

# REMOCIÓN DE HIDROCARBUROS EN UN SUELO CONTAMINADO EMPLEANDO HONGOS INMOVILIZADOS SOBRE CÁSCARA DE PAPAYA EN UN PROCESO DE COMPOSTAJE

Eric Pascal Houbron<sup>1</sup>, Gabriel Rafael Hernández-Martínez<sup>1</sup>, Juan Enrique Ruiz-Espinosa<sup>2</sup>, Alejandro Zepeda<sup>2</sup>, Michel Canul-Chan<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Facultad de Ciencias Químicas - Región Orizaba Córdoba, Universidad Veracruzana. Laboratorio de Gestión y Control de la Contaminación Ambiental. Prolongación de Avenida Oriente 6 1009, Rafael Alvarado, C.P. 94340 Orizaba, Veracruz

<sup>2</sup>Facultad de Ingeniería Química – Universidad Autónoma de Yucatán. Periférico Norte, Kilómetro 33.5. Tablaje Catastral 13615. Chuburná de Hidalgo Inn, C.P. 97203

Fecha de recepción: 18 de octubre de 2025 - Fecha de aceptación: 7 de julio de 2026

## Resumen

El aceite de motor usado ha generado graves problemas de contaminación en el suelo. Este puede ser descontaminado usando un proceso de compostaje con residuos orgánicos. Las cáscaras de papaya son producidas en grandes cantidades, las cuales pueden ser utilizados como soporte para inmovilizar hongos, para posteriormente emplearse en procesos de compostaje para la remoción de contaminantes. El presente trabajo tuvo como objetivo utilizar una técnica de compostaje para remover los hidrocarburos del petróleo presentes en un suelo contaminado con aceite de motor usado, empleando hongos inmovilizados sobre cáscara de papaya seca. Cinco cepas fúngicas fueron evaluadas para determinar su capacidad de remoción de hidrocarburos. Los hongos fueron cultivados en cajas Petri con PDA y petróleo crudo. Posteriormente, los hongos fueron cultivados sobre cáscara de papaya seca como soporte orgánico. Para cada sistema experimental, se determinó el consumo de hidrocarburos por gravimetría, el cambio de humedad por medio de peso seco y el cambio del pH. Durante la evaluación de la remoción de los hidrocarburos totales del petróleo (HTP) en el suelo las cepas mostraron porcentajes de degradación entre el 10.85 y 60.83 %, así como velocidades de degradación de 0.02312 y 0.00055 g HTP/g suelo por día. Se observaron cambios en la humedad, así como la disminución del pH como resultado de la acción microbiana. Los resultados sugieren que el compostaje con hongos inmovilizados sobre cáscara de papaya es una estrategia viable para la remediación de hidrocarburos, ya que ofrece una alternativa sustentable para el manejo de residuos agroindustriales.

**Palabras claves:** Hidrocarburos del petróleo, Aceite de motor, Papaya, Biodegradación, Biorremediación

---

\*[mcanul@uv.mx](mailto:mcanul@uv.mx); [michelcanul@hotmail.com](mailto:michelcanul@hotmail.com)

## REMOVAL OF HYDROCARBONS FROM CONTAMINATED SOIL USING IMMOBILIZED FUNGI ON PAPAYA PEEL IN A COMPOSTING PROCESS

### Abstract

Engine oil is a petroleum derivative that causes soil contamination. This contamination can be treated using a composting process with organic waste. Papaya peels can be produced in large quantities and can be employed as an organic support for immobilized fungi, to later be used in composting processes for the removal of contaminants. The main objective of the present study was to use a composting technique to remove petroleum hydrocarbons present in soil contaminated with used engine oil. Immobilized fungi on papaya peels were added, which served as the organic support. Five fungal strains were evaluated to determine their hydrocarbon-removal capacity. The strains were initially grown in Petri dishes with PDA medium supplemented with crude oil. Subsequently, they were cultured on dried papaya peels used as an organic support. Hydrocarbon consumption was determined by gravimetry; humidity changes were assessed by dry weight, and pH was measured. During the evaluation of total petroleum hydrocarbon removal from the soil, the strains showed degradation percentages ranging from 10.85 % to 60.83 %, with degradation rates between 0.02312 and 0.00055 g TPH/g soil per day. Changes in humidity were observed, and a decrease in pH was noted due to microbial activity. These findings suggest that composting with immobilized fungi on papaya peels is a viable strategy for hydrocarbon remediation and offers a sustainable alternative for agro-industrial waste management.

**Keywords:** Petroleum hydrocarbons, Engine oil, Papaya, Biodegradation, Bioremediation

### Introducción

La alta demanda de los derivados de los hidrocarburos del petróleo ha ocasionado un incremento en sus procesos de producción, refinamiento, y en sus actividades de distribución (Canul-Chan et al., 2018; Xiao et al., 2024). El aceite de motor es un subproducto derivado de los hidrocarburos del petróleo (Houbbron et al., 2021; Pimda & Bunnag, 2015; Ramadass et al., 2018). Es considerado como un residuo peligroso de manejo especial, y en muchos casos, su mala gestión o disposición final es la principal causa de la contaminación del suelo.

Adicionalmente, su presencia en el suelo puede persistir por más de seis años en algunos ecosistemas, donde puede ocasionar problemas crónicos a la biota endémica del sitio, así como también para la salud humana y la seguridad ecológica (Benguenab & Chibani, 2021; Gaur et al., 2023).

La presencia de los hidrocarburos del petróleo y sus derivados en el suelo tiene un fuerte impacto en la salud de los humanos, debido a lo anterior, los científicos e investigadores trabajan en seleccionar, desarrollar nuevas estrategias y métodos para remediar los ambientes contaminados

(Xiao et al., 2024). Diferentes métodos *in situ* y *ex situ* han sido empleados para remediar los sitios contaminados, donde se han empleado tecnologías para separar y destruir los contaminantes, a través de procesos que involucran ultrasonido, acústica, electromagnetismo, métodos fisicoquímicos, químicos y biológicos. Sin embargo, muchos de los tratamientos son costosos, y no son amigables con el ambiente, además de ser poco efectivos (Ambaye et al., 2022; Gaur et al., 2023).

El compostaje es una técnica de remediación de suelos que ha ganado popularidad debido a su alta eficiencia de degradación y a su fácil manejo. Diversos estudios han empleado el proceso de compostaje como un método para degradar materiales contaminantes, en los cuales se han observado altas tasas de degradación particularmente en los hidrocarburos policíclicos aromáticos llevado a cabo en temperaturas mesófilas (Cai et al., 2023; Gustavo Adolfo et al., 2022). Esta técnica involucra la conversión de desechos orgánicos y agentes contaminantes en abono orgánico como el humus, el cual puede ser usado para mejorar la productividad del suelo en la agricultura (Cai et al., 2023; Fei-Baffoe et al., 2024). Adicionalmente, reduce los costos del tratamiento de los residuos orgánicos. Sin embargo, la remediación del suelo contaminado por medio del composteo depende del potencial metabólico de los microorganismos involucrados en el proceso de remoción de los contaminantes (Rombel et al., 2024). Por lo tanto, es importante identificar métodos de regulación para mejorar el proceso de remediación de los suelos contaminados con hidrocarburos del petróleo y sus derivados. Esto a través del control de los diferentes parámetros fisicoquímicos como la relación del contenido de nutrientes (C/N), la

humedad, la oxigenación, el pH, entre otros (Cai et al., 2023). Diversos estudios han demostrado que el proceso de co-composteo puede mejorar la calidad del suelo y generar beneficios a la agricultura. Debido a lo anterior, la adición de residuos de tallos de maíz, paja, aserrín, entre otros, pueden contribuir al contenido de humedad, mejorar la relación C/N, aeración y a la optimización de la actividad microbiana (Gustavo Adolfo et al., 2022; Robichaud et al., 2019; Xu et al., 2023).

