

## MAESTRÍA EN INGENIERÍA DE PETRÓLEOS CON MENCIÓN EN RECUPERACIÓN MEJORADA

Modalidad de estudios: **Presencial**

### DESCRIPCIÓN GENERAL DEL PROGRAMA

El objetivo del Programa de Maestría Profesional en Ingeniería de Petróleo con mención en Recuperación Mejorada es formar expertos con una preparación rigurosa y sólida en los diversos campos de conocimientos y disciplinarios que integra la malla curricular a través de la alta especialidad en su práctica profesional que lleve como sustento la investigación, como la estrategia formativa transversal de tal forma que sean capaces de proponer soluciones para maximizar las reservas remanentes en los yacimientos explotados en la República del Ecuador.

### Perfil de egreso

- Planificar los conocimientos adquiridos sobre el campo de la planificación, diseño, operación y control de proyectos de Recuperación Mejorada de Petróleos EOR, incluyendo el manejo ambiental y social de sus actividades, que no se muestran como intensivas en el ámbito de cambiar el uso del suelo.
- Diseñar propuestas relacionadas con la adaptación, cambios e instalación de nuevas facilidades de producción y almacenamiento, así como la transformación de pozos cerrados de baja o nula productividad en pozos inyectores para Recuperación Mejorada.
- Aplicar las competencias necesarias para dar soluciones a problemas pertinentes del ámbito de las reservas y producción de petróleo a partir de la formulación, dirección y ejecución de proyectos de investigación, innovación y aplicación tecnológica dentro del marco de la Recuperación Mejorada de Petróleo.
- Administrar los recursos científicos en la búsqueda de resultados y en la aplicación de tecnologías, que le permitan desarrollar apropiada y adecuadamente sus actividades profesionales en el marco de la Recuperación Mejorada de Petróleo.
- Aplicar las competencias adquiridas para proactivamente ayudar a solventar las necesidades que el país tiene en el ámbito de la incorporación de nuevas reservas y la adición de nueva producción de petróleo, ejerciendo la profesión de manera responsable, legal y ética, comprometida con el desarrollo sustentable; propiciando un balance adecuado entre el desarrollo profesional, el desarrollo tecnológico y la calidad de vida.

### Malla Curricular

#### Primer Semestre

Ingeniería de yacimientos  
Caracterización estática y dinámica  
Simulación de yacimientos  
Ética y saberes ancestrales  
Metodología de la investigación

#### Segundo Semestre

Fundamentación de RM  
Inyección de agua  
Inyección de gas  
Métodos EOR con polímeros

Métodos EOR con surfactantes

#### Tercer Semestre

Métodos termales EOR  
Otros métodos EOR  
Macro desplazamiento  
Economía y finanzas  
Legislación sectorial

#### Cuarto Semestre

Salud, seguridad e higiene  
Gestión de proyectos  
Seminario de investigación



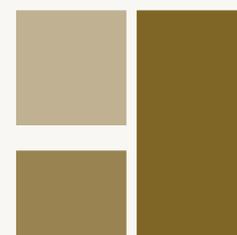
**Ledesma Sarmiento Giovany Eduardo**  
Ingeniero Ambiental de profesión y egresado de la maestría en Calidad, Seguridad y Ambiente, experto en limpieza de derrames y remediación ambiental de fuentes de contaminación con más de 10 años de experiencia en el sector petrolero.

e-mail: g.ledesma@biointeq.com.ec



**Palacios Cabrera Teresa Alejandra**  
Ingeniera química, máster en gestión y auditorías ambientales, docente de la Facultad de Ingeniería en Geología, Minas, Petróleos y Ambiental Universidad Central del Ecuador, consultora en gestión integral de residuos sólidos, mitigación al cambio climático, elaboración de estudios de impacto ambiental, planes de manejo y auditorías ambientales.

e-mail: teresaalejandr3@gmail.com



## Estudio para la implementación in situ y on site del método combinado físico, químico y biológico para la descontaminación de áreas impactadas por derrames de hidrocarburos

Study for the in-situ and on-site implementation of the combined physical, chemical and biological method for the decontamination of areas impacted by oil spills

### Resumen

*El presente trabajo de investigación trata acerca de la implementación in situ y on site de la combinación de tres técnicas física, química y biológica para la recuperación de ecosistemas afectados por derrames de hidrocarburos a nivel nacional e internacional, debido a la optimización de recursos tales como costo y tiempo de restauración, así como por su compatibilidad y afinidad con el medio ambiente, por el uso de dispersantes biodegradables, tala selectiva de especies vegetales, reconfiguración del suelo y reforestación del área remediada con plántulas nativas. La implementación de este método combinado in situ y on site en un ecosistema impactado por un derrame de hidrocarburos en la zona nororiental del Perú, arrojó como resultado un alto porcentaje de eficacia en la restauración de este ecosistema, por lo tanto se convierte en una alternativa muy recomendable para su aplicación en la recuperación y restauración de ecosistemas afectados por derrames de hidrocarburos, siempre que se ajusten los requerimientos establecidos para las variables críticas de todo el proceso*

