

ANÁLISE DA DEGRADAÇÃO DE SOLOS COSTEIROS CONTAMINADOS COM PETRÓLEO UTILIZANDO O CONSÓRCIO BACTERIANO, *BACILLUS* E *AGROBACTERIUM*

ANALYSIS OF THE DEGRADATION OF COASTAL SOILS CONTAMINATED WITH CRUDE OIL USING THE BACTERIAL CONSORTIUM, *BACILLUS* AND *AGROBACTERIUM*

ANÁLISIS DE LA DEGRADACIÓN DE SUELOS COSTEROS CONTAMINADOS CON PETRÓLEO CRUDO UTILIZANDO EL CONSORCIO BACTERIANO, *BACILLUS* Y *AGROBACTERIUM*

Jaqueline Heidy Chirre-Flores *

Universidad Nacional de Ingeniería, Lima, Facultad de Ingeniería Ambiental, Perú.

Hugo David Chirinos-Collantes*

Universidad Nacional de Ingeniería, Lima, Facultad de Ingeniería Ambiental, Perú.

Roberto Robles-Calderón

Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Facultad de Química e Ingeniería Química, Perú.

Ana Cecilia Valderrama-Negrón

Universidad Nacional de Ingeniería, Facultad de Ciencias, Perú.

Nélida Marín-Huachaca

Universidad Nacional de Ingeniería, Lima, Facultad de Ingeniería Ambiental, Perú.

María Rosario Viera-Palacios

Universidad Nacional de Ingeniería, Lima, Facultad de Ingeniería de Petróleo, Perú.

Nancy Oliveth Encarnación-Bermúdez

Universidad Nacional de Ingeniería, Lima, Facultad de Ingeniería de Petróleo, Perú.

* Autor correspondente

e-mail: jchirref@uni.edu.pe

Received 14 June 2025; received in revised form 30 September 2025; accepted 16 October 2025.

RESUMO

Introdução: Para o processo de degradação aeróbia do petróleo foram utilizados como consórcio bacteriano *Bacillus* e *Agrobacterium*, que são duas cepas bacterianas que juntamente com as bactérias heterotróficas nativas do solo contaminado com óleo conseguiram eliminar os contaminantes presentes no solo costeiro do norte do Peru. **Objetivos:** Analisar a biodegradação de solos costeiros do Peru contaminados com uma concentração de 25% de petróleo, utilizando o consórcio bacteriano de *Bacillus* e *Agrobacterium*. **Métodos:** A técnica de cromatografia gasosa (GC) foi utilizada para determinar a eficiência de degradação de diferentes frações de hidrocarbonetos totais de petróleo após biodegradação. **Resultados:** As duas cepas bacterianas conseguiram reduzir a concentração dos hidrocarbonetos de C₆ para C₁₀, (fracção F₁) em média 99%; C₁₀ a C₂₈ (fracção F₂) 71,2% e C₂₈ a C₄₀ (fracção F₃) 35% da concentração original. **Discussão:** Esta última fracção, F₃, contendo os compostos pesados, os hidrocarbonetos aromáticos policíclicos (HAPs), incluindo bifenilo, naftaleno e antraceno, entre outros, após 120 dias de incubação a 25°C, pH=6,0±0,2, apresentou menor porcentagem de biodegradação do que as outras fracções. **Conclusões:** As bactérias *Bacillus* e *Agrobacterium*, decompõem eficientemente os hidrocarbonetos. Contudo, a biodegradação pode depender das condições operacionais a que os consórcios estão expostos. Um aumento na taxa de biodegradação também foi observado nos sistemas mistos como resultado de uma possível interação entre as cepas bacterianas.