*Carica papaya L.* conocida como “papaya” pertenece a la familia de las *Caricaceae*, es nativa de México y América del sur, puede encontrarse en diversas partes del mundo en regiones tropicales y subtropicales (Sharma et al., 2020). México es el quinto productor de papaya a nivel mundial, produciendo 800, 442 t de los cuales el 60% corresponde a los estados de Oaxaca, Veracruz y Colima (Cruz-Lachica et al., 2018). Las cáscaras de papaya son producidas en grandes cantidades en las residencias y en las compañías de jugos. Algunos estudios han obtenido compuestos fenólicos y azúcares de este residuo, los cuales han sido empleados en la producción de biocombustibles (Jacqueline & Velvizhi, 2024). Así mismo, la adición de residuos de origen agroindustrial a un suelo contaminado ha mejorado la remoción de los hidrocarburos en suelos contaminados. Específicamente, los desechos de materiales lignocelulósicos provenientes de procesos agroindustriales, los cuales han demostrado ser un medio óptimo para el crecimiento de microorganismos y el catabolismo de los hidrocarburos del petróleo presentes en los suelos contaminados (Gustavo Adolfo et al., 2022; Omoni et al., 2024; Omoni et al., 2020). Por lo tanto, se pueden emplear residuos orgánicos de origen agroindustrial para remover hidrocarburos del petróleo del

suelo contaminado a través de un proceso de compostaje, el cual es una estrategia de remediación prometedor y económica para la degradación de los hidrocarburos del petróleo (Gielnik et al., 2019; Koolivand et al., 2022).

La biorremediación es una técnica factible para la degradación de los hidrocarburos del petróleo, la cual emplea bacterias, hongo u otro tipo de microorganismos. Los hidrocarburos de petróleo representan una fuente de carbono y energía para los microorganismos, adicionalmente, generalmente son compuestos con estructuras alifáticas y aromáticas de cadena ramificada y no ramificada susceptibles al ataque microbiano (Ramadass et al., 2018).

La micorremediación es el uso de hongos para descontaminar o eliminar sustancias que contaminan los ecosistemas. Los hongos han sido considerados como una alternativa en los procesos de remediación debido a su capacidad de utilizar a los hidrocarburos del petróleo como fuente de carbono y energía, así mismo, son capaces de sintetizar enzimas que les permiten usar un amplio rango de fuentes de carbono incluyendo los hidrocarburos, y pueden incorporarlos a sus ciclos de crecimiento (Crittenden et al., 2025). Los hongos son organismos heterotróficos y son uno de los tres clados de la vida eucariótica que evolucionó independientemente de la organización celular (Li et al., 2020).

Los hongos de pudrición blanca, como el *Pleurotus ostreatus* son organismos saprofitos especializados en degradar complejos de lignina a través de la exudación de agresivas y no específicas enzimas lignocelulolíticas como son las lacasas y peroxidasas (Lozano-Rodríguez, 2018; Robichaud et al., 2019; Xiao et al.,

2024). Los hongos de pudrición blanca pueden metabolizar derivados del petróleo, ya que pueden hacer biodisponibles a los hidrocarburos bajo condiciones naturales (Xiao et al., 2024). Las enzimas ligninolíticas son las responsables de la degradación de los hidrocarburos policíclicos aromáticos bajo condiciones aeróbicas.

Los hongos de pudrición blanca poseen diversas ventajas sobre los demás hongos, debido a su capacidad de sintetizar enzimas ligninolíticas extracelulares como un mecanismo para tolerar las altas concentraciones de los hidrocarburos policíclicos aromáticos, estas enzimas ayudan a los hongos a mineralizar a las mezclas de estos compuestos. Esto a través de procesos de hidrogenación, deshidrogenación y otras funciones (Zain ul Arifeen et al., 2022).

Se han reportado el uso de *Trametes versicolor* para la degradación del diésel presente en el suelo contaminado, así como *Pleurotus ostreatus* y *Pleurotus willow* en la remoción de antraceno obteniendo eficiencias de degradación superiores al 98% (Acevedo-Sandoval et al., 2018; Bai et al., 2023; Robichaud et al., 2019).

En otros estudios, se han reportado el uso de hongos filamentosos en la remoción de hidrocarburos del petróleo, debido a que la colonización del micelio fúngico contribuye a mejorar la estructura del suelo, y facilita la biodisponibilidad de los contaminantes. Comparado con las bacterias, los hongos filamentosos tienen algunas ventajas en el transporte y traslocación de sustancias esenciales, incluyendo nutrientes y agua, incluso los contaminantes a través de distancias significativas, lo cual puede mejorar la biorremediación (Bai et al., 2023; Li et al., 2020).

Especies de hongos filamentosos como *Trichoderma asperellum* y *Penicillium pedernalense* han sido empleados para degradar hidrocarburos totales del petróleo presentes en un suelo contaminado con diésel (Blanc et al., 2024). Así mismo, especies pertenecientes a los géneros *Aspergillus* y *Purpureocillum* han demostrado la capacidad para remover hidrocarburos alifáticos, clorofenoles e hidrocarburos policíclicos aromáticos, para ser empleados como fuente de carbono y energía (Al-Hawash et al., 2018; Benguenab & Chibani, 2021; Govarthanan et al., 2017; Li et al., 2020).

El objetivo del presente trabajo fue utilizar una técnica de compostaje para remover los hidrocarburos del petróleo presentes en un suelo contaminado con aceite de motor usado, empleando hongos inmovilizados sobre cáscara de papaya seca. Cinco cepas fúngicas fueron evaluadas para determinar su capacidad de crecer en presencia de hidrocarburos del petróleo, colonizar cáscaras de papaya, así como, de remoción de hidrocarburos en un suelo contaminado.

## Metodología

### *Cepas fúngicas*

Se emplearon cinco cepas fúngicas previamente aisladas de diferentes ambientes e identificadas como BL1, HV1, U01, MM2 y SU1. Las cepas BL1, HV1 fueron aisladas previamente de muestras de un suelo salino proviene de la comunidad de Zapotitlán Salinas, la cual se encuentra dentro de la reserva de la Biósfera de Tehuacán-Cuicatlán. Por otra parte, las cepas U01, MM2 y SU1 fueron aisladas de muestras de corteza de árboles con presencia de hongos, estas fueron obtenidas en la zona arqueológica de Actopan localizada en la

Centro Universitario para las Artes la Ciencia y la Cultura en la Ciudad de Córdoba, Veracruz (Lozano-Rodríguez, 2018). Todas las cepas pertenecen a la colección del Laboratorio de Gestión y Control de la Contaminación Ambiental de la Facultad de Ciencias Químicas de la Universidad Veracruzana.

Las cepas fúngicas fueron reactivadas en cajas Petri con agar papa dextrosa (PDA), donde fueron colocados 1 cm<sup>2</sup> del PDA con la cepa. Posteriormente, se llevaron a incubación a 30°C (Incubadora Felisa FE-131) durante 72 h, hasta observar un crecimiento total de las cepas sobre la superficie del agar en la caja Petri. Las cajas Petri con crecimiento fueron empleadas para observar características morfológicas de las cepas fúngicas como el color, textura, y forma.

