

Rehabilitación de suelos contaminados por derrame de hidrocarburos mediante biorremediación

**Carla Milena Proaño Herrera
Daniela Milagros Rivas Aybar**

Zamorano, Honduras
Diciembre, 2010

ZAMORANO
CARRERA DE CIENCIA Y PRODUCCIÓN AGROPECUARIA

Rehabilitación de suelos contaminados por derrame de hidrocarburos mediante biorremediación

Proyecto especial presentado como requisito parcial para optar
al título de Ingeniera Agrónoma en el
Grado Académico de Licenciatura

Presentado por

Carla Milena Proaño Herrera

Zamorano, Honduras
Diciembre, 2010

Rehabilitación de suelos contaminados por derrame de hidrocarburos mediante biorremediación

Presentado por:

Carla Milena Proaño Herrera

Aprobado:

Gloria Arévalo de Gauggel, M.Sc.
Asesora principal

Abel Gernat, Ph.D.
Director
Carrera de Ciencia y Producción
Agropecuaria

Mily Cortés, Ph.D.
Asesora

Raúl Espinal, Ph.D.
Decano Académico

Abelino Pitty, Ph.D.
Coordinador del área de Fitotecnia

Kenneth L. Hoadley, D.B.A.
Rector

ZAMORANO
CARRERA DE DESARROLLO SOCIOECONÓMICO Y AMBIENTE

Rehabilitación de suelos contaminados por derrame de hidrocarburos mediante biorremediación

Proyecto especial presentado como requisito parcial para optar
al título de Ingeniera en Desarrollo Socioeconómico y Ambiente en el
Grado Académico de Licenciatura

Presentado por

Daniela Milagros Rivas Aybar

Zamorano, Honduras
Diciembre, 2010

Rehabilitación de suelos contaminados por derrame de hidrocarburos mediante biorremediación

Presentado por:

Daniela Milagros Rivas Aybar

Aprobado:

Gloria Arévalo de Gauggel, M.Sc.
Asesora principal

Arie Sanders, M.Sc.
Director
Carrera de Desarrollo Socioeconómico
y Ambiente

Mily Cortés, Ph.D.
Asesora

Raúl Espinal, Ph.D.
Decano Académico

Kenneth L. Hoadley, D.B.A.
Rector

RESUMEN

Proaño, C., Rivas, D. 2010. Rehabilitación de suelos contaminados por derrame de hidrocarburos mediante biorremediación, Zamorano, Honduras. Proyecto especial de graduación del programa de Ingeniería Agronómica y de Ingeniería en Desarrollo Socioeconómico y Ambiente, Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano. Honduras. 22 p.

La remediación de suelos degradados por derrame de hidrocarburos tiene limitantes que afectan la rápida y efectiva mineralización del contaminante por los organismos vivos del suelo. El objetivo principal del estudio fue evaluar la gallinaza como estimulador del proceso degradador de hidrocarburos por organismos indígenas en el suelo. El experimento inició en Junio de 2010 con una duración de 10 semanas. Se usaron dos relaciones carbono:nitrógeno (15 y 30) y un testigo sin bioestimulante en cuatro niveles de contaminación por derrame de búnker de petróleo (0.5, 0.62, 0.74 y 0.89% de hidrocarburo). Para obtener las relaciones C:N se usaron diferentes proporciones suelo contaminado, gallinaza y aserrín. Se monitoreó pH y temperatura durante las seis semanas que duró el proceso de biorremediación. Al final del proceso se determinó la relación C:N, conductividad eléctrica, y cantidad de hidrocarburos. Se evaluó la germinación y el crecimiento del pasto tanzania (*Panicum maximum*) durante tres semanas después del periodo de biorremediación. La relación C:N en suelos franco arenosos contaminados con búnker de petróleo aumenta linealmente según la ecuación: $C:N = 6.963 (\% \text{ hidrocarburo en el suelo}) + 7.937$ ($R^2=0.971$). En suelos contaminados con hidrocarburos es necesaria la bioestimulación para su rehabilitación. La gallinaza sirve como aditivo principal de bioestimulante y es más eficiente en suelos con derrames menores a 14.4 litros de búnker/m³ de suelo aplicado en una relación C:N 30 con 12% de gallinaza y 5% de aserrín basado en peso seco (p/p). En seis semanas el bioestimulante redujo la concentración de hidrocarburos al 50% de la concentración inicial. Para derrames mayores a 14.4 litros se obtuvieron resultados similares usando una relación C:N 15 con 24% de gallinaza y 0.5% de aserrín basada en peso seco (p/p). La germinación y crecimiento del pasto se vio severamente afectado por una conductividad eléctrica mayor o igual a 3.8 dS/m generada por la gallinaza, cuando se usó más de 12% por lo cual se recomienda no usar esta relación.

Palabras clave: Bioestimulación, hidrocarburos.

CONTENIDO

Portadilla 1.....	i
Página de firmas 1.....	ii
Portadilla 2.....	iii
Página de firmas 2.....	iv
Resumen.....	v
Contenido.....	vi
Índice de cuadros y figuras.....	vii
1. INTRODUCCIÓN.....	1
2. MATERIALES Y MÉTODOS.....	3
3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	8
4. CONCLUSIONES.....	17
5. RECOMENDACIONES.....	18
6. LITERATURA CITADA.....	19

ÍNDICE DE CUADROS Y FIGURAS

Cuadro	Página
1. Equivalente de búnker (L/m ³) de derrame.....	5
2. Proporción de suelo y bioestimulante (p/p) para alcanzar relaciones C:N 30 y C:N 15 en diferentes niveles de contaminación de suelo con hidrocarburo búnker, EAP, Zamorano, Honduras.....	5
3. Tratamientos basados en la relación C:N 30 y C:N 15 con dos dosis de bioestimulante y sin bioestimulante en los cuatro niveles de contaminación de suelo con hidrocarburo búnker, EAP, Zamorano, Honduras.....	7
4. Volumen de contaminante, porcentaje de hidrocarburos en cuatro niveles de contaminación con búnker y relación C:N, EAP, Zamorano, Honduras.....	8
5. pH, variación por bioestimulación en suelo contaminado por hidrocarburo búnker a través del tiempo, EAP, Zamorano, Honduras. ¹	11
6. Evaluación del promedio de temperatura (°C) entre tratamientos y a través del tiempo durante las seis semanas de bioestimulación, EAP, Zamorano, Honduras. ¹ ..	13
7. Porcentaje de carbono y nitrógeno; y relación C:N a las seis semanas de bioestimulación, EAP, Zamorano, Honduras.....	12
8. Concentración de hidrocarburos (HTP) en suelos contaminados antes y después de la bioestimulación, EAP, Zamorano, Honduras.....	13
9. Degradación de búnker (%), según el nivel de contaminación y la relación C:N del bioestimulante, EAP, Zamorano, Honduras.....	14
10. Cantidad de gallinaza y aserrín a utilizar de acuerdo a la magnitud del derrame de búnker, en suelos de textura franco arenosa, EAP, Zamorano, Honduras.....	15
11. Porcentaje de germinación y conductividad eléctrica a la sexta semana de bioestimulación de suelo contaminado con hidrocarburo búnker, EAP, Zamorano, Honduras.....	15
12. Diferencia de altura (cm/planta) de pasto tanzania (<i>Panicum maximun</i>) entre semanas, EAP, Zamorano, Honduras.....	16
Figura	Página
1. Relación entre el nivel de contaminación y la relación C:N en suelos contaminados con hidrocarburo búnker, EAP, Zamorano, Honduras.....	8
2. Relación entre el nivel de contaminación y el porcentaje de degradación de hidrocarburo/L de búnker en suelos contaminados con hidrocarburo búnker, EAP, Zamorano, Honduras.....	14

1. INTRODUCCIÓN

Uno de los principales problemas a nivel global, referido a la contaminación de suelos, compromete la inadecuada gestión de los residuos y materiales de los procesos industriales. Dentro de las actividades que mayor impacto negativo han tenido y tienen sobre el suelo destacan aquellas de la industria de los hidrocarburos: explotación, producción, almacenamiento y transporte de petróleo. Así mismo, la toxicidad de los suelos degradados con este contaminante constituyen un riesgo potencial para la salud humana, contaminación de aguas subterráneas y afecta al desarrollo vegetal (Acosta *et al.* 2004).