Palavras chave: Hidrocarbonetos totais de petróleo, biodegradação, microrganismos, solos costeiros, consórcio

ABSTRACT

Introduction: For the aerobic degradation process of crude oil, *Bacillus* and *Agrobacterium* were used as a bacterial consortium, which are two bacterial strains that together with the native heterotrophic bacteria from soil contaminated with oil achieved to eliminate the contaminants present in the coastal soil of the northern Peru. **Aims:** Analyze the biodegradation of coastal soils in Peru contaminated with a concentration of 25% crude oil, using *Bacillus* and *Agrobacterium* bacterial consortium. **Methods:** Gas chromatography (GC) technique was used to determine the degradation efficiency of different fractions of total petroleum hydrocarbons after biodegradation. **Results:** Both bacterial strains were able to reduce the concentration of hydrocarbons from C₆ to C₁₀ (fraction F₁) by an average of 99%; from C₁₀ to C₂₈ (fraction F₂) by 71.2%; and from C₂₈ to C₄₀ (fraction F₃) by 35% of the original concentration. **Discussion:** This last fraction, F₃, which contains heavy compounds, polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs), including biphenyl, naphthalene, and anthracene, among others, showed a lower percentage of biodegradation than the other fractions after 120 days of incubation at 25°C, pH = 6.0 ± 0.2. **Conclusions:** Bacteria *Bacillus* and *Agrobacterium*, efficiently decompose hydrocarbons. However, biodegradation may depend on the operating conditions to which the consortia are exposed. An increase in the biodegradation rate was also observed in the mixed systems as a result of a possible interaction between the bacterial strains.

Keywords: Total Petroleum Hydrocarbons, biodegradation, microorganisms, coastal soils, bacterial consortium.

RESUMEN

Introducción: Para el proceso de degradación aeróbica del petróleo crudo, se utilizaron las bacterias *Bacillus* y *Agrobacterium* como consorcio bacteriano, las cuales son dos cepas bacterianas que junto con las bacterias nativas heterótrofas del suelo contaminado con petróleo eliminaron en gran medida los contaminantes presentes en el suelo costero del norte del Perú. **Objetivos:** Analizar la biodegradación de los suelos costeros de Perú contaminados con una concentración de 25% de petróleo crudo, usando un consorcio bacteriano de *Bacillus* y *Agrobacterium*. **Métodos:** Se utilizó la técnica de cromatografía de gases (GC) para determinar la eficiencia de degradación de las diferentes fracciones de hidrocarburos totales de petróleo después de la biodegradación. **Resultados:** Las dos cepas bacterianas consiguieron reducir la concentración de los hidrocarburos: de C₆ a C₁₀, (fracción F₁) en un promedio 99%; C₁₀ a C₂₈ (fracción F₂) en un 71.2% y C₂₈ a C₄₀ (fracción F₃) en un 35% de la concentración original. **Discusión:** Esta última fracción, F₃, contiene compuestos pesados, los hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAPs), incluyen bifenil, naftaleno y antraceno, entre otros, después de 120 días de incubación a 25°C y pH 6.0±0.2, presentó menor porcentaje de biodegradación que las otras fracciones. **Conclusiones:** Las bacterias *Bacillus* y *Agrobacterium* descomponen eficientemente los hidrocarburos. Sin embargo, la biodegradación puede depender de las condiciones de operación al que están expuestas los consorcios. Se observó también un aumento de la tasa de biodegradación en sistemas de cepas mixtas, producto de una posible interacción entre las cepas bacterianas.

Palabras clave: Hidrocarburos Totales de Petróleo, biodegradación, microorganismos, suelos costeros, consorcio bacteriano.

1. INTRODUCCIÓN:

La biodegradación es la transformación de sustancias orgánicas mediante microorganismos, produciendo agua, dióxido de carbono y biomasa. El petróleo es una mezcla de hidrocarburos con compuestos no hidrocarburos, cuyos componentes son parafinas o alcanos (22%), cicloalcanos o naftenos (50%), aromáticos (17%) entre otros (Moubasher *et al.*, 2015).

Los hidrocarburos del petróleo son perjudiciales a la salud de los seres vivos cuando

se encuentran en la intemperie. Los hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP) tienen efectos mutagénicos y cancerígenos y causan problemas en el sistema endocrino (Dutta *et al.*, 2017). El efecto cancerígeno de estos contaminantes orgánicos en los órganos del cuerpo aparece después de períodos prolongados de exposición (Hernández *et al.*, 2017; Koual *et al.*, 2019).

Uno de los procesos de degradación de los hidrocarburos del petróleo se realiza mediante procesos metabólicos, porque se ha demostrado que las bacterias metabolizan a los hidrocarburos

del petróleo (Yan *et al.*, 2004). La degradación bacteriana de los hidrocarburos de petróleo incluye métodos aeróbicos y anaeróbicos, pero debido a la viscosidad e hidrofobicidad del petróleo, el suelo contaminado por hidrocarburos de petróleo suele ser superficial. A pesar de su hidrofobicidad, los alcanos de cadena larga y los HAP pueden ser degradados por microorganismos, pero a un ritmo lento (Chen *et al.*, 2017).

