



UJAT

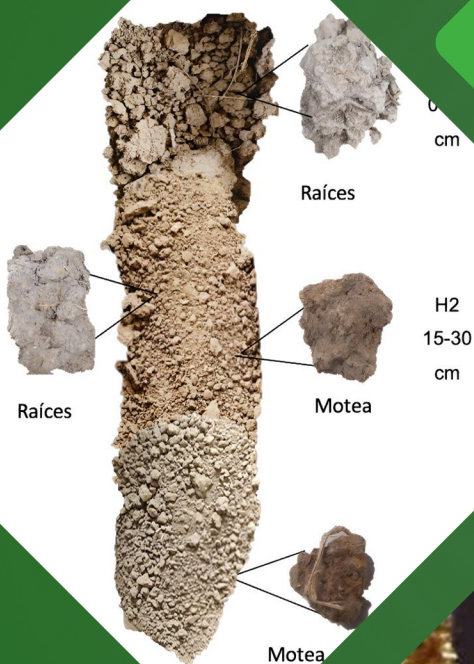
UNIVERSIDAD JUÁREZ
AUTÓNOMA DE TABASCO

“ESTUDIO EN LA DUDA. ACCIÓN EN LA FE”

JOB π S

Journal of Basic Sciences

DACB • UJAT



Nos complace presentar el número 31 del Journal of Basic Sciences, con un conjunto de investigaciones sobre diversas problemáticas ambientales, geocientíficas y tecnológicas, presentes tanto en el estado de Tabasco como en otras regiones del país. A lo largo de las temáticas abordadas en este número, se reflejan los desafíos que generan las actividades humanas sobre el medio ambiente, así como la necesidad de generar soluciones sustentables a partir del conocimiento que se genera en las ciencias básicas y que es aplicado en el desarrollo de tecnologías. El enfoque multi e interdisciplinario característico de esta revista, se refleja al integrar elementos de la química, la física aplicada y las matemáticas, hacia áreas tan diversas como la geografía, la geología, las ciencias ambientales o la biotecnología; ofreciendo un panorama del estado actual de problemáticas específicas y proponiendo al mismo tiempo rutas de acción viables desde una perspectiva técnica, económica y ambiental.

En primer término, se presenta un estudio enfocado a las islas de calor urbano en Villahermosa, Tabasco, en donde a partir de un crecimiento urbano desordenado y la reducción de la cobertura vegetal se han intensificado significativamente las temperaturas locales. Esta situación pone de manifiesto la importancia de incorporar criterios de planificación ecológica en el desarrollo urbano. Por otro lado, se incluye también una evaluación geoquímica de sedimentos lacustres en regiones de San Luis Potosí y Zacatecas, con el objetivo de identificar la concentración y el comportamiento de elementos de tierras raras, con este estudio se aportan datos importantes que permiten entender la evolución geológica de los depósitos sedimentarios analizados, lo que lleva a valorar el potencial económico que representan.

De la misma forma, se presentan dos estudios vinculados a la problemática ambiental generada por la industria petrolera en el estado de Tabasco. Por un lado, se realizó una revisión sistemática de técnicas de remediación contaminados con hidrocarburos, con la finalidad de evaluar su aplicabilidad en función de factores tales como el tipo de suelo, el equipo requerido y la viabilidad. Por otro lado, se exponen los resultados de un estudio realizado en Nacajuca, Tabasco, cuya finalidad fue establecer las alteraciones en el suelo a causa de la contaminación por hidrocarburos, identificando efectos negativos en composición química, estructura y fertilidad.

Así mismo, se incluye una propuesta para aprovechar subproductos agroindustriales generados en Tabasco, implementándolos en procesos de biorremediación, con la finalidad de transformar residuos en insumos útiles para el desarrollo de prácticas sostenibles, con un enfoque de economía circular. Finalmente, se presenta una contribución encaminada a analizar un sistema de celda conectada a un convertidor, desde la perspectiva de la estabilidad energética. Mediante técnicas de control basadas en pasividad, se logra mejorar el rendimiento y comportamiento dinámico del sistema, encaminado a mejorar el desarrollo de tecnologías más limpias y eficientes.

En conjunto, las contribuciones incluidas en este número son una muestra de los distintos esfuerzos encaminados a enfrentar los retos ambientales y tecnológicos actuales, mediante el uso del conocimiento científico y la innovación aplicada, ampliando el entendimiento de fenómenos complejos e impulsando la búsqueda de soluciones prácticas y sostenibles

DIRECTORIO INSTITUCIONAL

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco

Lic. Guillermo Narváez Osorio.
Rector

Dr. Luis Manuel Hernández Govea.
Secretario de Servicios Académicos

Dr. Wilfrido Miguel Contreras Sánchez.
Secretario de Investigación, Posgrado y Vinculación

Dr. Pablo Marín Olán. Director de Difusión,
Divulgación Científica y Tecnológica

Directorio Divisional División Académica de Ciencias Básicas

Dra. Hermicenda Pérez Vidal.
Directora

Dr. Luis Manuel Martínez González.
Coordinador de Investigación

M.C. Abel Cortazar May.
Coordinador de Docencia

L.Q. Esmeralda León Ramos.
Coordinador de Difusión Cultural y Extensión

CONSEJO EDITORIAL

- **Dr. Carlos Ernesto Lobato García.** Editor en Jefe. DACB, Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, <https://orcid.org/0000-0003-3734-7780>
- **Dr. Adib Abiu Silahua Pavón.** Gestor Editorial. DACB, Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, <https://orcid.org/0000-0001-5344-1430>

COMITÉ EDITORIAL

- **Mtra. Claudia Gisela Vázquez Cruz.** Editora Asociada. Actuaría. DACB, Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, <https://orcid.org/0009-0002-1791-5621>
- **Mtra. María Hortensia Almaguer Cantú.** Editora Asociada. Ciencias de la Computación. DACB, Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, <https://orcid.org/0009-0007-7839-9014>
- **Dr. José Arnold González Garrido.** Editor Asociado. Ciencias Farmacéuticas. DACB, Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. <https://orcid.org/0000-0003-1135-4050>
- **Dr. José Luis Benítez Benítez.** Editor Asociado. Física. DACB, Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. <https://orcid.org/0009-0000-0561-5029>
- **Mtro. Guillermo Chávez Hernández.** Editor Asociado. Geofísica. DACB, Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, <https://orcid.org/0000-0002-3555-9678>
- **Dra. Addy Margarita Bolívar Cimé.** Editora Asociada. Matemáticas. DACB, Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, <https://orcid.org/0000-0002-7342-0888>
- **Dra. Nancy Romero Ceronio.** Editora Asociada. Química. DACB, Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, <https://orcid.org/0000-0001-8169-3811>

JOURNAL OF BASIC SCIENCES, Vol. 11, Núm. 31, agosto de 2025, es una publicación continua cuatrimestral, editada por la División Académica de Ciencias Básicas de la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, Av. Universidad S/N, Zona de la Cultura, Col. Magisterial, C.P. 86040, Villahermosa Tabasco, México. Tel. (+52) (933) 358 1500 Ext. 5040. <https://revistas.ujat.mx/index.php/jobs>. Editor Responsable de la Revista: Carlos Ernesto Lobato García. Reserva de derechos al uso exclusivo 04-2015-052110084000-203, ISSN: 2448-4997, ambos otorgado por el Instituto Nacional del Derecho de Autor. Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, Av. Universidad S/N, Zona de la Cultura, Col. Magisterial, Centro, Tabasco. C.P. 86040. Fecha de última actualización, 30 de enero de 2025.

Las opiniones expresadas por los autores no necesariamente reflejan la postura del editor de la publicación y de esta Casa Editora.

Las publicaciones respaldadas con el sello editorial de la UJAT no podrán utilizarse para entrenar modelos de IA generativa, a menos de que haya una declaración expresa, tanto de la Universidad como de los autores y/o herederos.

CONTENIDO

	Pág.
Islas de Calor Superficial Urbano en México: Caso de estudio, Villahermosa, Tabasco	1-8
Evaluación de Tierras Raras en sedimentos lacustres, Mesa Central Norte entre San Luis Potosí y Zacatecas, México	9-17
Factibilidad de los diversos tratamientos para derrames de hidrocarburos en suelos en el Estado de Tabasco	18-35
Análisis geoquímico de acumulación de hidrocarburos en suelos de Tucta, Nacajuca	36-51
Valor agregado a residuos agroindustriales como alternativa en la biorremediación de suelos	52-61
Efecto de un control basado en pasividad en un sistema celda-converter	62-75

Factibilidad de técnicas de remediación de suelos contaminados por hidrocarburos para su aplicación en el estado de Tabasco: revisión sistemática

Cahuich-Flores, S. G.¹ , Morales-Bautista, C. M.¹ , Priego-Mendoza, E. A.¹, Gómez-Rivera A.¹ , Pérez-Vidal, H.^{1,*} , Márquez-Herrera, C. E.² 

¹Red de Investigación Multidisciplinar en Materia Ambiental: Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, C.P. 86690 Cunduacán, Tabasco, México.