Ante este contexto, las tecnologías que utilizan tratamientos biológicos para disminuir los niveles de contaminantes o eliminarlos del todo, como la biorremediación, se destacan no solo por ser más económicas sino también por ser herramientas útiles para encaminar una gestión ambiental eficiente y segura (Infante 1998). La biorremediación o también llamada biorrehabilitación, es un proceso mediante el cual se utiliza el potencial metabólico de organismos vivos que son capaces de degradar compuestos orgánicos contaminantes en compuestos no tóxicos, para el caso de los hidrocarburos en agua y dióxido de carbono (Miller 1995; Volke y Velasco 2002). En forma natural, los suelos contienen organismos indígenas capaces de degradar hidrocarburos y estos representan el 1% de la población bacteriana del suelo. A pesar de las cifras, estos organismos son capaces de degradar altos niveles de hidrocarburos con el ambiente adecuado para su actividad (Atlas 1981). A la técnica de biorremediación que favorece el crecimiento y el metabolismo de las cepas microbianas indígenas se le conoce como bioestimulación. Este es el método más usado para rehabilitar suelos contaminados con hidrocarburos debido a sus beneficios al ambiente ya que no requiere inocular el suelo con organismos exógenos con lo cual también se disminuyen los costos de tratamiento (Infante 1998).

El derrame de hidrocarburos en el suelo resulta en un desbalance de la relación carbono:nitrógeno debido a que el hidrocarburo contiene esencialmente carbono e hidrógeno, este factor produce una deficiencia en el uso de nitrógeno lo que retarda la actividad metabólica de los organismos autóctonos y la utilización del carbono (Jobson *et al.* 1974), así mismo la disponibilidad de oxígeno molecular es indispensable para la degradación del contaminante. Con las limitantes de oxígeno y nitrógeno, las poblaciones de organismos degradadores de hidrocarburos tienen tasas de crecimiento bajas, en algunos casos llega hasta el punto donde el contaminante puede permanecer en el suelo indefinidamente (Atlas 1991). Estudios han demostrado que como consecuencia de los daños en las condiciones del suelo producidas por derrame de hidrocarburos estos tienen efectos adversos en la productividad del suelo, en la densidad de las plantas y en el rendimiento de cultivos (Inoni *et al.* 2006; Kusic *et al.* 2010).

En la presente investigación se usó el método de bioestimulación para rehabilitar suelos contaminados por derrame de búnker de petróleo, utilizando dos relaciones de carbono:nitrógeno mediante la adición de gallinaza y aserrín. Además se manejaron los niveles de humedad y la aireación mediante riego y volteo manual del suelo. El objetivo principal del estudio fue evaluar a la gallinaza como bioestimulante para la recuperación de suelos afectados por derrame de hidrocarburos mediante biorremediación y como objetivos secundarios identificar la relación carbono:nitrógeno más eficiente entre C:N 15 y C:N 30 y evaluar el efecto de la biorremediación con gallinaza en el desarrollo vegetal.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

LOCALIZACIÓN DEL ESTUDIO

El experimento inició en Junio de 2010 con la toma de muestras de suelo que fue realizada en el municipio de San Lorenzo, departamento de Valle, Honduras, estos suelos fueron sometidos a una contaminación real por derrame de búnker de petróleo. La localidad tiene una precipitación anual de 1,680 mm y una temperatura media anual de 29°C (Hidrografía en Honduras, 2009). El experimento se desarrolló en los invernaderos del PIF (Programa de Investigaciones de Frijol) de la Escuela Agrícola Panamericana Zamorano ubicada a 30 km al Este de Tegucigalpa, a una altura de 800 msnm con una precipitación promedio anual de 1100 mm y con una temperatura media anual de 24°C.

SUELO

Las muestras se analizaron en el Laboratorio de Suelos y Agua de la EAP Zamorano. El pH fue determinado con una relación suelo: agua 1:1 (p/p) y medida con potenciómetro; la conductividad eléctrica con el conductímetro (puente de Wheanston) medida en solución suelo: agua 1:1 (p/p), carbono orgánico por el método de Walkley-Black; nitrógeno total determinado por el método de Kjeldahl, fósforo con la solución extractora Mehlich 3 y la concentración determinada por colorimetría (Arévalo y Gauggel 2009). La textura se determinó mediante el método de Bouyoucoucous, densidad aparente con el método del terrón y porcentaje de humedad por método gravimétrico (Arévalo y Gauggel 2008).

Las características del suelo usado durante el experimento fueron: textura franco arenosa (68% arena, 18% limo y 16% arcilla); densidad aparente 1.053 g/cm³; humedad a la contaminación 6.68%; pH 6.74; carbono orgánico 4.17%; nitrógeno total 0.36%; relación Carbono: Nitrógeno 11.6 y elementos extractables: fósforo 10 mg/kg, potasio 234 mg/kg, magnesio 630 mg/kg y sodio 315 mg/kg. El suelo tuvo una contaminación inicial de 0.5% (p/p) de hidrocarburo.

CONTAMINANTE

Se usó combustible búnker como contaminante, el cual también es conocido como fuel oil número 6 ó bunker C. Este hidrocarburo es usado en la industria por sus propiedades químicas de alta viscosidad y de alto contenido de carbono (Parra 2003). En Centroamérica se usa principalmente como combustible en centrales de generación

eléctrica, datos indican que en el año 2006 se consumieron 16.2 millones de barriles de búnker y sólo en Honduras se usaron 4.53 millones (Pérez 2009).

CARACTERÍSTICAS DE LA CONTAMINACIÓN

Se aplicaron cuatro niveles de contaminación por derrame de búnker. Se tomó como parámetro un derrame de búnker de 12 barriles de 22 galones/barril en 140 m³ de suelo. A partir de este parámetro y según la densidad aparente de las muestras de suelo, se determinó el volumen de búnker para cada nivel de contaminación. El nivel de contaminación más alto o nivel de contaminación cuatro es equivalente a un derrame de búnker de 21.12 barriles/100 m³ de suelo (17.54 L/m³); el nivel de contaminación tres es equivalente a 18.40 barriles /100 m³ de suelo (14.60 L/m³); el nivel de contaminación dos es equivalente a 14.91 barriles/100 m³ de suelo (12.24 L/m³) y el nivel de contaminación uno el cual corresponde a la contaminación inicial del suelo 12.76 barriles/100 m³ de suelo (10.48 L/ m³).