Las bacterias oxidantes de hidrocarburos necesitan adherirse a sustancias insolubles o gotitas de petróleo, en las que se puede observar un gran número de células de bacterias. Estos organismos provocan la degradación del petróleo y la descomposición de las manchas aceitosas en el ecosistema (Madigan *et al.* 2016).

El crecimiento microbiano y la actividad metabólica requieren macronutrientes esenciales para su desarrollo, como el nitrógeno y fósforo; los suelos contaminados con hidrocarburos suelen contener nutrientes limitados (Brook, 2001).

El metabolismo catabólico bacteriano para la degradación de hidrocarburos puede ser aeróbico o anaeróbico. La concentración de oxígeno afecta las tasas de degradación; de hecho, bajo condiciones aeróbicas, la biodegradación es más rápida y más eficiente porque el oxígeno es el aceptor final de electrones en la cadena representativa. En condiciones anaeróbicas, el aceptor final de electrones puede ser el nitrato, sulfato, o un átomo de hierro provenientes de los nutrientes del suelo, y la biodegradación es más lenta y a menudo insignificante en comparación con la degradación a condiciones aeróbicas (Nagkirti *et al.*, 2017).

Las bacterias hidrocarbonoclasticas han desarrollado mecanismos adaptativos para tolerar la presencia de hidrocarburos, como la capacidad de emulsionarlos y metabolizarlos, la activación de mecanismos de reparación del ADN, producción de moléculas involucradas en los mecanismos de detección de quórum para la formación de biopelículas, y regulación de bombas de eflujo y poros para controlar la concentración de hidrocarburos en la célula bacteriana (Ruiz *et al.* 2021).

La biorremediación es más efectiva cuando se lleva a cabo mediante consorcios microbianos complejos, en particular, se desarrollan de forma independiente en aquellas zonas históricamente contaminadas (Hesnawi & Adbeib 2013).

Muchos factores, como la temperatura, oxígeno, pH, concentración de las cepas

microbianas, biodisponibilidad, accesibilidad a factores de crecimiento, la estructura química y concentración de los hidrocarburos y las características del transporte celular, afectan la biodegradación de hidrocarburos por bacterias. El suelo alberga gran cantidad de microorganismos y constituye un ambiente propicio para la biodegradación de los hidrocarburos de petróleo (Alaidaroos, 2023; Pandolfo *et al.*, 2023).

2. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL:

2.1 Recolección de muestra

En este estudio, se recolectaron muestras de suelo de la zona norte de Lima en Perú, en el distrito de Ventanilla (11°51'54" S y 77°9'42"W), situado sobre el nivel del mar. Las muestras fueron recolectadas de diferentes puntos de muestreo cuidadosamente en bolsas esterilizadas y transportados al laboratorio para su posterior análisis.

Se realizó una mezcla de 5 kg. de suelo costero con 25% de petróleo crudo procedente de Brasil cuyas propiedades se muestran en la Tabla 1, asimismo, se le añadió 20% del consorcio bacteriano activado y 5% de agua potable para la difusión de los hidrocarburos hacia los microorganismos con la finalidad de obtener una adecuada biodegradación de los contaminantes del suelo costero (Escalante, 2002).

Tabla 1. Propiedades del petróleo crudo

Propiedad	Unidad	Valor	Norma
Densidad a 15°C	g/mL	0,88	ASTM D-1298
P. Específico 15,6/15,6°C	g/mL	0,88	Calculado
Densidad API	°API	29	Calculado
Azufre	%p/p	0,27	ASTM D-4294
N° de	mg	0,19	ASTM D-664
Neutralización	KOH/g		
Presión de Vapor Reid	kPa	21	ASTM D-6377
Punto de Vertido	°C	-18	ASTM D-97
Viscosidad 20°C	cSt	44	ASTM D-445
Viscosidad 40°C	cSt	18	ASTM D-445
Sulfhídrico disuelto	ppm v/v	2	ARAMCO H-3
Sulfhídrico evol. a 340°C	ppm p/p	9	REPSOL
Residuo de Carbón	%p/p	5	ASTM D-4530