**Palabras clave:** ecosistema; derrames; hidrocarburos; método combinado; tratamiento

**Abstract**

*This research explains the effectiveness of the on-site implementation of a combination of physical, chemical and biological techniques for restoration of ecosystems affected by oil spills at national and international level, by means of optimizing resources such as cost and time, compatibility and affinity of the restoration method with the environment by using biodegradable dispersants, selective logging of plant species, soil reshaping and reforestation of the area restored with native seedlings. The implementation of this on-site combined method in an ecosystem impacted by oil spill in the northeast region of Peru resulted in a high efficacy percentage of ecosystem restoration, therefore it is highly recommended for application in the restoration of ecosystems affected by oil spills, as long as the requirements defined for the process critical variables are adjusted.*

**Keywords:** combined method; ecosystem; oil spills; hydrocarbons; oil spills; treatment

**Introducción**

Las actividades antrópicas generan con frecuencia efectos negativos que son evidentes sobre los factores ambientales como en este caso el suelo, por ser éste el primer punto de contacto de un derrame ocurrido por cualquier causa, de sustancias líquidas o sólidas que pueden ser tóxicas como los hidrocarburos. El suelo en combinación con el agua y en menor medida con el aire potencializa su capacidad y se convierte en un agente dispersante de la contaminación.

En los últimos años, se ha desarrollado una rama de la ingeniería llamada "Ingeniería de la Remediación" que surgió por la necesidad de desarrollar técnicas y tecnologías para la recuperación ambiental de sitios afectados por hidrocarburos.

Al principio, el conjunto de tecnologías de remediación eran ajenas a las condiciones físicas, químicas y biológicas del medio ambiente. Actualmente ésta disciplina sigue en constante evolución y mejoramiento continuo para determinar soluciones efectivas y compatibles con el medio ambiente, bajo el amparo de la normativa ambiental vigente, esfuerzos de investigación, actividades de las ONG vinculadas, organismos gubernamentales, entre otros.

Las técnicas de tratamiento, para residuos sólidos peligrosos o materiales contaminados, consisten en la aplicación de procesos físicos, químicos o biológicos que coadyuvan a mejorar y recuperar sus propiedades en forma permanente. Estas técnicas destruyen contaminantes o los modifican a fin de que dejen de ser peligrosos, además pueden reducir la cantidad de material contaminado presente en un lugar,

retirar el componente que los convierte en peligrosos o inmovilizar el contaminante en el mismo desecho. (Flores & col., 2001)<sup>1</sup>

Entre las técnicas con menor impacto ambiental cabe destacar aquellas que no requieren excavación y transporte del suelo, es decir, que el tratamiento se realiza in situ y on site, dentro del mismo emplazamiento. La tecnología a utilizar depende entre otros muchos factores, del tipo de contaminante, tipo de terreno, afectación de las aguas subterráneas, tiempo necesario para descontaminar, costo de la actuación, etc. (CIPP, 1999)<sup>2</sup>

Hoy, el proceso de biorremediación busca mejorar sus técnicas con el paso del tiempo, para empezar a convencer a muchas empresas que han ido implementando políticas ambientales y así convertirlo en un proceso industrial. (Petro Cardona & Mercado Montero, 2014)<sup>3</sup>

**Material y métodos**

Para la implementación del modelo de estudio se eligió un área impactada por el derrame de 50 barriles de petróleo ocasionado por actos vandálicos el 06 de abril de 2013 en el Oriente peruano, Lote 8 de Pluspetrol Norte S.A, oleoducto Chambira – Batería 1, Km 9+397.

**Característica generales**

A continuación se describen las características generales del área impactada por un derrame de hidrocarburos:

- Altitud: 800 msnm
- Clima: tropical cálido
- Temperatura media anual: 24°C
- Humedad relativa media anual (%): 76.8
- Precipitación: > 2000 mm anuales
- Relieve: generalmente ondulado, presenta algunas planicies, así como colinas que no superan los 500 m de altura.
- Suelos: arcillosos rojos/negros, ácidos, poco fértiles, profundos, moderadamente fértiles y bien drenados; muy infértiles y arenosos, formados por arenas blancas totalmente lavadas. En los bosques de la Selva Baja se encuentran árboles de gran tamaño, arbustos, helechos, bromelias, lianas, líquenes y musgos.

1 Flores, N., & col., y. (2001). Utilización de lodos residuales en la restauración de suelos contaminados con hidrocarburos. In V. C. Ambientales (Ed.). Pachuca

2 CIPP (1999). Manejo de residuales durante la perforación de pozos de petróleo en tierra (onshore). Habana, Cuba: Regulación Ambiental de CUPET 01/095 (Revisión 2).

3 Petro Cardona, P. H., & Mercado Montero, G. D. (2014). Biorremediación de suelos contaminados por derrames de hidrocarburos derivados del petróleo en Colombia. Universidad de San Buenaventura seccional Cartagena, Cartagena de Indias

- Ríos: Existe gran cantidad y muy caudalosos, entre los que se distinguen tres tipos: de aguas negras, de aguas cristalinas y de aguas turbias. Durante la creciente, los ríos inundan anchas franjas, a lo largo de sus orillas.

- Lagos/Lagunas, Pantanos/Aguajales: Las lagunas son abundantes, y generalmente tienen un origen fluvial; así como también hay numerosas zonas pantanosas conocidas como aguajales.

**Actividades de limpieza y remediación**

**Contención del área impactada**

El proceso consiste en instalar doble barrera de contención a través de geomembrana alrededor del perímetro de dicha área con estacas de madera para evitar que se extienda la pluma de contaminación.