Después de realizar la contaminación controlada de búnker el suelo, con los diferentes grados de contaminación, se dejó a la intemperie y se homogenizó mediante el volteo con palas cada tres días, durante 15 días. El objetivo fue simular un derrame donde el suelo fue disturbado luego de la contaminación. A los ocho días de realizada la contaminación controlada y luego del volteo del suelo, se tomaron muestras de 600 gramos de cada nivel de contaminación. Las muestras fueron analizadas en el Laboratorio de Suelos y Agua de la EAP Zamorano, donde se determinó el carbono total mediante pérdida de peso por calcinación y el nitrógeno total por el método de Kjeldahl. El porcentaje de hidrocarburos en el suelo fue determinado en el Laboratorio de Suelos del Ministerio de Energía y Minas de la República de Guatemala mediante el método gravimétrico.¹

BIOESTIMULANTE

El bioestimulante utilizado en el experimento fue una mezcla de gallinaza y aserrín, ambos insumos colectados en Junio de 2010 en la Unidad Avícola y en la Unidad Forestal de la EAP Zamorano. El objetivo de usar aserrín en el bioestimulante fue el de ajustar las relaciones C:N por su alto contenido de carbono. Muestras de 200 g de los dos aditivos del bioestimulante fueron analizadas en el Laboratorio de Suelos y Agua donde se determinó el carbono total mediante pérdida de peso por calcinación, nitrógeno total por el método de Kjeldahl, fósforo por digestión húmeda con H₂SO₄ y H₂O₂ y determinado por espectrofotometría (colorimetría). El pH fue determinado con una relación suelo: agua 1:1 y medida con potenciómetro. El porcentaje de humedad fue determinado dejando secar la muestra a 70 °C y densidad aparente midiendo un peso conocido del material sobre el volumen que ocupa (Arévalo y Gauggel 2008).

¹ Villatoro M. 2010. Ing. Encargada.

Laboratorio de Suelos Ministerio de Energía y Minas de la República de Guatemala.

Debido a que el suelo sobre el que se trabajó ya estaba contaminado, se realizó un ajuste para determinar el equivalente de litros de contaminante por metro cúbico de suelo, a partir de las diferencias en el hidrocarburo medido en el suelo según el nivel de contaminación vs. el nivel inicial (Cuadro 1).

Cuadro 1. Equivalente de búnker (L/m^3) de derrame.

Nivel de contaminación	Contaminación ajustada (L/m^3)
1	10.48
2	12.24
3	14.60
4	17.54

BIOESTIMULACIÓN

En Julio de 2010 se mezcló el suelo contaminado y el bioestimulante. A cada nivel de contaminación de suelo se aplicaron dos niveles de bioestimulante para alcanzar las relaciones C:N 30 y C:N 15 y uno sin bioestimulante. Se usó el método de proporciones y se calcularon los porcentajes de suelo, gallinaza y aserrín para ajustar relaciones C:N (Cuadro 2). Cada mezcla se repartió en seis maceteros plásticos de tres pulgadas de diámetro y tres libras de capacidad, a los cuales se les colocó papel en el fondo para evitar pérdidas del hidrocarburo por lixiviación, se llenó cada macetero con tres libras de cada mezcla y seis maceteros sin bioestimulante por cada nivel de contaminación. Los maceteros se trasladaron a un invernadero de malla de sarán cubierto con plástico en las instalaciones del PIF, lugar donde permanecieron durante diez semanas.

Cuadro 2. Proporción de suelo y bioestimulante (p/p) para alcanzar relaciones C:N 30 y C:N 15 en diferentes niveles de contaminación de suelo con hidrocarburo búnker, EAP, Zamorano, Honduras.

Nivel de contaminación	C:N	Suelo (%)	Bioestimulante (%)	
			Gallinaza	Aserrín
1	30	83.4	11.6	4.9
	15	75.6	23.8	0.7
2	30	83.6	11.7	4.7
	15	75.6	23.8	0.5
3	30	88.4	6.90	4.7
	15	75.7	23.9	0.4
4	30	88.6	6.90	4.4
	15	75.8	23.9	0.3

Se mantuvo la humedad del suelo alrededor del 50%, humedad óptima para el crecimiento microbiano (Moreno 2008), utilizando el método del tacto que consiste en tomar un puñado de material con la mano y si este se presenta seco y al presionarlo no forma bolas está a menos del 50% de humedad (Israelsen *et al.* 1985). Si la cantidad de humedad en las mezclas no era la suficiente se realizaba riego mediante un sistema de micro aspersión.

Para asegurar la aireación de las mezclas se realizaron volteos semanales usando una pala de jardinería durante seis semanas.

EVALUACIÓN DE LA REMEDIACIÓN

Después de 42 días de la bioestimulación se sembraron 30 semillas por macetero de pasto tanzania (*Panicum maximun*). Previamente, 100 semillas de este pasto se pre germinaron para determinar su viabilidad. La pre-germinación se hizo colocando las semillas en una placa petri de 9 cm de diámetro y el fondo cubierto con papel absorbente. Las semillas fueron regadas periódicamente durante una semana, tiempo después del cual se midió el porcentaje de germinación para determinar la viabilidad. Con base en el porcentaje de germinación, se ajustaron los resultados de germinación en el experimento, con la siguiente ecuación.

$$\% \text{ germinación ajustada} = \frac{\% \text{ germinación}}{\% \text{ pre germinación}} \times 100 \quad [1]$$

Luego de determinar la viabilidad de las semillas se procedió a la siembra en los maceteros. Se realizaron riegos cada tres días durante un total de 28 días.

EFFECTIVIDAD DE LA REMEDIACIÓN

Se estableció la relación entre el porcentaje de hidrocarburo degradado y el nivel de contaminación, en los suelos tratados con bioestimulante con dos niveles de relación C:N 30 y 15.

VARIABLES MEDIDAS

Las variables medidas en las mezclas de suelo fueron temperatura y pH, éstas se midieron en la primera, segunda, cuarta y sexta semana del proceso de bioestimulación. El pH fue medido tomando una muestra de 50 g luego del volteo del suelo y analizada en el Laboratorio de Suelos y Agua. La temperatura se midió una vez a la semana, los días sábado a las 7 a.m., con un termómetro de suelo colocado en el centro del macetero a una profundidad de 10 cm.

Las otras variables, medidas a la sexta semana de la bioestimulación, fueron carbono orgánico, nitrógeno total, relación carbono: nitrógeno, fósforo, conductividad eléctrica y porcentaje de hidrocarburos. Se midió el porcentaje de germinación, a las dos semanas de siembra, y crecimiento de la planta semanalmente, durante tres semanas.

TRATAMIENTOS

Se establecieron 12 tratamientos que consistieron en cuatro niveles de contaminación, cada uno con dos dosis de bioestimulante ajustadas a relaciones C:N 30 y C:N 15 y sin bioestimulante las cuales sirvieron de testigos parciales (Cuadro 3).

Cuadro 3. Tratamientos basados en la relación C:N 30 y C:N 15 con dos dosis de bioestimulante y sin bioestimulante en los cuatro niveles de contaminación de suelo con hidrocarburo búnker, EAP, Zamorano, Honduras.

# Tratamientos	Descripción
1	Suelo con contaminación 1 [‡] y sin bioestimulante
2	Suelo con contaminación 1 y con bioestimulante C:N 30
3	Suelo con contaminación 1 y con bioestimulante C:N 15
4	Suelo con contaminación 2 y sin bioestimulante
5	Suelo con contaminación 2 y con bioestimulante C:N 30
6	Suelo con contaminación 2 y con bioestimulante C:N 15
7	Suelo con contaminación 3 y sin bioestimulante
8	Suelo con contaminación 3 y con bioestimulante C:N 30
9	Suelo con contaminación 3 y con bioestimulante C:N 15
10	Suelo con contaminación 4 y sin bioestimulante
11	Suelo con contaminación 4 y con bioestimulante C:N 30
12	Suelo con contaminación 4 y con bioestimulante C:N 15

[‡]Nivel de contaminación de hidrocarburos (p/p): 1, 2, 3 y 4: 0.50%, 0.62%, 0.74% y 0.89% respectivamente.

DISEÑO EXPERIMENTAL

El diseño utilizado en el experimento fue BCA (Bloques Completamente al Azar). Se realizaron seis repeticiones con un total de 72 unidades experimentales.