²Facultad de Química. Universidad Nacional Autónoma de México. Circuito Escolar S/N, Coyoacán, Cd. Universitaria, 04510 Ciudad de México, CDMX.

*hermicenda.perez@ujat.mx

Resumen

La actividad petrolera del estado Tabasco ha sido sinónimo de oportunidad en cuestiones económicas, pero en el ámbito ambiental, ocasiona efectos negativos por la contaminación significativa al suelo. Cuando esto ocurre, es común que algunos sitios no reciban el tratamiento adecuado por diversas razones, siendo el tema económico el de mayor relevancia. Es por ello, que el objetivo de esta investigación fue realizar una búsqueda de técnicas de remediación para conocer si es factible aplicarlos a los suelos de Tabasco, dichas técnicas se obtuvieron de plataformas de búsqueda con alta calidad científica como: Google Académico, Scielo y Science Direct. Para su búsqueda, el presente trabajo se basó en algunos lineamientos del protocolo PRISMA, para la descripción de cada técnica. Los criterios búsqueda y selección dieron como resultado un total de 10 artículos científicos, sin distinción alguna, considerando si se requiere algún equipo sofisticado, el tiempo de remediación y si la técnica es viable para emplearlo en grandes extensiones de contaminación y con esto considerar si pueden aplicarse en Tabasco.

Palabras claves: *derrame, hidrocarburos, suelos contaminados, técnicas de remediación*

Abstract

Oil activity in the state of Tabasco has been synonymous with economic opportunity, but in the environmental sphere, it causes negative effects due to significant soil contamination. When this occurs, it is common for some sites to not receive adequate treatment for various reasons, the economic issue being the most relevant. Therefore, the objective of this research was to conduct a search for remediation techniques to determine their feasibility in Tabasco soils. These techniques were obtained from high-quality scientific search platforms such as Google Scholar, Scielo, and Science Direct. For the search, this work was based on some guidelines of the PRISMA protocol for the description of each technique. The search and selection criteria resulted in a total of 10 scientific articles, without distinction, considering whether sophisticated equipment is required, the remediation time, and whether the technique is viable for use in large areas of contamination, thus determining whether they can be applied in Tabasco.

Keywords: *spill, hydrocarbons, contaminated soils, remediation techniques*

Recibido: 31 de octubre de 2024, Aceptado: 08 de mayo de 2025, Publicado: 22 de agosto de 2025

1. Introducción

El presente trabajo se basó en la búsqueda de información de metodologías que empleen el uso de técnicas de remediación de suelos, en especial aquellos sitios que han sido impactados por derrames de hidrocarburos y sus posibles aplicaciones a suelos tropicales, como los del estado de Tabasco. De manera general, las causas principales que originan un derrame son diversas, pero pueden ser accidentales o intencionados. Por ejemplo, el vandalismo de oleoductos, fallas mecánicas de las máquinas de perforación, fugas involuntarias de tanques de petróleo, así como de origen natural como los terremotos. Todos estos eventos, dan lugar a impactos ambientales al medio ambiente y la salud humana [1-3].

El estado de Tabasco, México, se conforma de 17 municipios, siendo Cárdenas, Centla, Comalcalco, Jalpa de Méndez, Macuspana y Paraíso los más importantes por ser zonas de gran actividad petrolera y de reservas de petróleo [4]. Dicha actividad opera desde hace varios años y a partir de 1992 se empezaron a documentar registros por derrames de hidrocarburos [5]. Moscoso-Baeza et al. (2022) [4] mencionan que durante el periodo de 2018 a 2021 Petróleos Mexicanos (PEMEX) ha registrado 176 emergencias ambientales, de los cuales 156 han sido provocados por derrames de hidrocarburos y 20 se han registrado por fuga de gas, donde el 63% de estas emergencias pertenecen al estado de Tabasco y Veracruz. Por esta razón, se ha reportado que el impacto ambiental por derrames de hidrocarburos en suelo, pueden alterar lo siguiente: 1. Sus propiedades físicas y químicas (textura, compactación, capacidad de campo, pH, disponibilidad de nutrientes), 2. Las comunidades microbianas (ya que juegan un papel importante en el ciclo de nutrientes, degradación de la materia orgánica y la salud del suelo), 3. Los invertebrados (lombrices, insectos y ácaros, ya que contribuyen a la formación de la estructura del suelo) y 4. Las plantas y animales [6], así como también ocasionar efectos negativos a la salud humana por la exposición, manifestándose como enfermedades cutáneas, digestivas, respiratorias, complicaciones reproductivas y durante el embarazo, entre otros [7-9].

Ante esta problemática el gobierno mexicano consolidó la NOM-138-SEMARNAT-SSA1-2012, para regular mediante lineamientos la concentración de hidrocarburos en suelo y “Establece los límites máximos permisibles de hidrocarburos en suelos y lineamientos para el muestreo en la caracterización y especificaciones para la remediación”, es por ello que el suelo debe ser sometido a una serie de acciones que impliquen su recuperación, que se basa en un conjunto de técnicas, tecnologías o tratamientos de remediación, donde el objetivo es disminuir o eliminar los contaminantes [10]. Estos tratamientos incluyen enfoques químicos (oxidación química, electrocinética), físicos (disposición final, lavado, etc.), térmicos (desorción térmica, incineración, vitrificación, etc.) y biológicos (biorremediación, Bioestimulación, fitorremediación, biolabranza, etc.) y pueden realizarse tanto *in situ* como *ex situ* [10-13].

Para poder elegir alguna técnica de remediación, se debe tener en cuenta la magnitud del sitio contaminado, la topografía, la estructura y las propiedades fisicoquímicas del suelo, así como el tipo y la cantidad del contaminante [14]. Por estas razones, algunos estudios como los de Chan-Quijano et al. (2015) [15] sugieren tres criterios para seleccionar la técnica de remediación más adecuada, estos son: 1) Comprender el uso que se le otorga al sitio (agrícola, forestal recreativo o residencial), 2) Conocer las ventajas, desventajas y limitaciones al realizar una remediación y 3) Tener conocimiento del problema con información reciente. Por tal razón, el objetivo de este trabajo fue realizar una búsqueda de técnicas de remediación que consideren estos aspectos para su aplicación a las condiciones de los suelos de Tabasco.

2. Metodología Experimental

Para el análisis de artículos científicos nos apoyamos con el protocolo PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic and Meta-Analyses), aplicando solamente algunos puntos o temas que se mencionan.

2.1 Criterios búsqueda, recopilación y selección de artículos

Se recopiló información referente al tema de interés, utilizando diferentes plataformas que poseen información científica y de alta calidad como: Google Académico, Scielo y Science Direct. Para la búsqueda de los artículos de difusión, se consideraron trabajos locales, nacionales e internacionales.

Se emplearon las siguientes palabras claves referente al tema de interés como: “Impacto ambiental”, “Remediación”, “Hidrocarburos y Tabasco,” “Suelo contaminado por Hidrocarburo”. A partir de las palabras clave, se fueron modificando las oraciones de búsqueda para obtener información precisa. En la Tabla 1 se muestran las oraciones ingresadas en las plataformas para la búsqueda de artículos.

Tabla 1. Oraciones ingresadas en las plataformas de búsqueda

Español	Inglés
Contaminación de suelo por hidrocarburo	Soil pollution by hydrocarbon
Derrame de hidrocarburo en Tabasco	Hydrocarbon spill in Tabasco
Remediación ambiental en Tabasco	Environmental remediation in Tabasco
Contaminación del suelo por hidrocarburo en Tabasco	Soil pollution by hydrocarbon in Tabasco

Para la selección de artículos científicos se consideró principalmente la fecha de publicación a partir del año 2020, para garantizar que la información sea la más actualizada y observando que se incluyeran en los reportes nuevas técnicas de caracterización y remediación. También se consideraron los siguientes puntos:

- El proceso de remediación efectuado en suelo
- Que el contaminante sea únicamente hidrocarburo
- Que los artículos sean de acceso libre (Open Access)

Posteriormente, la información obtenida se clasificó y se ordenó de forma cronológica de acuerdo con la fecha de publicación del artículo y tomando en cuenta el apellido del autor en orden alfabético en caso de encontrarse artículos publicados en el mismo año.

2.2 Proceso de análisis de los artículos

Los artículos seleccionados se analizaron individualmente, observando su eficacia y criterios, visualizando los objetivos, la justificación en conjunto de la metodología empleada, agrupándola de acuerdo con el tipo de remediación: biológica, química y física.

Todos los artículos seleccionados se les consideró los siguientes criterios para determinar su viabilidad en el estado de Tabasco: a) si el método reportado requiere de un equipo especializado para llevar a cabo la remediación b) que el método de remediación sea eficaz en obtener valores de límites máximos permisibles iguales o menores a los reportados en la NOM-138-SEMARNAT-SSA1-2012 c) la cantidad de tiempo que

requiere el método para remediar, ya sea en horas, días, semanas o meses y d) si los métodos son viables para atender grandes extensiones de áreas, por lo que se verificó que en los artículos se mencionara la remediación de suelos de grandes extensiones en metros cuadrados, kilómetros cuadrados o hectáreas.

