

Biorremediación con vermicomposta en la contaminación del suelo producida por hidrocarburos

Cruz Torres Nestor¹, Meléndez Estrada Jorge¹, Leal Castañeda Everth Jimena¹

¹Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura, Sección de Estudios de Posgrado e Investigación-Ambiental. Av. Miguel Bernard S/N Unidad Profesional Adolfo López Mateos, Zacatenco, Gustavo A. Madero, Ciudad de México, C.P. 07738, México.

*Autor para correspondencia: Nussy0226@outlook.com

Recibido:

15/julio/2021

Aceptado:

23/octubre/2021

Palabras clave:

Biorremediación,
degradación,
lombriz

Keywords:

Bioremediation,
degradation,
earthworms

RESUMEN

Para hacer frente a la contaminación ocasionada por el petróleo, es necesario tener un conocimiento integral en los procesos de degradación de los hidrocarburos, para dar la solución más apropiada a los problemas producidos en los suelos. Entre las opciones más adecuadas y sustentables está la biorremediación, esta se ayuda de agentes biológicos para la degradación de compuestos peligrosos y/o poder reducir en un máximo su nivel de peligrosidad. En esta investigación se estudió y analizó el tratamiento y degradación de la turbosina aplicando biorremediación con ayuda de la lombriz roja californiana (*Eisenia foetida*) para lograr la restauración de las propiedades físico-químicas alteradas por consecuencia de dicho combustible. Se logró alcanzar un porcentaje aceptable dentro de la descontaminación (69% en máxima humedad y 66% en humedad mínima), reforzando esto con germinación de plantas las cuales lograron crecer de forma exitosa presentando características físicas notablemente más desarrolladas.

ABSTRACT

To deal with the pollution caused by oil, it is necessary to have a comprehensive knowledge of the degradation processes of hydrocarbons, to give the most appropriate solution to the problems produced in soils. Among the most appropriate and sustainable options is bioremediation, this is helped by biological agents for the degradation of dangerous compounds and/or to reduce their level of danger as much as possible. In this research, the treatment and degradation of jet fuel was studied and analyzed by applying bioremediation with the help of the Californian red worm (*Eisenia foetida*) to achieve the restoration of the altered physicochemical properties as a consequence of said fuel. It was possible to reach an acceptable percentage within the decontamination (69% in maximum humidity and 66% in minimum humidity), reinforcing this with germination of plants which managed to grow successfully presenting noticeably more developed physical characteristics.

Introducción

Una de las principales problemáticas mundiales en la actualidad es la contaminación, y la contaminación proveniente del petróleo y sus derivados es sin duda una de las más dañinas al ambiente ya sea en el agua o en el suelo (Prado, 2011). La contaminación a causa del petróleo y sus derivados es un problema frecuente en el medio ambiente, por lo cual, se necesita un conocimiento integral de los procesos de degradación de los hidrocarburos y las consecuencias de su presencia en el medio edáfico, de tal manera que se proporcionen soluciones satisfactorias para paliar los problemas que pueden producir sobre los suelos donde se depositan (efectos negativos sobre la flora y la fauna) (Alhama, 2013). La contaminación con compuestos orgánicos en suelos y sedimentos es un problema ambiental importante por la cantidad de sitios contaminados. Los hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP) son un interés mayor debido a la toxicidad de muchos de ellos y a la frecuencia con que se detectan. El petróleo tiene una proporción de 76 a 86% de carbono y 10 a 14% de hidrógeno. Según Brito-Lema et al., 2003, los hidrocarburos se clasifican en hidrocarburos biogénicos e hidrocarburos antrópicos. La combustión generada en la industria incrementa la contaminación generalmente por el humo que se produce en la quema del carbón, combustibles fósiles y petróleo refinado, son algunas de las principales fuentes de estos contaminantes (Brito, 2003). De ahí la importancia de desarrollar técnicas adecuadas para la eliminación de hidrocarburos en los suelos (Alhama, 2013). Los hidrocarburos con menos de 10 átomos de carbono o bien de tres o menos anillos aromáticos tienden a ser fáciles de degradar. En un estudio realizado por Saucedo-Martínez et al., en 2015, el cual se trató una muestra de suelo contaminada con 45 000 ppm de aceite residual automotriz con maíz (*Zea mays*), composta bobina y vermicomposta. En dicha investigación se demostró que la mayor reducción del aceite ocurrió en combinación de ambas compostas. Estudios similares han revelado que prácticamente todos los HAP con menos de cinco anillos son al menos parcialmente biodegradables por una variedad de microorganismos tanto aerobios como anaerobios. Dos grandes tecnologías que favorecen a la remoción de compuestos orgánicos son la biorremediación y la atenuación natural; sin embargo, los HAP se consideran persistentes, por lo tanto, son difíciles de degradar (Corona-Iturbe, 2005). Para la biorremediación de suelos contaminados por hidrocarburos, la acción microbiológica es una alternativa ya que al ser un procedimiento natural son mayores las ventajas que presenta y no tiene un gran riesgo al ambiente. El vermicompostaje es un proceso ecotecnológico de costo realmente económico, el cual permite la bio-oxidación, degradación y estabilización de residuos orgánicos al