ANÁLISIS ESTADÍSTICO

Se usó un análisis de la varianza (ANDEVA), separación de medias, y la prueba Duncan. El análisis fue realizado con el programa Statistic Analysis System (SAS[®] 2007) con un nivel de significancia exigido de $P \leq 0.05$.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

SUELO CONTAMINADO

La relación carbono: nitrógeno aumentó con el nivel de contaminación en relación lineal según la ecuación:

$$y = 6.963x + 7.937 \quad [2]$$

Donde:

x= porcentaje de hidrocarburo en el suelo

y = relación C:N

Existe una correlación ($r = +0.985$ y $R^2 = 0.971$) entre la relación C:N y el porcentaje de hidrocarburos en el suelo (Cuadro 4) (Figura 1).

Cuadro 4. Volumen de contaminante, porcentaje de hidrocarburos en cuatro niveles de contaminación con búnker y relación C:N, EAP, Zamorano, Honduras.

Nivel de contaminación	Contaminante/suelo (v/v) (L/m ³)	Hidrocarburos (%)	C:N
1	10.48	0.53	11.6
2	12.24	0.62	12.1
3	14.60	0.74	12.9
4	17.54	0.89	14.3

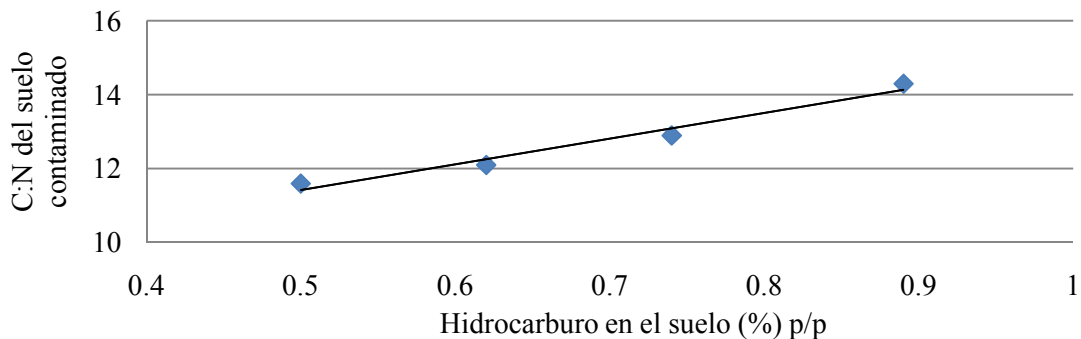


Figura 1. Relación entre el nivel de contaminación y la relación C:N en suelos contaminados con hidrocarburo búnker, EAP, Zamorano, Honduras

BIOESTIMULANTE

Los dos aditivos del bioestimulante fueron gallinaza y aserrín. La gallinaza tuvo una humedad del 19.09%, densidad aparente 0.331 g/cm^3 , pH 6.42, carbono 50.59%, nitrógeno 3.45%, relación carbono:nitrógeno 14.7 y fósforo 1.21 mg/kg. El aserrín presentó 57.43% de humedad, densidad aparente 0.127 g/cm^3 , carbono 57.43%, nitrógeno 0.15% y relación carbono:nitrógeno 380.

VARIACIÓN DEL pH

El comportamiento del pH varía a través del tiempo, alcanzando el mayor valor en la segunda semana después de la bioestimulación (7.36 en promedio). La alcalinización en el proceso de bioestimulación (compostaje) en la segunda semana, se debe a la liberación de amoníaco durante la amonificación y la mineralización del nitrógeno orgánico (Niklasch y Joergensen 2001), lo cual ocurre luego de añadir materia orgánica en suelos contaminados (Atagana 2008; Abouelwafa *et al.* 2008).

El pH disminuyó a la cuarta y sexta semana con promedios de 7.27 y 7.22 respectivamente y difieren estadísticamente ($P \leq 0.05$). La acidificación del medio fue causada por la volatilización del nitrógeno amoniacal y los iones hidrogeno liberados como resultado del proceso de nitrificación (Eklind y Kirchmann 2000). La descomposición de la materia orgánica, a través de la digestión de bacterias y hongos, generan ácidos húmicos los cuales también serían responsables por la disminución del pH. Al final del proceso de descomposición de la materia orgánica, se espera que la disminución de pH aliente a la formación de sustancias húmicas que tienen propiedades tampón, neutralizando el pH (Hachicha *et al.* 2008; Marthur 1991).

Cuando no hay bioestimulación en el suelo contaminado, el pH se mantiene significativamente similar ($P \leq 0.05$) con promedios de 6.9, 6.91 y 6.91 en los niveles más bajos de contaminación (0.50, 0.62 y 0.74% de hidrocarburos) y el pH es ligeramente más elevado (6.97) en el nivel más alto (0.89% de hidrocarburos) con diferencia significativa con los demás ($P \leq 0.05$). El pH en el suelo aumenta luego de una severa contaminación con hidrocarburos (Atagana 2008; Ayotamuno *et al.* 2006).

En promedio, los tratamientos que obtuvieron mayor pH en todo el proceso de bioestimulación son los que recibieron bioestimulación con relación C:N 30 (B_{30}) y el tratamiento con nivel de contaminación (0.62% de hidrocarburo) y C/N 30 (C_2B_{30}), que difiere estadísticamente de los demás con el pH más alto (7.50 en promedio) ($P \leq 0.05$). En general los valores de pH observados estuvieron dentro de los rangos recomendados para el compostaje de materiales orgánicos, valores de 5.5 a 8 (Cuadro 5) (Moreno 2008).

Cuadro 5. pH, variación por bioestimulación en suelo contaminado por hidrocarburo búnker a través del tiempo, EAP, Zamorano, Honduras.¹

Tratamientos ²	Semanas				Promedio
	1	2	4	6	
C ₁ B ₀	6.92 ^{g(wx)}	6.86 ^{f(x)}	6.88 ^{fg(wx)}	6.94 ^{ef(w)}	6.90 ^f
C ₁ B ₃₀	7.22 ^{d(y)}	7.80 ^{a(w)}	7.47 ^{bc(x)}	7.19 ^{d(y)}	7.45 ^b
C ₁ B ₁₅	7.28 ^{cd(y)}	7.87 ^{a(w)}	7.38 ^{de(x)}	7.26 ^{cd(y)}	7.42 ^{bc}
C ₂ B ₀	6.91 ^{g(wx)}	6.97 ^{e(w)}	6.84 ^{g(x)}	6.92 ^{f(wx)}	6.91 ^f
C ₂ B ₃₀	7.10 ^{e(y)}	7.68 ^{b(w)}	7.51 ^{b(x)}	7.45 ^{b(x)}	7.50 ^a
C ₂ B ₁₅	7.36 ^{ab(x)}	7.83 ^{a(w)}	7.42 ^{cd(x)}	7.37 ^{bc(x)}	7.43 ^b
C ₃ B ₀	6.94 ^{fg(w)}	6.84 ^{f(w)}	6.94 ^{f(w)}	6.92 ^{f(w)}	6.91 ^f
C ₃ B ₃₀	6.92 ^{g(y)}	7.40 ^{cd(x)}	7.59 ^{a(w)}	7.61 ^{a(w)}	7.42 ^b
C ₃ B ₁₅	7.30 ^{bc(y)}	7.31 ^{d(y)}	7.47 ^{bc(x)}	7.61 ^{a(w)}	7.38 ^c
C ₄ B ₀	7.00 ^{f(wx)}	6.93 ^{ef(xy)}	6.90 ^{fg(y)}	7.03 ^{e(w)}	6.97 ^e
C ₄ B ₃₀	7.14 ^{e(x)}	7.39 ^{cd(w)}	7.35 ^{e(x)}	7.04 ^{e(x)}	7.42 ^{bc}
C ₄ B ₁₅	7.38 ^{a(x)}	7.42 ^{c(x)}	7.50 ^{b(w)}	7.36 ^{bc(x)}	7.23 ^d
Promedio	7.12 ^z	7.36 ^w	7.27 ^x	7.22 ^y	**
(P≤0.05)	**	**	**	**	**

*Significativo (P≤0.05), **altamente significativo (P≤0.01).