3. Resultados y Discusión

3.1 Análisis general de la información y selección de artículos

Los resultados de búsqueda de las plataformas (Google Académico, Scielo y ScienceDirect) se reportan en la Tabla 2 de acuerdo con las palabras claves ingresadas. Las búsquedas arrojaron trabajos de tesis, artículos y revistas de divulgación. Se observó que la plataforma Google Académico se destacó por obtener una mayor cantidad de documentos encontrados a diferencia de la plataforma de Scielo y ScienceDirect en donde hubo una menor cantidad de resultados, a pesar de ser plataformas consideradas para publicación de artículos por su alta calidad de información.

Tabla 2. Comparación de los resultados de búsquedas en las plataformas en el periodo de 2020 - 2024

	Google Académico		Scielo		ScienceDirect	
Oraciones de búsqueda	Total de resultados	Total acotado al periodo de estudio*	Total de resultados	Total acotado al periodo de estudio*	Total de resultados	Total acotado al periodo de estudio*
Contaminación de Suelo por Hidrocarburo	24,800	15,900	10	4	55	7
Derrame de Hidrocarburo en Tabasco	1,870	337	0	0	3	0
Remediación Ambiental en Tabasco	1,560	485	0	0	8	3
Contaminación del Suelo por Hidrocarburo en Tabasco	3,720	808	0	0	6	2

La selección de artículos se realizó de acuerdo con el numeral 2.3, dando como resultados un total de 10 artículos. En la Tabla 3 se muestran los artículos agrupados de acuerdo con la técnica de remediación empleada cronológicamente.

Tabla 3. Artículos clasificados por la técnica de remediación y cronológicamente

Técnica de Remediación	Autor		Título de la Investigación
Biológica	Marques-Benavides et al. (2020) [16]	i.	<i>Phaseolus vulgaris</i> en el tratamiento de suelos agrícolas contaminados por hidrocarburos.
Biológica	Pérez-Hernández et al. (2020) [17]	ii.	Potencial de <i>Mimosa pigra</i> para restaurar suelos contaminados con antraceno y fenantreno.
Biológica	Rico-Cerda et al. 2020 [18]	iii.	Recuperación de suelo contaminado por una mezcla de hidrocarburos
Biológica	Ugaz-Hoyos et al. (2020) [19]	iv.	Biosurfactantes en la biorremediación de suelos contaminados por hidrocarburos.
Biológica	Cruz-Colín et al. (2021) [20]	v.	Vermicomposteo de un suelo contaminado con petróleo.
Biológica	Ojeda-Morales et al. (2023) [21]	vi.	Remediación de suelos contaminados con hidrocarburos empleando sustancias húmicas de vermicomposta.
Química	Lassalle et al. (2023) [22]	vii.	Remediación con haz de electrones de suelos impactados con hidrocarburos pesados.
Química	Moses et al. (2023) [23]	viii.	Una posible remediación de hidrocarburos totales de petróleo de suelos contaminados utilizando nanotubos de carbono multipared suspendidos en surfactante
Física, química y biológica (Mixta)*	Saeed et al. (2021) [24]	ix.	Potencial de bioestimulación del biocarbón para la remediación del suelo contaminado con petróleo crudo y el crecimiento de las plantas.
Física, química y biológica (Mixta)*	Curiel-Alegre et al. (2022) [25]	x.	Aplicación de un consorcio microbiano inmovilizado sobre biochar en la recuperación de un suelo contaminado con hidrocarburo.

*Cuando se usa más de una técnica de remediación en conjunto se denomina mixta o tren de tratamiento.

3.2 Análisis de estructura de cada artículo

A continuación, se reportan los análisis realizados a cada artículo científico, agrupados respectivamente por la técnica de remediación empleada, así como en orden cronológico.

3.2.1 Técnicas de remediación biológica

3.2.1.1 *Phaseolus vulgaris* en el tratamiento de suelos agrícolas contaminados por hidrocarburos

El trabajo fue realizado por Marques-Benavides et al. (2020) [16] en Hidalgo, Michoacán, donde el objetivo principal fue emplear la especie de planta *Phaseolus vulgaris* en conjunto con las bacterias *Azotobacter vinelandii* y *Paenibacillus polymyxa* en suelo contaminado artificialmente a 35,000 ppm de ARA para decrecerlo a un valor inferior al máximo permisible de la NOM-138-SEMARNAT-SSA1-2012.

Para el diseño experimental se utilizó un suelo laterítico con pH 6.64, materia orgánica 2.57%, capacidad de campo 30.08%, capacidad de intercambio catiónico 4.61 mg/100 g y con textura: arcilla 40.56%, arena 0.76% y limo 37.8%. Posteriormente el suelo se contaminó artificialmente con 35,000 ppm de ARA para lograr un decremento de la concentración, menor a 4,400 ppm valor máximo aceptado por la NOM-138-SEMARNAT-SSA1-2012.

Para el proceso de biorremediación, el suelo contaminado inicialmente fue enriquecido por 5 días con lombricomposta (LC) de bovino con la siguiente composición química: nitrógeno total 1.7 %, materia orgánica 34.9%, (P) 0.24%, (Mg) 0.49%, (K) 0.63%, (Ca) 0.63%, pH 7.2. Transcurrido 15 días el suelo contaminado el suelo fue nuevamente enriquecido con un fertilizante mineral (FEMI) con la siguiente composición (g/L): NH_4NO_3 10.0, K_2HPO_4 2.5, KH_2PO_4 2.0, MgSO_4 1.0, NaCl 0.1, CaCl_2 0.1, Fe SO_4 trazas y 10.0 mL/L de una solución de oligoelementos (g/L): H_3BO_3 2.86, $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 0.22, $\text{MgCl}_2 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 1.81, pH ajustado 7.0. Al cumplirse 30 días del enriquecimiento con LC y FEMI en el suelo se sembraron semillas de *P. vulgaris* en conjunto con 1.0 ml de *A. vinelandii* y *P. polymyxa*, los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 4.

Tabla 4. Concentraciones de aceite residual automotriz (ARA) en suelo con *P. vulgaris* e inoculado con *A. vinelandii* *P. polymyxa* a nivel: plántula y prefloración.

Tiempo (Días)	Concentración de ARA (35,000 ppm)	
	Suelo con ARA enriquecido con <i>P. vulgaris</i>	Suelo con ARA (control negativo)
0	35,000 ^{a*}	35,000 ^a
19	15,895 ^a (plántula)	34,986 ^a
24	2,044 ^{a+}	33,832 ^a
33	1,152 ^{a+} (floración)	29,220 ^a

*Valores con letra distinta indican diferencia significativa (ANOVA Tukey $p < 0.05$); +=valores inferiores al máximo permisible de la NOM-138-SEMARNAT-SSA1-2012.

De acuerdo con los resultados presentados, el enriquecimiento del suelo contaminado con ARA a 35,000 ppm con LC y el FEMI favorecieron la siembra de *P. vulgaris* potenciado con *A. vinelandii* y *P. polymyxa*. Logrando a los 19 días una disminución de la concentración y crecimiento de *P. vulgaris*, a los 24 días se redujo la concentración significativamente y a los 33 días la concentración se redujo a un valor de 1,152 ppm con presencia de floración de *P. vulgaris* y logrando estar por debajo de límite máximo de la NOM-138-SEMARNAT-SSA1-2012, en comparación con el control negativo que su degradación fue pobre ya que no fue enriquecido. Por lo tanto, un suelo contaminado con ARA requiere acciones de restitución de su fertilidad, mediante un tipo de LC y FEMI adecuados para facilitar la fitodegradación.

3.2.1.2 El potencial de *Mimosa pigra* para restaurar suelos contaminados con antraceno y fenantreno.

Este trabajo fue realizado por Pérez-Hernández et al. (2020) [17], cuyo objetivo fue evaluar el potencial de la especie vegetal *Mimosa pigra* para remover y bioacumular antraceno y fenantreno, además de conocer los efectos de los contaminantes sobre las propiedades fisicoquímicas del suelo a lo largo de una dinámica de 70 días. Se ha reportado que *M. pigra* tiene la capacidad para remover compuestos orgánicos y translocarlos en sus tejidos ya sea en raíz, tallo, hojas o frutos [26].