trabajo en conjunto de lombrices y microorganismos, del cual se obtiene la vermicomposta, misma que representa el producto final estabilizado, homogéneo y de granulometría fina. Este proceso tecnológico eficiente ayuda a convertir los residuos orgánicos en productos de valor agregado los cuales se emplean en las prácticas de restauración ecológica y programas de fertilidad del suelo (Cornelio, 2017). De acuerdo con Sandoval, 2011, quien utilizó vermicomposta para la degradación de lodos residuales provenientes de una planta de tratamiento, se demostró que los lodos pueden ser aprovechados en usos agrícolas y forestales. Según Fernández et al., 2006, en la faja petrolífera del río Orinoco en Venezuela, se realizó un estudio de biorremediación en el suelo contaminado a causa de los pozos de perforación, donde se utilizaron como agentes bioestimulantes lombrices, humus líquido y estiércol equino, para reducir el nivel de contaminación. En el presente trabajo se buscaron las variables óptimas para la degradación de un hidrocarburo de alto octanaje mediante vermicompost. Para ello, se eligió el género *Eisenia foetida* debido a la gran facilidad que tienen estas especies de ser cultivadas, además de ser un macro organismo fuerte y con gran capacidad de tolerancia a los altos rangos de temperatura, humedad y potencial de acidez.

Metodología

Materiales

Para el experimento se utilizó una muestra de suelo proveniente del cerro de la estrella, ubicado en la alcaldía Iztapalapa de la Ciudad de México. Se empleó turbosina facilitada por PEMEX (PEMEX, Cd. de México). Se adquirieron los anélidos con un biólogo especializado en el cultivo de lombriz roja californiana (*Eisenia foetida*) en Xochimilco, Ciudad de México. Se emplearon ocho contenedores de vidrio (17cmx15cmx30cm), se utilizó un potenciómetro de la marca Hanna Instruments, oficina en Guadalajara Jalisco, México, para la lectura de pH y salinidad, un medidor de humedad del suelo de la marca Spectrum Technologies, Inc. Aurora, Illinois EE.UU. como materia orgánica se emplearon residuos de cocina (restos vegetales y frutas). Para el criadero se empleó 1kg de fibra de coco la cual fue adquirida con el mismo proveedor de las lombrices. Se empleó $\text{Na}_2\text{C}_2\text{O}_4$, KOH, KCl y H_2SO_4 (los reactivos y soluciones empleados fueron de la marca Productos Químicos Monterrey, S.A.) para el análisis fisicoquímico. Así mismo, se usó un espectrómetro infrarrojo (Perkin Elmer, Waltham, Massachusetts) para la cuantificación de los hidrocarburos medidos como hidrocarburos totales del petróleo (HTP) usando cloroformo grado cromatográfico como disolvente de arrastre de las muestras de suelo.

