



Atenuación natural y biorremediación de suelos contaminados por hidrocarburos, Amazonas, Perú

Natural attenuation and bioremediation of contaminated soil by hydrocarbons, Amazonas, Peru

Rosa Luz Fernández Valqui¹ , Elí Pariente Mondragón² 

RESUMEN

El presente estudio de aplicación de las técnicas "Atenuación natural y Biorremediación de suelos contaminados por hidrocarburos" tuvo como objetivos, caracterizar la atenuación natural y biorremediación de los hidrocarburos totales de petróleo proveniente de un suelo agrícola afectado por derrames de petróleo; determinar en pruebas experimentales la evolución de la atenuación natural y biorremediación en función del tiempo; así mismo, seleccionar los factores que influyen en el desarrollo de la atenuación natural y biorremediación. El proceso metodológico consistió en un análisis de los parámetros del suelo, pruebas experimentales, análisis de las concentraciones de hidrocarburos totales de petróleo (HTP) y cuenta bacteriana. En este estudio se halló que las técnicas de atenuación natural y biorremediación pueden aportar con la limpieza de un suelo afectado o contaminado por HTP, con solo la aplicación de compost y agua. Este trabajo de investigación incluye descripciones, ilustraciones, análisis de suelos, y una integración de información de las técnicas de limpieza de suelos contaminados y sobre la situación actual del suelo afectado en el Km 397+300 tramo II del Oleoducto Norperuano.

Palabras clave: afectación, remediación, suelo, análisis.

ABSTRACT

The present study of application of techniques "Natural attenuation and bioremediation of contaminated soil by hydrocarbons" aimed to characterise the natural attenuation and bioremediation of total oil hydrocarbons from agricultural land affected by oil spills; determine in experimental tests the evolution of natural attenuation and bioremediation as a function of time; also, select the factors that influence the development of natural attenuation and bioremediation. The methodological process consisted of an analysis of the soil parameters, experimental tests, analysis of the concentrations of total oil hydrocarbons (PHT) and bacterial counts. In this study, it was found that the techniques of natural attenuation and bioremediation can contribute to the cleaning of a soil affected or contaminated by HTP, with only the application of compost and water. This research includes descriptions, illustrations, soil analysis and also an investigation of contaminated soil cleaning techniques and the current situation of the affected soil is km 397 + 300 section II of the North Peruvian Pipeline.

Keywords: affectation, bioremediation, soil, analysis.

¹Universidad Nacional Toribio Rodríguez de Mendoza de Amazonas, Facultad de Ingeniería Civil y Ambiental, Chachapoyas, Perú.

²Universidad Nacional Toribio Rodríguez de Mendoza de Amazonas, Facultad de Ingeniería y Ciencias Agrarias, Chachapoyas, Perú.

*Autor de Correspondencia, e-mail: luz.tauro7@gmail.com

I. INTRODUCCIÓN

Los suelos presentan un umbral específico de estabilidad, es decir, una capacidad para adecuarse de acuerdo a las interacciones humanas, sin entrar en procesos de degradación, lo cual puede variar en función del tiempo, del suelo y su ambiente. No obstante, una misma acción puede inducir procesos de diferente magnitud que pueden ser beneficiosos o adversos a sus umbrales de estabilidad (Acevedo-Sandoval, 2000). Las diferentes actividades humanas contribuyen a la afectación a contaminaciones de los suelos, causada principalmente, por residuos urbanos, industriales, y mineros, entre otros. Así mismo la contaminación por hidrocarburos y productos derivados del petróleo constituye una perturbación al ambiente debido a su naturaleza persistente y su tendencia a expandirse en el suelo y aguas superficiales (Sifuentes, 2014).

En la extracción del petróleo se ha desestimado el bienestar del ambiente, lo que ha contribuido a la degradación de los elementos vitales de los seres humanos, agua, aire, suelo. En Perú apenas existen esfuerzos sobre estudios de contaminación y remediación de suelos contaminados por hidrocarburos, en comparación con el aire y el agua referente a estudios de contaminación. Por lo que es necesario realizar estudios para conocer la situación actual de los suelos cercanos a los ramales del oleoducto norperuano, procesos e investigaciones indispensables para el uso adecuado y conservación de los suelos (Sifuentes, 2014).

