

**F. Manzano-Agugliaro, Q.C. Hernández Escobedo y A.J. Zapata Sierra**

**APROVECHAMIENTO DEL ESTIÉRCOL DE VACUNO PARA  
LA BIORREMEDIACIÓN *EX SITU* DE SUELOS CONTAMINADOS  
POR DIÉSEL EN MÉXICO**

Separata ITEA

INFORMACIÓN TÉCNICA ECONÓMICA AGRARIA, VOL. **106** N.º 3 (197-207), 2010

## Aprovechamiento del estiércol de vacuno para la biorremediación *ex situ* de suelos contaminados por diésel en México

F. Manzano-Agugliaro\*, Q.C. Hernández Escobedo\*\* y A.J. Zapata Sierra\*\*\*

\* Autor de Correspondencia. Profesor Titular de Universidad, Dpto. Ingeniería Rural, Escuela Politécnica Superior, Universidad de Almería, 04120 Almería, España.  
E-mail: fmanzano@ual.es

\*\* Catedrático Universitario, División de Ciencias Básicas e Ingeniería, Universidad Autónoma Metropolitana, México. E-mail: qhernandesco@yahoo.es

\*\*\* Profesor Titular de Universidad, Dpto. Ingeniería Rural, Escuela Politécnica Superior, Universidad de Almería, España. E-mail: ajzapata@ual.es

### Resumen

En el presente trabajo se analiza la experiencia del aprovechamiento del estiércol de vacuno en la descontaminación del suelo contaminado por diésel (1,4% en peso) en San Luis Potosí (México). La aplicación de una metodología sencilla y barata, permite la aplicación de la biorremediación *ex situ* de suelos contaminados con diésel. La caracterización inicial de la contaminación por hidrocarburos es muy importante, pues la concentración inicial de hidrocarburos totales del petróleo (HTP) y la fracción de diésel en concreto puede determinar las dosis de estiércol y agua residual a aportar inicialmente. La técnica de excavación y colocación del suelo en biopilas dio excelentes resultados en el proceso de biorremediación, ya depositado el suelo en las biopilas se procedió a regarlo con agua no-potable. El comportamiento de la descontaminación de un suelo contaminado por diésel mediante el empleo de biopilas con adición de estiércol de vacuno puede modelizarse mediante un tipo de curva logística, y de este modo se estima que a los 183 días el 99,8% de diésel fue eliminado del suelo.

**Palabras clave:** Biorremediación, Modelización, Estiércol de Vacuno.

### Summary

#### Use of bovine manure for *ex situ* bioremediation of diesel contaminated soils in Mexico

In the present paper analyzes the experience of the use of the bovine manure at the decontamination of a contaminated soil by diesel (1,4% of the weight) in San Luis Potosí (México). The purpose of a simple methodology allows the application of *ex situ* bioremediation of soils contaminated with diesel. The initial soil characterization's of HTP (Total Petroleum hydrocarbons) and diesel concretely can determinate the initial manure and residual water to be added. The technique of excavation and soil placement biopile gave excellent results in the process of bioremediation, and deposited in the soil to biopile was watering with non-potable and bovine manure can be modelled mathematically and this estimated that we need 183 days for the 99.8% of diesel degraded soil.

**Key words:** Bioremediation, Model, Bovine Manure.

## Introducción

La contaminación por hidrocarburos derivados del petróleo genera problemas ambientales (Lin *et al.*, 2010) y en la salud humana (Labud *et al.*, 2007) al contaminar suelos y acuíferos (Hunkeler *et al.*, 2002). Esto ha llevado a desarrollar tecnologías innovadoras para la remediación de los daños causados (Whang *et al.*, 2008). Este trabajo se centra en la remediación de suelos contaminados por diésel, los cuales se producen por situaciones, como fisuras en los depósitos de almacenamiento subterráneos (Pinto *et al.*, 2007), volcaduras de camiones cisterna (Vieira *et al.*, 2006) o tuberías que transportan el hidrocarburo de un sitio a otro (Iturbe *et al.*, 2007).

Hay varias formas de transportar los hidrocarburos, entre otros, barcos, camiones cisterna, ferrocarriles y tuberías (Halmemies *et al.*, 2003). Las tuberías conectan las zonas de producción de hidrocarburos con las refinerías, las zonas de almacenamiento y las estaciones de distribución separadas por grandes distancias. México tiene una extensa red de tuberías de transporte, siendo los principales hidrocarburos transportados el petróleo crudo (oleoductos), gas (gasoductos), petroquímicos y hasta poliductos donde por la misma tubería se transporta el diésel, gasolina y gas (Iturbe *et al.*, 2007). En México existen serios problemas de contaminación por diésel, de hecho la empresa paraestatal PEMEX (Petróleos Mexicanos) reconoce la existencia de estos problemas medio ambientales en el transporte de hidrocarburos dentro del país.