Métodos

Crianza y adaptación de la lombriz

Debido a las características de la lombriz, se diseñó la columna de compostaje la cual estuvo conformada por dos contenedores (uno encima de otro), en la unidad contenedora superior se dispuso el criadero de lombriz con sustrato y composta. Continuamente se mantuvo un monitoreo de la adaptabilidad de los organismos, así como de la tasa de reproducción durante un periodo de tres a cuatro semanas. Para el proceso de adaptación se empleó el método reportado por (Rodríguez et al., 2019). Se tomaron tres muestras de 1kg de suelo y se agregaron diferentes concentraciones del hidrocarburo (15, 10 y 5ml/kg suelo). A cada muestra se le adicionó 20 ejemplares de anélidos y se les suministró materia orgánica y estiércol de conejo como alimento; se monitorearon por siete días. Posteriormente, ya elegida la concentración adecuada de turbosina se consideró una muestra de 1kg, para el muestreo se empleó la técnica propuesta por Fernández et al., 2006 los cuales proponen la ubicación de seis puntos a distintas distancias y realizar las excavaciones con inclinación triangular a 20-30cm de profundidad. La muestra fue preservada en bolsa de plástico para su posterior análisis. Después de cuatro semanas de adaptación de la lombriz, se procedió a generar la contaminación del suelo con una concentración de 15ml de turbosina/kg de suelo, en un contenedor de vidrio (cada uno con 1kg de suelo) y 20 lombrices.

Diseño experimental y cinética

Se generó un diseño factorial 2^3 tomando como factores el pH, humedad y temperatura todos con dos niveles, alto y bajo. Los niveles alto y bajo de la humedad fueron de 70 y 85%, en el caso de la temperatura los niveles alto y bajo fueron de 28-30 °C y 20-22 °C respectivamente. Se realizó un muestreo de cada contenedor en los días 1, 15 y 30 de cada mes durante las 18 semanas para poder evaluar la concentración de la turbosina y así lograr una cinética de degradación. Así mismo, el pH, conductividad eléctrica, humedad y contenido de materia orgánica se evaluaron durante todo el experimento, cada siete días durante 120 días. Se realizaron cinco pruebas en el laboratorio de acuerdo a la NOM-138-SEMARNAT/SSA1-2012 y al método propuesto por (Fernández et al., 2006) con las cuales se pudieron conocer las características físicas y químicas del suelo con el que se trabajó.

Análisis físico-químicos

Prueba de pH

Para esta prueba, se pesó 1g de suelo y se colocó en un vaso de precipitado de 25ml al cual se le agregaron 10

ml de agua destilada, se agitó y se dejó reposar por 10 minutos. Transcurrido ese tiempo, se procedió a cuantificar el pH con el potenciómetro (Hanna Instruments, México) previamente calibrado.

Conductividad eléctrica

Se tomó una muestra de 0.6g de suelo previamente molido y se colocó en un vaso de precipitados de 250ml y se le agregó agua destilada con la bureta, se mezcló con la espátula hasta lograr la saturación. Una vez logrado el brillo en la superficie de la mezcla (formación de un espejo) se dejó reposar la pasta por tres horas. Para obtener el extracto del suelo, se colocó el papel filtro sobre el embudo Buchner, se humedeció con agua destilada y se conectó el sistema de filtración de vacío, obteniéndose un extracto de aproximadamente 50 ml. Para determinar la conductividad eléctrica, se calibró el conductímetro (Hanna Instruments, Guadalajara Jalisco) con las dos soluciones estándar de KCl 0.1 N y 0.01 N. Después se eligió la solución con la que se aproximaba más a la conductividad de la muestra, se cuantificó la conductividad eléctrica y la temperatura del extracto.

Contenido de humedad

Se pesó 1g de la muestra de suelo sobre un papel a peso constante, se colocó dentro de la estufa a 80 °C durante 12 horas, pasado este tiempo se sacó la muestra de la estufa y se colocó en un desecador para enfriarla aproximadamente por 30 min, se volvió a pesar la muestra y se procedió hacer el cálculo de los porcentajes de humedad en el suelo por la diferencia de pesos, todo lo anterior se realizó por triplicado.