### *Adaptación de las cepas fúngicas a la presencia de petróleo*

La adaptación de las cepas fúngicas a la presencia de hidrocarburos del petróleo se llevó a cabo por medio de la siembra de los hongos en caja Petri con petróleo crudo. Para ello se emplearon cajas Petri con agar de papa y dextrosa (PDA, Bioxon), las cuales fueron preparadas siguiendo las instrucciones del fabricante. A cada caja Petri con PDA se le adicionó 50 µL de petróleo crudo y se distribuyó sobre la superficie de esta usando un asa de vidrio recta. Posteriormente, las cajas fueron inoculadas con un segmento de 1 cm<sup>2</sup> de agar PDA con cada una de las cepas fúngicas previamente crecidas. Las cajas de Petri fueron llevadas a incubación a temperatura ambiente durante cuatro días para observar el crecimiento fúngico sobre la superficie de la caja Petri.

### **Recolección del suelo contaminado para remediar**

La recolección del suelo contaminado se llevó a cabo en un taller de reparación automotriz. Para esto se emplearon bolsas nuevas de polietileno de 2 kg, una pala de metal previamente lavada con detergentes libres de fosfatos y esterilizada con cloruro de benzalconio al 1%. Durante la recolección se obtuvo una muestra de 10 kg de suelo contaminado con aceite de motor. Posteriormente, el suelo fue transportado al laboratorio, donde se homogenizó manualmente para luego retirar las piedras de tamaño considerable y los objetos extraños al suelo. El pH del suelo contaminado se midió utilizando 1 g de suelo, el cual se colocó en un vaso de precipitado, donde se adicionó 10 ml de agua destilada y se homogeneizó de manera mecánica durante 5 min. Después de la agitación, se dejó reposar durante 1 h para la posterior medición con el potenciómetro debidamente calibrado, acuerdo con la norma NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004. El contenido de humedad se determinó por medio de la diferencia de pesos, se empleó una muestra del suelo de 5 g y un capsula de porcelana a peso contante. La muestra fue colocada en la capsula y colocada en la estufa a 105 °C por 2 h. Después del secado, la capsula con la muestra de suelo fue colocada en un desecador por 1 h y posteriormente se determinó el peso. Se calculó la humedad por diferencia de pesos (Ec. 1) (NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004).

$$(\%H) = \frac{A}{A-B} * 100 \quad (1)$$

Donde: %H es humedad de la muestra, A es el peso de la muestra con humedad (g), B es peso de la muestra seca (g).

La medición de hidrocarburos totales de petróleo (HTP) se realizó por medio de la técnica de extracción de grasas por el método de Soxhlet. Se colocaron 5 g de muestra de suelo contaminado en un cartucho de celulosa, se adicionó hexano grado técnico (CIVEQ) como agente extractor y se ajustó a un tiempo de reflujo de 4 h. La degradación de hidrocarburos totales del petróleo se determinó por medio de la ecuación (Ec. 2):

$$g \text{ HTP} / g \text{ suelo contaminado} = \frac{P_f - P_i}{M} \quad (2)$$

Donde:  $P_f$  es el peso final del matraz balón con el extracto del suelo contaminado expresado en g,  $P_i$  es el peso del matraz balón en peso constante expresado en g, y M es peso de la muestra inicial (5 g).

El porcentaje de remoción de los HTP fue determinado de acuerdo con la ecuación 3.

$$\text{Remoción HTP (\%)} = \frac{HTP_i - HTP_f}{HTP_i} * 100 \quad (3)$$

Donde: Remoción HTP (%) es el porcentaje de remoción de los hidrocarburos totales del petróleo,  $HTP_i$  es la cantidad de HTP presentes en la muestra inicial expresados en g HTP/ g suelo y  $HTP_f$  es la cantidad de HTP presentes en la muestra final expresados en g HTP/ g suelo.

### **Obtención y caracterización del soporte orgánico**

Se recolectaron 5 kg de cáscara de papaya fresca provenientes del Mercado municipal “Emiliano Zapata” en la Ciudad de Orizaba, Veracruz. La cáscara de papaya fue colocada en bolsas de plástico de polietileno nuevas y estériles, y transportadas al laboratorio para su posterior caracterización. Las cáscaras de papaya fueron coladas en charolas de

aluminio y secadas a 80°C en una estufa (Felisa Fe-291) durante 12 h para evitar el crecimiento fúngico u otro agente microbiano.

### ***Propagación e inmovilización sobre el soporte orgánico***

La inmovilización de las cepas fúngicas sobre el soporte orgánico se llevó a cabo en matraces Erlenmeyer de 1 L a los cuales se le adicionó 500 g de cáscaras de papaya previamente secas. La materia seca fue humedecida con la adición de 50 mL de agua estéril para lograr una humedad del 10% v/p, e inoculadas con 1 cm<sup>2</sup> de cada una de las cepas fúngicas previamente crecidas en el PDA en los diferentes matraces, los cuales fueron tapados con una torunda de algodón e incubados a temperatura ambiente hasta observar el crecimiento sobre el soporte.

### ***Evaluación de la degradación de hidrocarburos del petróleo***

La evaluación de la remoción de los HTP se llevó a cabo en los sistemas de compostaje, los cuales consistieron en recipientes de vidrio (dimensiones 21 x 30 x 4.5 cm). En cada unidad de compostaje se colocaron 1 kg de suelo contaminado y 500 g de soporte orgánico con las diferentes cepas fúngicas inmovilizadas, estos sistemas fueron cubiertos con una tela de gasa de algodón blanca con el fin de evitar el paso de insectos al interior, y fueron incubados a temperatura ambiente. Los sistemas de compostaje fueron incubados en el interior del laboratorio a condiciones ambientales de temperatura (25 ± 2°C) y de humedad (75 ± 5%), la duración total de los experimentos fue de 42 días. Los sistemas de compostaje fueron homogenizados manualmente gentilmente cada tercer día, usando una espátula de acero inoxidable para garantizar la transferencia de oxígeno en el sistema y

mejorar el crecimiento de los hongos. El contenido de humedad de los sistemas de compostaje se ajustó 25 ± 1%, para ello se determinando el contenido de humedad de los sistemas como se describió previamente, el ajuste de la humedad se llevó a cabo por medio de la adicionando agua destilada. Se determinó el pH del sistema de los sistemas de compostaje al inicio y durante todo el proceso de remoción de HTP. El contenido de los HTP se evaluó cada 14 días en una muestra de 5 g de suelo empleando un método gravimétrico a través de la técnica de extracción por medio de Soxhlet y hexano como agente extractor durante un tiempo total de 4 h, el cual fue descrito previamente. Todos los experimentos fueron llevados a cabo por triplicado para cada cepa fúngica, se empleó como control abiótico el suelo contaminado sin la adición del soporte orgánico.

La velocidad de degradación se determinó como una razón de cambio, la cual consideró la cantidad de hidrocarburos removidos en un periodo de tiempo establecido. En el presente trabajo la velocidad de degradación se determinó en el periodo de 42 días, para lo cual se empleó la ecuación 4.

$$r_{degradación} = \frac{H_1 - H_2}{t_2 - t_1} \quad (4)$$

Donde  $r_{degradación}$  es la velocidad de degradación de hidrocarburos del petróleo expresados como g HTP/g de suelo \* día,  $H_1$  y  $H_2$  son las concentraciones iniciales y finales de hidrocarburos de petróleo, respectivamente, expresados como g HTP/g de suelo, y  $t_1$  y  $t_2$  son los tiempos inicial y final, respectivamente, expresados en días.