¹Promedios en la misma columna con letras distintas difieren entre sí (P<0.05).

Promedios en la misma fila con letras distintas difieren entre sí (P<0.05).

²C₁, C₂, C₃, C₄ = contaminación con hidrocarburos (p/p): 0.50%, 0.62%, 0.74% y 0.89% respectivamente; B₀ = sin bioestimulante, B₃₀ = bioestimulante C:N 30; B₁₅ = bioestimulante C:N 15.

TEMPERATURA

La temperatura muestra variaciones en el tiempo y entre tratamientos a (P≤0.05). Cuando no hay bioestimulación (B₀) la temperatura no difiere significativamente (P≤0.05) en los niveles más bajos de contaminación (0.50, 0.62 y 0.74% de hidrocarburos) con temperaturas de 21.7, 21 y 21.9 °C respectivamente siendo estas las más bajas de todo el experimento. El nivel de contaminación con 0.89% de hidrocarburos (C₄) difiere significativamente (P≤0.05) de los demás tratamientos sin bioestimulante (B₀) a 22.6 °C.

Con bioestimulación la temperatura aumenta. Las temperaturas más elevadas se observaron cuando el bioestimulante tiene relación C:N 30 (23.2, 23.7, 24.1 y 24.3) con contaminación de 0.50, 0.62, 0.74 y 0.89 % de hidrocarburos, respectivamente. Sin embargo, las temperaturas máximas del experimento no llegaron a ser las alcanzadas en un proceso de degradación de materia orgánica (compostaje) normal (Palomares *et al.* 1998). Esto se debe a que la mezcla suelo: bioestimulante estuvo compuesta principalmente por suelo de textura arenosa, el cual presenta una baja conductividad térmica (Jiménez y Lhomme 1990).

La temperatura va disminuyendo en la cuarta y sexta semana con diferencias significativas entre sí y con la temperatura a la segunda semana (P≤0.05). La disminución

de la temperatura indica un decrecimiento de la actividad microbiana y del grado de descomposición de la materia orgánica (Moreno 2008) (Cuadro 6).

Cuadro 6. Evaluación del promedio de temperatura (°C) entre tratamientos y a través del tiempo durante las seis semanas de bioestimulación, EAP, Zamorano, Honduras.¹

Tratamientos ²	Semanas				Promedio
	1	2	4	6	
C ₁ B ₀	22.3 ^{f(x)}	23.5 ^{g(w)}	21.3 ^{cd(y)}	19.8	21.7 ^e
C ₁ B ₃₀	23.8 ^{e(x)}	24.7 ^{f(w)}	21.4 ^{abcd(y)}	19.7	23.1 ^c
C ₁ B ₁₅	25.2 ^{d(w)}	25.7 ^{e(w)}	21.8 ^{a(x)}	19.7	22.4 ^d
C ₂ B ₀	22.3 ^{f(x)}	23.8 ^{g(w)}	21.2 ^{cd(y)}	20.0	21.8 ^e
C ₂ B ₃₀	25.5 ^{cd(x)}	26.5 ^{d(w)}	21.3 ^{bcd(y)}	19.9	23.7 ^b
C ₂ B ₁₅	26.0 ^{bc(x)}	27.2 ^{bc(w)}	21.6 ^{abc(y)}	20.0	23.3 ^c
C ₃ B ₀	22.7 ^{f(x)}	24.0 ^{g(w)}	21.1 ^{d(y)}	19.8	21.9 ^e
C ₃ B ₃₀	25.3 ^{cd(x)}	25.9 ^{e(w)}	21.8 ^{ab(y)}	20.3	24.1 ^a
C ₃ B ₁₅	27.3 ^{a(w)}	27.5 ^{b(w)}	21.4 ^{abcd(x)}	20.1	23.3 ^c
C ₄ B ₀	24.0 ^{e(x)}	25.3 ^{e(w)}	21.1 ^{d(y)}	20.0	22.6 ^d
C ₄ B ₃₀	26.3 ^{b(w)}	26.8 ^{cd(w)}	21.8 ^{a(x)}	20.0	24.3 ^a
C ₄ B ₁₅	27.4 ^{a(x)}	28.5 ^{a(w)}	21.3 ^{cd(y)}	19.9	23.7 ^b
Promedio	24.9 ^x	25.8 ^w	21.4 ^y	19.9 ^z	0.00 ^{**}
(P≤0.05)	0.00 ^{**}	0.00 ^{**}	0.003 ^{**}	0.05 ^{ns}	0.002 ^{**}

*Significativo (P≤0.05), **altamente significativo (P≤0.01) y ^{ns} no significativo.

¹ Promedios en la misma columna con letras distintas difieren entre sí (P<0.05).

Promedios en la misma fila con letras distintas difieren entre sí (P<0.05).

² C₁, C₂, C₃, C₄ = contaminación con hidrocarburos 0.50, 0.62, 0.74 y 0.89 respectivamente; B₀ = sin bioestimulante, B₃₀ = bioestimulante C:N 30; B₁₅ = bioestimulante C:N 15.

RELACIÓN C:N AL FINAL DEL PERIODO DE BIOESTIMULACIÓN

La variación de la relación C:N entre la semana inicial y a la semana final es mayor cuando no hay bioestimulante. La relación C:N aumentó en 24 unidades para el nivel de contaminación de 0.50% de hidrocarburos y en 30 unidades para niveles de contaminación 0.62, 0.74 y 0.89%. Una disminución en el porcentaje de nitrógeno incrementa las relaciones C:N en suelos contaminados (Atagana 2008; Eramo y Brennan 2009). Relaciones C:N mayores de 30 no favorecen a la actividad microbiana alargando el tiempo de permanencia del hidrocarburo en el suelo (Pardo *et al.* 2004; Jobson *et al.* 1974).

La relación C:N en los tratamientos con bioestimulación C:N 30 decrecieron a relaciones C:N finales de 20.5, 18.5, 21.6 y 22.4 (sin diferencias significativas entre sí a P≤0.05) en todos los niveles de contaminación. La relación C:N 15 disminuyó a 11.2, 12, 11.6 y 11.5 respectivamente en los niveles de contaminación crecientes, sin diferencias significativas entre sí (P≤0.05). La disminución en 4 unidades de la relación C:N en todos los tratamientos con bioestimulación C:N 15 reflejan una pobre descomposición de la materia orgánica, en este caso de la gallinaza (Huang *et al.* 2004). El resultado de la falta de

descomposición en la gallinaza también causa fitotoxicidad y tiene relación con altos niveles de conductividad eléctrica (Delgado *et al.* 2010). Las relaciones C:N finales no pueden ser usadas como un indicador absoluto de la maduración de un proceso de compostaje. Sin embargo, un valor menor o igual a 20 puede considerarse satisfactorio cuando la relación C:N inicial es de 25 o 30 (Hirai *et al.* 1983; Liao *et al.* 1994) (Cuadro 7).

Cuadro 7. Porcentaje de carbono y nitrógeno; y relación C:N a las seis semanas de bioestimulación, EAP, Zamorano, Honduras.

