

12

Fecha de presentación: mayo, 2019

Fecha de aceptación: junio, 2019

Fecha de publicación: agosto, 2019

EMERGENCIA Y DESARROLLO DEL MAÍZ (ZEA MAYS L.) EN UN SUELO CONTAMINADO CON HIDROCARBUROS TOTALES DEL PETRÓLEO EN FASE INICIAL Y A 340 DÍAS DE BIORREMEDIACIÓN EN BIOPILAS

EMERGENCY AND DEVELOPMENT OF MAIZE (ZEA MAYS L.) IN A POLLUTED SOIL WITH TOTAL HYDROCARBONS OF THE PETROLEUM IN INITIAL PHASE AND TO 340 DAYS OF BIOREMEDIATION IN BIOPILAS

Consuelo Hernández Rodríguez¹

E-mail: chernandez@ucf.edu.cu

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8629-5695>

Lázaro J. Ojeda Quintana¹

Osvaldo Arteaga Rodríguez¹

Lairy Sánchez Cordero¹

¹ Unidad Científico Tecnológica de Base Suelos. Barajagua. Cienfuegos. Cuba.

Cita sugerida (APA, sexta edición)

Hernández Rodríguez, C., Ojeda Quintana, L. J., Arteaga Rodríguez, O., & Sánchez Cordero, L. (2019). Emergencia y desarrollo del maíz (*Zea mays* L.) en un suelo contaminado con Hidrocarburos Totales del Petróleo en fase inicial y a 340 días de biorremediación en biopilas. *Revista Científica Agroecosistemas*, 7(2), 94-102. Recuperado de <https://aes.ucf.edu.cu/index.php/aes>

RESUMEN

La investigación se realizó en condiciones semicontroladas en bolsas con 2 kg de suelo Pardo Grisáceo contaminado de forma simulada con residuo petrolizado en concentración de 10 000 mg.kg⁻¹ HTP en tiempo cero y posteriormente sometido a biorremediación en biopilas durante 340 días con texturizantes alternativos: bagazo, cachaza, aserrín, pulpa de café, estiércol vacuno y thalassia. Se condujo en un diseño de Bloques al azar con ocho tratamientos: seis texturizantes, control de hidrocarburo y testigo, cuatro réplicas y maíz como cultivo indicador. La presencia de hidrocarburos en fase cero de las biopilas no comprometió la germinación del maíz, pero si su posterior desarrollo foliar. El peso seco de las raíces se favoreció por la presencia de hidrocarburos en tiempo cero y 340 días, sin correspondencia con el peso foliar. El Índice de Impacto Fitotóxico (IIF) confirmó afectaciones de las plantas de maíz en tiempo cero por la presencia de HTP. Después de transcurridos 340 días del proceso en biopilas este índice no mostró afectaciones en la variante estiércol vacuno, sin embargo hubo efectos negativos en los tratamientos con bagazo, aserrín y cachaza.

Palabras clave: *Zea mays*, contaminación, hidrocarburo, biorremediación.

ABSTRACT

The investigation was carried out under semicontrolled conditions in bags with 2 kg of polluted Grizzly brown soil in a feigned way with crude oil residual in concentration of 10 000 mg.kg⁻¹ HTP in zero time and later on subjected to bioremediation in Biopilas during 340 days with alternative texturer: trash, phlegm, sawdust, pulp of coffee, bovine manure and thalassia. The experiment was behaved at random in a design of blocks with eight treatments: six texturer, hydrocarbon control and witness, four replicas and Maize as indicator cultivation. The presence of hydrocarbons in zero phase of the biopilas didn't commit the germination of the maize, but if its later development to foliate. The dry weight of the roots was favored by the presence of hydrocarbons in zero time and 340 days, without correspondence with the weight to foliate. The Index of Impact phytotoxic (IIF) it confirmed affectations of the plants of maize in zero time for the presence of HTP. After having lapsed 340 days of the process in biopilas this index didn't show affectations in the varying bovine manure, however there were negative effects in the treatments with trash, sawdust and phlegm. The assimilable phosphorus and potassium, pH and the organic matter in the soil were highest in the polluted treatments HTP, independently of the lapsed time in biopilas.

Keywords: *Zea mays*, contamination, hydrocarbons, bioremediation.

INTRODUCCIÓN

La contaminación de los suelos ecológicamente sensibles con petróleo es un problema global y se estima que más de 8 millones de toneladas métricas de petróleo se liberan anualmente al medio ambiente.

Los tratamientos para disminuir o eliminar los hidrocarburos del petróleo en los ambientes contaminados son físico-químicos, térmicos y biológicos. En los físico-químicos, los fluidos de extracción pueden aumentar la movilidad de los contaminantes, requiriendo tratamiento y sistemas de recuperación que incrementan los costos. La factibilidad económica de los tratamientos térmicos aumenta en función del equipo y energía requerida. Por su parte, los tratamientos biológicos son beneficiosos al ambiente, de bajo costo y generalmente los hidrocarburos son mineralizados; sin embargo, el proceso es lento y el número de microorganismos puede no ser el adecuado, cuando las condiciones de suelo son desfavorables.