Asfaltenos	%p/p	2	CALCULADO
Nitrógeno	ppm p/p	2891	ASTM D-4629
Cadmio	ppb	1	-
Calcio	ppm p/p	1	Abs. Atómica
Cobre	ppm p/p	0.7	Abs. Atómica
Fósforo	ppm p/p	<5	Abs. Atómica
Hierro	ppm p/p	1	Abs. Atómica
Níquel	ppm p/p	7	Abs. Atómica
Plomo	ppm	1	-
Silicio	ppm p/p	<10	Abs. Atómica
Sodio	ppm p/p	4	Abs. Atómica
Vanadio	ppm p/p	10	Abs. Atómica
Cloro Total	ppm	98	ASTM D-7536
Cloro fase inorgánica	ppm	87	ASTM D-7536
Cloro fase orgánica	ppm	11	ASTM D-7536
Agua por destilación	% vol	2	ASTM D-4006
Aromaticidad disponible 40°C	-	0.6	REPSOL
Aromaticidad requerida 40°C	-	0,001	REPSOL
Valor P 40°C	-	>3.9	REPSOL

Fuente: Assay Crudo Buzios. (2023).

2.2 Análisis microbiológico

Para la identificación de colonias de bacterias específicas y el análisis morfológico, se realizaron según la metodología descrita en el manual de Bergey para bacteriología determinativa (Holt *et al.*, 1994).

2.3 Caracterización e identificación de aislados bacterianos

Con base en la caracterización de aislados bacterianos, fueron identificados cepas representativas de los géneros *Bacillus* y *Agrobacterium*.

2.4 Condiciones de operación del consorcio bacteriano

Las características del consorcio bacteriano de la patente Ultra Archaea son:

Apariencia: Polvo fino, Estado físico: Sólido. Color: gris claro, Olor: ligero olor a aceite, Umbral de olor: No aplicable, pH: 8.5, Punto de fusión: > 842 °F (> 450 °C), Inflamabilidad (sólido, gas): Este producto no es inflamable, Densidad relativa: 2,6 g/cm³, Solubilidad (agua): < 0.9 mg/l, Temperatura de descomposición: > 932 °F (> 500 °C).

Otra información, Densidad aparente: 0.9 – 1.4 g/cm³.

2.5. Resultados

del conteo del consorcio bacteriano

Los promedios de conteos de las unidades formadoras de colonia UFC/mL de las bacterias, muestran una reducción de la población del consorcio bacteriano desde 3.8×10^8 UFC/g a 3.6×10^7 UFC/g de tratamiento de biorremediación de suelos contaminados con petróleo.

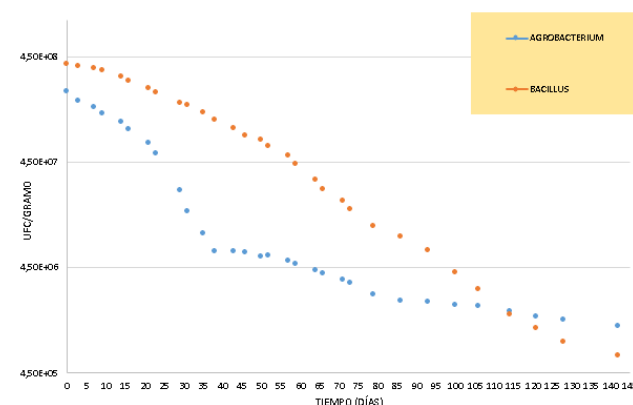


Figura 1. UFC/gramo del consorcio bacteriano vs Tiempo (días).

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN:

3.1. RESULTADOS

3.1.1. ANÁLISIS ESTADÍSTICOS

El análisis estadístico de los datos obtenidos se realizó utilizando el Software SPSS.