Tratamientos ¹	C:N		Δ
	inicial	Final	
C ₁ B ₀	11.6	35.8 ^{ab}	24
C ₁ B ₃₀	30.0	20.5 ^{cd}	-10
C ₁ B ₁₅	15.0	11.2 ^e	-4
C ₂ B ₀	12.1	42.9 ^{ab}	30
C ₂ B ₃₀	30.0	18.5 ^{cde}	-12
C ₂ B ₁₅	12.0	12.0 ^{de}	0
C ₃ B ₀	12.4	43.5 ^a	30
C ₃ B ₃₀	30.0	21.6 ^c	-9
C ₃ B ₁₅	15.0	11.6 ^{de}	-4
C ₄ B ₀	14.0	44.2 ^a	30
C ₄ B ₃₀	30.0	22.4 ^{bc}	-8
C ₄ B ₁₅	15.0	11.5 ^{de}	-4
(P≤0.05)	ns	*	ns

*Significativo (P≤0.05), ^{ns} no significativo.

¹C₁, C₂, C₃, C₄ = contaminación con hidrocarburos 0.50, 0.62, 0.74 y 0.89% respectivamente; B₀ = sin bioestimulante, B₃₀ = bioestimulante C:N 30; B₁₅ = bioestimulante C:N 15

EFFECTIVIDAD DE LA BIORREMEDIACIÓN

La concentración de hidrocarburos en el momento del derrame fue de 0.53, 0.62, 0.74 y 0.89% para los niveles crecientes de contaminación. En general, las concentraciones de hidrocarburos disminuyeron con respecto al nivel de contaminación inicial cuando se aplicó bioestimulante. Significó un descenso del 52% en el nivel de contaminación 1, independiente de la relación C:N del bioestimulante; en el nivel de contaminación 2 una reducción del 40% con el bioestimulante C:N 30 y 44% con C:N 15; en el nivel de contaminación 3 una reducción del 35 y 32%, respectivamente y una disminución del 38 y 58% en el nivel de contaminación más alto o 4 (Cuadro 8).

Cuadro 8. Concentración de hidrocarburos (HTP) en suelos contaminados antes y después de la bioestimulación, EAP, Zamorano, Honduras.

Tratamientos ¹	HTP (%)		Descenso de HTP (%)
	Inicial	Final	
C ₁ B ₀	0.53	nd	nd
C ₁ B ₃₀	nd	0.25	52
C ₁ B ₁₅	nd	0.25	52
C ₂ B ₀	0.62	nd	nd
C ₂ B ₃₀	nd	0.37	40
C ₂ B ₁₅	nd	0.35	44
C ₃ B ₀	0.74	nd	nd
C ₃ B ₃₀	nd	0.48	35
C ₃ B ₁₅	nd	0.50	32
C ₄ B ₀	0.89	nd	nd
C ₄ B ₃₀	nd	0.55	38
C ₄ B ₁₅	nd	0.37	58

nd= datos no disponibles

¹C₁, C₂, C₃, C₄ = contaminación con hidrocarburos 0.50, 0.62, 0.74 y 0.89 respectivamente; B₀ = sin bioestimulante, B₃₀ = bioestimulante C:N 30; B₁₅ = bioestimulante C:N 15

En general se puede decir que el bioestimulante a base de gallinaza es más efectivo en la recuperación de suelos contaminados por derrame de búnker, cuanto menor es la contaminación, independiente de la relación C:N (Cuadro 9). La relación entre el porcentaje de hidrocarburo degradado y el nivel de contaminación, presenta un comportamiento polinomial, es decir que a bajos niveles de contaminación es mayor la efectividad de la degradación de búnker hasta un punto, luego del cual, esta efectividad se invierte, siendo más efectivo a medida que aumenta la contaminación (Figura 2). La tendencia responde a las ecuaciones [3] y [4] para C:N 30 y 15, respectivamente.

C:N 30

$$y = 0.0004x^2 - 0.0129x + 0.1143 \quad [3]$$

$$R^2 = 0.9904$$

Donde:

y = porcentaje de degradación de hidrocarburo/(litros de búnker/m³ de suelo)

x = búnker derramado (L/m³ de suelo)

C:N 15

$$y = 0.0009x^2 - 0.0248x + 0.1873 \quad [4]$$

$$R^2 = 0.9186$$

Donde :

y = porcentaje de degradación de hidrocarburo/(litros de búnker/m³ de suelo)

x = litros de búnker/m³ de suelo

Según esta ecuación, cuando el derrame está por encima de 14.4 L/m³ de suelo es más efectivo utilizar bioestimulante C:N 15, en caso contrario es mejor usar la relación C:N 30.

Cuadro 9. Degradación de búnker (%), según el nivel de contaminación y la relación C:N del bioestimulante, EAP, Zamorano, Honduras.

C:N	Nivel de contaminación (L búnker /m ³ de suelo)	% HTP			% de degradación de HTP / (Litros de Búnker)
		inicial	Final	Δ	
30	10.48	0.53	0.25	0.28	0.027
	12.24	0.62	0.37	0.25	0.020
	14.60	0.74	0.48	0.26	0.018
	17.54	0.89	0.55	0.34	0.019
15	10.48	0.53	0.25	0.28	0.027
	12.24	0.62	0.35	0.27	0.022
	14.60	0.74	0.50	0.24	0.016
	17.54	0.89	0.37	0.52	0.030

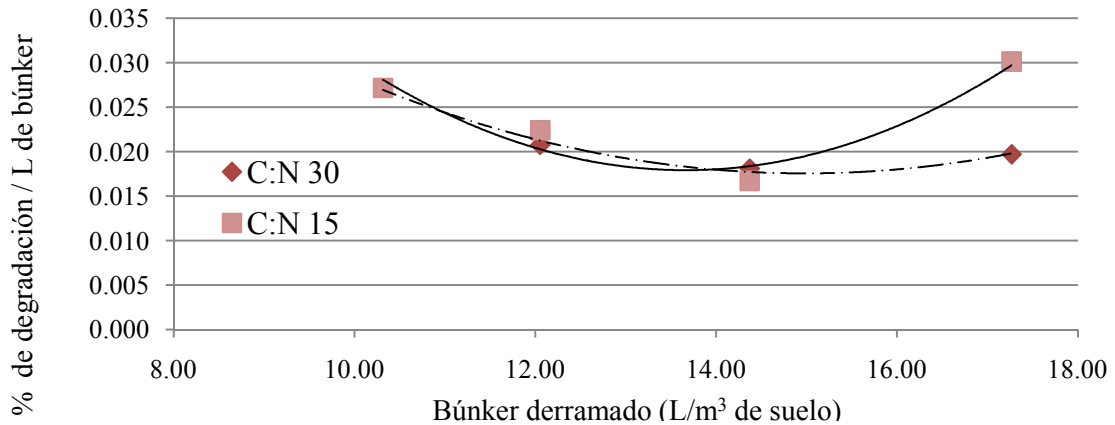


Figura 2. Relación entre el nivel de contaminación y el porcentaje de degradación de hidrocarburo/L de búnker en suelos contaminados con hidrocarburo búnker, EAP, Zamorano, Honduras.

Cuando la contaminación por derrame de búnker de petróleo es menor a 14.4 litros/m³ de suelo franco arenoso, se recomienda usar bioestimulante a base de gallinaza con una relación C:N 30, con 140 kg de gallinaza y 58 kg de aserrín por cada metro cúbico de suelo. Cuando la contaminación es mayor a 14.4 litros/m³ de suelo franco arenoso es más efectivo utilizar bioestimulante con C:N 15 con 252 kg de gallinaza y 10 kg de aserrín por cada metro cúbico de suelo (Cuadro 10).

Cuadro 10. Cantidad de gallinaza y aserrín a utilizar de acuerdo a la magnitud del derrame de búnker, en suelos de textura franco arenosa, EAP, Zamorano, Honduras.