### ***Análisis estadístico***

Los datos colectados en el presente estudio fueron tomados a partir experimentos llevados a cabo por triplicado, los cuales fueron analizados empleando Microsoft Excel. Se aplicó estadística descriptiva, calculando la desviación estándar y los porcentajes de remoción en los sistemas de compostaje, así como los cambios en el pH y la humedad. Adicionalmente, se aplicó un análisis de varianza (ANOVA) con un nivel de significancia de  $p < 0.05$ .

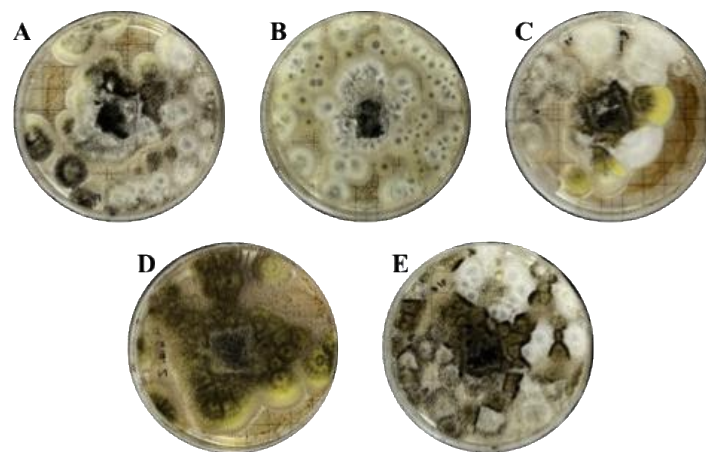
## Resultados

### *Crecimiento de las cepas fúngicas en presencia de hidrocarburos del petróleo*

La comparación del crecimiento y las características macroscópicas de las diferentes cepas fúngicas crecidas en caja Petri con PDA y petróleo crudo pueden ser observadas en la Figura 1. Como se puede observar las cinco cepas fúngicas fueron capaces de crecer en presencia de petróleo crudo. En la Figura 1A, se puede observar el crecimiento de la cepa identificada como BL1, la cual presentó una colonia principal central, acompañadas con diferentes

colonias circulares de color blanco con negro y de textura algodonosa. La cepa creció hasta ocupar la mayor parte de la superficie del agar. La cepa U01 (Figura 1B) tuvo un crecimiento central bien definido de color negro, así mismo se observan diferentes colonias circulares de color blanco con centro negro con bordes definidos. En cuanto a la cepa MM2 (Figura 1C) se observa un crecimiento central con una colonia de forma irregular de color verde oscuro con textura granular, y se observan colonias de forma irregular de color blanco y amarillo con centro negro con textura algodonosa.

En la Figura 1D, se observa el crecimiento de la cepa fúngica SU1, donde se puede observar el crecimiento central de color verde con negro y colonias más pequeñas con textura polvorienta unidas entre ellas del mismo color a la central. Finalmente, la cepa fúngica HV1 (Figura 1E) donde se puede observar el crecimiento a través de diferentes colonias de color blanco con negro el borde de las colonias es filamentososo.

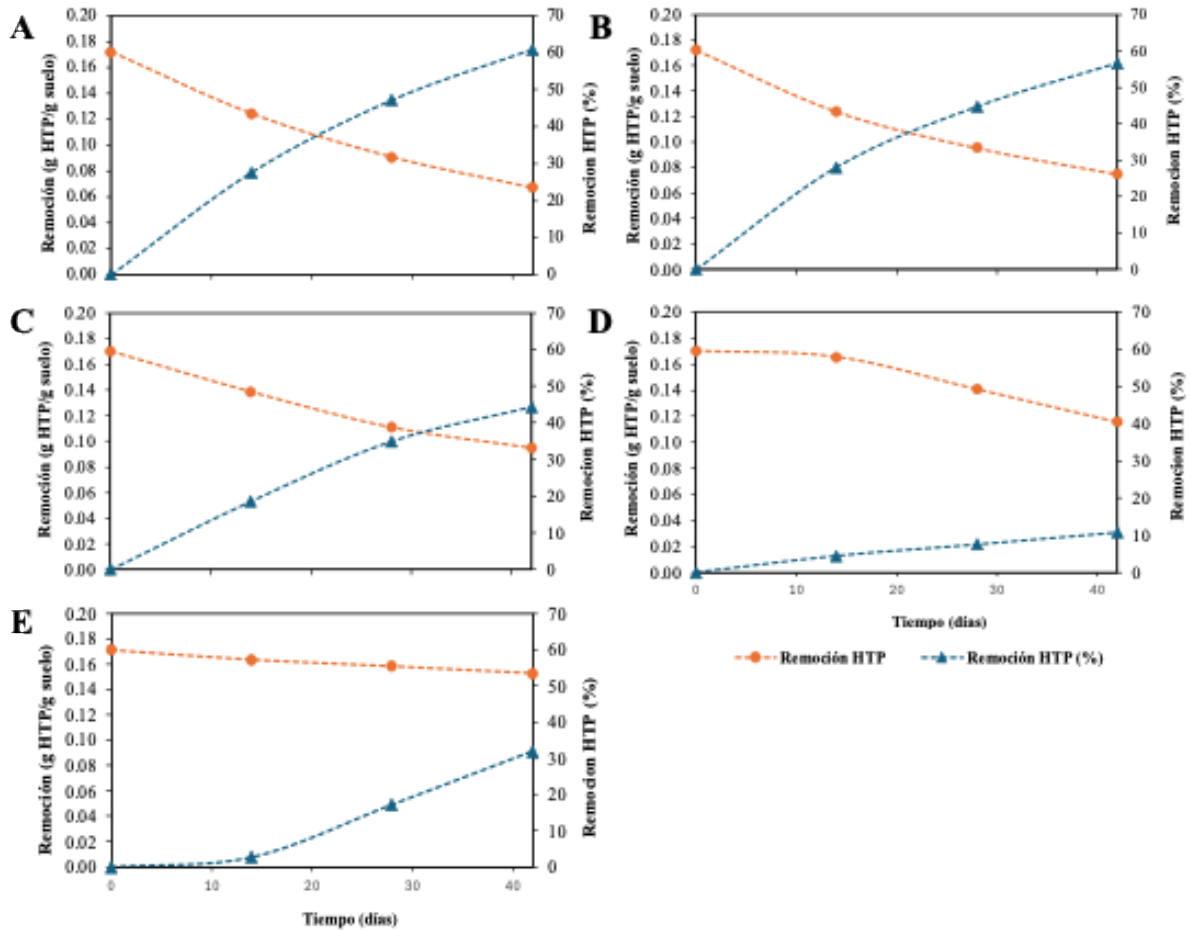


**Figura 1.** Comparación de las características macroscópicas del crecimiento de las diferentes cepas fúngicas en el anverso de las cajas Petri con Agar Papa Dextrosa. A) Cepa BL1, B) Cepa U01, C) Cepa MM2, D) Cepa SU1, E) Cepa HV1

**Suelo contaminado**

El suelo contaminado fue colectado de un sitio visiblemente contaminado con hidrocarburos de petróleo, principalmente por aceite de motor automotriz. En la capa

superficial fueron encontradas partículas extrañas, las cuales fueron retiradas antes de homogenizar la muestra. La determinación de pH mostró un resultado de 6.5, la humedad del suelo fue de 33%. El contenido de los HTP fue de 0.1719 g HTP/g suelo.



**Figura 2.** Comparación de la remoción de los hidrocarburos totales del petróleo presente en el suelo contaminado con aceite de motor usando las diferentes cepas fúngicas A) Cepa BL1, B) Cepa U01, C) Cepa MM2, D) Cepa SU1, E) Cepa HV1.