Determinación de textura

Para esta prueba se empleó el método de Bouyoucos. Se pesaron 100g de la muestra de suelo molido y se le añadieron 5g de oxalato de sodio ($\text{Na}_2\text{C}_2\text{O}_4$), posteriormente en un contenedor se vertió la muestra y se le adicionó 1/3 de agua destilada y se agitó por 10 minutos, transcurrido este tiempo se vertió la mezcla en una probeta de 1000ml y se le agregó agua destilada hasta alcanzar la marca de los 1000ml, posteriormente la probeta se cubrió con una tapa para lograr un vacío en la probeta, se agitó y se dejó reposar por 40 segundos, posterior a este tiempo con el hidrómetro de Bouyoucos ASTM 151H (Marca Gilson SA, EE. UU.) se tomó la lectura y se midió la temperatura con el termómetro, haciendo el registro correspondiente. Se dejó reposar por dos horas sin agitar, transcurrido este tiempo se volvió a tomar lectura con el hidrómetro y a medir nuevamente la temperatura, se realizaron los cálculos correspondientes, se consultó el triángulo de texturas para identificar el tipo de suelo.

Cuantificación del hidrocarburo

Concluido el tiempo de la cinética (120 días) de todas las muestras obtenidas se tomaron 2g de cada una, las cuales se molieron en mortero y se sometieron a un proceso de lavado con hexano. Para realizar este proceso cada muestra de 2g se envolvió en pequeños sacos de papel filtro los cuales se depositaron dentro de un matraz bola de 250ml y se le adicionó a cada saco 10ml de hexano, se tapó el matraz y se agitó por 40 segundos dejando reposar por un periodo de cuatro horas. Transcurrido este tiempo se sacó la muestra y se recolectó el hexano restante en pequeños viales color ámbar de 10ml, juntando un total de 40 muestras las cuales se llevaron analizar con espectroscopia infrarroja. La cuantificación de los HTP se realizó en un equipo de espectroscopía de Infrarrojo (Perkin Elmer, Waltham, Massachusetts.) usando cloroformo grado cromatográfico como disolvente de arrastre de las muestras de suelo.

Ensayo toxicológico

Para este ensayo se siguió la metodología empleada por (Sandoval, 2011) a los ensayos de germinación con semillas de "Kale" o col rizada (*Brassica oleracea*) efectuados en una charola de germinación por un periodo de tiempo de 240 horas (10 días).

Análisis de datos

Todas las determinaciones se realizaron por triplicado y se reportaron los valores medios y la desviación estándar. Se realizó un análisis de varianza (ANOVA) y la comparación de medias se realizó mediante la prueba de Tukey ($p < 0.05$) para el diseño factorial 2³. Los datos obtenidos fueron analizados empleando el paquete estadístico Minitab19 (Minitab, LLC. State College, Pennsylvania, EE.UU).

Resultados y discusión

Caracterización química de la turbosina

La turbosina es un tipo de queroseno que proviene del destilado intermedio del petróleo, cuenta con un octanaje compuesto por hidrocarburos de diez a doce átomos de carbono. La composición principal de la turbosina de acuerdo a (Olvera-Palacios, 2007) es la siguiente:

- Parafínicos hasta un 80% de su volumen.
- Aromáticos hasta un 22% de su volumen.
- Olefinas máximo 3% de su volumen.
- Azufre se presenta en compuestos como sulfuro de hidrogeno o en denominados como mercaptanos, un máximo de 0.003% de su volumen.
- Oxígeno se presenta en forma de fenoles o nerténicos (no deseables).
- Metales como el níquel, cobre, plomo y estaño (no deseables).

En la Figura 1 se muestra el espectrograma de la turbosina empleada en el experimento.