Se ha encontrado petróleo en todos los continentes del planeta, excepto en la Antártida. Sin embargo, la distribución mundial de los yacimientos no es uniforme, se concentran en ocho grandes zonas petrolíferas, algunas de las cuales se encuentran en el mar y son las siguientes (CM, 2002):

- La de América del Norte, que incluye los Estados Unidos y Canadá (17%)
- La de América Central y del Sur, con México, Venezuela, Argentina y Brasil como principales países productores (12%)
- La de África del Norte, con Libia, Argelia y Egipto (5%)

- La del resto de África, con Nigeria (3%)
- Irán, Irak y Emiratos Árabes Unidos (20%)
- La de Extremo Oriente, que incluye Indonesia, China e India (20%)
- La de la Europa del Mar del Norte, con Gran Bretaña y Noruega como grandes productores (6%)

Los derrames de hidrocarburos tanto en el suelo como en el agua han sido un problema desde el descubrimiento del petróleo como combustible. Los derrames de petróleo y las descargas de desechos de petróleo al mar por parte de refinerías, fábricas o embarcaciones constituyen un potencial daño a los animales y plantas, las cuales pueden pasar a través de la cadena alimenticia de un área y ser ingeridos eventualmente por personas (Pascucci, 2011). Así mismo los procesos de explotación y transporte de hidrocarburos provocan efectos adversos al hombre y al ambiente de forma directa e indirecta deterioran gradualmente este último (Ponce, 2014).

En Sudamérica los principales países explotadores de petróleo son Venezuela, México y Colombia, y en menor proporción Ecuador y Perú. En el Perú, desde el año 2003, existe un incremento de reservas probadas y probables tanto de petróleo crudo como de hidrocarburos líquidos. A pesar de una historia de muchos años de producción de petróleo, no se evidencia el agotamiento del recurso. El incremento de la actividad petrolera de los últimos años, motivados por los elevados precios del petróleo, ha permitido revertir la tendencia negativa tanto en producción como en reservas. A pesar del relativamente reciente incremento en la producción de petróleo en el Perú, este resulta insuficiente para satisfacer la demanda interna, por lo que se hace necesaria la importación de crudo (OSINERGMIN, 2005).

En el Perú se encuentra el oleoducto Norperuano de Petroperú que entro en operaciones en el año de 1972. Tiene 854 Km de longitud y dos ramales. El Oleoducto Principal, que fue el primero en ser construido, se divide en el Tramo I y Tramo II y va desde la Estación 1 en San José de Saramuro 2 hasta el Terminal Bayóvar 3. El Tramo I inicia en la Estación 1 y llega hasta la Estación 5 en Saramiriza 4, ambas ubicadas en el

Departamento de Loreto. El Tramo II comprende las Estaciones 5, 6, 7, 8 y 9, y cumple la función de asegurar el transporte del petróleo hasta el Terminal Bayóvar (El Peruano, 2015). Desde 1977 al 2016, la tubería del oleoducto ha sufrido 61 roturas y consecuentes derrames de petróleo; no cuenta con un Estudio de Impacto Ambiental (EIA), pero se maneja con un Programa de Adecuación y Manejo Ambiental (PAMA) que establece su compromiso de adoptar medidas de mantenimiento integral de las tuberías para evitar impactos negativos en el ambiente (Salazar, 2016).

La principal fuente de contaminación en el Departamento de Amazonas es el oleoducto Norperuano, el cual ha sufrido muchas roturas en los diferentes tramos

que atraviesan distintos ecosistemas de la región. Desde el año 2011, cuando el OEFA asumió competencias de fiscalización ambiental en el subsector hidrocarburos, hasta el 2016, se han registrado 20 emergencias ambientales significativas en el oleoducto Norperuano de Petroperú de las cuales seis ocurrieron en Amazonas (OEFA, 2016) (Tabla 1). Esta información resulta alarmante y debería generar concientización y toma de medidas urgentes en cuanto a la generación y al tratamiento de estos residuos generados para el cuidado del medio ambiente y de la humanidad (Ward, 2004). El principal derrame en el Departamento de Amazonas ocurrió el 25 de enero del 2016 en la provincia de Bagua (ARA, 2016).