**Degradación de hidrocarburos totales de petróleo**

La evaluación de la degradación de los HTP tuvo una duración de 42 días para las cinco cepas fúngicas evaluadas, los resultados

pueden ser observados en la Figura 2. La cepa fúngica identificada como BL1 presentó un mayor porcentaje de degradación de los HTP con un 60.83%, seguida de la cepa U01, la cual obtuvo un porcentaje del 56.54% de remoción. Esto

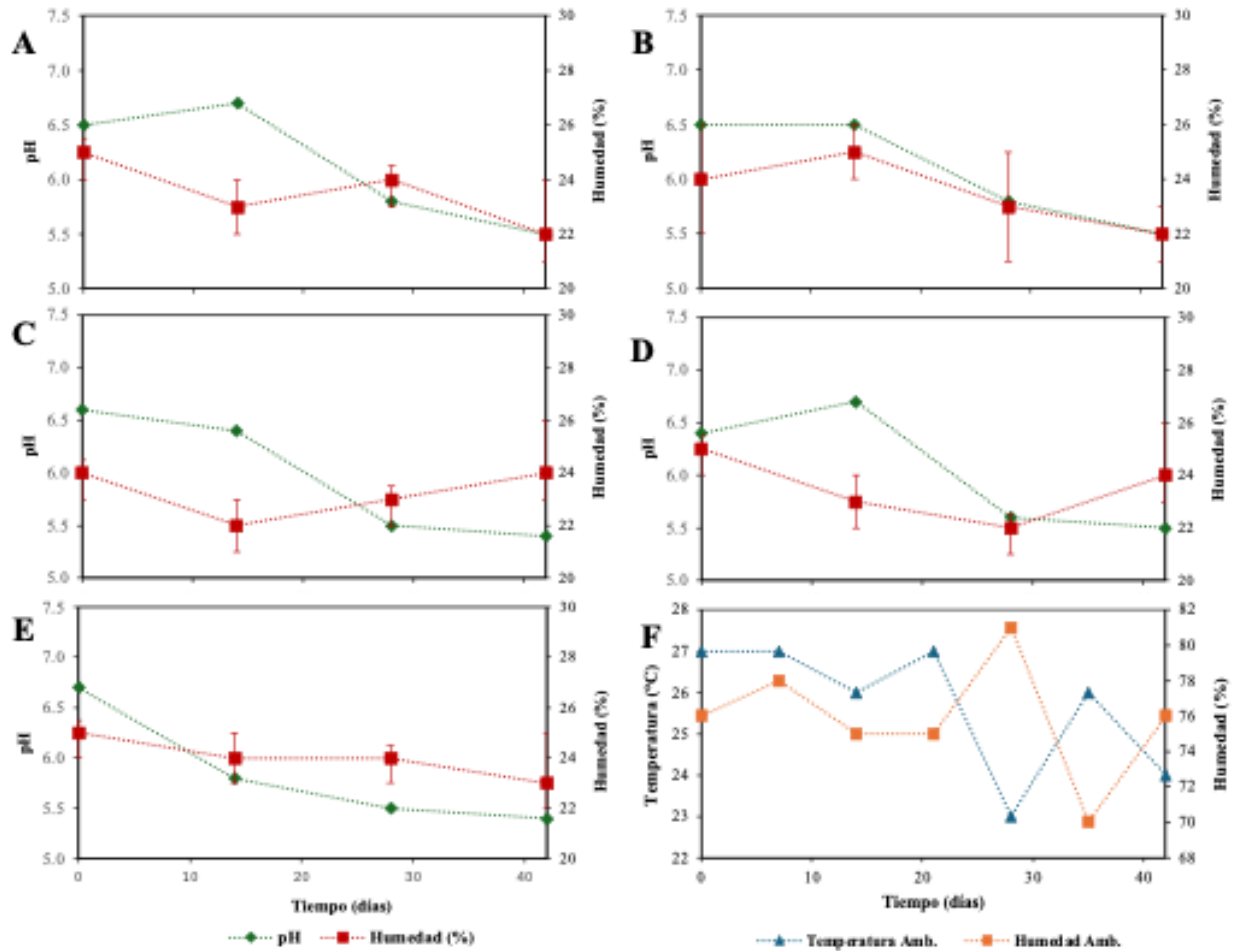
correspondió a una remoción de 0.1045 y 0.0972 g HTP/g suelo para las cepas BL1 y U01, respectivamente. Por otra parte, las cepas fúngicas MM2, SU1 y HV1, presentaron los valores de remociones más bajos, con 0.0753, 0.0544 y 0.0186 g HTP/g suelo, respectivamente. Por lo tanto, sus porcentajes de remoción fueron inferiores al 44.29%. Siendo el porcentaje más bajo de 10.85%, valor obtenido al emplear la cepa fúngica HV1.

En la Figura 3, se observan los resultados de la evaluación del cambio del pH y el porcentaje de humedad de los sistemas de compostaje, así como, los valores de la temperatura y humedad ambiental. En todos los sistemas se obtuvo un pH promedio de  $6.6 \pm 0.1$ . En todos los sistemas se observó una disminución del pH en el día 14 del proceso de compostaje para la remoción de los hidrocarburos del petróleo. Sin embargo, para los sistemas de remoción con la cepa fúngica HV1, se observó una considerable disminución, como se puede observar en la Figura 3E, el pH en el día 14 presentó un valor de 5.8, el cual para los días siguientes disminuyó hasta alcanzar un valor de 5.4 en el día 42 al final de los experimentos. Todos los experimentos finalizaron con valores de pH en un intervalo entre 5.4 y 5.5.

Por otra parte, con respecto al cambio de la humedad en los sistemas de compostaje se

observó un valor inicial en la humedad en el intervalo del 24 al 25 %. Los sistemas con las cepas BL1 y U01 presentaron una tendencia similar al presentar pérdidas de humedad durante los días 14 y 28, posteriormente finalizaron con un valor de la humedad del 22% en el día 42. Los sistemas con las cepas MM2 y SU1 presentaron pérdidas de humedad en los días 14 y 28, finalizando con un valor de 24% en ambos casos. Para los sistemas de compostaje con la cepa HV1 las pérdidas de humedad presentaron una tendencia menor y el valor final de la humedad fue de 23%.

En la Figura 3F, se pueden observar las condiciones ambientales de humedad y temperatura, los valores promedios fueron  $75.85 \pm 3.33$  y  $25.71 \pm 1.6^\circ\text{C}$ , respectivamente. Estas condiciones fueron importantes durante el proceso de remoción de HTP en los sistemas de compostaje, debido a que los sistemas fueron expuestos a las condiciones ambientales. Como se puede observar en la Figura 3F, la humedad ambiental tuvo un descenso en el día 35, pues se presentó un valor del 70%. En cuanto a la temperatura, tuvo un descenso en el día 28 y 42 mostrando valores en un intervalo entre 23 y 24 °C, siendo un poco más bajo de la temperatura promedio obtenida durante la realización de los experimentos.



**Figura 3.** Evaluación del efecto del cambio del pH y la humedad en los sistemas de compostaje con las diferentes cepas fúngicas, y su relación con la exposición a las condiciones ambientales. A) Cepa BL1, B) Cepa U01, C) Cepa MM2, D) Cepa SU1, E) Cepa HV1 y F) Condiciones ambientales registradas durante la evaluación de la degradación en los sistemas de compostaje.

En la Tabla 1, se pueden observar los resultados obtenidos de la remoción de HTP durante el proceso de compostaje empleando las cinco diferentes cepas fúngicas, como se puede observar la mayor cantidad de HTP se obtuvo cuando se emplearon las cepas identificadas como

BL1 y U01, la mayor cantidad de remoción se obtuvo al emplear la cepa BL1. Sin embargo, la mayor velocidad de degradación después de 42 días se obtuvo con la cepa U01 (0.02312 g HTP/g suelo por día). Los valores de pH y humedad fueron semejantes en estos sistemas.