La biodegradación aumentada o biorremediación surge de la necesidad de disminuir el impacto ambiental de los derrames de los hidrocarburos en los diferentes ambientes, acelerando los procesos de biodegradación por la actividad metabólica de plantas, hongos, algas y bacterias. El composteo es una de las diferentes tecnologías que se han utilizado con el objetivo de recuperar suelos contaminados, el cual se basa en la adición de texturizantes, enmendantes para acelerar la degradación del contaminante y mejorar propiedades físicas del suelo.

El objetivo del presente trabajo es evaluar la respuesta del maíz cultivado en un suelo contaminado con hidrocarburos totales del petróleo (HTP) previo y tras un proceso de biorremediación en biopilas con diferentes sustratos alternativos.

MATERIALES Y MÉTODOS

El trabajo se realizó en condiciones semicontroladas en la UCTB de Suelos, Barajagua, Cienfuegos, utilizando bolsas de polietileno con suelo Pardo Grisáceo, un peso neto de 2 kg con suelo contaminado de forma artificial con Hidrocarburos Totales de Petróleo (HTP) en concentración de 10 000mg/kg⁻¹ de suelo. Se realizaron dos experimentos, con el sustrato inicial de dichas biopilas (Tiempo 0) y al transcurrir 340 días en proceso de biorremediación, (Tiempo 1), donde fueron evaluados texturizantes o biomejoradores mezclados de forma manual, un control de hidrocarburo y un testigo sin contaminación. Como cultivo indicador se utilizó el maíz (*Zea mays* L). Se condujo en un diseño de Bloques al azar con ocho tratamientos y cuatro réplicas:

1. Suelo Pardo Grisáceo + Residuo Petrolizado + Bagazo.
2. Suelo Pardo Grisáceo + Residuo Petrolizado +Cachaza.
3. Suelo Pardo Grisáceo + Residuo Petrolizado +Aserrín.
4. Suelo Pardo Grisáceo + Residuo Petrolizado +Pulpa de Café.
5. Suelo Pardo Grisáceo + Residuo Petrolizado + Estiércol Vacuno.
6. Suelo Pardo Grisáceo + Residuo Petrolizado +Thalassia.
7. Suelo Pardo Grisáceo + Residuo Petrolizado Hidrocarburo (Control).
8. Suelo Pardo Grisáceo (Testigo).

Para la confección de biopilas, dichos sustratos fueron llevados previamente a una bolsa de plástico herméticamente cerrada durante diez días para propiciar la estabilización del sistema hidrocarburo/suelo, posterior a este período se homogenizó la mezcla inicial, se añadieron los texturizantes, seguido de una etapa de humectación hasta lograr un 20% de humedad en la mixtura y se construyeron las biopilas. Se sembraron siete semillas de maíz por bolsa, dejando cinco plantas para la evaluación posterior. Se añadió agua destilada hasta capacidad de campo cada dos días. Para evitar el efecto de borde las macetas se rotaron con frecuencia semanal.

Durante el desarrollo fenológico del cultivo indicador se cuantificó la germinación, altura de las plantas cada siete días y observaciones visuales de las plantas. En el momento del corte de las plantas fue medido el peso seco foliar y de raíces (a los 28 días en el Tiempo cero y 35 días en Tiempo 1).

Se determinó el Índice Relativo de Impacto Fisiológico (IRIF) y el Índice de Impacto Fitotóxico (IIF) en las variables: altura y peso seco de la parte aérea y raíz del cultivo indicador de acuerdo a las ecuaciones siguientes:

$$IRIF(x) = 1 - \left[\frac{T_p R_1}{T_t} \right]$$

dónde:

IRIF (x) = Índice Relativo de Fisiológico.

T_p = Tratamiento con HTP.

T_t = Tratamiento testigo.

$$IIF(x) = \frac{\sum_{i=1}^n IRIF(x)}{n}$$

dónde:

IIF: Índice de Impacto Fitotóxico.

IRIF (x): Índice Relativo de Impacto Fisiológico para la variable x.

n: número de variables

El IRIF_(x) se obtiene al restar una unidad al índice de tolerancia (Porta, Filliat & Plata, 1999), ya que éste permite evaluar la respuesta biológica en un suelo contaminado, ambos índices se determinaron con el método de Vázquez-Luna, *et al.* (2010), modificado de Rivera-Cruz, Trujillo-Narcía, Miranda de la Cruz, & Maldonado (2005).

Los resultados se interpretaron bajo el criterio de Arias, Rivera & Trujillo (2017): si IRIF (x), es igual a cero: el efecto es neutro (no afecta a la variable), pero si es mayor de cero el efecto es negativo (inhibición); si el IRF (x) es menor de cero el efecto es positivo sobre la variable (estimulación).

Al suelo, tanto, al inicio, como al final del ensayo se le tomaron muestras para determinaciones analíticas de pH en H₂O y KCl (Cuba. Oficina Nacional de Normalización, 1999a), Materia Orgánica de Walkley-Black (NC-ISO 51,1999), P₂O₅ y K₂O asimilables (Cuba. Oficina Nacional de Normalización, 1999b) y conductividad eléctrica (Cuba. Oficina Nacional de Normalización, 2001).