Para la fitorremediación se contaminó un suelo de textura franco-limosa con 100 mg/kg de antraceno y 200 mg/kg de fenantreno. Se establecieron tres tratamientos que fueron: suelo contaminado con planta (C1), suelo contaminado sin planta (C2) y suelo no contaminado con planta (C0) con una duración de 70 días, monitoreando el crecimiento y producción de biomasa de la planta. Al término de la experimentación se observó un incremento en la capacidad de retención del agua y una disminución de los contaminantes antes de los siete días para todos los tratamientos. Por otra parte, para el tratamiento C1 se obtuvo un porcentaje remoción del 92% y 80% para fenantreno y antraceno, respectivamente. En cambio, para el tratamiento C2 se obtuvieron porcentajes de remoción del 77% y 60% para fenantreno y antraceno, respectivamente. Como conclusión se observó que las características fisicoquímicas del suelo no se vieron afectadas por la fitorremediación como lo fueron el pH, contenido de nitrógeno, conductividad eléctrica, siendo una

alternativa económica y amigable para reducir estos contaminantes. Por lo que se puede inferir que *M. pigra* tiene la capacidad para ser considerada como planta fitorremediadora de estos compuestos orgánicos.

3.2.1.3 Recuperación de suelo contaminado por una mezcla de hidrocarburos

Este trabajo fue realizado por Rico-Cerda et al. (2020) [18], cuyo objetivo principal fue emplear la fitorremediación para disminuir la concentración de un aceite residual automotriz (ARA) de un suelo contaminado a 100,000 ppm a un valor inferior de 4,400 ppm de la NOM-138-SEMARNAT-SSA1-2012. Para efectuar la fitorremediación del suelo contaminado por ARA en una concentración de 100,000 ppm, se empleó la especie vegetal *Sorghum vulgare* en conjunto con las especies de hongos *Aspergillus niger* y *Penicillium chrysogenum* considerando que estos microorganismos además de estimular el crecimiento del sistema radical vegetal [27], también son capaces de metabolizar hidrocarburos del tipo ARA [28]. Los resultados de la degradación del ARA se reportan en la Tabla 5.

Tabla 5. Concentración de aceite residual automotriz en suelo posterior a la fitorremediación con *Sorghum vulgare* potenciado con *Aspergillus niger* y *Penicillium Chrysogenum* a los 120 días.

Suelo Agrícola Contaminado por ARA	ARA (ppm)	
	Inicial	Final
Suelo sin fitorremediación o control negativo	100,000 ^a	80,000 ^b
Suelo fitorremediado, <i>S. vulgare</i> + <i>A. niger</i> + <i>P. chrysogenum</i>	37,620 ^a	3,400 ^b

Letras diferentes son estadísticamente distintas al 0.05% según Tukey

Fuente: Rico-Cerda et al. 2020

De acuerdo con los resultados se demostró que ambas bacterias pudieron metabolizar los hidrocarburos presentes en el ARA, así como también estimularon el crecimiento radicular de la especie *Sorghum vulgare*. El suelo fitorremediado que incluyó solamente la especie de planta *Sorghum vulgare* logró una disminución de la concentración del ARA de 100,000 ppm a 37,620 ppm para un tiempo de 120 días. Posterior a ese tratamiento se inocularon los hongos *Aspergillus niger* y *Penicillium Chrysogenum* logrando una disminución de la concentración del ARA de 37,620 a 3,400 ppm. Con estos resultados se concluye que la fitorremediación con *Sorghum vulgare* en conjunto con los hongos *Aspergillus niger* y *Penicillium Chrysogenum* logran efectivamente la reducción de las concentraciones del ARA.

3.2.1.4 Biosurfactantes en la biorremediación de suelos contaminados por hidrocarburos

El trabajo fue realizado por Ugaz-Hoyos et al. (2020) [19] en la provincia de Talara, región Piura en Perú y el objetivo fue determinar el rendimiento de surfactantes producidos por *Pseudomonas spp.* degradadoras de hidrocarburos de petróleo. Para resolver una de las principales problemáticas como el riesgo ecológico, afectaciones nocivas en los suelos, para el análisis de suelo contaminado con petróleo de la Empresa Interoil Perú S.A.

El diseño experimental se dividió en dos fases: en la primera fase se determinaron las características del suelo contaminado, cuantificando hidrocarburos totales de petróleo (HTP) por cromatografía de gases acoplada a espectrometría de masas (GC-MS), también se tomó 1 kg de suelo contaminado para el aislamiento de bacterias, determinando el número de microorganismos totales y degradadores hidrocarburos o hidrocarbonoclasticos mediante la técnica del número más probable.

En la segunda fase se determinó el rendimiento de surfactantes producidos por *Pseudomonas spp.* degradadoras de hidrocarburos de petróleo. Primeramente, se realizó la selección de bacterias productoras de surfactantes mediante la prueba de dispersión de gota, se obtuvo el inóculo bacteriano en medio salido Davis con 1% v/v de glicerol a 30 °C durante 24 h con agitación cada 4 h. posteriormente se inoculó nuevamente 5 mL en el mismo medio a 30 °C por 72 h con agitación cada 12 h. se centrifugó y se obtuvo el sobrenadante para la técnica de dispersión de gota, donde se identificó el halo de mayor diámetro de emulsión sobre una capa de hidrocarburo. Se realizó el cálculo $Y(p/x)$ o coeficiente de rendimiento del producto en relación con la biomasa o cantidad de biomasa formada (gg^{-1}), dividiendo los gramos de surfactante entre los gramos de biomasa. Por último, se identificó la actividad detergente mediante una escala elaborada y la actividad emulsificante del surfactante por absorbancia en un espectrofotómetro de luz visible a 540 nm.

En todas las muestras de suelo contaminado se aislaron bacterias heterótrofas cultivables, obteniéndose 113 aislados con agar nutritivo y 135 con agar Mac Conkey, con un total de 248 aislados bacterianos. El género *Pseudomonas* se identificó en el 15.93% de bacterias identificadas con agar nutritivo y 44.44% de aislados en agar MacConkey, obteniéndose 78 aislados de *Pseudomonas spp.* El 55.56% de *Pseudomonas spp.* aisladas en agar nutritivo y 93.33% aisladas en agar Mac Conkey utilizaron petróleo crudo liviano como fuente de carbono y energía, durante 24 - 96 horas, considerándose degradadoras de hidrocarburos de petróleo el 84.62% de aislados. En el medio mínimo de Davis con glicerol como fuente de carbono, el 92.42% de cultivos de *Pseudomonas spp.* degradadores de petróleo desarrollaron durante 72 horas con producción de surfactante.

La actividad detergente de los surfactantes obtenidos o capacidad para facilitar la remoción del petróleo se determinó que (*Pseudomonas spp.* 8JU y 2HI) pueden regular cantidad de petróleo remanente como se muestra en la Tabla 6.

Tabla 6. Rendimiento $Y(p/x)$ de surfactantes producidos por *Pseudomonas spp.* degradadoras de hidrocarburos de petróleo

<i>Pseudomonas spp.</i> UNPRG	x Biomasa ($g L^{-1}$)	p Surfactante ($g L^{-1}$)	Y (p/x) gg^{-1} %	
2HI	4.328	1.50	0.35	35
8JU	4.839	1.50	0.31	31
4CF	5.393	1.00	0.19	0.19

De acuerdo con los resultados obtenidos de la tabla 6, indican que el uso del género *Pseudomonas spp.* pueden ser consideradas potenciales para la disminución de la concentración de los HTP ya que pueden sintetizar surfactantes a partir de los HTP, como las cepas 8JU y 2HI ya que obtuvieron un rendimiento del 31% y 35% en un intervalo de 72 horas. Con esto, se evidencia que las bacterias del género *Pseudomonas spp.* pueden ser empleadas en biorremediación.

3.2.1.5 Vermicomposteo de un suelo contaminado Petróleo

El trabajo fue realizado por Cruz-Colín et al. (2021) [20] en el estado de Tabasco, México. El objetivo de esta investigación fue aplicar la técnica de vermicomposteo para remediar un suelo contaminado con petróleo a 31,634 ppm empleando la especie *Eisenia foetida* y estiercol de caballo como sustrato.

Para el diseño experimental, el suelo contaminado fue caracterizado mediante la NOM-021-SEMARNAT-2000 donde se determinó pH, porcentaje de materia orgánica y nitrógeno orgánico; también se determinó el recuento de bacterias mesófilas aerobias. Para la cuantificación de hidrocarburos totales de petróleo (HTP) en el suelo, se realizó por la técnica de extracción Soxhlet usando diclorometano como solvente. Por

otra parte, al estiércol de caballo, se le determino, pH, carbono orgánico, nitrógeno inorgánico y grasas extraíbles. Las lombrices *E. foetida* fueron sometidos a una aclimatación hacia el sustrato para lograr una asimilación optima de los nutrientes. Los tratamientos establecidos se reportan en la Tabla 7, así como los porcentajes de remoción de HTP.

Tabla 7. Tratamiento de suelo por vermicomposteo

Tratamiento	Nomenclatura	Suelo (g): Sustrato (g): # de lombrices	% Remoción de HTP
Suelo contaminado + Sustrato	C1	180:20:0	9.10
	C2	170:30:0	22.4
	C3	160:40:0	22.6
Suelo Contaminado + Sustrato + Lombrices	T1 – A	180:20:10	15.8
	T1 – B	180:20:20	16.2
	T2 – A	170:30:10	21.9
	T2 – B	170:30:20	19.9
	T3 – A	160:40:10	23.9
	T3 – B	160:40:20	24.8

La experimentación tuvo una duración de 30 días y los resultados demostraron que las lombrices al estar sometidas a la presencia del hidrocarburo ocasionaban una reducción de su peso corporal, esto podría deberse a la poca cantidad del sustrato. Sin embargo, el tratamiento de T3-B fue la que obtuvo el mayor porcentaje de remoción con un valor de 24.8%, debido a que había más presencia de lombrices y sustrato y menos cantidad de suelo contaminado.

