

## ALTERNATIVA DE TRATAMIENTO PARA TIERRAS FULLER CONTAMINADAS CON ACEITE DIELECTRICO

### RESUMEN

Actualmente uno de los problemas ambientales importantes es la alteración de ecosistemas terrestres por contaminación con hidrocarburos derivados del petróleo. En Colombia, la industria eléctrica utiliza aceite dieléctrico como sistema aislante en los transformadores de distribución y potencia, los cuales deben someterse a mantenimiento periódicamente, generando desechos aceitosos como la tierra fuller y el papel Kraft. En esta investigación se evaluó un procedimiento que combina el lavado de la tierra fuller con agua y detergente a 70°C, seguido con un proceso de biolabranza, obteniéndose una disminución total de hidrocarburos de petróleo (TPH) superior al 73%.

**PALABRAS CLAVES:** tierra fuller, aceite dieléctrico, biolabranza, TPH.

### ABSTRACT

*At the moment one of the important environmental problems is the alteration of terrestrial ecosystems by contamination with hydrocarbons derived from petroleum. In Colombia, electrical industry uses dielectric oil like insulating system in the transforming of distribution and power, which must be put under maintenance periodically, generating remainders oily, like the fuller earth and the Kraft paper. In order to give solution this problematic one, a procedure that combines the washing to earth fuller with water and detergent to 70°C, followed with a process of landfarming, obtaining total petroleum hydrocarbon diminution (TPH) superior to 73%.*

**KEY WORDS:** fuller earth, oil dielectric, landfarming, TPH.

### 1. INTRODUCCIÓN

Durante mucho tiempo y hasta hace poco, nadie se preocupaba por el destino de los residuos generados por los mantenimientos de los transformadores de potencia. El principal residuo son las tierras fuller contaminadas de aceite dieléctrico, esto debido a que en el proceso de desludificación y limpieza del aceite de los transformadores se utiliza como material adsorbente en la etapa de percolado, para retener los compuestos contaminantes generados durante la operación normal del transformador.

Es común que las tierras fuller contaminadas se dispongan en los rellenos sanitarios junto con las basuras urbanas, sin tener conciencia del contenido de hidrocarburos que puede llegar a ser mayor al 20% en peso de sustancias lodosas y aceite dieléctrico.

El aceite dieléctrico es una mezcla adecuada de hidrocarburos isoparafínicos, nafténicos y aromáticos con moléculas entre 16 y 22 átomos de carbono, que en la industria eléctrica se utiliza como agente refrigerante, aislante y antioxidante en los transformadores eléctricos, en Colombia todas las ciudades cuentan con miles de transformadores de distribución, los cuales deben salir a mantenimiento varias veces durante su vida útil [5].

### MELVIN DURAN RINCON

Ingeniero Químico, M.Sc  
Profesor Auxiliar  
Universidad Tecnológica de Pereira  
melvin.duran@utp.edu.co

### NELSON CONTRERAS C

Químico, M.Sc  
Profesor auxiliar  
Universidad Tecnológica de Pereira  
ncontrer@utp.edu.co

Las tierras fuller contaminadas con aceite dieléctrico representan un peligro para el medio ambiente por la gran carga de hidrocarburos contaminante que posee. En este trabajo se propone un proceso para descontaminar estos residuos para así disponerlos sin afectar el medio ambiente. Inicialmente se aplicó a las tierras un tratamiento físico que consistió en un lavado donde se retira una parte del hidrocarburo, para luego seguir con un proceso de biorremediación.

El seguimiento a la carga contaminante de la tierra fuller, se realizó mediante la cuantificación de la concentración de hidrocarburos totales de petróleo (TPH) según norma ASTM 5520 D.

La parte experimental así como los resultados presentados en este artículo hacen parte de un proyecto de investigación desarrollado en el laboratorio de Oleoquímica de la escuela de Química de la Universidad Tecnológica de Pereira (UTP), como un aporte de solución a un problema que afecta de gran manera al medio ambiente, y apoyo para el fortalecimiento en el uso de tecnologías limpias en la industria eléctrica.