Búnker/suelo (L /m ³)	Bioestimulante (kg/m ³ suelo) (peso seco)		Nitrógeno aportado (kg/m ³ suelo)
	gallinaza	aserrín	
<14.4	140	58	4.92
>14.4	310	6.46	10.70

Para calcular el peso de gallinaza y/o aserrín total, debe tenerse en cuenta el % de humedad y multiplicar la cantidad dada $\times (1 + \% \text{ humedad de la gallinaza o aserrín})$.

PORCENTAJE DE GERMINACIÓN Y CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA

La viabilidad de las semillas de pasto tanzania (*Panicum maximun*) utilizadas para el experimento fue del 50%. La germinación en el experimento es baja y está afectada por la calidad de la semilla, aún así la semilla germinó en todos los niveles de contaminación sin bioestimulante y también fue afectada por la conductividad eléctrica del bioestimulante especialmente donde la proporción de gallinaza fue mayor (bioestimulante C:N 15).

El suelo tratado con bioestimulante con relación C:N 15 obtuvo valores de conductividad eléctrica por encima de 3.8 dS/m a las seis semanas, mientras que en el suelo con bioestimulante C:N 30, la CE osciló entre 2.5 y 3.8 dS/m. Las semillas germinaron en conductividades eléctricas por debajo o igual a 3.8 dS/m. La contaminación ayudó en la germinación, obteniendo la mayor germinación con las más altas contaminaciones C₃ y C₄ sin bioestimulación con alta significancia ($P \leq 0.001$) (Cuadro 11).

Cuadro 11. Porcentaje de germinación y conductividad eléctrica a la sexta semana de bioestimulación de suelo contaminado con hidrocarburo búnker, EAP, Zamorano, Honduras.

Tratamientos ¹	Germinación (%)	Conductividad Eléctrica (dSm ⁻¹)
C ₁ B ₀	20 ^b	0.4 ^d
C ₁ B ₃₀	7 ^f	2.7 ^c
C ₁ B ₁₅	0 ^g	5.8 ^a
C ₂ B ₀	18 ^{bcd}	0.4 ^d
C ₂ B ₃₀	14 ^{cde}	3.8 ^b
C ₂ B ₁₅	0 ^g	5.4 ^a
C ₃ B ₀	29 ^a	0.2 ^d
C ₃ B ₃₀	13 ^{de}	2.5 ^c
C ₃ B ₁₅	0 ^g	6.1 ^a
C ₄ B ₀	29 ^a	0.3 ^d
C ₄ B ₃₀	18 ^{bc}	2.5 ^c
C ₄ B ₁₅	10 ^{ef}	3.8 ^b
(P≤0.05)	**	**

*Significativo ($P \leq 0.05$), **altamente significativo ($P \leq 0.001$).

¹C₁, C₂, C₃, C₄ = contaminación con hidrocarburos 0.50, 0.62, 0.74 y 0.89 respectivamente; B₀ = sin bioestimulante, B₃₀ = bioestimulante C:N 30; B₁₅ = bioestimulante C:N 15.

CRECIMIENTO DEL PASTO

En general, los tratamientos sin bioestimulante obtuvieron los menores valores de crecimiento y en la diferencia de altura entre la segunda y la tercera semana fueron significativamente iguales entre ellos ($P < 0.05$). Los tratamientos con bioestimulante C:N 30 obtuvieron, en general, los mayores valores en diferencia de altura y son mayores aún cuando el nivel de contaminación es más alto (0.74 y 0.89% de hidrocarburo).

El tratamiento con nivel de contaminación de 0.62% de hidrocarburo y con bioestimulante C:N 30 es significativamente diferente ($P < 0.05$) y menor (no hubo crecimiento) de los demás tratamientos con éste bioestimulante (Cuadro 11). No hubo crecimiento en este tratamiento debido a que su conductividad eléctrica era mayor, comparado a los demás tratamientos con bioestimulante C:N 30 (3.8 dS/m).

Cuadro 12. Diferencia de altura (cm/planta) de pasto tanzania (*Panicum maximun*) entre semanas, EAP, Zamorano, Honduras.

Tratamientos ¹	Semanas	
	1 – 2	2 – 3
C ₁ B ₀	0.23	0.23 ^d
C ₁ B ₃₀	0.67	1.27 ^{bc}
C ₁ B ₁₅	Ω	Ω
C ₂ B ₀	0.33	0.47 ^{cd}
C ₂ B ₃₀	0	0.00 ^d
C ₂ B ₁₅	Ω	Ω
C ₃ B ₀	0.57	0.37 ^{cd}
C ₃ B ₃₀	2.10	1.70 ^b
C ₃ B ₁₅	Ω	Ω
C ₄ B ₀	0.67	0.30 ^{cd}
C ₄ B ₃₀	2.03	4.07 ^a
C ₄ B ₁₅	0.00	0.00 ^d
($P \leq 0.05$)	^{ns}	*

*Significativo ($P \leq 0.05$), **altamente significativo ($P \leq 0.001$) y ^{ns} no significativo.

Ω Tratamientos donde no hubo germinación.

¹C₁, C₂, C₃, C₄ = contaminación con hidrocarburos 0.50%, 0.62%, 0.74% y 0.89% respectivamente; B₀ = sin bioestimulante, B₃₀ = bioestimulante C:N 30; B₁₅ = bioestimulante C:N 15.

4. CONCLUSIONES

- En suelos contaminados con hidrocarburos es necesaria la aplicación de bioestimulante para la recuperación de los mismos, ya que resulta mejor que no realizar ninguna aplicación.
- La gallinaza sirve como bioestimulante en suelos contaminados por derrame de búnker de petróleo. Cuando se maneja con una relación C:N 30 permite el desarrollo vegetal.
- La contaminación de suelos causa un desbalance de la relación C:N aumentándola en seis semanas en 24 a 30 unidades.
- Entre más alto el nivel de contaminación en el suelo resulta efectivo utilizar bioestimulante a base de gallinaza con relación C:N 15.
- La relación C:N 15 en el bioestimulante usando gallinaza genera una conductividad eléctrica muy alta, limitante para la germinación de semillas y desarrollo vegetal.
- Suelos de textura franco arenosa y 4.17% de carbono orgánico aumentan linealmente su relación C:N al ser contaminados con búnker de petróleo según la ecuación: $C:N = 6.963(\% \text{ hidrocarburo en el suelo}) + 7.937$ ($R^2=0.971$).
- Para calcular la cantidad de gallinaza y aserrín a utilizar para biorremediación en derrames de búnker se obtuvo la siguiente ecuación:

Si el derrame es menor a 14.4 L/m^3 de suelo y relación C:N 30:

$$\text{kg de gallinaza/m}^3 \text{ de suelo} = \frac{\% \text{ de gallinaza}_{30}}{\% \text{ suelo}} \times \text{Dap} \times 1000 \quad [5]$$

$$\text{kg de aserrín/m}^3 \text{ de suelo} = \frac{\% \text{ de aserrín}_{30}}{\% \text{ suelo}} \times \text{Dap} \times 1000 \quad [6]$$

Donde Dap = densidad aparente (t/m^3).

En este estudio se encontró que para obtener una relación C:N 30 el porcentaje de gallinaza a usar es 12% (p/p), suelo fue 83% (p/p) y aserrín 5% (p/p).

Si el derrame es mayor a 14.4 L/m³ de suelo y relación C:N 15

$$\text{kg de gallinaza/m}^3 \text{ de suelo} = \frac{\% \text{ de gallinaza}_{15}}{\% \text{ suelo}} \times \text{Dap} \times 1000 \quad [7]$$

$$\text{kg de aserrín/m}^3 \text{ de suelo} = \frac{\% \text{ de aserrín}_{15}}{\% \text{ suelo}} \times \text{Dap} \times 1000 \quad [8]$$

Donde Dap = densidad aparente (t/m³).