Por lo tanto, se concluye que la especie *E. Foetida* tiene el potencial para adaptarse y degradar hidrocarburos hasta tres veces su cantidad, en conjunto con un sustrato, que en este caso fue estiércol de caballo. El sustrato favoreció el crecimiento de las lombrices, es por ello, que en los tratamientos T3-A y T3-B se obtuvieron los mayores porcentajes de remoción.

3.2.1.6 Remediación de suelos contaminados con hidrocarburos empleando sustancias húmicas de vermicomposta

El trabajo fue realizado por Ojeda-Morales et al. (2023) [21] en el estado de Tabasco, México. El objetivo fue evaluar la remoción de hidrocarburos totales del petróleo o HTP en tres suelos con diferentes clases texturales: S1: arcilloso, S2: arcilloso-limoso y S3: migajón arenoso; tratados con diferentes clases de abonos: vermicomposta comercial y sustancias húmicas comerciales (humato de potasio).

Para el diseño experimental, se muestreo suelo de 3 sitios y se le realizaron los parámetros fisicoquímicos de la NOM-021-SEMARNAT-2000 como la textura, densidad aparente, densidad real, humedad, fosforo, magnesio, ácidos húmicos y fúlvicos, pH, temperatura y materia orgánica. El diseño consta con 18 tratamientos (3x3x2) por triplicado (x3), siendo el factor A el tipo de suelo: S1 = Arcilloso, S2 = arcilloso-limoso y S3 = migajón-arenoso; el factor B el contenido de enmienda orgánica (EO): sin vermicomposta (SV) con vermicomposta orgánica (VO) y con sustancias húmicas comerciales (SHC); el factor C la carga microbiana: con microorganismos (CM) y sin microorganismos (SM).

Para la vermicomposta (VO) se empleó la lombriz roja californiana (*Eisenia foetida*) en diferentes sustratos por separado, como la cascarilla de arroz, bagazo de caña, cascarilla de cacao, estiércol de res y una mezcla de todas. Para la enmienda orgánica (EO) se realizó en tres niveles; el primer nivel no contiene EO, solo se agregó H₂O₂ y se mezcló con el suelo y el petróleo. En el segundo nivel se agregó VO. En el tercer nivel solo se usó SHC.

Para la evaluación de degradación de HTP se empleó una cinética de degradación con respecto al tiempo de duración del experimento que fueron a los 15, 30, 45 y 60 días. Los resultados demostraron que para el factor suelo el S2 (arcilloso-limoso) fue el más eficiente, con un valor de $36,106.4 \pm 15,336$ mg/kg $>S3>S1$. Para el factor de EO, la VO fue la mejor con un valor de $34,461 \pm 14,708$ mg/kg y para el factor de microorganismos, CM fue la que presentó más degradación con un valor de $29,694 \pm 13,947$ mg/kg a comparación de la que no tenía microorganismos con un valor de $44,919 \pm 44,937$ mg/kg.

Profundizando más en las interacciones entre factores el suelo S2 y la VO fue la mejor combinación para degradar los HTP con un valor de 32,457 mg/kg (Figura 1b). En la interacción EO-microorganismos, se observó que los microorganismos favorecen la VO para degradar HTP. En la interacción Suelo-microorganismos, se observó que el S2 se vio favorecido por la presencia de microorganismos para degradar HTP con un valor de 26,430.5 mg/kg. Por último, se muestra la cinética de degradación de HTP (Figura 2c), se observa que la VO a los 60 días fue el tratamiento con mayor degradación con un valor de 27,656 mg/kg.

Se concluye que el tipo de suelo, así como la presencia de microorganismos y el uso de enmienda orgánica como la vermicomposta pueden influir en la degradación de HTP y para poder lograr una biorremediación efectiva depende en gran medida de la biodisponibilidad de los nutrientes. La combinación de estos factores demostró que el vermicompostaje es viable para degradar compuestos orgánicos.

3.2.2 Técnicas de remediación Química

3.2.2.1 Remediación con haz de electrones de suelos impactados con hidrocarburos pesados

El estudio fue realizado por Lassalle et al. (2023) [22] en Dublín, California. El objetivo de esta investigación es una demostración de prueba de concepto de la remediación con haz de electrones de suelos impactados con hidrocarburos de petróleo, que se basa en trabajos previos de investigadores.

Se obtuvieron muestras de suelo de diferentes fuentes con sus respectivos tratamientos. La primera se obtuvo suelo de campo; se obtuvieron tres suelos que fueron GSC1AOS, GSI14RD y lodo BT. GSC1AOS y GSI14RD eran suelos arcillosos y muy meteorizados, impactados con petróleo crudo, en cambio lodo BT, era un lodo de estanque de oleaje húmedo, muy impactado. La segunda se obtuvieron dos suelos de referencia que fueron Benchmark 1 (BM1) y Benchmark 2 (BM2). BM1 y BM2 constan de una matriz de arena, limo y arcilla. BM1 es una mezcla de muestras obtenidas de un campo petrolífero fuera de servicio. A las muestras de suelo obtenidas en campo y las de referencia fueron sometidas al haz de electrones, las unidades se miden en kGy (kilogray). las muestras se almacenaron en un tubo de aluminio montado debajo de la viga y conectado a un tubo de lastre para adaptarse a los aumentos de presión debido a la generación de vapor de agua e hidrocarburos. Para la determinación de HTP se empleó cromatografía de gases con detector de ionización de llama (GC-FID) siguiendo los métodos 8015B y 8015C de la EPA SW-846.

Los resultados reportaron (Tabla 8) que los tratamientos GSC1AOS, BM1 y BM2 obtuvieron reducciones significativas de TPH $>75\%$. Para el tratamiento GSC1AOS se observa una reducción del 9.1% a 0.15% con una reducción final de HTP del 98.35%. Para GSI14RD obtuvo una reducción del 58.62%. Para BM1 obtuvo una reducción 1.6% a 0.17% con una reducción de HTP del 89.38%. Para BM2 una reducción de HTP de 76.19%. Por último, para Lodo BT se tuvo que aplicar una dosis más elevada para disminuir los HTP y se logró una disminución del 31.9% al 8% con una reducción de HTP del 74.92%.

Tabla 8. Resumen de suelos tratados con EBeam obtenidos en campo y de referencia. Valores de TPH medidos por GC-FID

Tratamientos	Dosis (kGy)	TPH (% base seca)	Reducción de HTP
GSC1AOS	0	9.1	-
	720	2.3	74.73%
	1000	2.1	76.92%
	1100	0.15	98.35%
GSI14RD	0	2.9	-
	720	1.2	58.62%
BM1	0	1.6	-
	480	1.2	25.00%
	720	1.4	12.50%
	960	0.17	89.38%
BM2	0	2.1	-
	820	0.5	76.19%
Lodo BT	0	31.9	-
	1100	28	12.23%
	820	8	74.92%

Con estos resultados se concluye que a irradiación con haz de electrones fue efectiva para remediar suelos contaminados petróleo. Se demostraron reducciones en TPH por debajo de los niveles objetivo de 1% en peso en una variedad de muestras de suelo obtenidas en el campo y sintetizadas en laboratorio. Las reducciones en el contenido de hidrocarburos se producen a través del craqueo y la volatilización, que resulta ser similar a una desorción térmica y pirólisis relativamente rápida. Esta técnica puede ser viable para ser implementada en el estado de Tabasco, ya que se cuenta con los mismos tipos de suelo, además la técnica no genera emisiones, ya que el proceso se alimenta eléctricamente. Sin embargo, La implementación del proceso para el tratamiento práctico requerirá la adaptación de tecnologías para una remediación segura, rentable y eficiente.

3.2.2.2 Una posible remediación de hidrocarburos totales de petróleo de suelos contaminados utilizando nanotubos de carbono multipared suspendidos en surfactante

El trabajo fue realizado por Moses et al. (2023) [23] en la ciudad de Warri del estado de Delta, Nigeria. El objetivo de este trabajo fue evaluar el potencial de degradación de HTP empleando nanotubos de carbono. los nanotubos de carbono (CNT) empleados, son materiales a nano escala unidimensionales hechos de carbono y pueden clasificarse en términos generales como nanotubos de carbono de paredes múltiples (MWCNT) y nanotubos de carbono de pared simple (SWCNT) con estructuras superficiales que pueden modificarse para brindar buenas características de adsorción.