### 1.1 Uso de la tierra fuller en la industria eléctrica

Las tierras fuller también se conocen como tierra de batán, tierra de florida, attapulgita o sepiolita; estas tierras tienen una gran capacidad de adsorción de moléculas ácidas generadas durante el proceso de degradación del aceite dieléctrico. Estas moléculas ácidas se producen durante el funcionamiento de los transformadores eléctricos, en donde el aceite se ve afectado por sobretensiones, rayos, calor, agua, celulosa, hierro, cobre, etc., las cuales actúan como agentes catalizadores que promueven la oxidación de los hidrocarburos que conforman el aceite dieléctrico. Las primeras sustancias polares que se forman son alcoholes y aldehídos, luego se forman las cetonas y posteriormente los ácidos orgánicos que reaccionan y a su vez forman los ésteres los cuales se activan y polimerizan aglomerándose y formando complejos moleculares de alto peso en forma de lodos que se depositan en los intersticios de la celulosa del papel, los devanados y radiadores del transformador. Estos lodos son los principales factores que ponen en grave riesgo de falla al transformador al afectar las propiedades aislantes de los aceites. Los mantenimientos con tierras fuller se utilizan para retirar estos lodos y limpiar el aceite, las tierras fuller usadas quedan con una importante carga contaminante [5].

En este proyecto de investigación se utilizaron tierras fuller usadas y contaminadas con aceite dieléctrico libre de bifenilos policlorados (PCB's).

### 1.2 Degradación natural de los hidrocarburos

Se estima que en un gramo de suelo en buen estado se puede encontrar hasta 600 millones de bacterias las cuales se pueden clasificar entre 15 mil y 20 mil especies distintas [4], aunque por cada gramo de suelo hay alrededor de 4 mil especies de microorganismos [9]. En suelos desérticos el número de bacterias disminuye hasta 1 millón que se distribuyen entre 5 y 8 mil especies. En la Tabla 1 se presentan las bacterias más representativas del suelo [2].

Las comunidades microbianas presentes en suelos contaminados tienden a estar dominadas por aquellas bacterias que pueden sobrevivir a la toxicidad presente en el ambiente siendo capaces de utilizar al hidrocarburo para vivir.

Los suelos contaminados contienen gran cantidad de microorganismos que pueden incluir un número de bacterias y hongos capaces de utilizar hidrocarburos [10], que representan un uno por ciento (1%) de la población total de aproximadamente  $10^4$  a  $10^6$  células por gramo de suelo. También, se han encontrado cianobacterias y algas capaces de degradar hidrocarburos. Los suelos contaminados con hidrocarburos contienen más microorganismos que los suelos no contaminados, pero su diversidad microbiana es más reducida [3,7].

Especie	Bacterias en el suelo (%)
Arthrobacter	5-60
Bacillus	5-67
Pseudomonas	3-15
Agrobacterium	1-20
Alcaligenes	1-20
Flavobacterium	1-20
Corynebacterium	2-12
Micrococcus	2-10
Taphylococcus	<5
Xanthomonas	<5
Mycobacterium	<5

Tabla 1. Composición de bacterias en el suelo.

Entre los microorganismos que normalmente se encuentran en un suelo contaminado con hidrocarburos, está la especie *Pseudomonas* en particular *P. putida*; esta bacteria pertenece a la subclase proteobacteria [8], específicamente corresponde a una  $\gamma$  proteobacteria y la temperatura óptima para su crecimiento está en el rango de 15 a 22 °C, pero se ha observado que pueden crecer a rangos menores (entre 4 y 22° C). La *Pseudomonas* es una bacteria propia del suelo, y algunos linajes de esta especie han sido considerados como potencial bacteria para aplicaciones biotecnológicas como es la biorremediación de suelos [13].

La velocidad de limpieza del suelo contaminado con hidrocarburos depende de condiciones ambientales favorables así como de presencia de nutrientes. Estas degradaciones o cambios ocurren usualmente en la naturaleza, sin embargo, la velocidad de tales cambios es baja, aunque mediante una adecuada manipulación estos sistemas biológicos pueden ser optimizados a fin de aumentar la velocidad de degradación.