En los análisis estadísticos se tuvo en cuenta que todos los caracteres cumplieren los supuestos de normalidad y homogeneidad de varianza para efectuar un ANOVA. La discriminación de las medias según el procedimiento de Duncan (1955), con significación del 1% en los casos en que el ANOVA resultó significativo. Se empleó como herramienta de trabajo el programa estadístico SPSS (versión 15.0).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La Tabla 1 refleja las características de las diferentes fuentes utilizadas como texturizantes, donde se aprecian mejores contenidos de materia seca total para la elaboración de biopilas en los materiales estiércol, pulpa de café, cachaza y bagazo, mayores tenores de nitrógeno en pulpa de café, seguido por estiércol, thalassia y cachaza, concentración superior de fósforo en estiércol. La conductividad eléctrica y el pH es adecuada en todos los texturizantes. Poseen bajo contenido de nitrógeno y fósforo el bagazo y aserrín y una elevada relación C/N el aserrín, resultado lógico debido a la naturaleza de los texturizantes.

Tabla 1. Características de las diferentes fuentes utilizadas como texturizantes.

| Fuente | % MST | % N | % P | C.E. (ds.m-1) | pH (KCl) | Relación C/N |
|---------------|-------|------|------|---------------|----------|--------------|
| Thalassia | 81.94 | 1.71 | 0.14 | 2.5 | 8.54 | 32.32 |
| Estiércol | 64.8 | 1.91 | 1.18 | 3.6 | 7.48 | 12.58 |
| Pulpa de café | 60.4 | 3.76 | 0.32 | 3.4 | 7.66 | 13.65 |
| Cachaza | 28.6 | 1.46 | 0.89 | 2.5 | 6.32 | 31.63 |
| Bagazo | 52.8 | 0.18 | 0.03 | 0.03 | 5.16 | 32.65 |
| Aserrín | 85.4 | 0.03 | 0,03 | 0.03 | 5.25 | 1866.0 |

Comportamiento de la germinación

a. Tiempo 0

Pudo observarse que al quinto día de la siembra germinaron las semillas del testigo y al sexto día se sumaron el resto de los tratamientos comprometidos con HTP y las enmiendas, así como el control. En todos los casos con un 100% de germinación.

b. Tiempo 1

Al quinto día de la siembra germinaron las semillas del testigo, control, thalassia y estiércol vacuno, 100 % en las variantes estiércol, control y testigo; 50 % en Thalassia; 35 % en cachaza y aserrín y 20 % en bagazo. A los 14 días se dejaron 5 pantas/bolsas en los tratamientos: testigo, control y estiércol vacuno. También pudo apreciarse que hubo plantas que germinaron posteriormente en el resto de las variantes y murieron en el transcurso del tiempo.

El efecto de la contaminación con hidrocarburo en concentración de 10 000mg/kg de suelo no comprometió la germinación del cultivo indicador en el tiempo cero de contaminación simulada. Sin embargo, después de 340 días en un proceso de biorremediación la germinación y supervivencia de las plantas se vio afectada, lo que se le atribuye a que los texturizantes bagazo, cachaza, aserrín, pulpa de café y thalassia no llegaron a su descomposición total y absorbieron parte de la contaminación con residuo petrolizado, la que fue cedida paulatinamente al cultivo indicador. Al respecto González (1995), consideró que las fracciones volátiles de los hidrocarburos penetran y eliminan el embrión de las semillas, disminuyendo su porcentaje de germinación.

Ekundayo, Emede & Osayande (2001), determinaron el efecto de un derrame de petróleo crudo sobre el crecimiento, productividad y absorción de

nutrimentos en maíz en un experimento de macetas y encontraron que la germinación fue retrasada y el porcentaje de germinación fue significativamente afectado por la contaminación con petróleo y el crecimiento fue pobre en los suelos contaminados.

La adición de fuentes orgánicas de nutrimentos a un suelo contaminado con petróleo (30 000 mg kg⁻¹) benefició el crecimiento del maíz. Las concentraciones de petróleo de 25 000 y de 35 000 mg kg⁻¹ suelo favorecieron una mayor emergencia del maíz, después del testigo sin contaminar. Esto presupone que a concentraciones entre 15 000- 35 000 mg kg⁻¹ suelo, las plantas de maíz germinen y emergen sin graves problemas de toxicidad por el petróleo.

Por otra parte, la germinación de semillas de maíz se retrasó y disminuyó en un 10% después de 16 semanas de permanecer remojadas en crudo de petróleo. Esta misma tendencia fue reportada por Escalante (2000), quien indicó además que se observan efectos fitotóxicos en su crecimiento a partir de la concentración de 10% de HTP. Por otra parte, Chaineau, Morel & Oudot (1997), afirman que altas concentraciones de hidrocarburos limitan y/o alteran la germinación de las semillas y el crecimiento de las plantas.

Apreciación visual de las plantas durante su ciclo fenológico

a. Tiempo 0

Las plantas se observaron diariamente. A los once días comenzaron los primeros indicios de clorosis en todos los tratamientos, mientras que el testigo se mantenía con un verde intenso. El nivel de clorosis se acentuó progresivamente y la depresión de la altura, lo que motivó que a los 28 días se realizara el corte de las plantas, debido a que solo el testigo mantenía las plantas en un desarrollo normal y sin clorosis.

b. Tiempo 1

Las plantas de las variantes testigo, control y estiércol vacuno estuvieron vigorosas, con un desarrollo normal. En los tratamientos restantes se observó un desarrollo deprimido y además se comenzó a apreciar clorosis en el control a partir de los 21 días.

Relacionado con el tema González (1995), encontró que las fracciones volátiles de los hidrocarburos, también causan clorosis a las plantas, ya que sufren severas deficiencias requiriendo mayor cantidad de macronutrientes evidentemente esto pudo influir en todas las variantes estudiadas, pues las mismas no recibieron suministro nutritivo adicional.