**Medición y ubicación**

Se delimitó y se hizo un levantamiento topográfico (área, perímetro y relieve) del área afectada mediante el uso de una Estación Total y un equipo GPS diferencial de alta precisión; el área afectada corresponde a 19.303,83 m<sup>2</sup>.

La ubicación geográfica del derrame corresponde a las coordenadas UTM E471207, N9565963 del sistema WGS84, zona norte al margen derecho de la quebrada Patuyacu entre los ríos Corrientes y Tigre tributarios del río Marañón, en la progresiva del km 9+397 del Oleoducto Chambira (Batería 8) – Batería 1, Lote 8, Región Loreto, Provincia Loreto, Distrito de Trompeteros, selva norte del Perú. Ver figura 1.

**Monitoreo ambiental**

Se definió un monitoreo inicial, otro de seguimiento y uno final, de acuerdo con el periodo de duración de los trabajos de descontaminación del área impactada y siguiendo el procedimiento respectivo.

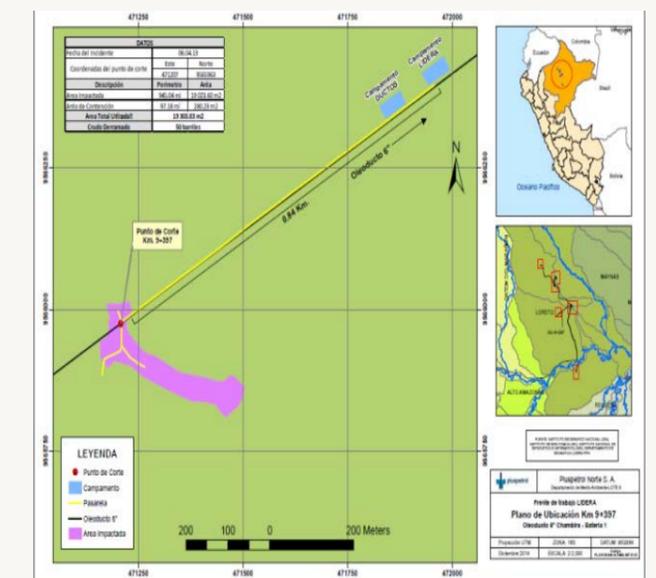


Figura 1. Mapa Ubicación del área impactada. Fuente: Pluspetrol, 2015

**Cronograma de actividades**

En la tabla 1 se detalla el cronograma de actividades.

Tabla 1: Cronograma de actividades

ACTIVIDADES	2014		AÑO 2015																							
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12		
Habilitación de Campamento																										
Trabajos generales en el área Impactada																										
Recolección de Material Vegetal																										
Lavado de Material Vegetal contaminado																										
Recuperación de fluido (espina de pescado)																										
Lavado de Suelos																										
Traslado de fluido recuperado hacia hot tap km 32+592																										
Biorremediación																										
Revegetación																										
Cierre y Desmovilización de campamento																										

Elaborado por: Giovany Ledesma, 2015

**Plan de monitoreo**

El muestreo inicial de suelo consistió en 2 grupos, el primero comprendió 12 puntos de muestreo en el lugar del incidente y el segundo fue 1 muestra tomada a 100 m del incidente y constituye la muestra "blanco". Las columnas resaltadas corresponden a aquellas que superan el límite máximo permisible de normativa ambiental peruana. En la tabla 2 se detalla el plan de monitoreo.

Tabla 2. Plan de monitoreo

	Monitoreo Inicial	Monitoreo de Seguimiento	Monitoreo Final
<b>Cantidad de Muestras</b>	12	6	12
<b>Muestras "blanco"</b>	1	-	1
<b>Fecha de Muestreo</b>	26-Ago-2014	29-Nov-14 18-Ene-15 25-Feb-15 25-Ago-15 14-Oct-15 01-Nov-15	29-Nov-2015
<b>Tiempo de muestreo</b>	4 horas		3,5 horas
<b>Parámetros a analizar</b>	TPH	TPH	TPH

Elaborado por: Giovany Ledesma, 2015

### Desbroce del área impactada

Se debe efectuar el inventario forestal del área impactada obteniendo 45 especies forestales con un DAP que oscila entre 35 y 50 cm. Ver tabla 3

Tabla 3. Plan de monitoreo

Ítem	Zona	Género y Especie	Nº de especies	Diámetro Promedio (m)	Altura comercial (m)
1	Incidente 9+397	<i>Parkia sp.</i>	4	0.35	11
2	Incidente 9+397	<i>Mauritia flexuosa</i>	12	0.45	10
3	Incidente 9+397	<i>Virola sp.</i>	4	0.35	17
4	Incidente 9+397	<i>Astrocaryum sp.</i>	7	0.40	15
5	Incidente 9+397	<i>Croton desmanii</i>	2	0.50	16
6	Incidente 9+397	<i>Cecropia sp.</i>	16	0.32	13

Elaborado por: Giovany Ledesma, 2015

### Perfil estratigráfico

Consiste en la remoción y retiro de la mayor cantidad de raíces impregnadas con hidrocarburos, las cuales se encontraban alojadas a 30 cm de profundidad (material orgánico y raíces), actividad realizada de manera manual. Todas las raíces fueron retiradas del incidente para su posterior lavado. Ver figura 2.