### 1.3 Biorremediación

Biorremediación es el nombre genérico que recibe un conjunto de técnicas cuyo fin es estimular la degradación de contaminantes o la recuperación del ecosistema mediante procesos biológicos. Dentro de las técnicas de biorremediación se encuentran la bioestimulación, la biolabranza y el bioaumentación [11].

Se aplica bioestimulación cuando se adicionan nutrientes para aumentar la actividad metabólica de la flora microbiana autóctona. En la biolabranza, el suelo contaminado se mezcla con agentes de volumen (suelo limpio) y nutrientes, y se remueve (labra) periódicamente para favorecer la aireación. El bioaumentación consiste en la adición de microorganismos exógenos, cuya eficiencia en la degradación del contaminante esté probada, estos microorganismos pueden ser naturales o modificados genéticamente.

La biorremediación es en esencia adición de materiales a ambientes contaminados para producir una aceleración en el proceso natural en el cual bacterias u otros microorganismos alteran y convierten moléculas orgánicas en otras sustancias, como ácidos grasos y CO<sub>2</sub>. Cuando la transformación llega hasta la generación de dióxido de carbono, se habla de una completa mineralización [1].

Todos los ecosistemas contienen algún tipo de microorganismo degradadores de hidrocarburos, solo que varían su cantidad y diversidad, por lo que se debe estimular con nutrientes para aumentar su número y obtener un mejor desempeño en la velocidad de degradación.

La degradación aeróbica de los hidrocarburos es considerablemente más rápida que el proceso anaeróbico, de modo que la oxigenación será necesaria para mantener las condiciones aeróbicas para una rápida degradación. Un suelo con una estructura abierta favorecerá la transferencia de oxígeno y un suelo anegado de agua tendrá un efecto contrario. La temperatura afecta el crecimiento microbiano, así que a bajas temperaturas la degradación será lenta [6, 12].

La biorremediación (biolabranza) en este trabajo, se llevó a cabo a temperatura cercana a 35°C, humedad de 40%, con una buena aireación y con disposición de nutrientes ricos en nitrógeno, hierro y fósforo. Esto implica que para realizar un buen trabajo es necesario tener una fuente de nutrientes. Las más conocidas son los abonos químicos y los orgánicos, para este trabajo se utilizó la gallinaza como abono.

La gallinaza es el material orgánico obtenido del proceso de compostaje de la excreta de aves de corral con residuos agroindustriales. La gallinaza utilizada contiene 2.25% de nitrógeno, 3.02% de fósforo, 7.43% de calcio, 0.86% de magnesio, 2.70 % de potasio, 1841 ppm de hierro, entre otros componentes. Se utilizó suelo limpio del área del vivero de la UTP, como agente diluyente.

## 2. CONTENIDO

El procedimiento aplicado tiene como fin, disminuir el impacto en el contenido de hidrocarburos de las tierras fuller procedentes de la industria eléctrica. Para lograrlo se realizó primero un tratamiento físico de lavado a las tierras y un tratamiento posterior de biorremediación. Las tierras fuller contaminadas utilizadas en el proceso se obtuvieron de una empresa eléctrica que realiza mantenimiento predictivo y correctivo a transformadores eléctricos.

La técnica de lavado de suelo consiste en adicionar una solución durante un tiempo, de tal manera que el contaminante pase a la fase acuosa y se desorba de las partículas de tierras fuller a las cuales está adherido.

El contenido inicial de hidrocarburos totales de petróleo (TPH) en las tierras fuller contaminadas es de 266720.75 mg/kg.

### 2.1 Tratamiento de las tierras fuller contaminadas

Las tierras fuller contaminadas se sometieron a tres tratamientos previos de lavado con el fin de reducir la cantidad de hidrocarburos presentes. Además se realizó un cuarto tratamiento donde la tierra fuller no fue lavada y se trabajó como en los tres tratamientos anteriores donde se aplicó a cada uno procesos de biolabranza, así como de degradación natural.