Tabla 1. Derrames de petróleo en el Departamento de Amazonas

Fecha de emergencia	Descripción	Región	Provincia	Distrito
03/04/2011	Derrame ocurrido en la estación N°7 progresiva km 513+500-tramo II	Amazonas	Utcubamba	El Milagro
04/09/2012	Derrame ocurrido en el km 397+300tramo II	Amazonas	Condorcanqui	Nieva
21/09/2013	Derrame ocurrido en el km 504+400 tramo-II	Amazonas	Bagua	Bagua
19/02/2015	Progresiva km 504+086 tramo II	Amazonas	Bagua	La Peca
06/11/2015	Km 516+408 tramo II	Amazonas	Utcubamba	El Milagro
25/01/2016	km 440+785 tramo II	Amazonas	Bagua	Imaza
10/08/2016	Km 365 del Oleoducto Norperuano	Amazonas	Condorcanqui	Nieva

Fuente: Autoridad Regional Ambiental de Amazonas –ARA 2016

Esta investigación “Atenuación natural de suelos contaminados con hidrocarburos” pretendió estudiar la atenuación natural y la biorremediación de los hidrocarburos totales de petróleo (HTP), en suelos contaminados con HTP, a través de pruebas experimentales. Al mismo tiempo analizó los factores que influyen en la evolución de la remediación natural (Atenuación natural). No obstante, contribuye a establecer el tiempo que puede llevar a un suelo contaminado a rehabilitarse de forma natural.

Este trabajo de investigación pretendió reducir la concentración de hidrocarburos totales de petróleo mediante una serie de mecanismos y así poder evitar el riesgo a la salud humana y ecológica. Así mismo, este trabajo consideró como objetivos específicos: (1) Caracterizar la atenuación natural y biorremediación

de los hidrocarburos totales del petróleo proveniente de un suelo agrícola afectado por derrame de petróleo, (2) determinar en pruebas experimentales de la evolución de la atenuación natural y biorremediación en función del tiempo, y (3) seleccionar los factores que influyen en el progreso de la atenuación natural y la biorremediación.

II. MATERIALES Y MÉTODOS

Método

El suelo analizado fue obtenido de las áreas donde anteriormente ocurrió un derrame de petróleo. Corresponde a un suelo afectado por hidrocarburos totales del petróleo.

Caracterización del suelo

La caracterización de un suelo afectado por hidrocar-

buos u otras sustancias peligrosas permite conocer las características de funcionamiento del subsuelo como filtro amortiguador, y el comportamiento de los contaminantes en él (Flores *et al.*, 2004).

En principio, se realizó la caracterización del suelo en estudio proveniente del área afectada por un derrame de petróleo, específicamente del Km 397 + 300 Tramo II del oleoducto Norperuano; conteniendo concentraciones escasas de hidrocarburos, en un rango de 3,96 mgKg⁻¹ a 14,766 mgKg⁻¹.

Seguidamente se realizó la caracterización del suelo

de estudio. Este consistió en la determinación de los principales parámetros físicos, químicos y biológicos del suelo afectado por el derrame de hidrocarburos (Tabla 2). Así mismo, con la finalidad de poder determinar la evolución de la atenuación natural y la biorremediación en función al tiempo, se procedió a contaminar el suelo con hidrocarburos solicitados a la refinería El Milagro en la Provincia de Utcubamba. El suelo se contaminó en una concentración de 66,508 mgKg⁻¹, para luego realizar nuevamente una caracterización de los parámetros del suelo.

Tabla 2. Técnicas empleadas en la caracterización del suelo estudiado

Parámetros	Técnicas utilizadas
Potencial de hidrógeno (pH)	Método del potenciómetro en relación (1:1)
Conductividad eléctrica	Del extracto acuoso en relación al suelo (1:1)
P,K,C,M,O,N	Método de Walkley y Black
Análisis mecánico (Arena, Limo y Arcilla)	Método del hidrómetro
Clase textural	Método del hidrómetro
Capacidad de intercambio catiónico (CIC)	Saturación con acetato de amonio
Cationes cambiables	Remplazamiento con acetato de amonio
Cuenta bacteriana	Método de Cuenta en placa

Experimentación en cajones

El experimento consistió en la preparación y en el acondicionamiento de 12 cajones de madera, que sirvieron como contenedores de almacenamiento, a los cuales se añadió 2.732 kg de suelo contaminado con HTP a cada uno. Las variables consideradas fueron las siguientes y se siguió el proceso metodológico de Corona (2004):

- Contenido de agua (15%).
- Adición de compost

Para la adición de nutrientes, se consideró la concentración de carbono presente en el suelo, partiendo de la relación 100:10:1 (C:N:K), así como las concentraciones de carbono, nitrógeno y potasio para la degradación del suelo. Se añadió compost como nutriente orgánico en la proporción C, N y K (100:10:1).

