, cd, pb). *Grade Thesis in Chemistry Universidad de Córdoba*. <https://docplayer.es/205893548-Biorremediacion-como-estrategia-para-la-recuperacion-de-suelos-mineros-contaminados-con-mercurio-cadmio-y-plomo-hg-cd-pb.html>
- [18] Low, J. E.; Whitfield Slund, M. L.; Rutter, A.; Zeeb, B. A. (2011). The effects of pruning and nodal adventitious roots on polychlorinated biphenyl uptake by *Cucurbita pepo* grown in field conditions. *Environmental Pollution*, 159(3), 769–775. <https://doi.org/10.1016/J.ENVPOL.2010.11.015>
- [19] Meseguer, I.; Aguilar, V.; González, M. J.; Martínez, C. (1998). Extraction and colorimetric quantification of uronic acids of the pectin fraction in fruit and vegetables. *Journal of Food Composition and Analysis*, 11, 285-291. <https://doi.org/10.1006/jfca.1998.0580>
- [20] Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. Política para la Gestión Sostenible del Suelo. (2016). [https://www.andi.com.co/Uploads/Pol%C3%ADtica\\_para\\_la\\_gesti%C3%B3n\\_sostenible\\_del\\_suelo\\_FINAL.pdf](https://www.andi.com.co/Uploads/Pol%C3%ADtica_para_la_gesti%C3%B3n_sostenible_del_suelo_FINAL.pdf)
- [21] Morales-Bautista, C. M.; Lobato-García, C. E.; Flores-Jiménez, J.; Mendez-Olán, C. (2019). Cambios en las propiedades físicas y químicas de un suelo debido a un proceso de restauración aplicado a un derrame de hidrocarburos. *Acta Universitariaes, Multidisciplinary Scientific Journal*, 29(11) 1-14. <https://doi.org/10.15174/au.2019.2154>
- [22] Mudgal, V.; Raninga, M.; Patel, D.; Ankoliya, D.; Mudgal, A. (2023). A review on Phytoremediation: Sustainable method for removal of heavy metals. *Materials Today: Proceedings*, 77(1), 201-208 <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.11.261>
- [23] Negreiros, A. C. S. V.; Lins, I. D.; Maior, C. B. S.; Moura, M. J. das C. (2022). Oil spills characteristics, detection, and recovery methods: A systematic risk-based view. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 80, 104912. <https://doi.org/10.1016/J.JLP.2022.104912>

- [24] Noguera, S.; Armado, A. (2010). Evaluación de metales en suelos contaminados por 106 derrames de crudo en Yaracal, estado Falcón, Venezuela. *Avances en Química*, 5 (3), 167-175. <https://www.redalyc.org/pdf/933/93315850005.pdf>
- [25] Otani, T.; Seike, N.; Sakata, Y. (2010). Differential uptake of dieldrin and endrin from soil by several plant families and Cucurbita genera. *Soil Science and Plant Nutrition*, 53(1), 86–94. <https://doi.org/10.1111/j.1747-0765.2007.00102.x>
- [26] Palomares, D. (2021). Análisis del nutriente vegetal fosforo en los suelos amazónicos del departamento del Caquetá. *Agronomist Grade Thesis Universidad Nacional Abierta y a Distancia*. <https://repository.unad.edu.co/jspui/bitstream/10596/43181/1/dypalomaresc.pdf>
- [27] Qu, S.; Yang, D.; Yu, H.; Chen, F.; Wang, K.; Ding, W.; Xu, W.; Wang, Y. QTL analysis of early flowering of female flowers in zucchini (*Cucurbita pepo* L.). *Journal of Integrative Agriculture* 2022. <https://doi.org/10.1016/J.JIA.2022.09.009>
- [28] Quispe, Y.; Zavaleta, F. (2020). Eficiencia fitorremediadora de gramíneas forrajeras en suelos con exceso de nitrógeno proveniente de abonamientos frecuentes, baños del inca - 2020. *Grade Thesis Environmental Engineering and Risk Prevention, Universidad Privada Antonio Guillermo Urrelo*. <http://repositorio.upagu.edu.pe/handle/UPAGU/1680>
- [29] Ramírez, D.L.V. (2010). Caracterización y Posterior Remediación Electro-cinética de Suelo Tipo Vertisol Pélico Contaminado con Hidrocarburo Procedente de una Zona Industrial. *Master's Thesis. Centro de Investigación y Desarrollo Tecnológico en Electroquímica, S.C. Querétaro, México*. <http://cideteq.repositorioinstitucional.mx/jspui/handle/1021/213>
- [30] 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. *Grade Thesis in Environmental Engineering, Universidad Nacional de Trujillo*. <http://dspace.unitru.edu.pe/handle/UNITRU/13782>
- [31] Ruiz, K. (2018). Optimización del proceso etanosolv para la obtención de celulosa biomásica y valoración de diferentes rutas de acetilación del material. *Doctoral Thesis. PhD in Environmental Sciences and Technology Centro de investigación en materiales avanzados, s.c. posgrado, Chihuahua*. <https://cimav.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1004/2243/1/Tesis%20Karla%20Ruiz%20Culty.pdf>
- [32] Santamaria, A.; Rossignoli, C.; Sierra, A., Ramírez, H. (2021). Efecto de la aplicación de biocarbón sobre propiedades químicas de suelo y desarrollo y rendimiento de lechuga. *Grade Thesis Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano*. <https://bdigital.zamorano.edu/bitstream/11036/7147/1/CPA-2021-T101.pdf>
- [33] Soler, C. (2017). Respuesta fisiológica de plantas de tomate de árbol (*Solanum Betaceum* Cav) bajo deficiencias y diferentes niveles de nitrógeno, fósforo y potasio. *Master's Thesis in Agricultural Sciences Universidad Nacional de Colombia*. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/59898>
- [34] Vega, A.F.; De Rio A. E.; Barbosa, A. L. (2014). Hidrodesulfuración de curdos de petróleo: base para el mejoramiento de combustibles. Una revisión. *Avances en Ciencias e Ingenierías*, 5(3), 37-60. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=323632128003>
- [35] Whitfield Åslund, M. L.; Rutter, A., Reimer, K. J.; Zeeb, B. A. (2008). The effects of repeated planting, planting density, and specific transfer pathways on PCB uptake by Cucurbita pepo grown in field conditions. *Science of the Total Environment*, 405(1–3), 14–25. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2008.07.066>