#### 2.1.1 Tratamiento 1. Lavado con agua y detergente comercial a 70°C.

Las tierras fuller contaminadas se lavaron a 70°C, por 15 minutos con una solución acuosa al 0.2% en peso de detergente comercial líquido biodegradable.

Posteriormente se seco la tierra y se tomaron muestras para análisis de TPH. Los resultados del lavado se muestran en la tabla 2.

Contenido inicial de TPH (mg/kg)	Contenido de TPH luego del lavado (mg/kg)	Reducción de TPH (%)
266720.75	205374.98	23

Tabla 2. Resultados del lavado de las tierras fuller en el tratamiento 1.

#### 2.1.1.1 Biolabranza

Se mezcló parte de la tierra fuller del tratamiento 1, con suelo limpio apto para cultivo y gallinaza en proporción en peso 1:1:0.5. El TPH se reduce a 82371.99 mg/kg, por acción de la dilución del material. Luego de la mezcla comenzó el proceso de biorremediación, que se extendió por 60 días tomando muestras para análisis de TPH cada 30 días (ver tabla 3).

#### 2.1.1.2 Degradación natural del hidrocarburo

Se mezclaron tierras fuller del tratamiento 1, con suelo limpio en proporción 1:1 en peso. Al adicionar el suelo limpio, la concentración de hidrocarburo (TPH) en la mezcla se redujo a 102693.76 mg/kg.

Paso seguido se dejó degradar de manera natural por 60 días, realizando el mismo proceso de monitoreo utilizado en la biolabranza (ver tabla 3).

Seguimiento	Procedimiento	
	Biolabranza TPH (mg/Kg)	Degradación natural TPH (mg/Kg)
Día 1	82371.99	102693.76
Día 30	78275.49	101734.83
Día 60	71574.47	99542.75
Reducción TPH (%)	13.1	3.1

Tabla 3. Seguimiento del proceso de biolabranza y de degradación natural de las tierras fuller para el tratamiento 1.

### 2.1.2 Tratamiento 2. Lavado con agua a 70°C.

Las tierras fuller contaminadas se lavaron con agua a 70°C, durante 15 minutos, se dejaron decantar, luego se secaron en una estufa a 110°C por 1 hora. Se tomaron muestras para análisis de TPH. Los resultados se muestran en la Tabla 4.

Contenido inicial de TPH (mg/kg)	Contenido de TPH luego del lavado (mg/kg)	Reducción de TPH (%)
266720.75	223675.34	16.1

Tabla 4. Resultados del lavado de la tierra fuller en el tratamiento 2.

#### 2.1.2.1 Biolabranza

Se mezclaron tierras fuller del tratamiento 2, con suelo limpio apto para cultivo y gallinaza, en proporción 1:1:0.5 en peso. El TPH se reduce a 88361.7 mg/kg, por acción de la dilución del material.

Posteriormente se dio inicio al proceso de biolabranza igual al descrito en el tratamiento 1 (ver tabla 5).

#### 2.1.2.2 Degradación natural del hidrocarburo

Se mezclaron tierras fuller del tratamiento 1 con suelo limpio en proporción 1:1 en peso. Al adicionar el suelo limpio, la concentración de TPH en la mezcla se redujo a 122337.62 mg/kg.

La degradación y el seguimiento es el mismo que se describe para el tratamiento 1, los resultados se presentan en la Tabla 5.

Seguimiento	Procedimiento	
	Biolabranza TPH (mg/Kg)	Degradación natural TPH (mg/Kg)
Día 1	88361.7	122337.62
Día 30	83942.62	121583.23
Día 60	78854.37	120887.54
Reducción TPH (%)	10.8	1.19

Tabla 5. Seguimiento del proceso de biolabranza y degradación natural de la tierra fuller con el tratamiento 2.

### 2.1.3 Tratamiento 3. Lavado con agua y detergente a 25°C

Se realizó un procedimiento similar al tratamiento 1, solo que la solución de detergente se preparo con agua a temperatura ambiente (25°C). De la misma manera se seco la tierra y se tomó una muestra para análisis de TPH.