A cada cajón se le agregó 248,21g de nitrógeno debido a que fue la mayor proporción que se requirió, y es la que en su mayoría los microorganismos necesitan para su nutrición (Gondim, 2013) (Tabla 3).

Las pruebas en laboratorio se consideraron sumamente importantes para poder conocer la evolución de la atenuación natural y biorremediación del suelo conta-

minado con HTP.

Cuenta bacteriana

Con la finalidad de investigar el contenido de microorganismos viable en el suelo, la técnica más utilizada es la técnica de cuenta en placa (Nyer, 1993). Esta técnica contribuye a identificar el número de colonias presentes en el suelo. Se realizaron dos conteos de microorganismos, el primero a cero días, y el segundo a los 60 días.

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Caracterización de los parámetros del suelo

La caracterización del suelo se realizó al extraer la muestra de suelo, al afectar el suelo y luego de la experimentación en los cajones, mediante técnicas experimentales utilizadas en el Laboratorio de Investigación de Agua y Suelo de la Universidad Nacional Toribio Rodríguez de Mendoza de Amazonas (UNTRM), documentando con ello, los parámetros físico-químicos y se expresan en la tabla 4.

Con base en los resultados obtenidos de la caracterización del suelo puede afirmarse que es un suelo ácido, con pH 5,35 – 6,98, parámetro favorable en los procesos de degradación, considerando que luego de ser

Tabla 3. Clasificación y características de cada cajón.

Código	Clasificación	Características
C1	C1:1	Suelo con HTP + 15% contenido de agua
	C1:2	Suelo con HTP+15% contenido de agua (duplicado)
	C1:3	Suelo con HTP +15% contenido de agua (duplicado)
	C1:4	Suelo con HTP +15% contenido de agua (duplicado)
	C1:5	Suelo con HTP +15% contenido de agua (duplicado)
	C1:6	Suelo con HTP +15% contenido de agua(duplicado)
	C1:7	Suelo con HTP +15% contenido de agua(duplicado)
C2	C2:1	Suelo con HTP +15% contenido de agua + compost (duplicado)
	C2:2	Suelo con HTP +15% contenido de agua + compost (duplicado)
	C2:3	Suelo con HTP +15% contenido de agua + compost (duplicado)
	C2:4	Suelo con HTP +15% contenido de agua + compost (duplicado)
	C2:5	Suelo con HTP +15% contenido de agua + compost (duplicado)
	C2:6	Suelo con HTP +15% contenido de agua + compost (duplicado)
	C2:7	Suelo con HTP +15% contenido de agua + compost (duplicado)

Tabla 4. Resultados de la caracterización de los parámetros del suelo (durante el muestreo del suelo)

Parámetros	Suelo afectado con HTP	Unidades	
Potencial de Hidrógeno (pH)	5,38		
Conductividad eléctrica (CE)	0,05	dS/m	
Fósforo (P)	4,18	Ppm	
Potasio (K)	183,92	Ppm	
Carbono (C)	3,64	%	
Nitrógeno (N)	0,31	%	
Análisis Mecánico	Arena	60	%
	Limo	14	%
	Arcilla	26	%
Clase textural	Fr,Ar,A,		
Capacidad de intercambio catiónico (CIC)	25,60	meq/100g	
Cationes Cambiables	Ca ⁺²	16,53	meq/100g
	Mg ⁺²	3,14	meq/100g
	K ⁺	0,36	meq/100g
	Na ⁺	0,18	meq/100g
	Ar ⁺³ + H ⁺	0,16	meq/100g

afectado el suelo, la concentración de HTP fue 66,6mg/kg⁻¹. Los valores de Conductividad Eléctrica (C.E) luego de la experimentación fueron de 0,80-0,09dS/m indicando suelos no salinos 0,2 (dS/m) (Flores, 1991); interpretándose como un suelo cuya presencia de sales no es dañina para el mismo suelo y cultivos (Badia, 1992). Por lo tanto, estos volúmenes (0,80-0,09dS/m) no fueron una limitante para el buen funcionamiento de los microorganismos (Santos, 2007).