Para el diseño experimental, se muestreo suelo contaminado por un derrame de petróleo crudo, para luego ser secado, molido y tamizado; luego se le determino capacidad de intercambio catiónico, conductividad eléctrica y el contenido de nitrógeno y fósforo. Los nanotubos de carbono de paredes múltiples (MWCNT) se sintetizaron mediante deposición química de vapor (CVD), las nanopartículas de óxido de hierro (IONP) se sintetizaron mediante la química verde empleando *Telfairia occidentalis* como precursor en un procedimiento similar al método empleado por (Silveira et al. 2018) donde los autores utilizaron $(\text{Fe}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O})$ y $(\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O})$.

Se establecieron tres tratamientos que fueron los siguientes: (1) = MWCNT + surfactante, (2) = nanotubo de carbono + IONP, (3) = nanocompuesto polimérico (NCP) (Polietilenglicol + MWCNT + IONP), para

diferentes tiempos (30, 60, 90 120, 150 y 180 min). Una vez preparados las 3 soluciones diferentes, en un matraz Erlenmeyer de 250 se mezcló 5 g de suelo contaminado con 10 ml de la solución acuosa por separado. Para el análisis de HTP, se utilizó un espectrofotómetro UV/VIS para medir la concentración del sobrenadante y la cantidad de TPH absorbida.

Los resultados demostraron que los tres tratamientos tuvieron una reacción espontánea al inicio, debido a los sitios de absorción fácilmente disponibles. El tratamiento 1 solo con MWCNT obtuvo la tasa de eliminación más alta del 90% a los 90 min, seguido de MWCNT + IONP una tasa del 85.78% a los 150 min, y PNC una tasa del 79.20% a los 30 min. Posiblemente, la diferencia en las tasas de eliminación de HTP entre los tratamientos se debe al hecho de que el tratamiento PNC tiene más grupos funcionales que los otros dos tratamientos. A los 180 min los 3 absorbentes alcanzaron el equilibrio con el siguiente porcentaje de eliminación PNC (75.60%) > MWCNTs + IONP (75.53%) > MWCNTs (75.53%).

Se concluye que la investigación demostró que el uso de la ultrasonificación aplicada a los tres tratamientos produce suspensiones absorbentes para producir altas tasas de eliminación de HTP del suelo, donde los resultados demostraron que a los 90 min o menos, a diferencia de las técnicas de biorremediación que puede tardar meses. Por otra parte, se recomienda estudios que impliquen la germinación de plantas para comprobar su restauración y reducción de la toxicidad.

3.2.3 Técnicas de remediación mixta

3.2.3.1 Potencial de bioestimulación del biocarbón para la remediación del suelo contaminado con petróleo crudo y el crecimiento de las plantas.

El trabajo fue realizado por Saeed et al. (2021) [24] en Florida, EEUU. El objetivo de esta investigación fue determinar el potencial del biochar como una herramienta bioestimulante para degradar hidrocarburos para la remediación de suelos contaminados con petróleo.

Para el diseño experimental, se llevó a cabo en macetas de barro con capacidad de 10 Kg de suelo y se establecieron los siguientes tratamientos: (1) To = Control sin aceite y biochar, (2) T1 = 10% de suelo contaminado con petróleo crudo, (3) T2 = 15% de suelo contaminado con petróleo crudo, (4) T3 = Suelo con 1% de biochar, (5) T4 = biochar + 10% de suelo contaminado con petróleo crudo y, (6) T5 = biochar + 15% de suelo contaminado con petróleo crudo. En cada maceta se dejaron germinar tres semillas y se esperó su germinación, durante toda la experimentación las macetas fueron regadas debidamente. Se obtuvieron muestras de plantas y suelo.

El biochar, se obtuvo el pino australiano de granjas locales, donde fue sometida a una pirolisis de 350 °C, luego fue molida a un tamaño de 2mm y se le realizó análisis elemental por espectrofotómetro de absorción atómica y se midió el pH. Para el suelo, se le determinó el pH, conductividad eléctrica, materia orgánica y contenido de humedad. Para la determinación de HTP se determinó por gravimetría por ultrasonificación, luego por extracción Soxhlet y se cuantificó la concentración cromatografía de gases acoplada a espectrometría de masas. Las plantas fueron extraídas completamente, se lavaron con agua destilada, luego se secaron a 65 °C por 72 h y se midió la biomasa en base seca.

Los resultados de la degradación de HTP reportaron que hubo una disminución significativa en los suelos tratados con biochar ($p=0.05$) después de 40 días a comparación de los días iniciales. Los suelos tratados con biochar obtuvo porcentajes de degradación del 34.2% y 23.6% para el tratamiento T4 y T5, respectivamente.

Por lo tanto, se demuestra el efecto bioestimulante del biochar para remediar suelos contaminados con hidrocarburos. Se observó mejoría en las actividades microbianas y enzimáticas del suelo para degradar los

HTP, así como también la mejoría de los parámetros morfológicos, fisiológicos y bioquímicos de la planta. Se determinó que esta técnica puede ser empleada para tratar contaminaciones de gran escala.

3.2.3.2 Aplicación de un consorcio microbiano inmovilizado sobre biochar en la recuperación de un suelo contaminado con hidrocarburo

Esta investigación fue realizado por Curiel-Alegre et al. (2022) [25]. El objetivo fue probar la efectividad de dos adiciones de biocarbón y el uso de ramnolípidos para aumentar la degradación de hidrocarburos recalcitrantes presentes en un suelo contaminado con petróleo.

Para el diseño experimental, se colectó suelo contaminado con hidrocarburos de fracción pesada y de metales traza, provenientes de un parque de maquinaria; se le determinó textura, densidad aparente, capacidad de retención de agua, conductividad eléctrica, pérdida de ignición, carbono orgánico, nitrógeno total y contenido de cal. También se le determinó metales traza e hidrocarburos totales de petróleo.

Por otra parte, se produjeron dos biocarbones a partir de huesos de albaricoque, uno a 450 °C (BH1) y otro a 650 °C (BH2). Se obtuvieron ramnolípidos (RML) comerciales para aumentar la movilidad de los hidrocarburos. Del suelo contaminado se aisló un consorcio microbiano (mBHB) y se inmovilizó en ambos biocarbones y en RML y se mezcló con el suelo.

Se diseñaron ocho tratamientos de incubación en microcosmos de suelo de 200 g (Tabla 9) para una incubación de 90 días a 22 °C, controlando la aireación y la humedad. Los microcosmos fueron muestreados destructivamente a los 2, 15, 30, 45, 60 y 90 días.

Tabla 9. Diseño experimental de los tratamientos

Muestras	Tratamiento
4CT	Suelo + Agua
BH1	Suelo + BH1 + Agua
BH2	Suelo + BH2 + Agua
RML	Suelo + Ramnolípidos + agua
BA4CT	Suelo + Consorcio + mBHB
BABH1	Suelo + Consorcio inmovilizado – BH1+ mBHB
BABH2	Suelo + Consorcio inmovilizado – BH2 + mBHB
BARML	Suelo + Consorcio + RML + mBHB

De acuerdo con los resultados se encontró que la caracterización de los HTP el 82% correspondían a hidrocarburos de cadena larga con peso molecular de C22 – 35. El análisis de degradación de los HTP se consideró al término de los 90 días. Los tratamientos 4CT y RML, no presentaron degradación. En cambio, para el tratamiento con BH1 y BH2 presentaron degradación del alrededor del 10%, esta degradación fue baja debido a su naturaleza recalcitrante. Por otra parte, los tratamientos en los que se empleó la bioaugmentación mostraron degradaciones más altas, para BA4CT fue del 23 % y para los tratamientos BABH1, BABH2 y BARML fueron cercanos al 30%.

Con estos resultados se concluye que las bajas degradaciones se debían a que el suelo ya se encontraba intemperizado, así como la baja disponibilidad de nutrientes en el suelo, además de la baja biodisponibilidad de estos compuestos a los microorganismos se vio afectada ya que se trataba de un suelo envejecido. Sin embargo, se demostró que la adición de un consorcio microbiano puede degradar hidrocarburos de fracción pesada, aunque también se sugiere que se debe hacer el uso de surfactantes para mejorar la solubilidad de este tipo de hidrocarburos.

3.3 Análisis de artículos científicos y factibilidad de aplicación en suelos de Tabasco

En la Tabla 10 se muestra el análisis comparativo de las técnicas de remediación, identificando la factibilidad de cada una para su aplicación en suelo tabasqueño.