Figura 2. Perfil estratigráfico. Elaborado por: Giovany Ledesma, 2015.

### Recolección y lavado de material vegetal in situ y on site

Todo el material vegetal (hojarasca, ramas, troncos y raíces) contaminado con petróleo fue recolectado manualmente y trasladado a la zona de lavado. Posteriormente fue dispuesto en un tanque de armado rápido (fast tank) por 2 días sumergido en una solución desengrasante biodegradable para poder separarlo del petróleo impregnado en sus tejidos. Después se aplicó agua a presión (6.5 kg/cm<sup>2</sup> o menor) con ayuda de una motobomba al material vegetal contaminado. El fluido sobrenadante, producto del lavado,

fue recolectado manualmente y dispuesto en un cubeto impermeabilizado con geomembrana y con techo.

Se realizó la separación del material lavado (limpio) del material contaminado o impregnado con hidrocarburo.

El material vegetal que cumplió con este objetivo fue triturado y dispuesto directamente en el medio ambiente para su degradación natural, mientras que el restante fue dispuesto en un área impermeabilizada con geomembrana y techado para su biorremediación.

### Construcción de zanjas y puntos de control

Para la recuperación de hidrocarburo se construyeron canales de drenaje en el área impactada, teniendo en cuenta la dirección de la pendiente del terreno. Estos canales están conformados por una zanja principal que atraviesa longitudinalmente el área impactada y a ésta ingresan canales secundarios (si es necesario se construye zanjas terciarias) que se originan desde la barrera de contención hacia la zanja principal. Estratégicamente se incluyeron puntos de control a lo largo de la zanja principal. De esta forma fue recolectado el fluido de petróleo sobrenadante que fue separado del área tratada, mediante lavado con agua a chorro y dispersante biodegradable.

### Lavado de suelo en el sitio y fuera del sitio (in site y on site).

Mediante el uso de bombas a presión se aplicó agua a chorros (presión de descarga 6.5 kg/cm<sup>2</sup> o menor) con una solución desengrasante biodegradable (proporción 5 - 10:1) sobre el área impactada que separó las partículas de petróleo del suelo. Esta actividad fue realizada unas 3 veces, hasta retirar todo o gran parte de los hidrocarburos existentes en el suelo. La aplicación del agua a presión se realizó en dirección a los canales de drenaje y este a su vez hacia los 5 puntos de control. Se realizó el lavado a un área total de 19.303 m<sup>2</sup>.

### Recuperación de residuos oleosos

La recuperación del petróleo se realizó mediante técnicas manuales. En esta etapa se empleó polvo absorbente granulado, barreras absorbentes, barrera natural flotante (rama de aguaje) y otras herramientas manuales, el personal empleó recogedores tipo tamices conformados por mallas metálicas de 2 mm de diámetro. El hidrocarburo recuperado fue almacenado en tanques de armado rápido, cubetos (16 m<sup>3</sup>) impermeabilizado con geomembrana y en tanques cilíndricos de 55 galones de capacidad y transportados hacia una plataforma (impermeabilizada con geomembrana y con techo) para su posterior bombeo a través del hot tap<sup>1</sup> de la progresiva del km 32 del oleoducto Corrientes-Saramuro.

4 Corte realizado al oleoducto para instalar una válvula que permita inyectar el crudo recuperado en el flujo de petróleo del oleoducto.

### Equipos utilizados

En la tabla 4 se detallan los equipos utilizados:

Tabla 4. Equipos utilizados

Cantidad	Equipo	Uso	Potencia
1	Motobomba de presión	Lavado de suelo con hidrocarburos	9 HP
3			35 HP
3	Motobomba de presión	Lavado de material vegetal con hidrocarburos	9 HP
2	Motobomba de caudal	Abastecimiento de agua para los pits y lavado de suelo con hidrocarburos	25 HP
global	Mangueras de descarga de alta presión de 400 psi (1 1/2" - 2 1/2")	Lavado de suelos y material vegetal con hidrocarburos	-----
global	Bifurcos (1 1/2" - 2 1/2")	Lavado de suelos y material vegetal con hidrocarburos	-----
1	Chipiadora	Triturado de material vegetal	-----

Elaborado por: Giovany Ledesma, 2015

### Biorremediación on site

Se construyeron biopilas para aireación manual en forma trapezoidal sobre un área impermeabilizada y con techo, localizada junto al área impactada, que fue empleada para el tratamiento biológico del suelo y sedimentos provenientes del lavado.

Las biopilas fueron construidas a partir de capas de suelo impregnado con hidrocarburo, los sedimentos provenientes del lavado, material vegetal triturado lavado y nutrientes (bioterra-nombre comercial). La aireación, pasando 1 día en estas biopilas, se realizó por volteo manual, utilizando herramientas menores.

Adicionalmente, con el fin de estimular la microflora natural que se encuentra en el suelo (levaduras, hongos y bacterias) se adicionó 2 veces por semana la solución de nutrientes preparada en campo (a base de extracto de hortiga) con el uso de una bomba de fumigación manual, asimismo, se homogenizó la aplicación mediante un arado. Las biopilas fueron cubiertas con geomembrana al finalizar la jornada, a fin de evitar la saturación de humedad y posterior sofocamiento de la microflora presente en el proceso de biorremediación y así garantizar la eficacia de los microorganismos.