**Tabla 1.** Remoción de los hidrocarburos totales del petróleo, pH, humedad promedio y la velocidad de degradación de las diferentes cepas fúngicas.

Cepa	Remoción (g HTP/g suelo)	Remoción (%)	pH promedio	Humedad promedio (%)	Velocidad de degradación (g HTP/g suelo por día)
BL1	0.1045 ± 0.00424	60.83	6.08±0.56	23.50 ± 0.70	0.02312 ± 0.00086
U01	0.0972 ± 0.00311	56.54	6.13±0.50	23.50 ± 0.57	0.00344 ± 0.00102
MM2	0.0753 ± 0.00919	44.29	5.98±0.58	23.25 ± 0.86	0.00226 ± 0.00058
SU1	0.0544 ± 0.00325	31.98	6.05±0.59	23.50 ± 0.90	0.00179 ± 0.00084
HV1	0.0186 ± 0.00127	10.85	5.85±0.59	24.00 ± 0.62	0.00055 ± 0.00009

Con respecto a las cepas fúngicas MM2 y SU1, el porcentaje de remoción de la cepa fúngica MM2 fue 12.31% superior al valor obtenido con la cepa fúngica SU1. En cuanto a la velocidad de degradación fue mayor en la cepa MM2 con un 21% de incremento respecto al valor obtenido en la cepa SU1. El pH promedio durante el proceso de compostaje con la cepa MM2 presentó un valor más bajo de 5.98, en comparación con el valor obtenido en la cepa SU1 de 6.05. Finalmente, la cepa fúngica HV1 presentó los valores más bajo de remoción y velocidad de degradación, así mismo, presentó el valor de pH más bajo en comparación con las cuatro cepas fúngicas restantes.

## Discusión

Las cepas fúngicas fueron capaces de crecer y tomar a los hidrocarburos presentes en el suelo contaminado. De acuerdo, con lo observado en la morfología de las cinco cepas fúngicas se puede inferir que presentan características semejantes a los hongos filamentosos. Esto con respecto a lo previamente reportado Blanc et al., (2024), cuando siete hongos filamentosos fueron aislados mediante enriquecimiento de suelo

contaminado con hidrocarburos, y demostraron poseer la capacidad de crecer y tomar a los HTP como fuente de carbono y energía.

La remoción de los HTP en los sistemas de compostaje de las cinco cepas fúngicas estuvo en un intervalo entre 10 y 60 %, lo cual corresponde a valores de 0.0186 y 0.1045 g HTP/g suelo. Estos valores son semejantes con lo reportado previamente por Blanc et al. (2024), donde se demostró que el hongo *Trichoderma asperellum* fue capaz de crecer en presencia de diésel removiendo el 54% de los HTP presentes en un suelo contaminado con 0.100 g HTP/g suelo. En otro reporte, se demostró que los hongos aislados de sedimentos marinos fueron capaces de degradar el 25% de los hidrocarburos policíclicos aromáticos en condiciones de anaerobiosis. Así mismo, se evaluó la capacidad de remoción de *Schizophyllum commune* 20R-7-F01, un hongo de pudrición blanca que fue capaz de remover hasta un 25 % de hidrocarburos aromáticos como fenantreno, pireno y benzo-a-pireno en condiciones aeróbicas (Zain ul Arifeen et al., 2022). Por su parte, Benguenab y Chibani (2021) reportaron la capacidad de *Aspergillus ustus* y

*Purpureocillium lilacinum* para degradar petróleo crudo bajo condiciones aerobias en un intervalo de 44.55% y 30.43%, así mismo, se observó la remoción de aceite de motor usado en un rango entre 14.39% y 16%, valores que fueron superados por cuatro de las cinco cepas fúngicas empleadas en el presente trabajo. En otro reporte presentado por Yang et al. (2023), se aislaron dos hongos *Purpureocillium lilacinum* y *Penicillium chrysogenum* de un suelo contaminado con petróleo crudo, los cuales fueron capaces de remover entre un 7.6 % y 15.3 % de los HTP, estos resultados son comparables con los obtenidos de la cepa fúngica HV1 empleada en el presente trabajo. De acuerdo con lo anterior, se puede deducir que los resultados obtenidos en el presente trabajo fueron superiores a los reportes previos.

En el presente trabajo se obtuvo un valor máximo de 64 % de los HTP presentes en el suelo contaminado con aceite de motor usado, esto a través de un proceso de compostaje del suelo contaminado y la adición de las cáscaras de papaya. Este proceso representa una opción de tecnología de remediación de suelos a bajo costo, así mismo, este proceso puede llevarse bajo condiciones controladas, ya sea en pequeña y gran escala. El uso de diversos residuos orgánicos en la remediación de suelos contaminados ha sido explorado, demostrando que puede ser una opción de reutilización y revalorización de los residuos orgánicos de origen agroindustrial, así como, una gestión adecuada a su disposición final (Cai et al., 2023; Jacqueline & Velvizhi, 2024). El empleo de las cáscaras de papaya como soporte orgánico y medio de propagación tuvieron un papel importante para el desarrollo de las cepas fúngicas, siendo este un soporte de propagación a bajo costo. Ya que los

desechos lignocelulósicos han sido empleados como un soporte metabólico y una estrategia de bajo costo en la remediación de ambientes contaminados con hidrocarburos del petróleo (Gustavo Adolfo et al., 2022; Nwankwegu et al., 2016; Robichaud et al., 2019). De acuerdo con un reporte presentado por Xu et al. (2023) la eficiencia de degradación de los HTP presentes en un suelo contaminado estuvieron en un intervalo entre 35.6 % y 61.1 % cuando se adicionaron mezclas de lodos de aguas residuales, desechos de cocina, tallos de maíz y carbono vegetal obtenido de la pirolisis (biochar). Adicionalmente, la adición del biochar al proceso de remoción de HTP en un proceso de co-compostaje incremento en un 12 % la velocidad de degradación de los hidrocarburos. De acuerdo con Robichaud et al. (2019) la adición de composta municipal, un hongo de pudrición blanca (*Pleurotus ostreatus*) y sauce (*Salix planifolia*) fue efectiva para remediar un suelo contaminado con diésel en un clima subártico, esto en comparación con la adición de fertilizantes químicos y un proceso de atenuación natural, lo anterior demuestra que combinación de los tres elementos adicionados permite alcanzar eficiencias de remoción de hasta un 73% de las diferentes fracciones del diésel.

La adición de residuos orgánicos durante la remediación de suelos contaminados ha demostrado que mejora la actividad microbiana, donde la lignocelulosa juega un papel importante en el mecanismo de adsorción y mineralización (García-Sánchez et al., 2015; Xu et al., 2023). Así mismo, la adición de agentes orgánicos e inorgánicos puede tener una influencia en la composición de las comunidades microbianas presentes en el suelo. Los compuestos orgánicos han demostrado

mejorar las propiedades fisicoquímicas y biológicas del suelo, ya que pueden actuar como agentes que brindan soporte, así mismo, incrementan los niveles de carbono, nitrógeno y fósforo, lo cual contribuye a la utilización de los contaminantes como fuente de energía (García-Sánchez et al., 2015; Omoni et al., 2024; Xu et al., 2023).