De acuerdo a la concentración de nutrientes Fósforo (P), Potasio (K), Nitrógeno (N) y Carbono (C) es un suelo con concentración alta en fósforo, potasio y carbono, y

pobre en nitrógeno total (N). Sin embargo, los microorganismos requieren nutrientes inorgánicos (N, P) en cantidades mínimas para soportar el crecimiento celular y sustentar el proceso de biodegradación y en este caso se cumplió con el requisito mínimo (Santos, 2007).

El análisis mecánico o características texturales, expresan la cantidad de partículas presentes en el suelo (arcillas, limos, arenas). En este estudio, en los análisis finales (Tablas 6 y 7) se aprecia la presencia de la clase textural Arena Franca (AFr) en proporciones arena (88%), limo (6%) y arcilla (6%), por lo que, teóricamente, su permeabilidad es rápida (Guerrero, 2013),

indicando mayor ventaja para el paso del agua, oxígeno y nutrientes necesarios en el suelo (Narro, 1994).

La Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC) después de la experimentación fue de 29.60-11.20 meq/100 g, indicando valores altos de 15-30 meq/100g (INTAGRI, 2015); e interpretándose como alta habilidad del suelo para retener nutrientes por el contenido del material Ilita y Clorita presente, puesto que es un suelo rico en materia orgánica (Chavarría,

2011). La CIC es importante dentro del potencial nutricional del suelo porque tiene la propiedad de comportarse como iones de carga negativa, que son capaces de retener o absorber cationes. Esta capacidad del suelo es lo que permite retener los elementos necesarios para nutrir a las plantas (Garrido, 1993). La CIC también almacena nutrientes para las plantas Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^{+} , y posteriormente los libera de forma paulatina (Zavaleta, 1992).

Tabla 5. Resultados de la caracterización de los parámetros del suelo luego de la afectación del suelo con HTP

Parámetros		Suelo afectado con HTP	Unidades
Potencial de Hidrógeno (pH)		7,00	
Conductividad eléctrica (CE)		0,03	dS/m
Fósforo (P)		1,58	Ppm
Potasio (K)		69,92	Ppm
Carbono (C)		3,14	%
Nitrógeno (N)		0,27	%
Análisis Mecánico	Arena	82,02	%
	Limo	8,0	%
	Arcilla	10,0	%
Clase textural		A,Fr,	
Capacidad de intercambio catiónico (CIC)		8,07	meq/100g
Cationes Cambiables	Ca^{+2}	6,61	meq/100g
	Mg^{+2}	0,99	meq/100g
	K^{+}	0,10	meq/100g
	Na^{+}	0,17	meq/100g
	$Ar^{+3} + H^{+}$	0,00	meq/100g

Tabla 6. Resultados de la caracterización de los parámetros del suelo luego de la experimentación en cajones (suelo con nutrimento)

Parámetros		Suelo afectado con HTP	Unidades
Potencial de Hidrógeno (pH)		6,98	
Conductividad eléctrica (CE)		0,80	dS/m
Fósforo (P)		21,30	Ppm
Potasio (K)		1037,88	Ppm
Carbono (C)		5,60	%
Nitrógeno (N)		0,48	%
Análisis Mecánico	Arena	84,0	%
	Limo	8,0	%
	Arcilla	8,0	%
Clase textural		A,Fr,	
Capacidad de intercambio catiónico (CIC)		29,60	meq/100g
Cationes Cambiables	Ca^{+2}	20,86	meq/100g
	Mg^{+2}	4,00	meq/100g
	K^{+}	2,52	meq/100g
	Na^{+}	0,59	meq/100g
	$Ar^{+3} + H^{+}$	0,00	meq/100g

Concentración de HTP en el suelo

Se realizaron dos muestreos con la finalidad de analizar las concentraciones de HTP en las muestras experimentales: un muestreo inicial y un segundo muestreo durante el experimento. El periodo entre cada mues-

treo fue de 60 días. Se obtuvieron muestras simples para determinar las concentraciones de hidrocarburos totales del petróleo por el método de cromatografía de gases para HTP de la EPA (Environmental Protection Agency) (Tablas 8 y 9).