Los métodos existentes para tratar estos suelos contaminados pueden ser de naturaleza física, química o biológica y tanto unos como otros pueden, aplicarse en el lugar de la contaminación (tratamiento *in situ*) o trasladarse a otro lugar para su recuperación (tratamiento *ex situ*) (Margesin y Schinner, 2001). En el método *in situ* algunas ve-

ces el material contaminado tiene que ser confinado, normalmente por aislamiento mediante grandes barreras, lo que ocasiona altos costos de mantenimiento (Gallego *et al.*, 2001). En la recuperación *ex situ* el suelo contaminado tiene riesgos en la excavación, manejo y transporte del material contaminado (Vidali, 2001).

Los métodos *ex situ* se utilizan para destruir completamente los contaminantes o transformarlos en sustancias inocuas (Rao, 1996). Estas técnicas pueden ser más rápidas, más fáciles de controlar y aplicables a un mayor conjunto de contaminantes y suelos que las técnicas *in situ* (Hanson *et al.*, 1997). Sin embargo, requieren excavación y acondicionamiento del suelo contaminado antes e incluso, a veces, después de la fase de tratamiento biológico. Incluyen tanto técnicas de tratamiento en fase sólida como en forma de lodos (Mulligan y Galvez-Cloutier, 2003).

La biorremediación es un proceso espontáneo o dirigido en el cual se utilizan procedimientos biológicos, microorganismos, para degradar o transformar los contaminantes hasta formas menos tóxicas o no tóxicas y mitigar, como consecuencia, la contaminación ambiental. En presencia de oxígeno suficiente (condiciones aerobias) y nutrientes, los microorganismos convierten, sustancias como combustibles y disolventes, en dióxido de carbono, agua y biomasa microbiana (Milton, 2007; Rahman *et al.*, 2006).

Una vez que los contaminantes son degradados, la población microbiana decrece, al consumirse lo que constituía su fuente nutritiva (Yakubu, 2007). El objetivo de las técnicas de recuperación biológica, es la creación de las condiciones ambientales óptimas para que los microorganismos se puedan desarrollar adecuadamente y provocar la máxima remediación (Korda *et al.*, 1997).

El procedimiento de biorremediación más utilizado es la bioestimulación de los microorga-

nismos ya existentes a base de adición de nutrientes, como la fuente de carbono es muy elevada (es decir, la contaminación de hidrocarburos), se tiende a un rápido agotamiento de las cantidades de nutrientes inorgánicos, tales como nitrógeno y fósforo (Alexander, 1999). Así Gallego *et al.* (2001) alcanzan el 95% de descontaminación en 45 días en ensayos de laboratorio adicionando nitrógeno y fósforo a nuestras contaminadas con diesel.

Margesin *et al.* (2007) demostraron que uno de los principales factores que afecta a la biorremediación del suelo contaminado con diesel en la concentración inicial de la contaminación, así a los 21 días un suelo sin tratamiento estaba descontaminado al 20% con una HTP (hidrocarburos totales del petróleo) de 10.000 mg/kg de suelo, al 10% para 20.000, mientras que a los 38 días lo estaba al 31,4% para 10.000 y al 10,4% para 20.000. Por otro lado si el suelo estaba fertilizado con abono inorgánico (con 9,5%  $\text{NH}_3\text{-N}$ , 5,5%  $\text{NO}_3\text{-N}$ , 6,6%  $\text{P}_2\text{O}_5\text{-P}$ , y 12,2%  $\text{K}_2\text{O-K}$ ; N/P = 2.3:1, K/P = 1,8:1; con el criterio de mantener una relación C/N de 20:1 para cada concentración de hidrocarburo), a los 38 días la descontaminación era del 53,6% para 10.000 y del 40,4% para 20.000 mg/kg de suelo.

Lin *et al.* (2010) obtienen una bioremediación natural del suelo contaminado con diesel (HTP de 1800 a 2790 mg/kg de suelo) a los 28 días del 26%, pero a los 250 días sólo llegan al 80%. Y por otro lado Serrano *et al.*, (2008) consideran que a los 100 días, un suelo contaminado por diesel (HTP 2784 mg/kg de suelo) esta remediado de forma natural al 95%, y lo esta al 99% a los 400 días.

Osman *et al.* (2009) presentan las ventajas de la utilización del estiércol de vacuno para la atenuación de la contaminación del suelo, donde para obtener una degradación del 99% se debía agregar 2,5 toneladas por hectárea. Por otro lado, Fallgren y Jin (2008) en un ensayo de laboratorio, sobre una

muestra de 120 kg de suelo contaminado de diesel obtienen una degradación en 200 días, destacando en este estudio que el estiércol de vacuno aporta, no sólo microorganismos, sino también incrementa la cantidad de nitrógeno necesaria para su multiplicación. Wellman *et al.* (2001) emplean también estiércol de vacuno para la descontaminación de un suelo contaminado con diesel (5000 mg/kg de suelo), muestran una descontaminación cercana al 80% en 41 días.