### Monitoreo de seguimiento

El muestreo de seguimiento fue realizado durante el proceso de descontaminación del área impactada, el cual

se efectuó en la etapa de recuperación de fluido, lavado de suelos y reconformación del área. Con los resultados obtenidos se logró identificar la concentración de hidrocarburos presentes en el suelo, la misma que fue disminuyendo hasta llegar a los valores límites permisibles establecidos en la normativa ambiental.

En este caso, las muestras fueron analizadas en un laboratorio interno, empleando el método de retorta, que mide la concentración de aceite en las muestras de suelo. Ver tabla 5.

### Monitoreo final

El muestreo final consistió en la toma de muestras en 15 puntos dentro del área remediada y 1 muestra fuera de dicha área que constituyó la muestra "blanco". Ver tablas 6 y 7. Se determinaron los parámetros de hidrocarburos totales de petróleo, metales y mercurio.

### Resultados del monitoreo final

En virtud de que con el resultado del monitoreo final, 13 de las 15 muestras analizadas presentaron una concentración de TPH inferior al límite máximo permisible, establecido en la normativa ambiental peruana, fue necesario realizar un último lavado de suelo sobre las 2 muestras restantes que superaban dicho límite hasta que disminuyan su concentración de TPH por debajo del mismo.

Se realizó un último monitoreo sobre tales muestras, cuyos resultados presentaron una concentración de TPH por debajo del límite máximo permisible establecido en la normativa ambiental peruana.

Tabla 5. Resultados monitoreo de seguimiento

Fecha de Monitoreo					
		9.000		8.000	3.000
		1.000	1.000	2.000	2.000
		1.000	1.000	1.000	1.000
	Promedio	5.000	4.000	5.000	4.000
	LMP (Retorta)	5.000	5.000	5.000	5.000

Fuente: Pluspetrol, 2015

Tabla 6: Resultados final de 2 muestras

Muestras del Grupo: 42129/2015			
Método de Análisis	005 Análisis por Cromatografía – Hidrocarburos Totales de Petróleo		
Unidad	mg/Kg (ppm)		
Identificación	Fracción de HC F1 (C5-C10)	Fracción de HC F2 (C10-C28)	Fracción de HC F3 (C28-C40)
L8-km9+397-0-50P-M4	<0,6	74	48
L8-km9+397-0-50P-M5	<0,6	195	129
Decreto Supremo N° 002-2013-MINAM, publicado el 06 de abril de 2013. Estándares de Calidad Ambiental para Suelo Agrícola	200	1.200	3.000

Fuente: Corplab, 2015

Tabla 7. Monitoreo final

Muestras del Grupo: 42129/2015			
Método de Análisis	005 Análisis por Cromatografía – Hidrocarburos Totales de Petróleo		
Unidad	mg/Kg (ppm)		
Identificación	Fracción de HC F1 (C5-C10)	Fracción de HC F2 (C10-C28)	Fracción de HC F3 (C28-C40)
L8-km9+397-0-50P-M1	<0,6	615	889
L8-km9+397-0-50P-M2	<0,6	908	1.076
L8-km9+397-0-50P-M3	<0,6	726	1.052
L8-km9+397-0-50P-M4	<0,6	1.428	1.405
L8-km9+397-0-50P-M5	<0,6	2.135	1.689
L8-km9+397-0-50P-M6	<0,6	<2	<2
L8-km9+397-0-50P-M7	<0,6	499	699
L8-km9+397-0-50P-M8	1,3	736	1.117
L8-km9+397-0-50P-M9	2	429	660
L8-km9+397-0-50P-M10	<0,6	<2	360
L8-km9+397-0-50P-M11	<0,6	495	653
L8-km9+397-0-50P-M12	<0,6	1.088	1.488
L8-km9+397-0-50P-M13	<0,6	547	815
L8-km9+397-0-50P-M14	<0,6	<2	<2
L8-km9+397-0-50P-M15	<0,6	695	987
L8-km9+397-0-50P-M16-BL muestra "blanco"	<0,6	335	417
Decreto Supremo N° 002-2013-MINAM, publicado el 06 de abril de 2013. Estándares de Calidad Ambiental para Suelo Agrícola	200	1.200	3.000

Fuente: Corplab, 2015

### Reconformación de áreas remediadas

Después de obtener los resultados del laboratorio en los que las concentraciones de TPH cumplen con los límites permisibles de la Normativa Ambiental Peruana, se procedió a reconformar toda el área remediada aplicando fertilizante orgánico, con la finalidad de recuperar la textura del suelo y proporcionar nutrientes y minerales para la regeneración de microorganismos que favorezcan la reforestación y la recuperación de la flora silvestre. Además, se utilizó un sustrato (bioterra) que provee de macro y micronutrientes al suelo, mejorando la fijación radicular.

### Reforestación

Considerando que el 5% del área remediada está dentro del derecho de vía del oleoducto, no pudo llevarse a cabo la reforestación en esa parte, sin embargo el área remanente que constituye el 95% sí fue reforestada. La reforestación consistió en extraer especies nativas de un área muy cercana a la remediada para ser sembradas en ésta última. Las mismas han sido monitoreadas cada 2 meses durante 1 año a fin de evaluar su mortandad y desarrollo.