Tabla 7. Resultados de la caracterización de los parámetros del suelo luego de la experimentación en cajones (suelo sin nutrimento)

Parámetros	Suelo afectado con HTP	Unidades
Potencial de Hidrógeno (pH)	5,35	
Conductividad eléctrica (CE)	0,09	dS/m
Fósforo (P)	7,74	Ppm
Potasio (K)	132,05	Ppm
Carbono (C)	2,22	%
Nitrógeno (N)	0,19	%
Análisis Mecánico	Arena	88,0
	Limo	6,0
	Arcilla	6,0
Clase textural	A,Fr,	
Capacidad de intercambio catiónico (CIC)	11,20	meq/100g
Cationes Cambiables	Ca ⁺²	6,28
	Mg ⁺²	1,44
	K ⁺	0,16
	Na ⁺	0,14
	Ar ⁺³ + H ⁺	0,09

Tabla 8. Concentraciones iniciales de HTP. Muestreo a los cero días (suelo recientemente afectado por HTP)

Concentración de H ₂ O	Cajón	Concentración de HTP (mg/kg)	ECA para suelos agrícolas (mg/kg)
15%	C1:1	66,580	200
	C1:2	66,580	
	C1:3	66,580	
	C1:4	66,580	
	C1:5	66,580	
	C1:6	66,580	
	C1:7	66,580	
	C2:1	66,580	
	C2:2	66,580	
	C2:3	66,580	
	C2:4	66,580	
	C2:5	66,580	
	C2:6	66,580	
	C2:7	66,580	

En el primer muestreo se obtuvieron concentraciones consideradas como iniciales (66,580 mg/kg⁻¹), mientras que, en el segundo muestreo, dado a los 60 días, las concentraciones disminuyeron considerablemente (0,6mg/ kg⁻¹). Esto implica que se logró una degradación de los HTP estudiados. Por lo tanto, indican que los factores ambientales estudiados (aireación, humedad, agua y nutrientes) favorecieron la degradación como biostimuladores para la mejor actividad de los microorganismos.

Los análisis realizados al inicio y después de la investigación se encuentran por debajo de los Estándares de Calidad Ambiental para suelos agrícolas (MINAM, 2017).

Los valores límites establecidos en los ECAs para suelos de uso agrícola son los siguientes (MINAM, 2017).

1. Hidrocarburos de Petróleo de Fracción F1 o Fracción Ligera: 200 mg
2. Hidrocarburos de Petróleo de Fracción F2 o Fracción Media: 1200 mg
3. Hidrocarburos de Petróleo de Fracción F3 o Fracción Pesada: 3000 mg

Síntesis de resultados

En el muestreo inicial, inmediatamente al afectar el suelo con HTP, se obtuvieron concentraciones iniciales considerables. Pasados 60 días, las concentraciones se redujeron considerablemente. Estos resultados documentan una degradación de HTP en los primeros días (60 días) para HTP. Esto indica, que, de acuerdo a los factores ambientales estudiados (aireación, contenido de humedad y nutrientes), sirvieron como bioestimu-

Tabla 9. Concentraciones de HTP a los 60 días (Muestreo)

Concentración de H ₂ O	Cajón	Concentración de HTP (mg/kg)	ECA para suelos agrícolas (mg/kg)
15%	C1:1	<0,603	200
	C1:2	<0,603	
	C1:3	<0,603	
	C1:4	<0,603	
	C1:5	<0,603	
	C1:6	<0,603	
	C1:7	<0,603	
	C2:1	<0,603	
	C2:2	<0,603	
	C2:3	<0,603	
	C2:4	<0,603	
	C2:5	<0,603	
	C2:6	<0,603	
	C2:7	<0,603	

lantes para la mayor actividad de los microorganismos.

Eficiencia de remoción de los HTP

La eficiencia de remoción obtenida en cada uno de los cajones fue mediante el cálculo de eficiencia (Corona, 2004).

Como se puede observar en la tabla 8, la eficiencia total de remoción en cada cajón es de 99.09%, es decir, que las concentraciones de HTP han disminuido satisfactoriamente con respecto a la concentración de HTP que se tenía inicialmente, notándose que en los 14 cajones se presentó la disminución y alta eficiencia de remoción de HTP (100%).