En el caso de los tratamientos en biopilas, el suelo es distribuido en montículos de hasta varios metros de altura, algunos estudios sugieren colocarlos sobre un sistema de distribución de aire que inyecte aire en cada uno de los montículos mediante una bomba de vacío. Los métodos de compostaje que se pueden aplicar, son de tres tipos: compostaje en pilas estáticas (la aireación de las pilas se hace mediante difusores o bombas de vacío), compostaje en reactores con agitación mecánica (el compostaje es mezclado y aireado en un reactor) y compostaje en grandes pilas que periódicamente se mezclan utilizando tractores o equipos similares (Bhupathiraju *et al.*, 2002).

El objetivo de este trabajo es, por un lado, analizar el proceso de recuperación *ex situ*, de un suelo contaminado por diesel mediante biorremediación con estiércol de vacuno en biopilas a gran escala y por otro modelizar el comportamiento de la degradación del diesel mediante la metodología de biorremediación empleada.

## Materiales y métodos

### Caracterización del suelo contaminado

La zona afectada se encuentra situada en San Luís Potosí, en el tramo Querétaro-San Luís Potosí en México. La contaminación se

originó por la rotura de una tubería de diesel de 81 cm de diámetro propiedad de PEMEX. En la zona afectada se observa el daño ocasionado por el derrame de combustible, al presentar una vegetación seca y con manchas del hidrocarburo. La cantidad de contaminante disminuye a medida que aumenta la distancia desde el punto de fuga, debido a la filtración en el suelo y a los trabajos de limpieza que realiza el personal de PEMEX.

Para caracterizar la superficie contaminada se tomaron muestras de suelo con una barrena manual a distintas profundidades y la planimetría de dicha muestra se determinó con GPS. Las muestras se enviaron para su caracterización al laboratorio de Aguas Residuales y Suelo de la Universidad Autónoma Metropolitana en la Ciudad de México.

Se muestrearon un total de 120 puntos, un 80% dentro del área que se consideró a

priori como contaminada y un 20% fuera de ese área. De los 96 puntos muestreados dentro del área, en 50 se muestreó hasta una profundidad de 0,2 m, en 30 puntos hasta 0,3 m, en 4 puntos hasta 1m, en 6 puntos hasta 2 m, en 3 puntos hasta 2,7m de profundidad y en 3 puntos a más de 3,5 m llegando hasta los 4,5 m de profundidad. Los 24 muestreos fuera del área se hicieron hasta 0,30 m y las muestras de suelo no presentaban humedad u olor a diésel. La caracterización final resultado de la extracción del suelo, indica que cerca del punto de fuga (P) existe mayor profundidad de suelo contaminado que en el resto de las subáreas, siendo cada vez menor cuanto más se alejan del punto de fuga, figura 1.

La tabla 1 muestra las áreas y volúmenes de suelo extraídos en cada una de las profundidades, siendo el área total contaminada de casi 4 ha.

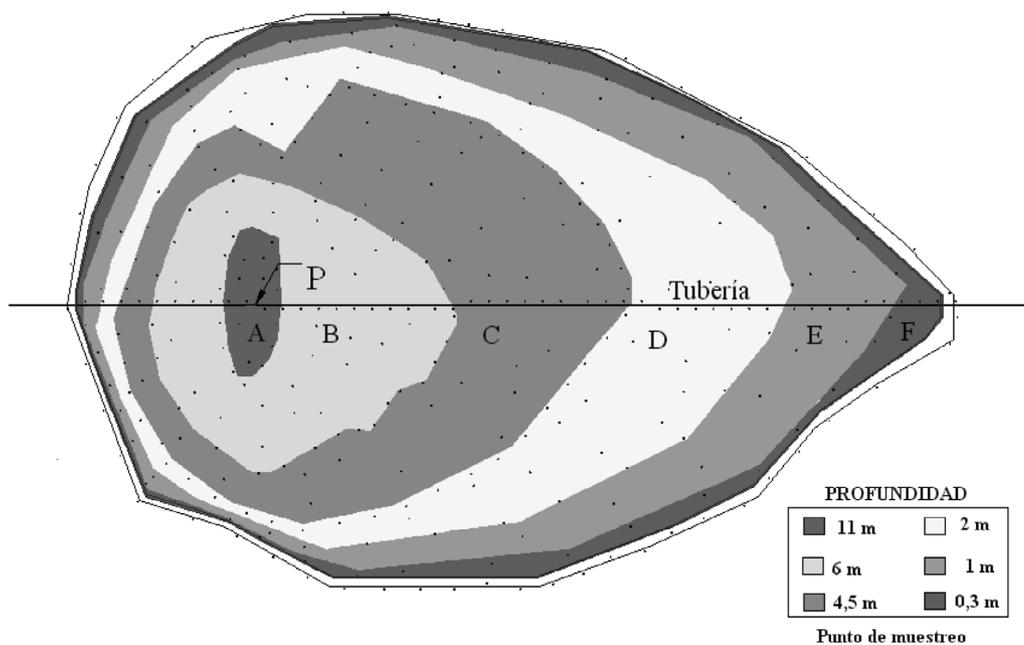


Figura 1. Puntos de muestreo y división en subáreas.  
Figure 1. Sampling points and ted sub areas characterized.