Observaciones en raíces

Otro resultado derivado de las observaciones en tiempo cero, se obtuvo al tomar las muestras de raíces en los tratamientos que contenían el hidrocarburo (tratamientos 1-7), donde se apreció que el hidrocarburo se encontraba depositado mayoritariamente en el fondo de las bolsas; lo que pudiese sugerir que en suelos contaminados con petróleo el paso de los hidrocarburos a través de la matriz del suelo (lixiviación) puede llegar hasta las partes profundas e incluso no exento de contaminar el manto freático. Este resultado no se apreció a 340 días.

Medición de la altura de las plantas

a. Tiempo 0

La altura de las cinco plantas por macetas (Figura 1) presentó diferencias estadísticas entre tratamientos en las frecuencias de 7, 14 y 21 días, con tendencias similares: mayor altura en el testigo, seguido por los tratamientos que incluyen estiércol y pulpa de café respectivamente como texturizantes. Se pudo apreciar, un comportamiento general a disminuir en el tiempo la altura de las plantas con relación a la altura inicial (a los 7 días). A los 28 días, solo las variantes que incluían bagazo y pulpa de café aumentaron discretamente su altura, el resto decrecieron, aunque en ninguno de los casos con diferencias estadísticas entre sí. El tratamiento con aserrín difirió de todos, y mostró el mayor declive en la altura.

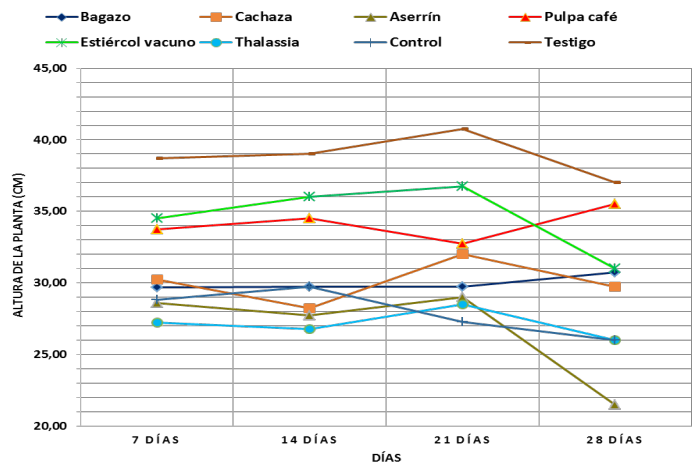


Figura 1. Resultados de la medición de la altura de las plántulas de maíz en intervalos de 7 días durante el ensayo (Tiempo 0).

b. Tiempo 1

Transcurridos 340 días del proceso de biorremediación, la dinámica de crecimiento realizada cada 7 días obtuvo que la altura de las plantas por bolsas fue superior en los tratamientos estiércol vacuno, testigo y control (suelo+hidrocarburo), lo que coincide con las menores concentraciones de hidrocarburo

en el suelo. Se apreció además el tratamiento que incluye bagazo como el de menor desarrollo foliar del maíz.

Al transcurrir 340 días, la concentración del hidrocarburo HTP en tiempo cero de 10 000 mg.kg⁻¹ disminuyó en todas las variantes: bagazo 6075.0 mg.kg⁻¹; cachaza 6225.0 mg.kg⁻¹; aserrín 6335.0 mg.kg⁻¹; pulpa de café 5950.0 mg.kg⁻¹; estiércol vacuno 4550.0 mg.kg⁻¹; thalassia 5750.0 mg.kg⁻¹, control (suelo+hidrocarburo) 4850.0 mg.kg⁻¹.

Las plantas de maíz sobrevivieron y se desarrollaron en el tratamiento control (suelo + hidrocarburo) con una concentración de 4850 mg.kg⁻¹ de HTP en el suelo a los 340 días, sin ocurrir muertes y con promedio de cinco plantas por réplica.

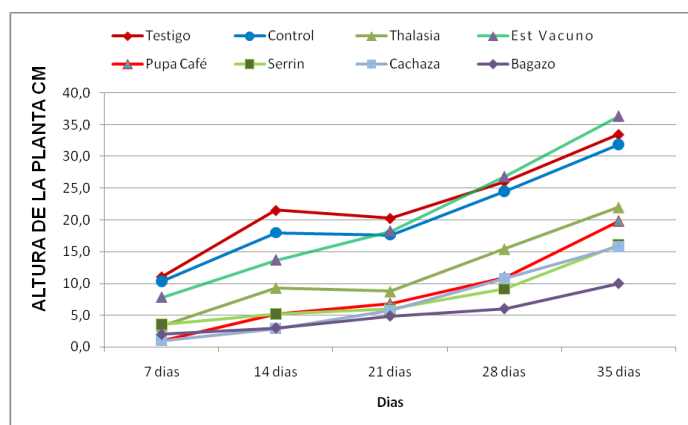


Figura 2. Resultados de la medición de la altura de las plántulas de maíz en intervalos de 7 días durante el ensayo (Tiempo 1).