En este estudio se encontró que el porcentaje de suelo fue 75% (p/p), gallinaza 24% y aserrín 0.5% (p/p).

5. RECOMENDACIONES

- Evaluar otras fuentes de nitrógeno para usar como bioestimulante que aporte 4.92 kg de N/m³ de suelo para derrames menores a 14.4 litros de búnker/m³ y 10.7 kg de N/m³ de suelo con derrames mayores a 14.4 litros de búnker/m³. Ejemplo: urea.
- Medir el hidrocarburo final presente en los tratamientos sin bioestimulante en los diferentes niveles de contaminación.
- Si se quiere hacer análisis estadístico del nivel de contaminación final en todos los tratamientos se debe hacer esta medición en cada una de las repeticiones.

6. LITERATURA CITADA

Abouelwafa, R., G. Ait Baddi, S. Souabi, P. Winterton, J. Cegarra, M. Hafidi. 2008. Aerobic biodegradation of sludge from the effluent of a vegetable oil processing plant mixed with household waste: Physical-chemical, microbiological, and spectroscopic analysis. *Bioresource Technology* 99(18):8571-8577.

Acosta, A., E. Ruda., A. Mongiello. 2004. *Contaminación y Salud del Suelo*. Argentina. Ediciones UNL. 95 p.

Arévalo, G., C. Gauggel. 2008. *Manual de Laboratorio de Ciencia de Suelos y Aguas*. EAP, Zamorano. 71 p.

Arévalo, G., C. Gauggel. 2009. *Manual de prácticas. Curso de manejo de suelos y nutrición vegetal*. EAP, Zamorano. 77 p.

Atagana, H.I. 2008. Compost Bioremediation of Hydrocarbon-contaminated Soil Inoculated with Organic Manure. *African Journal of Biotechnology* 7(10):1516-1525.

Atlas, R. 1981. Microbial degradation of petroleum hydrocarbons: an environmental perspective. *Microbiology Review* 45:180-209.

Atlas, R. 1991. Microbial hydrocarbon degradation-bioremediation of oil spills. *Journal of Chemical Technology & Biotechnology* 52:149–156.

Ayotamuno M.J., R.B. Kogbara, S.O.T. Ogaji y S.D. Probert. 2006. Bioremediation of a crude-oil polluted agricultural-soil at Port Harcourt, Nigeria. *Applied Energy* 83(11): 1249-1257.

Baker, D., N. Suhr.1982. Atomic absorption and flame emission spectometry.. *Methods of soil analysis. Parte 2. Chemical and microbiological properties. Second ed. Amer. Soc. Agron. Madison, Wiscosin.* 13-27 p.

Bremmer, J.M., C.S. Mulvaney. 1982. Nitrogen total. *Methods of soil analysis. Part 2. Chemical and microbiological properties. Second ed. Amer. Soc. Agron. Madison, Winsconsin.* 525 – 622 p.

Delgado M., J. Martin., R. Miralles De Imperial, C. León-Cófreces, M. Cruz. 2010. *African Journal of Plant Science* 4(5):151–159.

Dibble, J.T., R.M Bartha. 1979. Effect of environmental parameters on the biodegradation of oil sludge. *Applied and Environmental Microbiology* 37(4):729-739.

Eklind, Y., H. Kirchmann. 2000. Composting and storage of organic household waste with different litter amendments, II: nitrogen turnover and losses. *Bioresource Technology* 74:125–133.

Eramo, A., Brennan, R. A. 2009. A new use for mushroom compost: bioremediation of diesel-contaminated soil. *The Free Library* (November, 1) (en línea). Consultado el 11 de Octubre de 2010. Disponible en: [http://www.thefreelibrary.com/A new use for mushroom compost: bioremediation of diesel-contaminated...-a0213054856](http://www.thefreelibrary.com/A+new+use+for+mushroom+compost:+bioremediation+of+diesel-contaminated...-a0213054856).

Hachicha, S., F. Sallemi, K. Medhioub, R. Hachicha, E. Ammar. 2008. Quality assessment of composts prepared with olive mill wastewater and agricultural wastes. *Waste Management* 28:2593–2603.

Hidrografía en Honduras. 2009. Consultado el 15 de Julio de 2010. Disponible en: <http://conozcahondurasfundacion.blogspot.com/2009/07/hidrografia-en-honduras.html>.

Huang, G.F., J. Wong, Q.T. Wu, B. Nagar. 2004. Effect of C/N on composting of pig manure with sawdust. *Waste Management* 24:805–813

Infante, C. 1998. Biorremediación de derrames de hidrocarburo en ambientes naturales, In IV Congreso Interamericano sobre el Medio Ambiente, Ed. Carrillo, R., Caracas, Equinoccio 2:325 – 328.

Inoni, O., D. Omotor, F. Adun. 2006. The effect of oil spillage on crop yield and farm income in Delta State, Nigeria. *Journal Central European Agriculture* 7:41-49.

Israelsen, O. 1985. Principios y aplicaciones del riego. Ed. Reverté S,A., España, 388 p.

Jobson, A., M. Mclaughlin, F. Cook, D. Westlake. 1974. Effect of Amendments on the microbial utilization of oil applied to soil. *Applied Microbiology* 27(1):166-171.

Kisic, V., A. Jurisic, G. Durn, H. Mesic, S. Mesic. 2010. Effects of hydrocarbon on temporal changes in soil and crops. *African Journal of Agriculture Research* 5(14):1821-1829.

Leahy, J. 1990. Microbial degradation of hydrocarbons in the environment. *Microbiology and Molecular Biology Reviews* 52(3):305-315.

Mathur, S.P. 1991. Composting processes. In *Bioconversion of Waste Materials to Industrial Products*, ed. A.M. Martin, p 147-186. New York, NY: Elsevier.

McLean, E. 1982. Soil pH and lime requeriment *Methods of soil analysis. Part 2. Chemical and microbiological properties. Second ed.* Amer. Soc. Madison, Wisconsin. 199 – 223 p.

Miller, R. M. 1995. Surfactant-enhanced bioavailability of slightly soluble organic compounds. In: Skipper H, Turco R, editors; Skipper H, Turco R, editors. Soil Science Society of America special publication 43. Bioremediation: science and applications. Madison, Wis: Soil Science Society of America.

Moreno J., Herrero R. 2008. Compostaje. México. Editorial Mundiprensa. 570 p.

Niklasch, H., R. Joergensen. 2001. Decomposition of peat, biogenic municipal waste compost, and shrub/grass compost added in different rates to a silt loam. *Journal Plant Nutrition Soil Science* (164):365–369.

Pardo, J., M. Perdomo, J. Benavides. 2004. Efecto de la adición de fertilizantes inorgánicos compuestos en la degradación de hidrocarburos en suelos contaminados con petróleo. *Nova* 2:40 – 49.

Parra, E. 2003. *Petróleo y Gas Natural: Industria, Mercados y Precios*. España. Editorial AKAL. 350 p.

Pérez, G. 2008. Oferta energética y dependencia energética de Centroamérica. Foro Nacional de Energía Renovables (en línea). Consultado el 29 de septiembre de 2010. Disponible en:

http://www.gfse.at/fileadmin/dam/gfse/Services%20and%20Activities/01_Roberto_Perez.pdf

Volke, S., J. Velasco, 2002. *Tecnologías de remediación para suelos contaminados*. México. Instituto Nacional de Ecología (INE-SEMARNAT). p 64.

Wu L., L.Q. Ma y G. Martinez. 2000. Comparison of methods for evaluating stability and maturity of biosolids compost. *Journal of Environmental Quality* 29:424-429.

Zubillaga M.S, A. Branzini, R. Lavado. 2008. *Pilquen Universidad Nacional del Comahue* 9:1-9.