Tabla 10. Análisis comparativo de las técnicas de remediación

No. de Artículo	Autor	Uso de equipo sofisticado	Tiempo de remediación	Capacidad de remediación de grandes extensiones	Reducción de la concentración	Cumplimiento de Normatividad
1	Marques-Benavides et al. (2020) [16]	No requiere	33 días	Extensiones grandes	De 35,000 a 1152 mg/kg	Cumple especificaciones
2	Pérez-Hernández et al. (2020) [17]	No requiere	70 días	Extensiones grandes	92% de remoción	Cumple especificaciones
3	Rico-Cerda et al. 2020 [18]	No requiere	120 días	Extensiones grandes	100,000 a 3400 mg/kg	Cumple especificaciones
4	Ugaz-Hoyos et al. (2020) [19]	Si requiere	72 h	No cumple	No lo menciona	No cumple especificaciones
5	Cruz-Colín et al. (2021) [20]	No requiere	30 días	Extensiones grandes	24.8% de remoción	No Cumple especificaciones
6	Ojeda-Morales et al. (2023) [21]	No requiere	60 días	No cumple	50,000 a 27,000 mg/kg	No cumple especificaciones
7	Lassalle et al. (2023) [22]	Si requiere	De 30 min a 1 h	No cumple	De 91,000 a 1501 mg/kg (98.35% remoción)	Cumple especificaciones
8	Moses et al. (2023) [23]	Si requiere	Hasta 5 meses	No cumple	90% de remoción	Cumple especificaciones
9	Saeed et al. (2021) [24]	Si requiere	40 días	No cumple	34% de remoción	No cumple especificaciones
10	Curiel-Alegre et al. (2022) [25]	Si requiere	90 días	No cumple	4,272 a 3000 mg/kg	Cumple especificaciones

Palma-Vazquez et al. (2017) [29] mencionan que los suelos predominantes en el estado de Tabasco son los Gleysols, Histosols, Fluvisols, Acrisols, Vertisols, Leptosoles, Alisols, Luvisols, Cambisols, Arenosols, Lixisols y Solonchaks. Por lo que hay una variedad de suelos que van desde los arcillosos, arenosos, anegados y de costa. En toda la entidad tabasqueña puede existir por lo menos un caso de contaminación en esos grupos mayores de suelos.

La contaminación de hidrocarburos en Tabasco es muy recurrente por su alta actividad petrolera [30] y el impacto ocasionado es muy significativo, por lo que debe ser considerado el tipo de textura (arcilla, limos, arenas o materia orgánica), siendo los suelos en los que predomine la arena los más vulnerables, ya que el

hidrocarburo recubre las partículas de arena e impide el intercambio catiónico (Solís-García, 2024) [31]. En este caso los artículos 1- 4, 6, 7 y 10 (Tabla 10) si mencionan que tipo de textura contiene su suelo.

También es importante conocer qué tipo de hidrocarburo se encuentra presente en la matriz de suelo por lo que se debe conocer qué tipo de fracción es el hidrocarburo, ya sea: ligera, mediana o pesada, siendo los de fracción ligera y mediana los menos problemáticos para biodegradar, en cambio la fracción pesada tiene una persistencia muy alta [31].

En la Tabla 10, se observa que la duración de las experimentaciones puede variar desde días hasta meses, hay ocasiones en la que puede tomar incluso años, pero muchas veces esto depende de los alcances y limitaciones de la investigación. También se observa que el uso de equipos sofisticados está más presente en las técnicas químicas y algunas biológicas (Artículo 4, 7-10), aunque el uso de estos equipos tiene mucho que ver con los criterios del investigador, ya que también existen métodos tradicionales que pueden ofrecer los mismos resultados con menor presupuesto. además, se consideró si las técnicas pueden aplicarse a grandes extensiones de contaminación de un sitio, las técnicas químicas de los artículos 7-10 (Tabla 10) no aplicaban, ya que se requiere la preparación de soluciones químicas que por lo general suele ser costosas y solo son aplicables a pequeñas cantidades de suelo en gramos.

Es importante destacar los sesgos que representa cada artículo, muchas veces no representan las concentraciones del contaminante de interés, en este caso los autores los omiten reportando las variables de interés, por lo que puede ser complicado una comparación de resultados, aunque se pueden considerar como antecedentes. Es importante destacar que las investigaciones que obtuvieron altas porcentajes de degradación de hidrocarburos son las que más deberían ser consideradas ya que esas pueden ser replicadas u optimizadas, para su aplicación en la remediación de suelos.

Debido a que en Tabasco las áreas de contaminación suelen ser muy grandes se considera que las técnicas biológicas son las más adecuadas (Tabla 10) (Artículo 1-6), ya que se pueden aplicar tanto en suelos contaminados con hidrocarburos de fracción ligera, mediana y pesada, esto se debe a su mayor alcance, teniendo repuestas favorables en un periodo no mayor a 120 días, sin la necesidad de usar herramientas o equipos sofisticados los cuales pueden generar un gasto económico excesivo, cumpliendo con los parámetros de la NOM-138-SEMARNAT-SSA1-201, además de no generar metabolitos que sean tóxicos para el medio ambiente así como también favoreciendo el crecimiento de bacterias, hongos y plantas [19], [31].

4. Conclusiones

En conclusión, las metodologías analizadas para la remediación de suelos impactados por derrames de hidrocarburos destacan la complejidad y los múltiples factores que deben considerarse para su implementación. Aspectos como los costos económicos, los requisitos energéticos, la disponibilidad de nutrientes y contaminantes, las características del suelo y del contaminante, así como los subproductos generados, juegan un papel crucial en la selección de la técnica más adecuada. Si bien las técnicas de remediación in situ suelen ser más eficientes en términos de costo-beneficio al evitar gastos asociados con excavación y transporte, la elección final debe basarse en un análisis integral que garantice la efectividad del proceso y la sostenibilidad ambiental.

Para la selección de alguna de las técnicas se deberán de considerar diferentes variables que pueden ser incluso limitativas, por ejemplo, los costos económicos, los equipos empleados, el tiempo de remediación, conocer si la técnica está disponible en el mercado ya que implicara la importación de esta o si ha sido probado en gran escala.

Las técnicas de remediación física no son recomendables para suelos agrícolas, ya que pueden ser destructivas y económicamente exigentes por la mano de obra y de los materiales empleados. Sin embargo, esta técnica es efectiva ya que requiere un tiempo mínimo de aplicación. Entre las físicas, la térmica generalmente no se aplica en suelos agrícolas ya que es destructiva. Las técnicas de remediación químicas son eficientes por su rapidez y sobre todo porque se puede emplear en cualquier compartimento ambiental, sin embargo, la generación de subproductos no la hace amigable para el medio ambiente. Las técnicas de remediación biológica es una técnica totalmente amigable con el medio ambiente y sobre todo rentable en cuestiones de costos-beneficio, ya que no requiere mucha mano de obra y de personal en el monitoreo. Una de las desventajas es el largo periodo de implementación, sin embargo, son las más viables para aplicarse en el estado de Tabasco, ya que la mayoría de los impactos ambientales son a gran escala y se cuenta con una variedad de recursos biológicos para ser aprovechados en un sistema de biorremediación. Por último, se debe investigar sobre las estrategias que involucre la combinación de diferentes tratamientos de remediación de suelos contaminado por HTP, cuyo enfoque sinérgico pueda resultar en el mejoramiento del rendimiento y en mayores eficiencias de remoción de contaminantes y que sobre todo sea amigable con el medio ambiente.

5. Agradecimientos

Agradecemos a la Secretaria de Ciencias, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI) por la beca de manutención del primer autor en el programa de Doctorado en Ciencias en Química Aplicada de la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. Así como también se agradece a la red de Investigación Multidisciplinar en Materia Ambiental desde la Perspectiva de la Química Aplicada por proporcionar las herramientas necesarias para esta investigación.

6. Conflicto de Intereses

Los autores declaran no tener conflictos de intereses.

7. Declaratoria del uso de Inteligencia Artificial

Los autores declaran que no han utilizado ninguna aplicación, software, páginas web de inteligencia artificial generativa en la redacción del manuscrito, en el diseño de tablas y figuras, ni en el análisis e interpretación de los datos.

8. Referencias

- [1] J. J. dos Santos and L. T. Maranhão, "Rhizospheric microorganisms as a solution for the recovery of soils contaminated by petroleum: A review," *Journal of Environmental Management*, vol. 210, pp. 104–113, Mar. 2018, doi: 10.1016/j.jenvman.2018.01.015.
- [2] I. Hussain *et al.*, "Rhizoremediation of petroleum hydrocarbon-contaminated soils: Improvement opportunities and field applications," *Environmental and Experimental Botany*, vol. 147, pp. 202–219, Mar. 2018, doi: 10.1016/j.envexpbot.2017.12.016.
- [3] H. Singh, N. Bhardwaj, S. K. Arya, and M. Khatri, "Environmental impacts of oil spills and their remediation by magnetic nanomaterials," *Environmental Nanotechnology, Monitoring & Management*, vol. 14, p. 100305, Dec. 2020, doi: 10.1016/j.enmm.2020.100305.