Resultados ofrecidos por Méndez Natera, Salazar Garantón & Velásquez (2006), al estudiar el efecto del derrame petrolero simulado y la aplicación de un remediador utilizando dos tipos de maíz obtuvieron que la aplicación del remediador 15 días después del derrame petrolero + siembra 30 días después del derrame resultó ser el más adecuado para maíz grano amarillo, y para maíz grano blanco el mejor resultado se apreció aplicando remediador inmediato con el petróleo y siembra 15 días posteriores, sugiriendo que la flora bacteriana autóctona contribuyó con el mejoramiento de las condiciones del suelo al ser comparados con un testigo sin contaminación.

A su vez Xu & Johnson (1995), indicaron que la contaminación por hidrocarburos reduce el crecimiento de la planta porque los hidrocarburos pueden cubrir las raíces de las plantas influenciando la absorción de agua y nutrientes, comportamiento no apreciado a los 340 días del proceso en biopilas, en los tratamientos contaminados control y estiércol vacuno que fueron semejantes al testigo sin contaminación.

Peso seco de plantas y raíces

a. Tiempo cero

El análisis del peso seco aporta como mejor variante el tratamiento testigo con diferencias estadísticas absoluta del resto de las variantes. Esto evidentemente relacionado con el tamaño alcanzado por las plantas, mayor vigor y coloración verde en observación visual. A continuación, les sigue las variantes que añaden pulpa de café y estiércol vacuno como mejoradores del suelo contaminado con hidrocarburos, lo que está en coherencia con las mediciones de altura en el corte.

Los resultados obtenidos al analizar el peso seco de raíces (Tabla 2) no presentan la misma tendencia que en los datos foliares, pero en esta medición el factor humano puede introducir errores al momento de separar las raíces del suelo de la maceta. Los mayores valores se presentaron en la variante aserrín, pero sin diferencias estadísticas con el variante bagazo. En sentido general se obtuvo un mayor peso seco de raíces en las variantes contaminadas.

b. Tiempo 1

Al analizar el peso se obtuvo un mayor valor absoluto (3.41 g/bolsa) con diferencias altamente significativas en el tratamiento que contiene estiércol vacuno como enmendante, lo que sugiere una biorremediación aportada por el estiércol. A continuación de esta variante siguen el testigo (2.18 g/bolsa) y control (1.56 g/bolsa) sin diferencias estadísticas entre ellos, sugiriendo que la flora bacteriana autóctona contribuyó con el mejoramiento de las condiciones del suelo y además que el desarrollo del maíz haya aportado fitorremediación al ser comparados el control contaminado sin adición de enmendantes con el testigo sin contaminación como ha sido reportado en la literatura por Quiñones, Ferrera, Gavi, Fernández, Rodríguez & Alarcón (2003); y Acosta Hernández (2004). Los menores tenores foliares se obtuvieron con las variantes que incluyeron como texturizantes bagazo, cachaza y serrín.

Estos resultados tienen un comportamiento similar a los parámetros altura y número de plantas con sobrevivencia en el momento del corte a los 35 días. Los resultados obtenidos al analizar el peso seco de raíces no presentan la misma tendencia que en los datos foliares y hubo un mayor peso seco de raíces en las variantes contaminadas con residuo petrolizado al igual que sucedió en tiempo cero.

Comportamiento similar al registrado en el trabajo, se reporta por Franco (1993), que obtuvo que el peso seco de raíces de frijol se vio favorecido por la presencia de hidrocarburos, con al menos

un incremento del doble respecto al testigo sin hidrocarburos.

El maíz es un cultivo indicador utilizado comúnmente para evaluar el efecto de la reducción de la concentración de hidrocarburos en los suelos contaminados a través de las variables: altura de la planta, peso seco foliar y peso seco radicular, los cuales se incrementan cuando los suelos contaminados con hidrocarburos han sido tratados de manera conjunta con estiércol + aserrín y expresan menor desarrollo cuando solamente han sido tratados con estiércol o aserrín por independiente. En el trabajo que se discute no hubo combinaciones de texturizantes, por lo que el efecto obtenido es resultado de cada uno por independiente.

Tabla 2. Peso seco en g/macetas foliar y raíces en tiempo cero y tiempo 1.

| Tratamientos | Foliar | | Raíces | |
|------------------|--------------------|--------------------|---------------------|----------------------|
| | Tiempo 0 | Tiempo 1 | Tiempo 0 | Tiempo 1 |
| Bagazo | 1,2 ^d | 0.18 ^c | 1,28 ^{ab} | 0.26 |
| Cachaza | 1,3 ^{cd} | 0.46 ^c | 1,17 ^{bc} | 0.99 |
| Aserrín | 1,27 ^{cd} | 0.313 ^c | 1,4 ^a | 0.83 |
| Pulpa Café | 2,07 ^b | 0.61 ^{bc} | 1,05 ^{cd} | 0.95 |
| Estiércol vacuno | 1,7 ^{bc} | 3.41 ^a | 1,20 ^{bc} | 0.96 |
| Thalassia | 1,3 ^{cd} | 1.29 ^{bc} | 1,11 ^{bcd} | 0.49 |
| Control | 1,22 ^d | 1.56 ^{bc} | 1,22 ^{bc} | 0.58 |
| Testigo | 2,55 ^a | 2.18 ^{ab} | 0,98 ^d | 0.21 |
| ES± | 0,0314 ** | 1.1266** | 0.0257 ** | 1.0553 ^{ns} |