Tabla 1. Perímetro, área, profundidad y volumen de las subáreas contaminadas caracterizadas  
 Table 1. Perimeter, area, depth and volume of the sub areas characterized

Código	Perímetro (m)	Área (m <sup>2</sup> )	Volumen (m <sup>3</sup> )	Profundidad (m)
A	120,07	808,19	8956,89	11
B	307,24	6.253,81	37212,88	6
C	500,23	10.781,20	49816,74	4,5
D	620,52	10.073,35	19730,30	2
E	713,26	8.160,60	8080,39	1
F	750,60	3.362,29	1005,77	0,30
<b>Total</b>	<b>3.011,92</b>	<b>39.439,51</b>	<b>124.802,97</b>	

El suelo se caracterizó inicialmente determinando parámetros físicos y químicos, y posteriormente se analizó el contenido de Hidrocarburos Totales del Petróleo (HTP), véase tabla 2. Las técnicas de análisis para la caracterización del suelo contaminado se hicieron de acuerdo a los métodos mostrados en la tabla 2.

#### Tratamiento de suelo contaminado

Para iniciar el tratamiento del suelo, se excavó y se confinó el suelo contaminado en un espacio destinado especialmente para ello, el traslado se realizó manualmente y con la ayuda de una retroexcavadora. La superficie del suelo se cubrió con una geo-

Tabla 2. Valores iniciales de los parámetros de suelo caracterizados al inicio del ensayo (FECHA) en las biopilas y métodos de análisis utilizados  
 Table 2. Initial values of soil parameters in the biopiles and analytical methods

Parámetro	Valor	Norma
pH	7,1	AS-02 NOM-021-RECNAT-2000
Hidrocarburos totales del petróleo (HTP)	45.000 mg/kg	Proy-NOM-138-SEMARNAT-2003
HTP fracción diesel	14.000 mg/kg	
Contenido de agua	8,7%	AS-02 NOM-021-RECNAT-2000
Fracción de carbono orgánico	0,6569	Walkley & Black AS-07, NOM-021-RECNAT 2000
Densidad real	2,30 g/cm <sup>3</sup>	Picnómetro AS-04, NOM-RECNAT-2000
Densidad Aparente	1,10 g/cm <sup>3</sup>	
Fósforo Disponible	88 mg/Kg	Bray and Kurtz (1947)
% carbono Orgánico	0,6569	
% Materia Orgánica	1,13	
Contenido de Agua	8,7%	
UFC/g	1200	

membrana, sobre ella se depositó el suelo contaminado en forma de biopila con una altura aproximada de 1,5 metros con objeto de facilitar el posterior volteo mecánico en la biopila, esta altura aproximada se ha empleado con éxito en otros trabajos donde la altura máxima de la biopilas de 1,8 a 2 m (Lin *et al.*, 2010). Dado el gran volumen de suelo a tratar, resultaría muy costoso incluir un sistema de aireación en las biopilas, por ello se sustituyó por una aireación basada en un movimiento mecánico del suelo que a su vez servía para la adición del estiércol y del agua residual, además algunos autores señalan que el laboreo del suelo facilita la evaporación del diesel en suelos contaminados (Hejazi y Husain, 2004).

Dado que el suelo es arcilloso, no se es recomendable emplear otras estrategias de descontaminación de bajo coste como la adición de fertilizantes inorgánicos, pues trabajos previos de laboratorio demuestran que estos sólo funcionan bien en suelos arenosos o limosos pero no arcillosos (Singh y Lin, 2009).

La cantidad de estiércol vacuno, que se mezcló con el suelo contaminado fue de 100 kg por cada 7000 kg de suelo contaminado, esto es aproximadamente el 1,5% en peso. Otros autores, en ensayos de laboratorio, han ensayado dosis del 5, 10, y 20% de estiércol, obteniendo los mejores resultados con la dosis más alta, con un 81% de degradación en 41 días (Wellman *et al.*, 2001), pero combinando estas dosis con sulfato amónico. Dada la magnitud del trabajo, es decir la gran cantidad de suelo a tratar no se puede emplear una dosis tan elevada. Para proporcionar los nutrientes necesarios para la actividad microbiana, se adicionó agua residual con una solución de sacarosa con una concentración de 1g/L, que aumenta la relación C/N y permite estar cerca de las necesidades microbianas (Bento *et al.*, 2005). El agua permite además incrementar el oxígeno del suelo y facilita la evaporación de algu-

nos compuestos del diesel (Hejazi y Husain, 2004), otros trabajos han demostrado (Tsai *et al.*, 2009) que la adición de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> a baja concentración mejora la eficiencia microbiana en la descontaminación por diesel.

Una semana después de completar la extracción del suelo contaminado y formar las biopilas se añadió el estiércol de vacuno en la dosis mencionada y el riego, empleando en este último 20 m<sup>3</sup> al día. El muestreo del suelo contaminado se realizó los días 0, 28, 56, 84, 112, 140, 168 y 196, siendo el resultado del HTP obtenido, el promedio a su vez de 40 muestras tomadas aleatoriamente en las biopilas.