Para realizar la siembra se colocaron los brinzales en una cuadrícula con una distancia entre plantones de 3x3 m, es decir que en el centro de un cuadro de 9 m2 se sembraron plántulas dentro de los hoyos de 30x30x30 cm, colocando previamente en la base material orgánico y de relleno con tierra nativa, haciendo que las plántulas queden en la parte central de manera que puedan aprovechar un sustrato mullido para el desarrollo de sus raíces.

En el área remediada fueron sembradas 800 plántulas. Ver tabla 8.

Tabla 8. Inventario de plántulas sembradas

Ítem	Zona	Género y Especie	Nombre Común	# de Plántulas
1	Incidente 9+397	Attalea butyracea	Shebon	150
2	Incidente 9+397	Mauritia flexuosa	Aguaje	150
3	Incidente 9+397	Inga sp2	Shimbillo	150
4	Incidente 9+397	Virola sp	Cumula	50
5	Incidente 9+397	Oenocarpus bataua Mart	Unguragui	100
6	Incidente 9+397	Vismia sp.	Pichirina	200

Fuente: Pluspetrol, 2015

### Resultados

En la tabla 9 se observan los resultados consolidados y generados durante todo el proceso in situ y on site de limpieza y remediación del área impactada.

Tabla 9. Inventario de plántulas sembradas

Fecha Incidente	06-04-2013	
Fecha Inicio de trabajos	Sep-2014	
Fecha Final Remediación	Nov-2015	
Área Afectada	19.303,83 m²	
Actividades	Unidades	Cantidad Total
Recolección de suelos contaminado	m³	247
Lavado de material vegetal contaminado	m³	235
Lavado de suelo	m²	19.303,83
Recuperación de Hidrocarburo	barril	296
Inyección de hidrocarburo hacia Hot Tap km 32	barril	296

Elaborado por: Giovany Ledesma, 2015

### Costos de implementación

En la tabla 10 se detallan los rubros y costos de la implementación in situ y on site del método combinado físico, químico y biológico para la descontaminación del área impactada por el derrame de hidrocarburos en el km 9+397 del oleoducto Chambira (Batería 8) – Batería 1 del Lote 8 operado por Pluspetrol Norte S.A. en la Amazonía Peruana.

En el desglose de costos está incluido el rubro de construcción de campamentos y facilidades para cubrir las necesidades básicas del personal requerido para la implementación in situ y on site del método combinado físico, químico y biológico, debido a que el área impactada se encuentra en un lugar remoto sin acceso terrestre ni fluvial.

Tabla 10. Costo implementación método combinado

ÍTEM	2014				2015										SUBTOTAL (USD)
	SEP (USD)	OCT (USD)	NOV (USD)	DIC (USD)	ENE (USD)	FEB (USD)	MAE (USD)	ABR (USD)	MAY (USD)	JUN (USD)	JUL (USD)	AGO (USD)	SEP (USD)	OCT (USD)	
Mano de Obra	75.608,94	12.493,04	67.057,97	90.542,84	83.932,65	61.459,86	8.201,93	87.075,26	184.479,79	70.681,63	20.646,15	192.940,19	15.878,85	28.642,74	\$ 999.641,84
Equipos y Materiales	6.768,32	466,95	806,74	8.684,44	8.882,5	3.297,19	0	1.031,28	3.697,46	12.096,59	430,9	23.565,99	4.858,54	8.902,02	\$ 83.488,92
Transporte aéreo y fluvial	147.062,49	17.851,28	42.473,27	52.356,82	36.479,41	53.537,06	46.673,68	31.667,62	44.787,89	65.114,76	52.081,48	47.817,22	42.054,92	81.385,55	\$ 761.343,45
Alimentación	16.422,25	14.820,17	0	15.907,3	27.195,77	0	4.209,93	28.056,62	10.162,72	14.120,7	8.094,79	24.004,6	26.688,69	26.360,69	\$ 216.044,23
<b>TOTAL (USD)</b>															<b>\$ 2'060.518,44</b>

Fuente: Pluspetrol, 2015

### Análisis de otra alternativa

La implementación del método fuera del sitio, consiste en re-tirar y trasladar todo el material contaminado (suelo y material vegetal contaminado) afuera del área impactada, lo cual implica incurrir en costos de transporte aéreo y maquinaria pesada para recién allí, poder realizar su tratamiento posterior. Estos rubros representan un costo de aproximadamente USD \$618.155,53 o el 30% más del costo de implementación in situ y on site, además de un tiempo de 4 meses o un 29% adicional al tiempo de implementación in situ y on site.

### Discusión

#### Curva de descontaminación según el cronograma de muestreo

La concentración de TPH a 0,3 m de profundidad va disminuyendo conforme avanzan los trabajos de limpieza y remediación a través del tiempo. A un metro de profundidad se

puede observar que la concentración de TPH es constante en el tiempo. La eficacia de disminución de la concentración de TPH a 0,3 m de profundidad es del 91%. Ver figura 3.