Índice Relativo de impacto fisiológico (irif) e índice de impacto fitotóxico (iif) para las variables altura, peso seco foliar y peso seco de raíces

a. Tiempo cero

El IRIF (Figura 3) indicó los efectos negativos de la contaminación con hidrocarburo (valores superiores a cero) en las variables altura y peso seco de las plantas de maíz, no así para la variable peso seco de raíces que obtuvo valores numéricos inferiores a cero, elementos que están en coherencia con la Tabla 2.

b. Tiempo 1

El Índice Relativo de Impacto Fisiológico (IRIF) a los 340 días indicó valores superiores a cero en las variables altura, peso seco de las plantas de maíz y peso seco de raíces en todos los tratamientos, excepto en la variante que utilizó estiércol vacuno como enmendante que obtuvo valores numéricos inferiores a cero, lo que infiere biorremediación con este tratamiento. Las mayores afectaciones en las variables medidas se obtuvieron en el tratamiento bagazo.

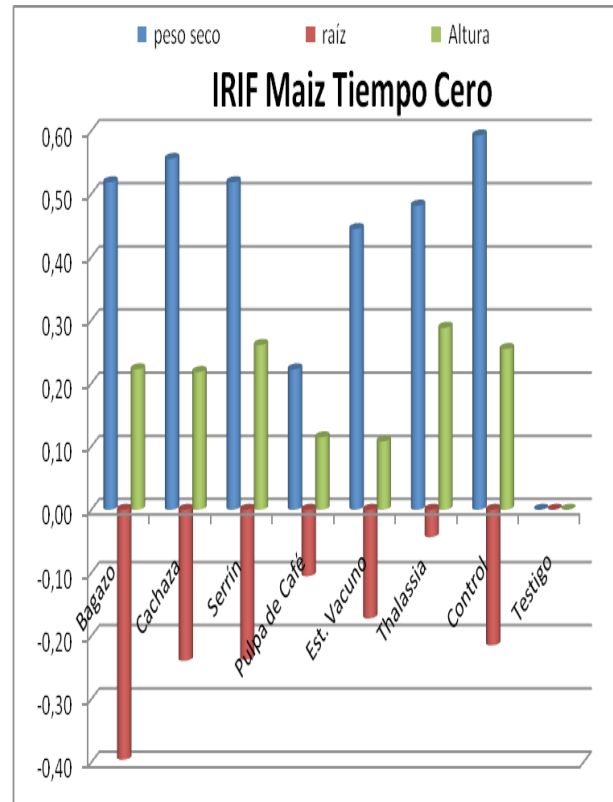


Figura 3 Índice relativo de impacto fisiológico (IRIF) sobre las variables altura, peso seco foliar y peso seco de raíces en plantas de maíz en suelo contaminado con hidrocarburo bajo diferentes tratamientos en tiempo cero y tiempo 1.

El IIF indica el impacto que producen los hidrocarburos sobre el crecimiento de las plantas y mostró afectaciones en todas contaminadas con HTP en tiempo 0. Después de transcurridos 340 días el IIF mostró que no hubo afectaciones en la variante que incluían estiércol vacuno, sino una estimulación, (IIF menor que cero), lo que sugiere biorremediación con este texturizante. Se obtuvo una mayor inhibición en los tratamientos con bagazo, aserrín y cachaza.

Relacionado con el tema, Vázquez Luna, Castelán Estrada, Rivera Cruz, Ortiz Ceballos & Izquierdo, (2010), al estudiar contaminación simulada de hidrocarburos totales en suelo encontraron que los IIF se incrementaron al aumentar la concentración

de petróleo en el sustrato, lo que tuvo repercusiones significativas sobre el crecimiento y desarrollo de *Leucaena leucocephala* y *Crotalaria* y que el IRIF para las variables altura, longitud radicular, biomasa aérea, biomasa radicular y biomasa total de plántulas de *L. leucocephala* y *C. incana* fue siempre mayor a cero en los tratamientos con contaminación de petróleo al ser comparado con el testigo.

Tabla 3. Índice de impacto fitotóxico (IIF) en plántulas de maíz en tiempo cero de confeccionadas las biopilas contaminadas con 10 000 mgkg⁻¹ de HTP.

| Tratamientos | Tiempo 0 | | Tiempo 1 | |
|--------------|---|------------|---|------------|
| | Maíz Índice de Impacto Fitotóxico (IIF) | Repuesta | Maíz Índice de Impacto Fitotóxico (IIF) | Repuesta |
| Bagazo | 0,12 | Inhibición | 0,78 | Inhibición |
| Cachaza | 0,18 | Inhibición | 0,56 | Inhibición |