### Análisis de datos

Para modelizar el comportamiento de la degradación del diesel se utilizó la curva logística. El modelo logístico propone que bajo ciertas circunstancias, muchas magnitudes en sistemas ecológicos y sociales evolucionan con el tiempo de acuerdo con la expresión:

$$y = \frac{k \cdot y_0 \cdot e^{i \cdot x}}{k + y_0 (e^{i \cdot x} - 1)}$$

donde  $k$  es se llama capacidad del sistema,  $i$  se llama tasa natural de incremento,  $y_0$  es el valor inicial para la curva, y  $x$  es el dato original. Una magnitud que crece de acuerdo con esa expresión se dice que presenta crecimiento logístico. Los parámetros de ajuste del modelo logístico se ajustaron por mínimos cuadrados con la herramienta solver de Excel.

### Resultados

En la figura 2 se presenta gráficamente la evolución del tanto por ciento de degradación del diésel por kilogramo de suelo a lo largo del tiempo, los puntos indican los días de muestreo.

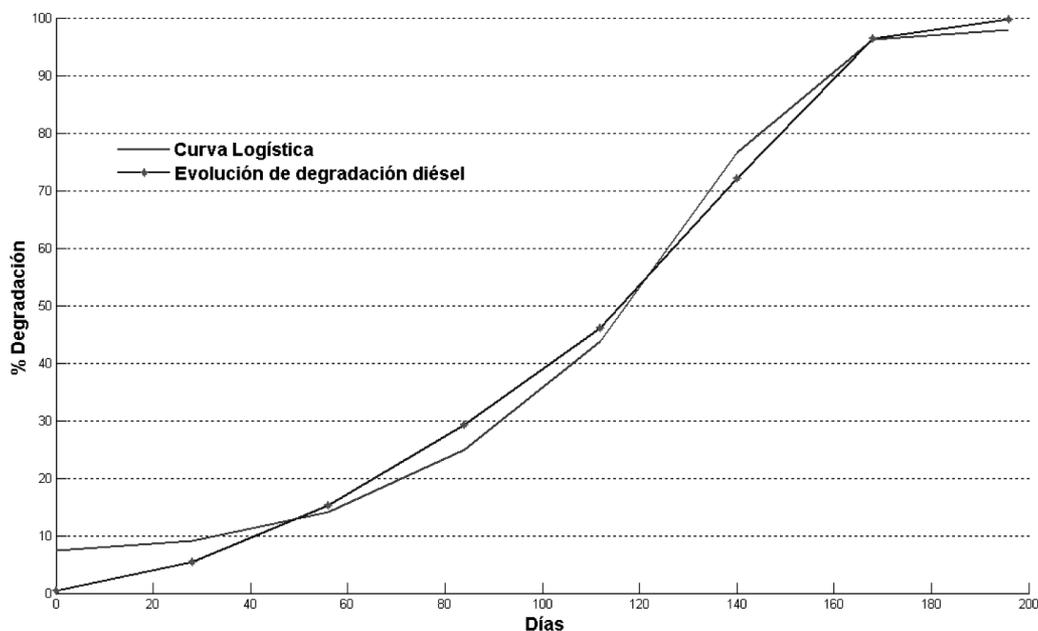


Figura 2. Evolución del porcentaje de degradación del diésel y ajuste de la curva logística.  
 Figure 2. Change with time of the degradation percentage of diesel and logistic curve adjusted.

Al final de los primeros 28 días, el nivel de degradación del diésel en el suelo se ubicaba en 5,33%. Aumentando la descontaminación del diésel al 72% tras 140 días, y al 96,4% a los 168 días.

En la figura 2 se incluye la curva logística ajustada a los datos experimentales degradación del diésel (% degradación) y en la tabla 3 se dan los valores de los parámetros de la curva ajustada.

$$y = \frac{131,2466 \cdot 2,0927 \cdot e^{0,0281 \cdot x}}{131,2466 + 2,0927 \cdot (e^{0,0281 \cdot x} - 1)}$$

Del análisis de la curva logística se deduce que, la contaminación de diésel comenzó a disminuir al tercer día cuando se empezó una reducción del 0,1% de la contaminación. La remediación total (99,8%) se estima que se alcanzó en el día 183. El muestreo a los 196 días realizado para completar otro intervalo

de muestreo de 28 días, tras el día 168 ya daba un buen nivel de descontaminación, que según se ha observado se obtuvo 13 días antes, que de haberlo sabido se podía haber dado por finalizada la remediación del suelo, con el consiguiente ahorro de coste.