El pH es un factor crucial en la biodegradación, ya que grandes cambios en este pueden alterar la comunidad fúngica y la actividad enzimática (Bai et al., 2023; Li et al., 2020). De acuerdo con los resultados obtenidos en el presente proyecto los cambios en el pH fueron mínimos al pasar de 6.5 a 5.5 en promedio, esto como resultado de la acción microbiana. Por su parte, la temperatura puede influir en la remoción de contaminantes presente en el suelo, ya que afecta la estructura química de los contaminantes y la biodiversidad fúngica. Además, la viscosidad del petróleo incrementa a bajas temperaturas y por lo tanto la volatilidad se reduce. Los procesos de remoción de contaminantes en el suelo generalmente ocurren en intervalos de temperatura de 30 - 40°C. A altas temperaturas, la solubilidad de los HTP incrementa, lo que permite una mejor biodisponibilidad, pero puede afectar a la estructura y actividad de la comunidad microbiana (Li et al., 2020; Rangel et al., 2018). En el presente trabajo, la temperatura de operación de los sistemas de composteo fue la ambiental y estuvo en un intervalo de  $25 \pm 2^\circ\text{C}$  lo cual permitió un buen desarrollo del proceso de remediación, ya que se observó crecimiento fúngico.

De acuerdo con los reportes de trabajos previos, la técnica de compostaje ha demostrado la disminución de la presencia de los hidrocarburos del petróleo en los suelos contaminados, sin embargo, los

mecanismos de degradación microbianos, así como, los métodos de degradación de hidrocarburos en suelo con la adición de diferentes fuentes de carbono aún no han sido estudiados (Cai et al., 2023; Gustavo Adolfo et al., 2022; Rombel et al., 2024; Xu et al., 2023).

Trabajos adicionales serán necesarios para explicar y elucidar las rutas metabólicas empleadas por las cepas fúngicas durante la remoción de los hidrocarburos, donde se puedan determinar las enzimas que son secretadas para metabolizar a los contaminantes. Será necesario determinar la presencia de producción de biosurfactantes, la cual ha sido reportada durante la remoción y degradación de los hidrocarburos del petróleo. Para poder comprender el metabolismo de los hidrocarburos por parte de las cepas, será necesaria la identificación de las cepas fúngicas empleadas en el presente trabajo a través de métodos de biología molecular. Así mismo, es probable que se pueda mejorar la eficiencia de remoción de hidrocarburos al emplear un consorcio formado por diferentes combinaciones de las cepas fúngicas. Finalmente, es importante cuantificar la concentración final de los HTP y sus intermediarios metabólicos en el producto final del compostaje para asegurar que se puede emplear como mejorador de suelo en los procesos agrícolas.

## Conclusiones

La remoción de hidrocarburos del petróleo presentes en un suelo contaminado fue llevada a cabo por medio de un proceso de compostaje con la adición de cáscara de papaya y cepas fúngicas. Las cinco cepas fúngicas empleadas presentaron la capacidad de crecer en presencia de petróleo crudo, así mismo, se demostró que la cáscara de papaya puede ser usada como

soporte orgánico para crecer e inmovilizar hongos. La evaluación de factores como el cambio de pH y humedad de los sistemas de compostaje fueron claves para dar el seguimiento al proceso de remoción de hidrocarburos. El presente trabajo es un primer acercamiento al empleo de la cascará de papaya como soporte orgánico y adición de nutrientes a un sistema de remediación de suelo a través de un proceso de compostaje. El uso de los residuos de cáscara de papaya proporciona una alternativa a la correcta gestión de residuos agroindustriales. Sin embargo, serán necesarios más trabajos en

esta dirección para ayudar al avance del conocimiento y mejorar la eficiencia del proceso de remoción a través del uso del compostaje como tecnología de remediación de suelos contaminados con hidrocarburos.

### Agradecimientos

Al laboratorio de Gestión y Control de la Contaminación Ambiental de la Facultad de Ciencias Químicas – Orizaba de la Universidad Veracruzana por las facilidades otorgadas en la realización del presente trabajo.

### Referencias

- Acevedo-Sandoval, O., Gutierrez-Alcantara, E., Perez-Balan, R., Rodriguez-Vazquez, G., Zamorategui-Molina, A., & Tirado-Torres, D. (2018). Degradation of polycyclic aromatic hydrocarbons using bacterial isolate from the contaminated soil and white rot fungus *Pleurotus ostreatus*. *Appl. Ecol. Environ. Res*, 16(4), 3815-3829. Doi: [https://www.aloki.hu/pdf/1604\\_38153829.pdf](https://www.aloki.hu/pdf/1604_38153829.pdf)
- Al-Hawash, A. B., Zhang, J., Li, S., Liu, J., Ghalib, H. B., Zhang, X., & Ma, F. (2018). Biodegradation of n-hexadecane by *Aspergillus* sp. RFC-1 and its mechanism. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 164, 398-408. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2018.08.049>
- Ambaye, T. G., Chebbi, A., Formicola, F., Prasad, S., Gomez, F. H., Franzetti, A., & Vaccari, M. (2022). Remediation of soil polluted with petroleum hydrocarbons and its reuse for agriculture: Recent progress, challenges, and perspectives. *Chemosphere*, 293, 133572. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.133572>
- Bai, Y., Liang, H., Wang, L., Tang, T., Li, Y., Cheng, L., & Gao, D. (2023). Bioremediation of Diesel-Contaminated Soil by Fungal Solid-State Fermentation. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 112(1), 13. <https://doi.org/10.1007/s00128-023-03840-3>
- Benguenab, A., & Chibani, A. (2021). Biodegradation of petroleum hydrocarbons by filamentous fungi (*Aspergillus ustus* and *Purpureocillium lilacinum*) isolated from used engine oil contaminated soil. *Acta Ecologica Sinica*, 41(5), 416-423. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.chnaes.2020.10.008>
- Blanc, D. C., Duarte, J. A., & Fiaux, S. B. (2024). Indigenous fungi with the ability to biodegrade hydrocarbons in diesel-contaminated soil are isolated and selected using a simple methodology. *Environmental Pollution*, 357, 124431. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.envpol.2024.124431>

Cai, D., Wang, Y., Zhao, X., Zhang, C., Dang, Q., & Xi, B. (2023). Regulating the biodegradation of petroleum hydrocarbons with different carbon chain structures by composting systems. *Science of The Total Environment*, 903, 166552. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.166552>

Canul-Chan, M., Sánchez-González, M., González-Burgos, A., Zepeda, A., & Rojas-Herrera, R. (2018). Population structures shift during the biodegradation of crude and fuel oil by an indigenous consortium. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 15(1), 1-16. <https://doi.org/10.1007/s13762-017-1362-7>

Crittenden, J., Raudabaugh, D., & Gunsch, C. K. (2025). Isolation, characterization, and mycostimulation of fungi for the degradation of polycyclic aromatic hydrocarbons at a superfund site. *Biodegradation*, 36(1), 15. <https://doi.org/10.1007/s10532-024-10106-0>

Cruz-Lachica, I., Marquez-Zequera, I., Allende-Molar, R., Sañudo-Barajas, J. A., Leon-Felix, J., Ley-Lopez, N., & Garcia-Estrada, R. S. (2018). Diversity of mucoralean fungi in soils of papaya (*Carica papaya* L.) producing regions in Mexico. *Fungal Biology*, 122(8), 810-816. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.funbio.2018.04.008>

Fei-Baffoe, B., Amuah, E. E. Y., Annan, E. L., Sulemana, A., Sackey, L. N. A., Miezah, K., Bentil, J., Nang, D. B., & Kazapoe, R. W. (2024). Synergistic use of cattle bile, compost and fertilizer amendments in enhancing the bioremediation of hydrocarbon-contaminated soils. *Cleaner and Circular Bioeconomy*, 9, 100116. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.clcb.2024.100116>