El planteamiento de la hipótesis es el siguiente:

Ho: Los datos tienen una distribución normal

Ha: Los datos no tienen una distribución normal

Nivel de Significancia

Confianza: 95%

Significancia (alfa): 5%

Tabla 2. Comparación de Pruebas de normalidad

	Kolmogorov-Smirnov ^a			Shapiro-Wilk		
	Estadístico	gl	Sig.	Estadístico	gl	Sig.
Tiempo	0.319	6	0.056	0.683	6	0.004
Prueba	0.202	6	0.200	0.853	6	0.167
HTP	0.268	6	0.200	0.853	6	0.167

* Esto es un límite inferior de la significación verdadera.

a. Corrección de significación de Lilliefors

Tabla 3. Prueba de normalidad de Shapiro - Wilk

	Estadístico	gl	p
Tiempo	0,683	6	0,004
Prueba	0,853	6	0,167
HTP	0,853	6	0,167

Criterio de decisión

Si $p \leq 0,05$ rechazamos la H_0 y aceptamos la H_a

Si $p \geq 0,05$ aceptamos la H_0 y rechazamos la H_a

Decisión y conclusión

Como $p \geq 0,05$ entonces aceptamos la H_0 y rechazamos la H_a , es decir los datos tienen una distribución normal.

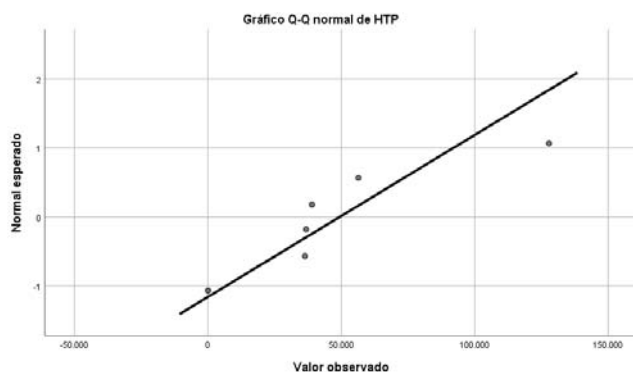


Figura 2. Normalidad de HTP versus el valor observado.

Análisis para determinar si hay correlación

Hipótesis

$H_0: r = 0$ (no existe correlación)

$H_a: r \neq 0$ (si existe correlación)

Nivel de significancia

$$\alpha = 0,05$$

Correlación de Pearson

Criterio de decisión

Si $p \leq 0,05$ aceptamos la H_0 y rechazamos la H_a

Si $p \geq 0,05$ rechazamos la H_0 y aceptamos la H_a

Tabla 4. Correlación de Pearson

Correlaciones			
	Tiempo	Prueba	HTP

Tiempo	Correlación de Pearson	1	0.000	-0.643
	Sig. (bilateral)		1.000	0.169
	N	6	6	6
Prueba	Correlación de Pearson	0.000	1	0.282
	Sig. (bilateral)	1.000		0.588
	N	6	6	6
HTP	Correlación de Pearson	-0.643	0.282	1
	Sig. (bilateral)	0.169	0.588	
	N	6	6	6

Tabla 5. Correlación de Pearson de las pruebas experimentales

	r	p	N
Tiempo - HTP	-0.643	0.169	6

Decisión y conclusión

Como $p \geq 0,05$ entonces aceptamos la H_a y rechazamos la H_0 , es decir el tiempo y HTP tienen correlación. El r negativo indica que el HTP disminuye con el tiempo.

Tabla 6. Pruebas de efectos inter-sujetos

Pruebas de efectos inter-sujetos					
Variable dependiente: HTP					
Origen	Tipo III de suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Modelo corregido	77212623 58,944 ^a	3	25737541 19.648	3.810	0.215
Intersección	14639618 282,713	1	14639618 282.713	21.672	0.043
Tiempo	37493986 74,108	1	37493986 74.108	5.550	0.143
Prueba	39718636 84,836	2	19859318 42.418	2.940	0.254
Error	13510173 79,647	2	67550868 9.824		
Total	23711898 021,305	6			

Total	90722797	5			
corregido	38,592				
a. R al cuadrado = ,851 (R al cuadrado ajustada = ,628)					