Con objeto de poder comparar los resultados obtenidos con otros trabajos similares, y dado que uno de los factores más importantes en la velocidad de degradación es la concentración inicial de HTP (Margesin *et al.* 2007), se ha realizado una gráfica, figura 3, donde además se ha realizado un ajuste de los datos de dicho trabajo a los 38 días, para las series sin tratamiento del suelo y la fertilizada (NPK), para poder extrapolar hasta nuestra concentración inicial de HTP (45.000 mg/kg de suelo). Los ajustes obtenidos con factores de correlaciones superiores al 0.9686, dan un buen ajuste, para las ecuaciones que se muestran

Tabla 3. Valores estimados de los parámetros del modelo logístico

$$y = \frac{k \cdot y_0 \cdot e^{i \cdot x}}{k + y_0 (e^{i \cdot x} - 1)}$$

entre el porcentaje de degradación (y) y los días desde el inicio de la recuperación (x)

Table 3. Adjusted parameters for the logistic model,

$$y = \frac{k \cdot y_0 \cdot e^{i \cdot x}}{k + y_0 (e^{i \cdot x} - 1)}$$

where  $y$  = degradation percentage, and  $x$  = days from the beginning of the remediation process

Parámetro	Valor
k	131,25
i	0,0281
$y_0$	2,0927
$R^2$	99,6%
$\sum (x - y)^2$	838,714

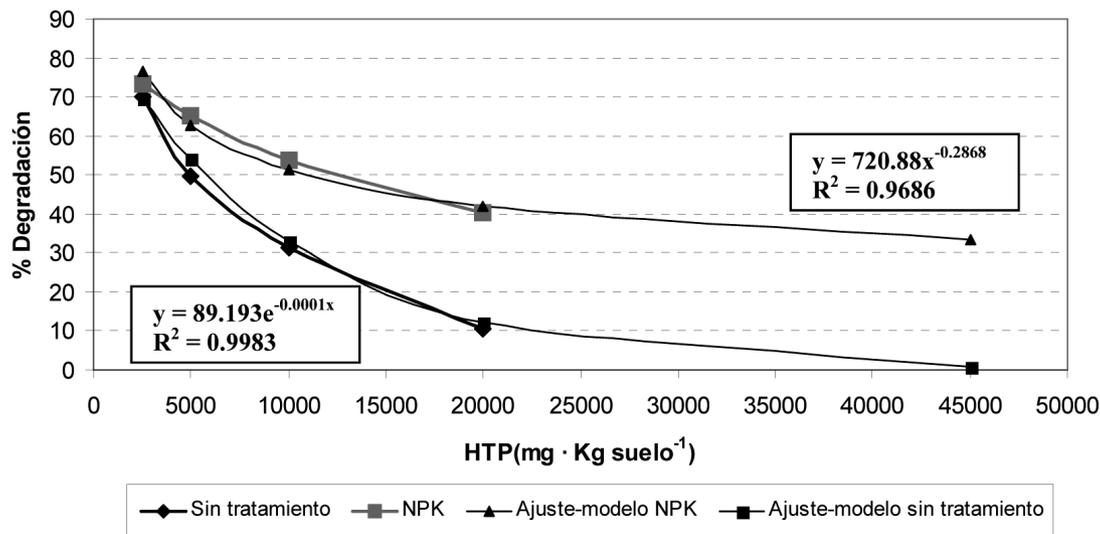


Figura 3. Modelado de degradación del HTP a los 38 días en el suelo según la concentración de HTP, para suelos sin tratamiento y con fertilizante NPK. Adaptado de Margesin et al. (2007).

Figure 3. HTP Degradation model, in the day 38, for several HTP concentration in soil with otu treatment and fertilized one (NPK). Adapted from Margesin et al. (2007).

en el gráfico. Observamos que para un suelo sin tratar la degradación es cercana al 1% y sube al 33% si el suelo esta fertilizado, mientras que en nuestro al añadir estiércol de vacuno la degradación es del 10%.

## Discusión

En este trabajo se ha estudiado la biorremediación ex situ en condiciones reales de campo de alrededor de 4 ha de suelo contaminado por diesel con un volumen de cerca de 125000 m<sup>3</sup> durante 196 días. La mejor forma de medir la eficiencia del proceso de biorremediación es monitorizar el porcentaje de eliminación de hidrocarburo (HTP) del suelo (Atlas, 1992). La pérdida o degradación de HTP es la suma de dos procesos, la degradación microbiana y un proceso abiótico, formado por la evaporación, adsorción de hidrocarburos en los coloides del suelo y oxidación química entre otros procesos (Alexander, 1999). En este trabajo se han contemplado conjuntamente ambos efectos en la determinación de la curva de biorremediación porque se estimó interesante realizar el estudio en condiciones reales de campo.

Dado que la disponibilidad de nutrientes, especialmente nitrógeno y fósforo suelen ser los factores más limitantes en la efectividad de la biorremediación (Xu y Obbard 2004), se añadió estiércol de vacuno mediante mezclado mecánico y agua residual, además estos mejoran el oxígeno disponible en el suelo, que mejora a su vez la eficiencia microbiana en la descontaminación por diesel del suelo (Tsai et al., 2009).