Como puede observarse en la tabla 9, las eficiencias de remoción resultaron satisfactorias, y es que las concentraciones iniciales de HTP disminuyeron en más de un 95% con respecto a lo que se tenía inicialmente ($66,6\text{mg/kg}^{-1}$).

De acuerdo en los Estándares de Calidad Ambiental (ECA suelo) (MINAM, 2017) y considerando los tipos de suelo existentes allí (Suelo agrícola, Suelo residencial y Suelo comercial) para cualquiera de los casos allí presentes, el trabajo experimental los incluye indistintamente. Así mismo, si consideramos el nivel más bajo “Suelo agrícola”, la normativa menciona el valor límite de hidrocarburos de petróleo de fracción F1, o fracción ligera, considerando 200mg/kg^{-1} . Los resultados muestran concentraciones inferiores al valor límite mínimo para fracción ligera (MINAM, 2017).

Diversos autores reportan resultados similares para

hidrocarburos aromáticos policíclicos de interés obteniendo más de 80% de remoción (Corona, 2004). No obstante, concluimos que los factores ambientales, especialmente el contenido de agua es de gran importancia si el objetivo es degradar HTP, HAP, así como mencionan estudios realizados anteriormente (Liu *et al.*, 2001). Por lo tanto, a mayor contenido de agua mayores eficiencias de remoción. Para el caso del experimento con contenido de agua 15% constante, se obtuvieron los mismos resultados de degradación. Con base en lo demostrado experimentalmente, el agua es un factor fundamental para la degradación de los hidrocarburos. Sin embargo, el agua puede afectar la actividad de los microorganismos y la atenuación y biorremediación de los HTP, por influencia de la aireación, difusión del contaminante y la movilidad de los microorganismos, factores cruciales para la remoción (Liu *et al.*, 2001).

El control de los factores ambientales añadidos al suelo es la causa principal para la degradación de los HTP.

Cuenta bacteriana

La determinación de las UFC/g, de suelo, se realizó al inicio de la investigación y después de la experimentación entre el periodo de 60 días. Esto se realizó con la finalidad de encontrar una relación entre las concentraciones y las bacterias en el suelo.

En principio, con la finalidad de evitar estropear el suelo en la prueba de cuenta en placa, se realizaron pruebas con dos métodos “enriquecimiento con agar

nutritivo” y “enriquecimiento con agua destilada”, llegando a determinar que con el enriquecimiento de agar nutritivo se encuentra 28 UFC/g.

Los valores obtenidos en el segundo muestreo, durante la técnica en placa, se expresan en la tabla 10.

Para la determinación de las unidades formadoras de colonias (UFC) por gramo de suelo se procedió a realizar un cultivo de bacterias a inicios de la investigación y a final de la investigación, esto fue para tener una relación entre la concentración de HTP y las bacterias para finalmente analizarlas (Tabla 11).

Los valores obtenidos de UFC fueron realizadas por dos diluciones, mediante la técnica de cuenta en placa. En la primera dilución se hallaron entre 28-250 UFC/g. Esta se realizó al inicio del experimento sin afectar al suelo con HTP. Seguidamente se realizó una segunda dilución a los 60 días, obteniendo 18 UFC/g. En esta hubo una disminución de la población microbiana en todos los cajones experimentales, lo que

confirma una menor respiración microbiana. Sin embargo, esta disminución no alteró las concentraciones de hidrocarburos, las eficiencias de remoción obtenidas fueron las esperadas. El proyecto de investigación en principio incluyó un análisis estadístico, siguiendo las pautas de un DCA, y el proceso de los datos aplicando un análisis de varianza (prueba f). No obstante, dado que las concentraciones finales luego del experimento resultaron con igual concentración ($<0.6\text{mg/kg}^{-1}$) y con una eficiencia de remoción al 99.09% de HTP, el análisis estadístico fue omitido, puesto que el análisis estadístico sería no significativo.

IV. CONCLUSIONES

Las características físicas, químicas y biológicas del suelo son fundamentales si se desea conocer si la atenuación natural y la biorremediación son viables como técnicas de recuperación de suelos afectados con HTP. Mediante las pruebas experimentales, se obtuvo 99-

Tabla 10. UFC mediante la técnica de cuenta en placa a los 60 días.