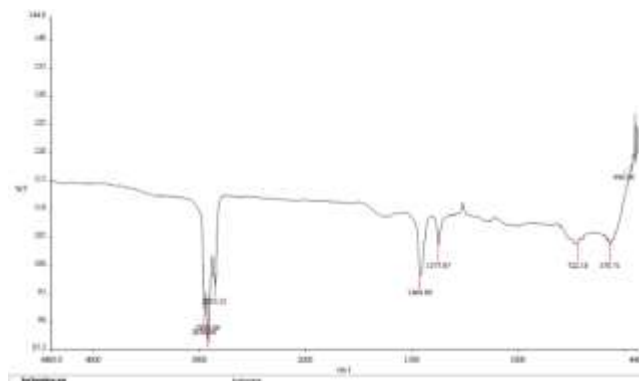


Figura 1. Espectrograma de la turbosina.

En el espectrograma anterior no se observa la presencia de grupos funcionales OH en el rango de 3700-3000cm⁻¹ las cuales corresponden al agua, por lo que se deduce la ausencia de humedad en la muestra. Sin embargo, se observan tres diferentes bandas de CH a 2,958.3cm⁻¹, bandas de CH₂ en 2,252 y CH₃ cm⁻¹ en 2,050 y 1,377 cm⁻¹ las cuales corresponden a la tensión y flexión respectivamente de los carbonos de enlaces simples de las cadenas alifáticas del hidrocarburo. Así mismo, se observa una banda en 1,464 cm⁻¹ la cual corresponde a la flexión del grupo C=C. En comparación con otros hidrocarburos como gasolina premium, magna y diésel, la turbosina carece de humedad y de una banda prominente ubicada en 1034cm⁻¹ aproximadamente, correspondiente a las vibraciones del grupo C-O-C.

Análisis físico-químicos

Los resultados de los análisis realizados a una muestra de suelo no contaminado con turbosina se presentan en la Tabla 1. Estos resultados iniciales se ajustaron para poder generar las diferentes condiciones planteadas para el análisis factorial del experimento.

Tabla 1. Resultado de los análisis físico-químicos.

Prueba	Resultado
pH	6.85
Humedad	7.5%
Conductividad eléctrica	2.6 Ms/s
Bouyoucos	Franco arenoso

Cuantificación del hidrocarburo

La cuantificación del hidrocarburo se realizó mediante un análisis de Transformada de Fourier por Infrarojo (FTIR) obteniendo el área de picos de amplio rango correspondientes a los grupos funcionales de las cadenas aldehidas del hidrocarburo. En la Figura 2, se muestra el proceso de remoción del hidrocarburo durante el periodo de tiempo de la cinética (120 días). Los resultados indican que la unidad experimental 1 (UE1) correspondiente a las muestras con humedad máxima y temperatura mínima, fueron las que presentaron una eficiencia de remoción de la turbosina mayor (82%).

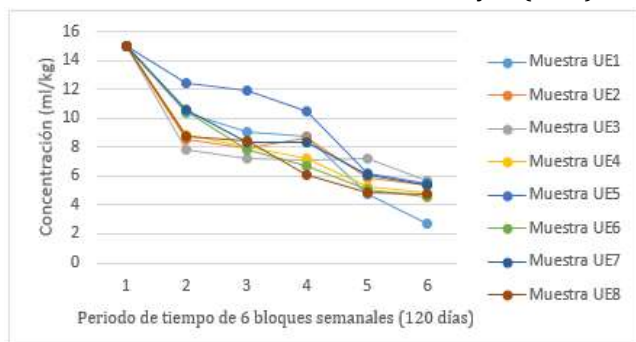


Figura 2. Degradación de la turbosina.

Lo anterior se debe al aumento de anélidos ya que, se reprodujeron al contar con las condiciones favorables para su supervivencia. La humedad fue un factor determinante para que esto ocurriera, es decir, humedades entre el 80-85% favorece al ciclo vital del anélido en comparación del resto de las UE y proporcionó una mayor adaptación al medio edáfico, lo cual ocasionó que la estimulación y aireación del sustrato a través de la lombriz beneficiara a los microorganismos encargados de la degradación de las partículas más pequeñas del hidrocarburo logrando así una mejor estimulación de nutrientes en el sustrato.