Contenido inicial de TPH (mg/kg)	Contenido de TPH luego del lavado (mg/kg)	Reducción de TPH (%)
266720.75	245874.15	7.81

Tabla 6. Resultados del lavado de la tierra fuller en el tratamiento 3

#### 2.1.3.1 Biolabranza

Se mezcló tierra fuller del tratamiento 3 con suelo limpio apto para cultivo y gallinaza en proporción 1:1:0.5 en peso. El TPH se reduce a 97687.02 mg/kg, por acción de la dilución del material.

Después de mezclado se dio inicio al proceso de biorremediación ya descrito, los resultados de este proceso se muestran en la tabla 7.

#### 2.1.3.2 Degradación natural del hidrocarburo

Las tierras fuller del tratamiento 3 se mezclaron con suelo limpio en proporción 1:1 en peso disminuyendo la concentración de TPH en la mezcla a 125361.02 mg/kg.

Luego de la dilución con suelo limpio, se dejo degradar de manera natural por 60 días, los resultados del seguimiento se muestran en la Tabla 7.

### 2.1.4 Tratamiento 4. Tierras fuller sin lavado

Las tierras fuller, se sometieron a degradación natural y biolabranza sin un lavado previo; por lo tanto, la concentración inicial del TPH es de 266720.75 mg/kg.

#### 2.1.4.1 Biolabranza

Se mezclaron tierras fuller sin lavado previo con suelo limpio apto para cultivo y gallinaza en proporción 1:1:0.5 en peso. El TPH se reduce a 106423.51 mg/kg, por acción de la dilución del material.

Seguimiento	Procedimiento	
	Biolabranza TPH (mg/Kg)	Degradación natural TPH (mg/Kg)
Día 1	97687.02	125361.02
Día 30	93257.13	123093.91
Día 60	90183.51	121586.42
Reducción TPH (%)	7.7	3.0

Tabla 7. Seguimiento del proceso de biolabranza y de degradación natural de la tierra fuller proveniente del tratamiento 3.

Luego de la mezcla comenzó el proceso de biorremediación (ver Tabla 8).

### 2.14.2 Degradación natural del hidrocarburo

Se mezclaron tierras fuller con suelo limpio en proporción 1:1 en peso. La concentración de hidrocarburo TPH en la mezcla se redujo a 132000.32 mg/kg.

Luego de la dilución con suelo limpio, las tierras se dejaron degradar de manera natural por 60 días, los resultados del seguimiento se presentan en la Tabla 8.

Seguimiento	Procedimiento	
	Biolabranza TPH (mg/Kg)	Degradación natural TPH (mg/Kg)
Día 1	106423.51	132000.32
Día 30	101353.89	131693.12
Día 60	99852.12	130855.62
Reducción TPH (%)	6.2	0.9

Tabla 8. Seguimiento del proceso de biolabranza y de degradación natural de la tierra fuller proveniente del tratamiento 4.

### 3. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Se comprobó, en el proceso de biolabranza, que la acción de un grupo microbiano en la degradación del hidrocarburo, debido a que la velocidad de degradación, es mayor a los casos donde se realiza la degradación natural. Esto confirma que si se estimula con nutrientes bajo condiciones adecuadas, la flora bacteriana del suelo puede trabajar de manera más eficiente, en la degradación del hidrocarburo. Además, la aplicación de nutrientes en este proceso incrementa la velocidad de degradación del TPH entre 2.5 y 9 veces.

La utilización de gallinaza como fuente de nutrientes resultó efectiva en los ensayos de laboratorio, aunque de muy difícil aplicación a gran escala debido a la dificultad de obtener una mezcla completamente homogénea.

En los ensayos donde se realizó un lavado a las tierras fuller se comprobó que es más eficiente cuando además de poner en contacto la solución de lavado con la tierra fuller, existe un mezclado a temperatura por encima de la ambiental.

En el caso del lavado de las tierras fuller la solución con detergente a 70°C disminuye notoriamente la concentración de TPH en 23%. El lavado con agua a 70°C reduce el contenido de TPH en 16.1% y el lavado con detergente y temperatura ambiente logra una reducción de 7.81%. Las eficiencias de remoción finales de estas soluciones de lavado sobre las tierras fuller se ven influenciadas por la temperatura a la cual se realice el lavado, así como la utilización de un detergente que ayude a retirar el hidrocarburo.