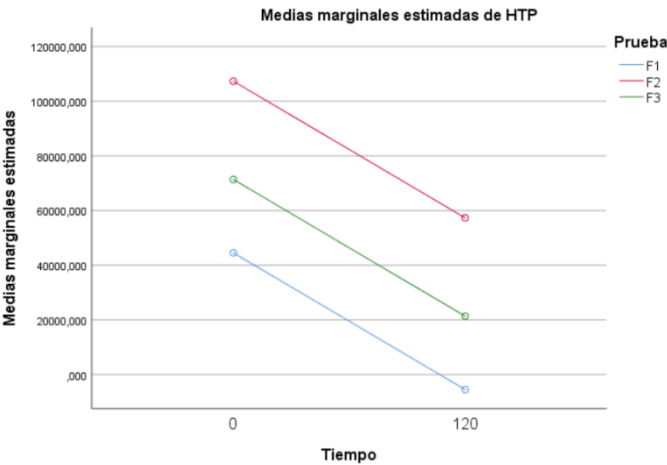


Figura 3. Medias marginales estimadas de HTP.

El análisis estadístico de las pruebas de efectos inter-sujetos, muestra que tiene la tendencia de las pruebas experimentales, de que a mayor tiempo hay mayor degradación de HTP.

3.2. DISCUSIÓN

Enumeración de bacterias heterótrofas totales y bacterias que degradan hidrocarburos totales.

Los resultados de recuentos del consorcio bacteriano se presentan en la figura 1. Los valores de los recuentos de bacterias de las muestras de suelo oscilaron desde 3.8×10^8 UFC/g a 3.6×10^7 UFC/g (Figura 1). El suelo tiene propiedades fisicoquímicas favorables para ayudar al crecimiento del consorcio bacteriano.

Se midieron las fracciones de hidrocarburos de petróleo crudo, mediante la técnica de cromatografía de gases (GC) para determinar la eficiencia de biodegradación de las diferentes fracciones de hidrocarburos totales de petróleo (HTP). El consorcio bacteriano logró reducir la concentración de hidrocarburos de C_6 a C_{10} ; en promedio en un 99%, C_{10} a C_{28} de 71.2% y C_{28} a C_{40} en un 35% de la concentración original como se muestra en la Tabla 2. Las condiciones de operación para el proceso de biorremediación de suelo costero contaminado con petróleo, durante los 52 días de incubación, se dieron a 25°C , $\text{pH}=6.0\pm0.2$. Los hidrocarburos que utilizan el porcentaje de abundancia de bacterias obtuvieron una degradación significativa en todos los suelos

muestreados. Estudios han demostrado que diversas cepas de *Bacillus* degradan hidrocarburos (Wang *et al.*, 2019; Baburam *et al.*, 2022) por acción enzimática tanto en condiciones aeróbicas y anaeróbicas, además de producir biosurfactantes (Abubakar *et al.*, 2024; Das *et al.*, 2024). Con respecto al *Agrobacterium*, algunas cepas tienen la capacidad de producir biosurfactante y degradar el petróleo crudo (Sharma *et al.*, 2019). Saimmai *et al.* (2012) aislaron un consorcio bacteriano a partir de suelo contaminado con petróleo; el consorcio estaba constituido por *Agrobacterium tumefaciens*, *Bacillus cereus*, *Chryseobacterium* sp. y *Sphingobacterium multivorum* y se demostró su capacidad biodegradadora.

Tabla 7. Metodología de Ensayo y análisis de las fracciones de petróleo crudo.

Ensayo	Método	L.C.	Unidad
Total	EPA 8015C.		
Petroleum	Nonhalogenated	0.603	mg/kg
Hydrocarbons (TPH):	Organics by Gas Chromatography.		
Fracción de Hidrocarburos	Rev. 3 / February 2007		
F ₁ (C ₆ -C ₁₀)			
Total	EPA 8015C.		
Petroleum	Rev. 3	1.9	mg/kg
Hydrocarbons (TPH):	Nonhalogenated		
Fracción de Hidrocarburos	Organics by Gas Chromatography.		
F ₂ (C ₁₀ -C ₂₈)	2007		
Total	EPA 8015C.		
Petroleum	Rev. 3	1.9	mg/kg
Hydrocarbons (TPH):	Nonhalogenated		
Fracción de Hidrocarburos	Organics by Gas Chromatography.		
F ₃ (C ₂₈ -C ₄₀)	2007		

L.C.: Límite de Cuantificación.