Tabla 4. Algunas características del suelo al final del corte del maíz

| Tratamientos | pH Tiempo 0 | pH Tiempo 1 | MO (%) Tiempo 0 | MO (%) Tiempo 1 | P ₂ O ₅ mg/100g Tiempo 0 | P ₂ O ₅ mg/100g Tiempo 1 | K ₂ O mg/100g Tiempo 0 | K ₂ O mg/100g Tiempo 1 |
|------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|--|--|-----------------------------------|-----------------------------------|
| Bagazo | 7,61 ^{cd} | 7.60 ^b | 3,02 ^{cd} | 4.67 ^{ab} | 8,47 ^{de} | 31.72 ^a | 25,55 ^{de} | 16.50 ^c |
| Cachaza | 7,54 ^d | 7.60 ^b | 3,82 ^{abc} | 5.07 ^a | 60,30 ^a | 21.35 ^b | 37,93 ^d | 14.60 ^c |
| Aserrín | 7,68 ^{bcd} | 7.62 ^b | 4,22 ^{ab} | 3.90 ^{ab} | 33,75 ^{bc} | 33.52 ^a | 19,37 ^e | 9.35 ^c |
| Pulpa de café | 7,80 ^b | 7.58 ^b | 3,27 ^{bcd} | 4.47 ^{ab} | 19,17 ^c | 21.53 ^b | 255,64 ^a | 61.80 ^a |
| Estiércol vacuno | 7,67 ^{bcd} | 7.76 ^b | 4,60 ^a | 5.25 ^a | 135,43 ^a | 23.70 ^b | 138,19 ^b | 33.27 ^b |
| Thalassia | 8,14 ^a | 8.13 ^a | 2,37 ^d | 3.15 ^b | 14,27 ^d | 18.32 ^{bc} | 55,44 ^c | 15.72 ^c |
| Control | 7,72 ^{bc} | 7.78 ^b | 3,22 ^{bcd} | 4.47 ^{ab} | 10,15 ^d | 14.48 ^c | 20,25 ^e | 11.32 ^c |
| Testigo | 5,67 ^e | 5.39 ^c | 1,22 ^e | 1.33 ^c | 4,75 ^e | 4.36 ^d | 12,55 ^e | 12.87 ^c |
| ES± | 0,1273 ^{**} | 0.0603 ^{**} | 0,1946 ^{**} | 0.3597 ^{**} | 7,9162 ^{**} | 1.5862 ^{**} | 14,3426 ^{**} | 2.6757 ^{**} |

Similares resultados se ofrecen en la literatura mundial, Pérez Vargas, García Esquivel & Esparza García (2002), refirieron que el contenido de materia orgánica del suelo se incrementaba notablemente, así como la acidificación y la saturación de bases y la capacidad de intercambio catiónico.

De igual forma, Plice (1948), encontró grandes incrementos en la materia orgánica en suelos que se han contaminado con crudo y también reportó que los suelos contaminados con gas natural tienen pH alrededor del punto neutral como sucedió en el presente estudio.

Serrano, et al. (2013), reportan que la contaminación por hidrocarburos de petróleo ejerce efectos adversos sobre las plantas, generando minerales tóxicos en el suelo disponible para ser absorbidos, además,

| | | | | |
|---------------|------|------------|--------|--------------|
| Serrín | 0,18 | Inhibición | 0,58 | Inhibición |
| Pulpa de Café | 0,08 | Inhibición | 0,49 | Inhibición |
| Est. Vacuno | 0,13 | Inhibición | -0,207 | Estimulación |
| Thalassia | 0,24 | Inhibición | 0,498 | Inhibición |
| Control | 0,21 | Inhibición | 0,32 | Inhibición |
| Testigo | 0,00 | ----- | 0,00 | ----- |

Agroquímico del suelo

Los contenidos de fósforo y potasio asimilable, así como el pH y la materia orgánica en el suelo en tiempo cero y después de 340 días del proceso de biopilas (Tabla 4) fueron superiores en los tratamientos contaminados con residuo petrolizado, aunque no significa que sea beneficioso el incremento de la materia orgánica, ya que dicho incremento se puede atribuir a al material petrogénico y no biogénico.

conduce a un deterioro de la estructura del suelo; pérdida del contenido de materia orgánica y pérdida de nutrientes minerales del suelo, tales como potasio, sodio, sulfato, fosfato, y nitrato, de igual forma, el suelo se expone a la lixiviación y erosión.

Quiñones, et al. (2003), determinaron que el maíz, MV08 presentó valores más altos de emergencia en todas las concentraciones de petróleo crudo en el suelo. Respecto al crecimiento de las plantas de maíz, las recolecciones MV06 y MV08 tienen mayor potencial para utilizarse en experimentos en suelos contaminados con petróleo. La concentración de petróleo 25 000 mg kg⁻¹ suelo favoreció el crecimiento de las plántulas de maíz.

CONCLUSIONES

Los sustratos combinados en la Tiempo cero no comprometieron la germinación de la semilla, pero sí la altura y biomasa foliar. Después de un proceso de 340 días (Tiempo 1), la germinación, supervivencia y altura de las plantas fue óptima en los tratamientos estiércol vacuno, testigo y control y superior en biomasa foliar la variante estiércol vacuno.

El peso seco de raíces de maíz se favoreció por la presencia de hidrocarburos en Tiempo cero y a los 340 días, sin correspondencia con el peso foliar.

El Índice Relativo de Impacto Fisiológico (IRIF) para Tiempo cero indicó efectos negativos en las variables altura y peso seco foliar y favorable para la variable raíz. A los 340 días del proceso en biopilas, se repite este comportamiento, excepto en la variante que utilizó estiércol vacuno como enmendante. Las mayores afectaciones en peso seco foliar, peso seco de raíces y altura se obtuvieron en el tratamiento bagazo.

En Tiempo cero, el Índice de Impacto Fitotóxico (IIF) confirmó afectaciones de las plantas de maíz en presencia de los HTP en todas las variantes que lo incluyen. Transcurridos 340 días del proceso en biopilas este índice no mostró afectaciones en la variante con estiércol vacuno y se acentuó en las variantes que incluyeron bagazo, aserrín y cachaza como texturizantes.