Los resultados obtenidos en la evaluación de la degradación natural demostraron que dicha degradación requiere de un periodo de tratamiento mayor al evaluado para lograr una reducción de los TPH hasta niveles que no afecten la salud pública.

Los altos niveles de remoción de hidrocarburos obtenidos en el tratamiento de biolabranza demostraron que la adición de nutrientes orgánicos, en combinación con altos porcentajes de humedad y condiciones aeróbicas agiliza los procesos de biodegradación de hidrocarburos.

El procedimiento más efectivo observado en este trabajo se presenta cuando se realiza un lavado previo a la tierra fuller contaminada con una solución de detergente a 70°C, y una biorremediación (biolabranza) posterior utilizando material de volumen y nutrientes orgánicos. La disminución total del hidrocarburo en este caso pasa de 266720.75 mg/kg a 71574.47 mg/kg, lo que representa un 73.1% en reducción. El material resultante presenta color, aspecto y olor característico a suelo limpio.

La disminución en el porcentaje de remoción de hidrocarburos después de llevar a cabo los procesos de biolabranza y degradación natural en los ensayos, se le atribuye específicamente a la cantidad de nutrientes con la cual fueron tratados, ya que los dos se mantuvieron bajo los mismos parámetros de humedad, temperatura y aireación.

Se recomienda la validación del trabajo de laboratorio en procesos industriales a condiciones de campo, además de mejorar los métodos para incrementar el crecimiento y actividad de las bacterias degradadoras de hidrocarburos. También sería de gran interés estudiar los tipos de microorganismos involucrados en la biodegradación de los hidrocarburos.

### 4. BIBLIOGRAFÍA

- [1] ALEXANDER M.. Biodegradation and bioremediation. San Diego, Academic Press., 1994, p. 302.
- [2] ATLAS R. Ecología microbiana y microbiología ambiental. Madrid, Addison-Wesley Iberoamericana, 2002, p. 677.
- [3] BOSSERT I., Compeau G. Microbial Transformation and degradation of Toxic Organic Chemicals. New York, Wiley – Liss, 1995, p.125.
- [4] Commission of the European Communities, The soil protection communication, Bruselas, 2001.
- [5] GALLO E. Diagnostico y mantenimiento de transformadores en campo. Transequipos, 2005, p. 105.

- [6] HOLLIGER C., Zehnder A. Anaerobic biodegradation of hydrocarbons. *Current Opinion in Biotechnol.* 1996; 7 : 326-330.
- [7] MESSARCH M., Nies L. Modification of heterothropic plate counts for assessing the bioremediation potencial of petroleum contaminated soils. *Environ. Technol.* 1997; 18 : 639-646.
- [8] NELSON K. Complete genome sequence and comparative analysis of the metabolically versatile *Pseudomonas putida* KT2440. *Environ. Microbiol.* 2002; 4 : 799-808
- [9] OGRAM A. Methods of soil microbial community análisis. *Manual of Environmental Microbiology.* Washington DC, ASM Press, 1997, pp 422-430.
- [10] SUTHERLAND J. Detoxification of polycyclic aromatic hydrocarbons by fungi. *J. Ind Microbiol.* 1992; 9 : 53-62.
- [11] VAN DEUREN J, Wang Z, Ledbetter J. Remediation technologies screening matrix and reference Guide. Technology Innovation Office EPA, 3ª Ed., <http://www.epa.gov/tio/remed.htm>, 1997.
- [12] VARGAS P. Biorremediación de residuos del petróleo. *Hipótesis / Apuntes Científicos Uniandinos.* 2004; 4 : 44-49
- [13] YU Z, Stewart G, Mohn W. Apparent contradiction: psychrotolerant bacteria from hydrocarbon-contaminated arctic tundra soils that degrade diterpenoids synthesized by trees. *Appl. Environ. Microbiol.* 2000; 66(12) : 5148-54