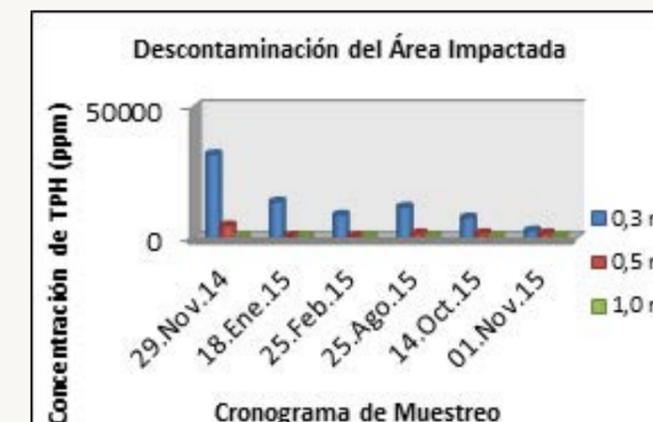


Figura 3. Descontaminación del área. Elaborado por: Giovany Ledesma, 2015

### Curva de descontaminación según la profundidad de muestreo

La concentración de TPH es inversamente proporcional a la profundidad de muestreo, por lo tanto a menor profundidad mayor concentración de TPH y a mayor profundidad menor concentración de TPH. Ver figura 4.

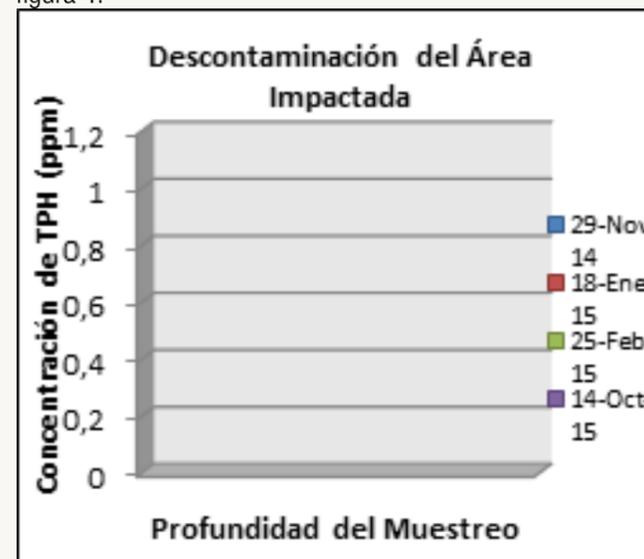


Figura 4. Descontaminación del área. Elaborado por: Giovany Ledesma, 2015

Para calcular la eficacia de la implementación in situ y on site del método combinado físico, químico y biológico, se utilizó la siguiente fórmula.

$$E = 100\% - \left( \frac{\chi_{cf}}{\chi_{ci}} * 100 \right) \quad \text{Ec. (1)}$$

$$E = 100\% - \left( \frac{858}{14995} * 100 \right)$$

$$E = 94\%$$

En donde:

E = Eficacia

$\chi_{cf}$  = promedio de concentraciones finales

$\chi_{ci}$  = promedio de concentraciones iniciales

En términos generales y de conformidad con las figuras 22 y 23 se observa que en el lapso de 14 meses, partiendo de una concentración inicial promedio de TPH de 14.995 ppm, la fracción de hidrocarburos F2 (C10-C28), fue disminuyendo hasta una concentración final promedio de TPH de 858 ppm de la misma fracción de hidrocarburos. De esta forma, se demostró que la eficacia de la implementación in situ y on site del método combinado físico, químico y biológico es del 94%. El 6% no alcanzado, puede ser sustentado por la duración del tiempo de lavado del suelo contaminado que corresponde al método físico.

También se determinó que con el monitoreo final de 15 muestras, 13 de ellas registraron una concentración de TPH por debajo del límite máximo permisible, establecido en la normativa ambiental Peruana, por lo que posteriormente hubo la necesidad de proceder con un último lavado de suelo en las zonas cuyas muestras registraron valores más altos que la normativa ambiental peruana.

Este método combinado es amigable y compatible con el medio ambiente, debido a que se procuró utilizar la mayor parte de insumos suministrados por la misma naturaleza, así como el uso de sustancias biodegradables, además de la tala selectiva de especies vegetales y la restauración de las condiciones ambientales iniciales mediante la reconfiguración del área remediada y la reforestación de plántulas nativas.

### Conclusiones

a) El tiempo de la implementación in situ y on site del método combinado físico, químico y biológico fue de 14 meses con un costo de USD \$ 2'060.518,44 para 19.303,83 m<sup>2</sup> de área remediada, que en comparación con la implementación ex situ y off site representa un ahorro del 30% en costos y del 29% en tiempo.

b) Se determinó que la implementación in situ y on site del método combinado físico, químico y biológico es ambientalmente amigable porque se procuró utilizar la mayor parte de insumos entregados por la misma naturaleza: lavado de suelos y material vegetal contaminado con hidrocarburos, mediante el uso de sustancias biodegradables, además de la tala selectiva de especies vegetales y la restauración de las condiciones ambientales iniciales, mediante la reconfiguración del área remediada y reforestación con plántulas nativas. Éste método consiste en realizar los trabajos de limpieza y remediación dentro del área impactada; ningún tipo de contaminante es retirado y tratado fuera del área afectada, optimizando de esta manera tiempos y costos de tratamiento.