El contenido de fósforo y potasio asimilable, así como el pH y la materia orgánica en el suelo donde se cultivó el maíz fue superior en los tratamientos contaminados con HTP, independientemente del tiempo transcurrido para la biorremediación.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Arias, A., Rivera, M., & Trujillo, A. (2017). Fitotoxicidad de un suelo contaminado con petróleo fresco sobre *Phaseolus vulgaris* L. (LEGUMINOSAE). *Rev. Int. Contam. Ambiente.*, 33(3), 411-419. Recuperado de <http://www.scielo.org.mx/pdf/rica/v33n3/0188-4999-rica-33-03-411.pdf>
- Chaineau, H., C., Morel, J. L., & Oudot, J. (1997). Phytotoxicity and plant uptake of fuel oil hydrocarbons. *J. Environ. Quality*, 26, 1478-1483. Recuperado de <https://dl.sciencesocieties.org/publications/jeq/abstracts/26/6/JEQ0260061478>
- Cuba. Oficina Nacional de Normalización. (1999a). Calidad del suelo. Análisis químico. Determinación del porcentaje de materia orgánica. La Habana: ONN.
- Cuba. Oficina Nacional de Normalización. (1999b). Calidad del suelo. Determinación de las formas móviles de fósforo y potasio. La Habana: ONN.
- Cuba. Oficina Nacional de Normalización. (2001). Calidad del Suelo. Determinación de la conductividad eléctrica y sales solubles totales en suelos afectados por salinidad Relación suelo- agua. La Habana: ONN.
- Duncan, D. B. (1955). Multiple range and multiple F test. *Biometrics*. 11 (1), 1-42. Recuperado de <https://www.jstor.org/stable/pdf/3001478.pdf>
- Escalante, E. (2000). Estudio de Ecotoxicidad de un suelo contaminado con hidrocarburos. (Tesis para obtener el Grado de Maestro en Biotecnología). México. D.F: Universidad Autónoma Metropolitana.
- Ekundayo, E. O., Emede, T. O., & Osayande, D. I. (2001). Effects of crude oil spillage on growth and yield of maize (*Zea mays* L.) in soils of Midwestern Nigeria. *Plant Foods for Human Nutrition*, 56 (4), 313 -324. Recuperado de <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pub-med/11678437>
- Franco, S. E. (1993). Respuesta de frijol (*Phaseolus vulgaris*) a la presencia de contaminantes de tipo hidrocarburo. (Tesis Profesional). Chapingo: Universidad Autónoma Chapingo.
- González, R. (1995). Impacto ambiental de la industria petrolera en el estado de Tabasco. Memoria de Práctica Profesional. Villaflores: Universidad Autónoma de Chiapas.
- Méndez Natera, J. R., Salazar Garantón, R., & Velásquez, A. (2006). Efecto del derrame petrolero simulado y la aplicación de un remediador sobre la germinación de semillas y desarrollo de plántulas en dos tipos de maíz (*Zea mays* L.). *Revista UDO Agrícola* 6(1), 102-108. Recuperado de <http://www.bioline.org.br/pdf?cg06013>
- Plice, M. J. (1948). Some effects of crude petroleum on soil fertility. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 14, 413-416.
- Porta, A., Filliat, N., & Plata, N. (1999). Phytotoxicity and phytoremediation studies in soils polluted by weathered oil. En, B.C. Alleman y A. Lesson (Eds.), *Phytoremediation and innovative strategies for specialized remedial applications*. (pp. 51-56). Columbus: Battell.
- Pérez Vargas, J., García Esquivel, G., & Esparza García, F. (2002). Papel ecológico de la flora rizosférica en fitorremediación. *Avance y Perspectivas*, 21, 297-300. Recuperado de <https://biblat.unam.mx/es/revista/avance-y-perspectiva/articulo/papel-ecologico-de-la-flora-rizosferica-en-fitorremediacion>

- Rivera-Cruz, M.C., Trujillo-Narcía, A., Miranda de la Cruz, M. A., & Maldonado, E. (2005). Evaluación toxicológica de suelos contaminados con petróleos nuevo e intemperizado mediante ensayos con leguminosas. *Interciencia*, 30, 326-331. Recuperado de <https://www.redalyc.org/service/redalyc/downloadPdf/339/33910503/1>
- Quiñones, E., Ferrera, R., Gavi, F., Fernández, L., Rodríguez, R., & Alarcón, A. (2003). Emergencia y crecimiento de maíz en un suelo contaminado con petróleo crudo *Agrociencia*, 37(6), 585-594. Recuperado de <http://www.redalyc.org/pdf/302/30237604.pdf>
- Vázquez Luna, D., Castelán Estrada, M., Rivera Cruz, M. C., Ortiz Ceballos, Á. I., & Izquierdo, F. (2010). *Crotalaria incana* L. y *Leucaena leucocephala* Lam. (leguminosae): especies indicadoras de toxicidad por hidrocarburos de petróleo en el suelo. *Rev. Int. Contam. Ambie.*, 26(3), 183-191. Recuperado de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0188-49992010000300001
- Xu, J. G., & Johnson, R. L. (1995). Root growth microbial activity and phosphatase activity in oil contaminated, remediated and uncontaminated soil planted to barley and field pea. *Planted soil*, 73, 3-10. Recuperado de <https://www.jstor.org/stable/42947502>