Los resultados obtenidos en este trabajo de biorremediación campo con estiércol de vacuno son coherentes con otros trabajos de laboratorio, ya que a los 38 días se tiene unos porcentajes de degradación entre los obtenidos por Margesin et al. (2007) para suelos sin tratamiento y fertilizados con

abono inorgánico. Luego entendemos que la metodología empleada demuestra ser eficaz y además respetuosa con el medio, ya que para los volúmenes de suelo descontaminado y la alta concentración de diesel, 1,4% en peso, la cantidad necesaria de abono inorgánico sobre todo nitrógeno, sería muy elevada, para mantener la relación C/N en 20:1, teniendo en cuenta que el diesel contamina al 86% en C (Margesin et al. 2007). Además la fertilización inorgánica no funciona bien en suelos arcillos (Singh y Lin, 2009) como es nuestro caso.

Con la curva logística deducida anteriormente para la biorremediación ex situ, podemos comparar nuestros resultados con otros trabajos. La descontaminación del 81% la obtendríamos en nuestro trabajo a los 150 días, muy alejado de los 41 días de Wellman et al. (2001), pero esto es lógico por dos motivos, primero que su concentración de HTP era 3 veces inferior a la nuestra, y además en ese trabajo se añadía también nitrógeno con fertilizante inorgánico, que al disminuir la relación C/N, mejoraba el crecimiento de los microorganismos, en caso contrario el N se agota rápidamente y con él, los microorganismos debido al alto contenido de carbono de los hidrocarburos como es el diesel (Molina-Barahona et al., 2004; Perfumo et al., 2006).

La descontaminación se estima completada a los 183 días con el 99,8%, este resultado es análogo a otros trabajos que obtienen 200 días en la biorremediación empleando también estiércol de vacuno (Fallgren y Jin, 2008) aunque ellos en un ensayo de laboratorio.

## Conclusión

En conclusión, la metodología empleada en este trabajo para la biorremediación ex situ de un suelo muy contaminado (1,4% en peso de diésel), mediante su colocación en

biopilas de 1,5 m de altura, al cual se le añadió estiércol vacuno y agua residual mediante volteo mecánico; tuvo un proceso de recuperación combinada entre factores bióticos y abióticos que se modeló matemáticamente estimando en 183 días el 99,8% de la descontaminación.

### Bibliografía

- Alexander M, 1999. Biodegradation and Bioremediation, 2nd ed. Academic Press, London.
- Atlas RM, Bartha R, 1992. Hydrocarbon biodegradation and oil spill bioremediation. In: Marshall, KC (Ed.) *Advances in Microbial Ecology*, Vol. 12. Plenum Press, New York, pp 287-338.
- Bento FM, Camargo FAO, Okeke BC, Frankenberger WT, 2005. Comparative bioremediation of soils contaminated with diesel oil by natural attenuation, biostimulation and bioaugmentation. *Bioresource Technology*. 96. pp. 1049-1055.
- Bhupathiraju VK, Krauter P, Holman HN, Conrad ME, Daley PF, Templeton AS, Hunt JR, Hernandez M, Álvarez L, 2002. Assessment of in-situ bioremediation at a refinery waste-contaminated site and an aviation gasoline contaminated site. *Biodegradation*. 13. pp. 79-90.
- Bray RH, Kurtz LT, 1947. Determination of total organic and available forms of phosphorus in soils, *Soil Sci*. 59, pp. 39-45.
- Fallgren PH, Jin S, 2008. Biodegradation of petroleum compounds in soil by a solid-phase circulating bioreactor with poultry manure amendments. *Journal of Environmental Science and Health Part A-Toxic/Hazardous Substances & Environmental Engineering*. 43, pp. 125-131.
- Gallego JLR, Loredó J, Llamas JF, Vazquez F, Sanchez J, 2001. Bioremediation of diesel-contaminated soils: Evaluation of potential in situ techniques by study of bacterial degradation. *Biodegradation* 12 (5) pp. 325-335.
- Halmemies S, Gröndahl S, Assfman M, Neninen K, 2003. Vacuum extraction based response equipment for recovery of fresh fuel spills from soil. *Journal of Hazardous Materials*. 97. pp. 127-143.
- Hanson KG, Anuranjini J, Madhavi K, Anjana J, 1997. Bioremediation of Crude Oil Contamination with *Acinetobacter* sp. A3. *Current Microbiology*. 35. pp. 191-193.
- Hejazi RF, Husain T, 2004. Landfarm performance under arid conditions. 2. Evaluation of parameters. *Environ. Sci. Technol*. 38, pp. 2457-2469.
- Hunkeler D, Hohener P, Zeyer J, 2002. Engineered and subsequent intrinsic in situ bioremediation of a diesel fuel contaminated aquifer. *Journal of Contaminant Hydrology* : 59 (3-4) pp. 231-245.
- Iturbe R, Flores C, Castro A, Torres L, 2007. Subsoil contamination due to oil spills in zones surrounding oil pipeline-pump stations and oil pipeline right-of-ways in Southwest-Mexico. *Chemosphere*. 68. pp. 893-906
- Korda A, Santas P, Tenente A, Santas R, 1997. Petroleum hydrocarbon bioremediation: sampling and analytical techniques, in situ treatments and commercial microorganisms currently used. *Applied Microbial Biotechnology*., 48. pp. 677-686.
- Labud V, Garcia C, Hernandez T, 2007. Effect of hydrocarbon pollution on the microbial properties of a sandy and a clay soil. *Chemosphere*. 66. pp. 1863-1871.
- Lin TC, Pan PT, Cheng SS, 2010. Ex situ bioremediation of oil-contaminated soil. *Journal of Hazardous Materials* 176 (1-3), pp. 27-34.
- Margesin R, Schinner F, 2001. Biodegradation and bioremediation in extreme environments. *Applied Microbial Biotechnology*. 56. 650-663.
- Margesin R, Hammerle M, Tscherko D, 2007. Microbial activity and community composition during bioremediation of diesel-oil-contaminated soil: Effects of hydrocarbon concentration, fertilizers, and incubation time. *Microbial Ecology* 53 (2) pp. 259-269.
- Molina-Barahona L, Rodríguez-Vázquez R, Hernández-Velasco M, Vega-Jarquín C, Zapata-Pérez O, Mendoza-Cantu A, Albores A, 2004. Diesel removal from contaminated soils by biostimulation and supplementation with crop residues. *Appl. Soil Ecol*. 27, pp. 165-175.