- [4] D. Moscoso-Baeza and A. M. de Escobar-Fernández, “Impacto Económico de la Refinería Olmeca en el municipio de Paraíso, Tabasco,” *Revista de Investigaciones Universidad del Quindío*, vol. 34, no. S5, Art. no. S5, Dec. 2022, doi: 10.33975/riuq.vol34nS5.1086.
- [5] A. Trujillo-Narcía, M. del C. Rivera-Cruz, L. del C. Lagunes-Espinoza, D. J. Palma-López, S. Soto-Sánchez, and G. Ramírez-Valverde, “Efecto De La Restauración De Un Fluvisol Contaminado Con Petróleo Crudo,” *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, vol. 28, no. 4, pp. 361–374, 2012.
- [6] K. Kumar-Yadav, K. Singh, A. Singh, and D. Kumar, “The Ecological Impact of Oil Spills on Soil Health,” *Vigyan Varta*, no. SP3, pp. 93–96, Aug. 2023.
- [7] M. C. Lin et al., “Adverse pregnancy outcome in a petrochemical polluted area in Taiwan,” *Journal of Toxicology and Environmental Health. Part A*, vol. 63, no. 8, pp. 565–574, Aug. 2001, doi: 10.1080/152873901316857743.
- [8] C.-Y. Yang, C.-C. Chang, H.-Y. Chuang, C.-K. Ho, T.-N. Wu, and P.-Y. Chang, “Increased risk of preterm delivery among people living near the three oil refineries in Taiwan,” *Environment International*, vol. 30, no. 3, pp. 337–342, May 2004, doi: 10.1016/S0160-4120(03)00180-6.
- [9] C. Paz-y-Mino et al., “Impacto genético en comunidades Amazónicas del Ecuador localizadas en zonas petroleras,” *Revista Ecuatoriana de Medicina y Ciencias Biológicas*, vol. 1, pp. 7–19, Aug. 2010, doi: 10.26807/remcb.v3i1-2.39.
- [10] C. M. Morales-Bautista, C. E. Lobato-García, J. Flores-Jiménez, and C. Méndez-Olán, “Cambios en las propiedades físicas y químicas de un suelo debido a un proceso de restauración aplicado a un derrame de hidrocarburos,” *Acta Universitaria*, vol. 29, pp. 1–14, Nov. 2019, doi: 10.15174/au.2019.2154.
- [11] T. Volke and A. Velasco, *Tecnologías de remediación para suelos contaminados*. México: Instituto Nacional de Ecología, 2002.
- [12] S. J. Varjani, “Microbial degradation of petroleum hydrocarbons,” *Bioresource Technology*, vol. 223, pp. 277–286, Jan. 2017, doi: 10.1016/j.biortech.2016.10.037.
- [13] A. A. Ahmad et al., “Remediation Methods of Crude Oil Contaminated Soil,” *World Journal of Agriculture and Soil Science*, vol. 4, no. 3, pp. 1–8, Mar. 2020.
- [14] H. Dağhan and M. Öztürk, “Chapter 10 - Soil Pollution in Turkey and Remediation Methods,” in *Soil Remediation and Plants*, K. R. Hakeem, M. Sabir, M. Öztürk, and A. R. Mermut, Eds., San Diego: Academic Press, 2015, pp. 287–312. doi: 10.1016/B978-0-12-799937-1.00010-3.
- [15] J. G. Chan-Quijano, A. Sanchez, S. Ochoa-Gaona, P. Martínez-Zurimendi, L. N. López Jiménez, and A. Vázquez, “Directrices para la remediación de suelos contaminados con hidrocarburos,” *Teoría y Praxis*, vol. 17, pp. 123–144, Jun. 2015, doi: 10.22403/UQROOMX/TYP17/05.
- [16] L. Marques-Benavides, D. Modesto-Sánchez, B. C. Saucedo-Martínez, J. L. Rico-Cerda, L. Bribiesca-Rodríguez, and J. M. Sánchez-Yáñez, “Phaseolus vulgaris en el tratamiento de suelo un agrícola contaminado por hidrocarburos,” *Journal of the Selva Andina Research Society*, vol. 11, no. 2, pp. 94–102, 2020.
- [17] V. Pérez-Hernández, L. M. C. Ventura-Canseco, F. A. Gutierrez-Miceli, I. Pérez-Hernández, M. Hernández-Guzmán, and S. Enciso-Saenz, “The potential of Mimosa pigra to restore contaminated soil with anthracene and phenanthrene,” *Revista Terra Latinoamericana*, vol. 38, no. 4, Art. no. 4, Oct. 2020, doi: 10.28940/terra.v38i4.603.
- [18] J. L. Rico-Cerda, J. L. Ignacio-De la Cruz, P. G. Mondragón-Reynel, and J. M. Sánchez-Yáñez, “Recuperación de un suelo contaminado por una mezcla de hidrocarburos,” *Journal of the Selva Andina Research Society*, vol. 11, no. 2, pp. 75–83, 2020.
- [19] J. Ugaz-Hoyos, H. Vega-Cruz, S. Iglesias-Osores, and C. Carreño-Farfan, “Biosurfactantes en la biorremediación de suelos contaminados por hidrocarburos,” May 29, 2020, *SciELO Preprints*. doi: 10.1590/SciELOPreprints.642.
- [20] M. del R. Cruz-Colín, J. M. Mora-Rodríguez, M. Ávila-Jiménez, M. T. Castañeda-Briones, M. Espinoza-Castañeda, and M. Chávez-Martínez, “Vermicomposteo de un suelo contaminado con petróleo,” *Revista Tendencias en Docencia e Investigación en Química*, vol. 7, no. 7, pp. 552–556, 2021.
- [21] M. E. Ojeda-Morales, Y. Córdova-Bautista, J. G. Álvarez-Ramírez, J. de los S. López-Lázaro, G. Martínez-Pereyra, and C. M. Morales-Bautista, “Remediación de suelos contaminados con hidrocarburos

empleando sustancias húmicas de vermicomposta,” *Revista Terra Latinoamericana*, vol. 41, Jul. 2023, doi: 10.28940/terra.v41i0.1656.

[22] J. Lassalle *et al.*, “Electron beam remediation of soils impacted with heavy hydrocarbons,” *Journal of Hazardous Materials Advances*, vol. 11, p. 100335, Aug. 2023, doi: 10.1016/j.hazadv.2023.100335.

[23] H. Moses, J. O. Odigure, A. J. Otaru, and C. F. Oduoza, “A potential remediation of total petroleum hydrocarbon from contaminated soils using surfactant suspended multiwall carbon nanotubes,” *Results in Engineering*, vol. 19, p. 101371, Sep. 2023, doi: 10.1016/j.rineng.2023.101371.

[24] M. Saeed *et al.*, “Biostimulation potential of biochar for remediating the crude oil contaminated soil and plant growth,” *Saudi Journal of Biological Sciences*, vol. 28, no. 5, pp. 2667–2676, May 2021, doi: 10.1016/j.sjbs.2021.03.044.

[25] S. C. Curiel-Alegre *et al.*, “Aplicación de un consorcio microbiano inmovilizado sobre biochar en la recuperación de un suelo contaminado con hidrocarburos,” *Revista de Ciências Agrárias*, vol. 45, no. 4, Art. no. 4, 2022, doi: 10.19084/rca.28440.

[26] E. A. Pilon-Smits and J. L. Freeman, “Environmental cleanup using plants: biotechnological advances and ecological considerations,” *Frontiers in Ecology and the Environment*, vol. 4, no. 4, pp. 203–210, 2006, doi: 10.1890/1540-9295(2006)004[0203: ECUPBA]2.0.CO;2.

[27] M. D. Guevara-Espinosa, N. Cruz-Miranda, M. C. Rivera-Morales, and K. Fuentes-Ortiz, “Phytoremediation of soils contaminated with Mn and Cu from *Ocimum basilicum*,” *Revista Latinoamericana el Ambiente y las Ciencias*, vol. 9, no. 22, pp. 76–89, Nov. 2018.

[28] H. Contreras and C. Carreño, “Eficiencia de la biodegradación de hidrocarburos de petróleo por hongos filamentosos aislados de suelo contaminado,” *Revista Científica UNTRM: Ciencias Naturales e Ingeniería*, vol. 1, no. 1, Art. no. 1, Apr. 2018, doi: 10.25127/ucni.v1i1.269.

[29] D. J. Palma-López, J. Cisneros Dominguez, E. Moreno Caliz, and J. A. Rincon Ramirez, (PDF) *Suelos de Tabasco: Su Uso y Manejo Sustentable*, 1st ed. Villahermosa, Tabasco: Colegio de Postgraduados-Campus Tabasco, 2007. Accessed: Mar. 31, 2025. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/293958380_Suelos_de_Tabasco_Su_Uso_y_Manejo_Sustentable

[30] J. L. Capdepon Ballina and P. Marín Olán, “La economía de Tabasco y su impacto en el crecimiento urbano de la ciudad de Villahermosa (1960-2010),” *LiminaR*, vol. 12, no. 1, pp. 144–160, Jan. 2014, doi: 10.29043/liminar.v12i1.330.

[31] J. A. Solís García, “Buenas prácticas de remediación y restauración de sitios contaminados con hidrocarburos de petróleo en suelo agrícola,” Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, Villahermosa, Tabasco, 2024. Accessed: Mar. 30, 2024. [Online]. Available: <https://ri.ujat.mx/handle/200.500.12107/4468>