Resultados similares obtuvo Torres (2002), en una investigación realizada empleando parafinas a degradar y usando una cinética de 150 días, obtuvo óptimos resultados de la eliminación de este contaminante proveniente del petróleo. Demostrando que la lombriz *Eisenia foetida* presenta gran adaptabilidad a la parafina y es capaz de degradarla casi en su totalidad al combinarse con la flora microbiana nativa y otros microorganismos. En el Biotratamiento No.1 (*Eisenia sp* + flora microbiana nativa) obtuvo una remoción del 78.9% mientras que en el Biotratamiento No. 2 (*Eisenia sp* + *Pseudomonas aeruginosa* + flora microbiana nativa) la remoción fue del 84.5% con lo cual se comprueba las asociaciones de la lombriz con flora nativa. Con esta referencia se comprueba que la lombriz *Eisenia foetida* es una valiosa opción para el tratamiento de suelos contaminados, pero es necesario combinarla con otros microorganismos para obtener los resultados óptimos.

En la Tabla 2 se presenta la cantidad de hidrocarburo removido y la eficiencia de remoción de cada UE después de la cinética, donde se aprecia que la UE1 fue la que presentó mayor efectividad, esto correspondiente a las muestras con humedad máxima y temperatura mínima, fueron las que presentaron una eficiencia de remoción de la turbosina mayor (82%). Es importante mencionar que las condiciones propiciaron que las UE 1-4 presentaron una mayor eficiencia de remoción del hidrocarburo en promedio respecto a las UE 5-8.

Tabla 2. Eficiencia de remoción de la turbosina

UE	C.i. (ml/kg)	C.f. (ml/mg)	Hidrocarburo removido (ml/mg)	Eficiencia (%)
1	15	2.7	12.3	82
2	15	5.4	9.6	64
3	15	5.7	9.3	62
4	15	4.9	10.1	67.33
Promedio				69
5	15	5.5	9.5	63.33
6	15	4.6	10.4	69.33
7	15	5.4	9.6	64
8	15	4.8	10.2	68
Promedio				66

C.i.=Concentración inicial. C.f.=Concentración final

De acuerdo con Martinkosky et al. (2016), demostraron que *Eisenia foetida* es capaz de degradar con gran facilidad hidrocarburos de fracciones de petróleo de C21 incluso >C21 (aunque estas tardan más tiempo y son más letales para el anélido). Los análisis revelaron que los tratamientos de suelo contaminados con hidrocarburos alifáticos y aromáticos en los cuales se emplean las lombrices de suelo, presentan un porcentaje de degradación del 35% en compuestos de C12 a C35 en hidrocarburos aromáticos y un 55% en alifáticos de C16-C35. Es probable que con un tratamiento más completo y por un mayor periodo de tiempo (poco más de un año) se puedan obtener mejores resultados.

Por otro lado, en la tabla 3 se presentan las tres variables del modelo experimental y sus posibles interacciones, las cuales si presentan un valor de "p" menor a 0.05 se consideran significativas. La temperatura, por ejemplo, es un parámetro significativo para la biorremediación del suelo contaminado con turbosina para ambos niveles elegidos. El análisis factorial demostró que las variables por sí solas y sus posibles combinaciones son significativas para la mayoría de los casos, excepto para la semana 13 y 18 donde se observa que la interacción entre la humedad y el pH no son significativos. Así mismo, se observa en la semana 13 que el pH no es significativo. El coeficiente de correlación calculado en el análisis factorial fue mayor a ~0.95 lo cual demuestra que existe una buena correlación entre las variables, en caso de requerir generar un ajuste de curvas para obtener una ecuación que represente el comportamiento de las variables seleccionadas.

Tabla 3. Valores de “p” para las diferentes semanas y combinaciones.

Coeficientes codificados					
Término	Valor de p				
	Semana 4	Semana 9	Semana 13	Semana 17	Semana 18
Temperatura	0.000	0.000	0.000	0.000	0.055
Humedad	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
pH	0.000	0.000	0.372	0.001	0.000
Temperatura*Humedad	0.002	0.000	0.000	0.000	0.000
Temperatura*pH	0.003	0.000	0.000	0.000	0.000
Humedad*pH	0.104	0.000	0.131	0.000	0.000
Temperatura*Humedad*pH	0.003	0.000	0.000	0.000	0.000

También se determinaron las variables óptimas para la degradación máxima, y se encontró que la humedad debe manejarse en un nivel alto mientras que la temperatura y el pH, el nivel bajo fue el adecuado.