- Milton HS, Jr, 2007. Beneficial bacteria and bioremediation. *Water Air Soil Pollut.* 187. pp.1-3.
- Mulligan C, Galvez-Cloutier R, 2003. Bioremediation of Metal Contamination. *Environmental Monitoring and Assessment*, 84, pp. 45-60.
- Norma Mexicana AS-02, NOM-021-RECNAT-2000.
- Norma Mexicana AS-04, NOM-021-RECNAT-2000.
- Norma Mexicana AS-07, NOM-021-RECNAT 2000.
- Norma Mexicana Proy-NOM-138-SEMARNAT-2003.
- Osman K, Al-Rehiyani S, Al-Deghairi M, Salama A, 2009. Bioremediation of oxamyl in sandy soil using animal manures. *International Biodeterioration & Biodegradation.* 63. pp. 341-346.
- Perfumo A, Banat IM, Marchant R, Vezzulli L, 2006. Thermally enhanced approaches for bioremediation of hydrocarbon contaminated soils. *Chemosphere*, 66(1). pp. 1-6.
- Pinto MA, de Arruda AP, Kataoka G, de Franceschi G, Bonotto DM, 2006. Laboratory study on the Bioremediation of diésel oil contaminated soil from a petrol station. *Brazilian Journal of Microbiology.* 38. pp. 346-353.
- Rao PS, Davis GB, Johnston CD, 1996. Technologies for enhanced remediation of contaminated soils and aquifers: an overview, analysis and case studies. In: *Contaminants and the Soil Environment in the Australia Pacific Region, Kluwer Academic Publishers.* 6. pp. 361-410.
- Serrano A, Gallego M, Gonzalez JL, Tejada M, 2008. Natural attenuation of diésel aliphatic hydrocarbons in contaminated agricultural soil. *Environmental Pollution.* 151. pp. 494-502.
- Singh C, Lin J, 2009. Evaluation of nutrient addition to diesel biodegradation in contaminated soils. *African Journal Of Biotechnology* 8 (14) pp. 3286-3293.
- Tsai TT, Kao CM, Surampalli RY, Chien HY, 2009. Enhanced Bioremediation of Fuel-Oil Contaminated Soils: Laboratory Feasibility Study. *Journal Of Environmental Engineering-Asce.* 135. pp. 845-853.
- Vidali M, 2001. Bioremediation. An overview. *Pure and Applied Chemistry.* 73. pp. 1163-1172.
- Vieira PA, Viera RB, Franca de FP, Cardoso VL, 2006. Biodegradation of effluent contaminated with diésel fuel and gasoline. *Journal of Hazardous Materials.* 140. pp. 52-59.
- Whang LM, Liu PWG, Ma CC, Cheng SS, 2008. Application of biosurfactants, rhamnolipid, and surfactin, for enhanced biodegradation of diesel-contaminated water and soil. *J. Hazard. Mater.* 151 pp. 155-163.
- Wellman DE, Ulery AL, Barcellona MP, Duerr-Auster S, 2001. Animal waste-enhanced degradation of hydrocarbon-contaminated soil. *Soil & Sediment Contamination.* 10. pp. 511-523.
- Xu R, Obbard JP, 2004. Biodegradation of polycyclic aromatic hydrocarbons in oil-contaminated beach sediments treated with nutrient amendments. *J Environ Qual* 33. pp. 861-867.
- Yakubu, MB, 2007. Biological approach to oil spills remediation in the soil. *African Journal Of Biotechnology* 6 (24) pp. 2735-2739.

(Aceptado para publicación el 22 de febrero de 2010)