c) La eficacia para la descontaminación de áreas impactadas por derrames de hidrocarburos, mediante la im-

plementación in situ y on site del método combinado físico, químico y biológico es del 94%, este porcentaje es debido a que en el lapso de 14 meses partiendo de las concentraciones de TPH iniciales en promedio de 14.995 mg/kg de fracción de hidrocarburos F2 (C10-C28), fue disminuyendo hasta una concentración final promedio de 858 mg/kg de la misma fracción de hidrocarburos, valores por debajo de lo estipulado en la normativa ambiental peruana, la misma que establece 1200 mg/kg para uso del suelo agrícola.

d) Si bien la implementación in situ y on site del método combinado físico, químico y biológico tiene un 94% de eficacia, el 6% no alcanzado puede deberse a la duración del tiempo de lavado del suelo contaminado que corresponde al método físico.

e) En virtud de que la implementación in situ y on site del método combinado físico, químico y biológico tuvo una eficacia del 94%, debido a que 13 de 15 muestras presentaron una concentración final de TPH inferior al límite máximo permisible establecido en la normativa ambiental peruana (1200 mg/kg TPH); las dos muestras que no cumplieron con la normativa fueron sometidas nuevamente a un lavado hasta alcanzar los límites permisibles, por lo cual se lavó nuevamente, en las zonas de las dos muestras que presentaron valores altos, de tal forma que cumplan con la normativa citada.

### Recomendaciones

a) Dedicar mayor tiempo en la supervisión y control durante el lavado del suelo contaminado para alcanzar un mayor porcentaje de eficacia del tratamiento e implementación in situ y on site del método combinado físico, químico y biológico.

b) Promocionar en la industria petrolera la implementación in situ y on site del método combinado físico, químico y biológico para la descontaminación de áreas impactadas por derrames de hidrocarburos, por tratarse de un método amigable con el medio ambiente, debido a que se utiliza la mayor parte de insumos provistos por la misma naturaleza, así como sustancias biodegradables, además

de la ejecución de la tala selectiva de especies vegetales y restauración de las condiciones ambientales iniciales mediante la reconfiguración del área remediada y reforestación de plántulas nativas.

c) Aplicar la metodología del presente estudio como una herramienta práctica y aplicable a realidades similares en otros países con la misma problemática.

### Referencias bibliográficas

Abboud, S. (2000). Toxicity Evaluation of Muds and Cements in Drilling Operations. La Habana, Cuba: Curso de postgrado. MINBAS.

Aguilera, S. M., 2000. Importancia de la protección de la materia orgánica en suelos. Simposio Proyecto Ley Protección de Suelo. Boletín N° 14. Valdivia, Chile. pp. 77-85.

Alonso Riesco, R. (2012). Proyecto de recuperación de suelos contaminados por hidrocarburos. Universidad Autónoma de Barcelona, Cerdanyola del Vallés.

Cevallos J, Ospina P. Evaluación de Impactos e Indicadores Ambientales en el Ecuador, Quito – Ecuador, mayo 1999.

CIPP. (1999). Manejo de Residuales durante la perforación de pozos de petróleo en tierra (onshore). La Habana, Cuba: Regulación Ambiental de CUPET 01/095 (Revisión 2).

EPA. (1996). 542-F-96-017 Guía del ciudadano: Técnicas de tratamiento innovadoras. Estados Unidos: Organismo para la Protección del Medio Ambiente.

EPA. (1996). Guía del ciudadano: El lavado de suelo. 542-F-96-018.

Fernández Linares, L. C., Rojas Avelizapa, N. G., Roldán Carrillo, T. G., Ramírez Islas, M. E., Zegarra Martínez, H. G., Uribe Hernández, R. Arce Ortega, J. M. (2006). Semanart - Inecc. Retrieved from [www.inecc.gob.mx](http://www.inecc.gob.mx): <http://www.inecc.gob.mx/descargas/publicaciones/509.pdf>

Flores, N., & col., y. (2001). Utilización de lodos residuales en la restauración de suelos contaminados con hidrocarburos. In V. C.

Ambientales (Ed.). Pachuca.

García, A. y Bello, A. , 2004. Diversidad de los organismos del suelo y transformaciones de la materia orgánica. Memorias. I Conferencia Internacional Eco-Biología del Suelo y el Compost.. Eco-Biología del Suelo y el Compost, p. 211.

Google Earth, 2015.

Galan, P. (2004). ambiente-ecologico. Retrieved from www.ambiente-ecologico.com: <http://www.ambiente-ecologico.com/revist30/contpe30.htm>.

Luque, J. (1995). Características edáficas de suelos afectados por derrames de petróleo.

Organización Panamericana de la Salud. (1999). Introducción a la toxicología ambiental. México: Lilia Albert.

Petro Cardona, P. H., & Mercado Montero, G. D. (2014). Biorremediación de suelos contaminados por derrames de hidrocarburos derivados del petróleo en Colombia. Universidad de San Buenaventura seccional Cartagena, Cartagena de Indias.

Sacarino, C., Ercoli, E., Gálvez, J., & Videla, O. (2001). Evaluación de dos años de experiencias de campo en biorremediación de suelos. Universidad de Cuyo, Argentina: ASTRA C.A.P.S.A. Laboratorio de Bioprocesos.

Universidad de Antofagasta. (2005, abril). universidad de antofagasta. Retrieved from [www.uantof.cl](http://www.uantof.cl): <https://www.uantof.cl/>