Por otro lado, el análisis de varianza realizado (ONE-WAY-ANOVA) se muestra en la tabla 4 donde se observan diferencias significativas en los resultados obtenidos, y una disminución gradual en la concentración del hidrocarburo para todas las muestras al término de la cinética.

Tabla 4. ANOVA y comparación de medias mediante TUKEY por muestra.

Semana	Concentraciones (ml/mg)							
	UE1	UE2	UE3	UE4	UE5	UE6	UE7	UE8
4	10.4±0.44b	8.5±0.63c	7.8±0.1c	8.9±0.1c	12.4±0.1a	10.5±0.1b	10.6±0.5b	8.8±0.1c
9	9.1±0.1b	7.9±0.1d	7.2±0.1e	8.1±0.1c,d	11.9±0.1a	7.8±0.1d	8.3±0.1c	8.4±0.1c
13	8.8±0.1b	8.6±0.1b	7.1±0.1d	7.2±0.05d	10.5±0.1a	6.7±0.1e	8.3±0.1c	6.1±0.02f
17	4.8±0.05f	5.9±0.1c	7.2±0.1a	5.3±0.1d	6.2±0.03b	5.1±0.1d,e	6.3±0.1b,c	4.5±0.1e,f
18	2.7±0.1c	3.4±0.1a	5.7±0.03a	4.9±0.1b	5.5±0.1a	4.8±0.1b	5.4±0.1a	4.8±0.1b

Se muestran valores medios ± desviación estándar seguida de diferentes letras minúsculas son significativamente diferentes ($p < 0.05$).

Saucedo et al., (2016), reportaron que la concentración del aceite residual automotriz en el suelo después de cuatro meses de la fitorremediación con *Zea mays* y los géneros de bacterias promotoras de crecimiento vegetal (ppm) fueron de 13 500 ppm *Z. mays* + lombricomposta + composta bovina (3%) + *Rhizobium etli* y de 10 350 ppm *Z. mays* + lombricomposta + composta bovina (3%) + *B. cepacia* y *R. etli*. En este estudio los resultados son más alentadores debido a la combinación de ambas compostas (lombricomposta y composta bovina). Sin embargo, la clave para lograr esos niveles radica en la combinación de los anélidos con bacterias degradadoras y el hongo *Z. mays* aunque el uso de compostas no degrada los hidrocarburos, contribuye a que se logre el óptimo desarrollo de la biomasa.

Análisis toxicológico

Los resultados del ensayo de toxicidad se muestran en la Tabla 5.

Tabla 5. Resultados de germinación.

Cultivo	Sustrato: Sm/St	Humus de lombriz (hl)	Periodo de germinación (días)	Longitud de tallo (cm)	Ancho de hojas (cm)
Ct	Sm		4	4.5	1.4
UE 1	St	X	7	≤1.5	0.5
UE 5	St	X	5	≤2.5	1
UE 1	St		4	≤2.5	1
UE 5	St		5	≤1.5	<0.5

* Control testigo (Ct), suelo modelo (Sm), suelo tratado (St) y humus de lombriz (hl).

Al completar las 240 horas (10 días de germinación) los brotes de mayor longitud son los del Ct (4.5cm de longitud) y hojas de 1.4 cm de ancho mientras que las de la UE5 (hl) y la UE1 presentaron una longitud de 2-2.5cm y un ancho de hoja de 1cm, la UE1 (hl) presentó la misma longitud que el brote de la UE5, pero sus hojas son notablemente más anchas mientras que las de la UE5 son más pequeñas y comenzaron a presentar una tonalidad amarillenta en las orillas. Los ensayos de toxicidad demostraron que las UE biorremediadas o tratadas, demoraron entre un 25-75% más tiempo en germinar los brotes, que los controles usados con suelo sin contaminar. En la Figura 3 se puede observar la comparativa de crecimiento a los 10 días de germinación.