García-Sánchez, M., Siles, J. A., Cajthaml, T., García-Romera, I., Tlustoš, P., & Száková, J. (2015). Effect of digestate and fly ash applications on soil functional properties and microbial communities. *European Journal of Soil Biology*, 71, 1-12. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ejsobi.2015.08.004>

Gaur, S., Sahani, A., Chattopadhyay, P., Gupta, S., & Jain, A. (2023). Remediation of Waste Engine Oil Contaminated Soil using Rhamnolipid based Detergent Formulation. *Materials Today: Proceedings*, 77, 31-38. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.08.452>

Gielnik, A., Pechaud, Y., Huguenot, D., Cébron, A., Riom, J.-M., Guibaud, G., Esposito, G., & van Hullebusch, E. D. (2019). Effect of digestate application on microbial respiration and bacterial communities' diversity during bioremediation of weathered petroleum hydrocarbons contaminated soils. *Science of The Total Environment*, 670, 271-281. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.03.176>

Govarthanan, M., Fuzisawa, S., Hosogai, T., & Chang, Y.-C. (2017). Biodegradation of aliphatic and aromatic hydrocarbons using the filamentous fungus *Penicillium* sp. CHY-2 and characterization of its manganese peroxidase activity [10.1039/C6RA28687A]. *RSC Advances*, 7(34), 20716-20723. <https://doi.org/10.1039/C6RA28687A>

Gustavo Adolfo, G.-F., Wolf-Anno, B., Martin, R., & Christina, S. (2022). Co-composting of biochar and nitrogen-poor organic residues: Nitrogen losses and fate of polycyclic aromatic hydrocarbons. *Waste Management*, 143, 84-94.

<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.wasman.2022.02.025>

Houbron, E., Cruz-Carmona, E., Ponciano-Rosas, A., Rustrián-Portilla, E., & Canul-Chan, M. (2021). Motor oil wastewater treatment in a packed bed bioreactor using immobilized native microbial consortium. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, 20(2), 761-773. <https://rmiq.org/iqfvp/Numbers/V20/No2/IA2271.pdf>

Jacqueline, P. J., & Velvizhi, G. (2024). Substantial physicochemical pretreatment and rapid delignification of lignocellulosic banana, pineapple and papaya fruit peels: A study on physical-chemical characterization. *Sustainable Chemistry and Pharmacy*, 37, 101347. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scp.2023.101347>

Koolivand, A., Abtahi, H., Parhamfar, M., Saeedi, R., Coulon, F., Kumar, V., Villaseñor, J., Sartaj, M., Najarian, N., Shahsavari, M., Seyedmoradi, P., Rahimi, L., & Bagheri, F. (2022). The effect of petroleum hydrocarbons concentration on competition between oil-degrading bacteria and indigenous compost microorganisms in petroleum sludge bioremediation. *Environmental Technology & Innovation*, 26, 102319.

<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.eti.2022.102319>

Li, Q., Liu, J., & Gadd, G. M. (2020). Fungal bioremediation of soil co-contaminated with petroleum hydrocarbons and toxic metals. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 104(21), 8999-9008. Doi: 10.1007/s00253-020-10854-y

Lozano-Rodríguez, J. E. H.-R., A.C.; Sandoval-Eliás, E.; González-López, G.; Canul-Chan, M.; Houbron, E. y Rustrián-Portilla, E. . (2018). Aislamiento De Hongos Con Potencial Para Degradar Hidrocarburos y Lignina. *Revista del Centro de Graduados e Investigación. Instituto Tecnológico de Mérida*, 33(73), 478-481. <https://doi.org/https://www.revistadelcentrodegraduados.com/2019/11/aislamiento-de-hongos-con-potencial.html?m=0>

Nwankwegu, A. S., Onwosi, C. O., Orji, M. U., Anaukwu, C. G., Okafor, U. C., Azi, F., & Martins, P. E. (2016). Reclamation of DPK hydrocarbon polluted agricultural soil using a selected bulking agent. *Journal of Environmental Management*, 172, 136-142. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.02.032>

Omoni, V. T., Bankole, P. O., Semple, K. T., Ojo, A. S., Ibeto, C., Okekporo, S. E., & Harrison, I. A. (2024). Enhanced Remediation of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Soil Through Fungal Delignification Strategy and Organic Waste Amendment: A Review. *Indian Journal of Microbiology*. <https://doi.org/10.1007/s12088-024-01383-7>

Omoni, V. T., Lag-Brotons, A. J., & Semple, K. T. (2020). Impact of organic amendments on the development of 14C-phenanthrene catabolism in soil. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 151, 104991. <https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2020.104991>

Pimda, W., & Bunnag, S. (2015). Biodegradation of waste motor oil by *Nostoc hatei* strain TISTR 8405 in water containing heavy metals and nutrients as co-contaminants. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 28, 117-123.

<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jiec.2015.02.006>

Ramadass, K., Megharaj, M., Venkateswarlu, K., & Naidu, R. (2018). Bioavailability of weathered hydrocarbons in engine oil-contaminated soil: Impact of bioaugmentation mediated by *Pseudomonas* spp. on bioremediation. *Science of The Total Environment*, 636, 968-974. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.04.379>

Rangel, D. E., Finlay, R. D., Hallsworth, J. E., Dadachova, E., & Gadd, G. M. (2018). Fungal strategies for dealing with environment-and agriculture-induced stresses. *Fungal Biology*, 122(6), 602-612. <https://doi.org/10.1016/j.funbio.2018.02.002>

Robichaud, K., Girard, C., Dagher, D., Stewart, K., Labrecque, M., Hijri, M., & Amyot, M. (2019). Local fungi, willow and municipal compost effectively remediate petroleum-contaminated soil in the Canadian North. *Chemosphere*, 220, 47-55.

<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.12.108>

Rombel, A., Rózyło, K., & Oleszczuk, P. (2024). The high dose of biochar reduces polycyclic aromatic hydrocarbons losses during co-composting of sewage sludge and wheat straw. *Journal of Environmental Management*, 351, 119628.

<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.119628>

Sharma, A., Bachheti, A., Sharma, P., Bachheti, R. K., & Husen, A. (2020). Phytochemistry, pharmacological activities, nanoparticle fabrication, commercial products and waste utilization of *Carica papaya* L.: A comprehensive review. *Current Research in Biotechnology*, 2, 145-160. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.crbiot.2020.11.001>

Xiao, L., Zhao, X., Yao, J., Lu, Q., Feng, X., & Wu, S. (2024). Biodegradation and adsorption of benzo[a]pyrene by fungi-bacterial coculture. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 283, 116811. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2024.116811>

Xu, S., Zhan, J., Li, L., Zhu, Y., Liu, J., & Guo, X. (2023). Total petroleum hydrocarbons and influencing factors in co-composting of rural sewage sludge and organic solid wastes. *Environmental Pollution*, 319, 120911.

<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.envpol.2022.120911>

Yang, S., Zhang, J., Liu, Y., & Feng, W. (2023). Biodegradation of hydrocarbons by *Purpureocillium lilacinum* and *Penicillium chrysogenum* from heavy oil sludge and their potential for bioremediation of contaminated soils. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 178, 105566. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2023.105566>

Zain ul Arifeen, M., Ma, Y., Wu, T., Chu, C., Liu, X., Jiang, J., Li, D., Xue, Y.-R., & Liu, C.-H. (2022). Anaerobic biodegradation of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) by fungi

isolated from anaerobic coal-associated sediments at 2.5 km below the seafloor.  
*Chemosphere*, 303, 135062.

<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.135062>