Tiempo (días)	Código	Código de placa	UFC/g
60	C1	C1:1	6
		C1:1 (10 ⁻²)	12
		C1:2	5
		C1:2(10 ⁻²)	6
		C1:3	7
		C1:3(10 ⁻²)	6
		C1:4	2
		C1:4(10 ⁻²)	9
		C1:5	10
		C1:5 (10 ⁻²)	5
		C1:6	3
		C1:6(10 ⁻²)	2
		C1:7	28
		C1:7(10 ⁻²)	13
60	C2	C2:1	69
		C2:1(10 ⁻²)	45
		C2:2	58
		C2:2(10 ⁻²)	28
		C2:3	29
		C2:3(10 ⁻²)	28
		C2:4	30
		C2:4 (10 ⁻²)	18
		C2:5	43
		C2:5(10 ⁻²)	26
		C2:6	35
		C2:6(10 ⁻²)	28
		C2:7	54
		C2:7(10 ⁻²)	31

Tabla 11. Conteo de bacterias a inicio de la investigación.

Tiempo (días)	Cuenta en placa	Código de placa	UFC/g
0	Enriquecimiento con agar nutritivo	P1:1	28
		P1:2	23
		P1:3	15
	Enriquecimiento con agua destilada	P2:1	10
		P2:2	9
		P2:3	7

09% de degradación de los hidrocarburos totales del petróleo (HTP).

El factor importante que favoreció la degradación de los microorganismos en un periodo corto de tiempo fue el contenido de agua constante.

Mediante el desarrollo del experimento, se halló que los cajones experimentales con nutrientes y sins nutrientes, y solo con 15% de contenido de H₂O, presentaron igual eficiencia de remoción.

Las concentraciones de HTP no evidenciaron toxicidad en ninguno de los cajones experimentales, lo que se evidenció con las concentraciones iniciales del experimento y, finalmente, con sus resultados iguales (0,6 mg/kg⁻¹).

V. CONTRIBUCIÓN DE LOS AUTORES

Todos los autores participaron en la redacción del manuscrito inicial, revisión bibliográfica, y en la revisión y aprobación del manuscrito final

VI. CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran no tener conflicto de intereses.

VII. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

Acevedo-Sandoval, O. A. 2000. *Degradación y Contaminación de los suelos del estado de Hidalgo*. Informe. Pachuca (México).

ARA (Autoridad Regional Ambiental). 2016. *Informe N° - 2016 - GR Amazonas/ARAAMAZONAS/DEGAMJRR*. Chachapoyas (Perú)

Badia, D. 1992. "Suelos Afectados por Sales". *Buill. Soc. Cat. Cien* 13: 609-629.

Chavarría, F. 2011. *Edafología I*. Caldas (Colombia): Universidad de Caldas.

CM (Comunidad de Madrid). 2002. *El petróleo, el recorrido de la energía*. Madrid (España): Dirección General de Industria, Energía y Minas

Corona, L. 2004. *Atenuación natural de suelos contaminados con hidrocarburos*. Tesis de Grado. Universidad Nacional Autónoma de México. Ciudad de México (México).

El peruano (2015). "Resolución de consejo directivo N° 044-2015-OEFA/CD. Resolución directo-ral N° 844-2015-OEFA/DFSAI." Lima (Perú).

Flores, A. 1991. *Suelos Salinos y Sódicos*. Tesis de Doctorado. Instituto Superior de Ciencias Agrarias de la Habana. La Habana. (Cuba).

Puente, F., M. Torras, y S. Tellez. 2004. *Medidas de mitigación para suelos contaminados por derrames de hidrocarburos en infraestructura de transporte terrestre*. Publicación técnica. Sanfadila (México).

Garrido, S. 1993. *Interpretación de Análisis de Suelo*. Getafe (Madrid): Ministerio de Agricultura Pesca y Alimentación.

Gondim Porto, C. 2013. *Análisis microbiológico de un suelo agrícola mediterráneo tras la aplicación de lodos de depuradora urbana*. Tesis de Doctorado. Universidad Complu-tense de Madrid. Madrid (España).

Guerreo, J. 2013 *Recuperación de suelos degradados por erosión, contaminación, salinización y acidez*. Tesis de Grado. Universidad Nacional Agraria La Molina. Lima (Perú).

INTAGRI. 2015. *La capacidad de intercambio catiónico del suelo*. <https://www.intagri.com/articulos/suelos/lacapacidad-de-intercambio-cationico-del->