Figura 3. Germinación al cumplirse las 240 hrs. (10° día). De izquierda a derecha Ct, UE1 (St/hl), UE5 (St/hl), UE1 (St) y UE5 (St).

Conclusiones

El presente estudio demostró que realizar un proceso de biorremediación de suelo contaminado por hidrocarburos por la técnica de vermicompostaje resulta ser altamente efectivo y completamente viable ya que se presentaron características notables con el uso de lombriz roja en compañía de microorganismos y usando una aireación adecuada. Manifestándose como una alternativa eficaz y amigable con el medio debido a las necesidades de adaptación de la lombriz la cual, es capaz de tolerar fuertes concentraciones de hidrocarburo y soportar pH's superiores al límite tolerable. El gran apetito de la lombriz ayudó acelerar la degradación del hidrocarburo, así como la formación de humus de lombriz el cual aportó una rica variación de nutrientes.

Es necesario controlar factores externos como la humedad, temperatura y pH para realizar una óptima biorremediación procurando utilizarlos sinérgicamente en un reactor específico para obtener la cinética idónea. Con base en los resultados obtenidos después de la cinética de remoción y con la prueba de germinación, se deduce que el suelo tratado puede ser utilizado en cultivos de áreas verdes o en zonas de reforestación. Sin embargo, es preciso continuar con estudios que incluyan investigaciones de ensayos de toxicidad con semillas certificadas, para evaluar su potencial en cultivos agronómicos.

Agradecimientos

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por el recurso económico brindado con el cual fue posible llevar a cabo la presente investigación.

Referencias

- Alhama I. R. (2013). Reciclado en suelos de lodos de refinería: Nuevas aproximaciones para la biodegradación de hidrocarburos mediante el manejo de enmiendas orgánicas. Región de Murcia, España.
- Brito O. O. (2003). La restauración de suelos contaminados con hidrocarburos en México. Gaceta Ecológica, Número 69.
- Cornelio V. M. (2017). Vermicompostaje: I avances y estrategias en el tratamiento de residuos sólidos orgánicos. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 393-406.
- Corona-Iturbe (2005). Atenuación natural en suelos contaminados con hidrocarburos. *Ingeniería Investigación y Tecnología*, 119-126.
- Fernández et al., L. N. (2006). Manual de técnicas de análisis de suelos aplicadas a la remediación de sitios contaminados. Ciudad de México.
- Martinkosky et al. (2016). Earthworms (*Eisenia fetida*) demonstrate potential for use in soil bioremediation by increasing the degradation rates of heavy crude oil hydrocarbons. Seattle.
- Olvera-Palacios (2007). Estaciones de Combustibles para la Aviación en México, Destacando las Características de la Zona de Combustibles del Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México. Tesis de Ingeniería, Instituto Politécnico Nacional. Ciudad de México.
- Prado A. M. (2011). Biorremediación de suelo contaminado con hidrocarburos empleando lodos residuales como fuente alterna de nutrientes. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 27(3), 241-252.
- Rodríguez et al. (2019). Supervivencia de la lombriz roja (*Eisenia foetida*) en suelo contaminado con concentraciones de hidrocarburos. Durango: *Revista Latinoamericana el Ambiente y las Ciencias* 9(21): 1425-1433.
- Sandoval R. F. (2011). Degradación de lodos residuales provenientes del tratamiento de aguas residuales municipales por medio de la vermicomposta para obtener humus líquido, tesis de maestría, instituto politécnico nacional. Ciudad de México.
- Saucedo et al. (2016). Bioestimulación de suelo impactado con aceite residual automotriz y fitorremediación con *Zea Mays*. Morelia Michoacán, México.
- Torres, A. M. (2002). Biotratamientos, con base en el uso de la lombriz *Eisenia sp.* aislada de pozos composteros para la remediación de suelos contaminados con residuos industriales de parafina. Ciudad de México.