Tabla 8. Ensayo acreditado ante IAS-829

Ensayo Acreditado ante IAS-829			
Ensayo	Unidad	Resultados	
		Inicio	Final
Total			
Petroleum	mg/kg	38989.623	32.05 (99.92%)
Hydrocarbons (TPH):			
Fracción F ₁ (C ₆ -C ₁₀)			

Tabla 9. Ensayos Acreditados ante INACAL-DA

(Sede Lima1)

Ensayo	Unidades	Resultados	
Hidrocarburos totales de petróleo (TPH): Fracción F ₂ (C ₁₀ -C ₂₈)	mg/kg	127817.4	36810.9 (71.2%)
Hidrocarburos totales de petróleo (TPH): Fracción F ₃ (C ₂₈ -C ₄₀)	mg/kg	56374.1	36350.2 (35.52%)

Se realizó la comparación de los resultados obtenidos de los análisis de las fracciones de petróleo crudo en un Cromatógrafo de Gases (GC), en el cual se observa que la fracción de hidrocarburos F₁ (C₆-C₁₀) tiene un porcentaje de degradación de 99.92%, F₂ (C₁₀-C₂₈) de 71.2% y F₃ (C₂₈-C₄₀) de 35.52% (Tabla 2). De acuerdo a los resultados obtenidos, el mayor porcentaje de biodegradación es de la F₁ que son las fracciones ligeros y medianos, siendo las fracciones pesadas el menor porcentaje por ser cadenas de hidrocarburos más pesadas que necesitan mayor tiempo de degradación de hidrocarburos de petróleo.

4. CONCLUSIONES:

Las bacterias *Bacillus* y *Agrobacterium* pudieron descomponer eficientemente los hidrocarburos en un medio biológico. Sin embargo, la biodegradación puede depender de las condiciones de operación al que están expuestas los consorcios. El aumento de la tasa de biodegradación en los sistemas mixtos plantea la posibilidad de que la interacción entre cepas bacterianas es lo que está provocando esta inducción.

Los resultados muestran una reducción de la población del consorcio bacteriano desde 3.8×10^8 UFC/g a 3.6×10^7 UFC/g. Se realizó el análisis de biodegradación de suelos costeros de Perú contaminados artificialmente con 25% de petróleo crudo Buzios, en el que se demostró que el 20% del consorcio bacteriano *Bacillus* y *Agrobacterium*, y diluida con agua potable produjo la biodegradación del petróleo crudo en el suelo costero, después de los 120 días de incubación a 25 °C, pH = 6.0 ± 0.2 .

Un consorcio de degradadores microbianos que consisten en emulsionantes naturales tendrá mayor efectividad en la limpieza de áreas contaminadas. El consorcio de *Bacillus* y *Agrobacterium* pudieron degradar los HTP de eficiencia de biorremediación, compuestos de carbono de C₆ a C₁₀; en promedio en un 99%, C₁₀ a C₂₈ de 71.2% y C₂₈ a C₄₀ en un 35% de la concentración original.

En conclusión, se obtuvo baja degradación en la fracción F₃ de los compuestos pesados debido a que en el suelo contaminado se encuentran también los hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP), cuya biodegradación es más lenta en comparación de las fracciones más ligeras F₁ y F₂ contenidas en los suelos contaminados con petróleo crudo.

Los análisis estadísticos de los datos de las pruebas experimentales demuestran que tienen la misma tendencia, de que a mayor tiempo de tratamiento de degradación se obtiene una mayor degradación de HTP.

5. DECLARACIONES

5.1. Limitaciones del estudio

Entre las principales limitaciones de la metodología de los estudios experimentales son la extensión del proceso y la accesibilidad de equipos disponibles para realizar un estudio completo de investigación.

5.2. Conflictos de Intereses

No hay conflicto de intereses en esta publicación.

5.3. Open Access

No se presentan ningunas limitaciones ya que se trata de acceso directo.

5.4 FINANCIAMIENTO Y AGRADECIMIENTOS

El financiamiento fue realizado por el Vicerrectorado de Investigación de la Universidad Nacional de Ingeniería, Lima-Perú.

Expresamos nuestro agradecimiento a la Facultad de Petróleo, Gas Natural y Petroquímica de la Universidad Nacional de Ingeniería, Lima-Perú.

De acuerdo con las directrices éticas del Periódico Tchê Química, que no permiten donaciones de autores con manuscritos en evaluación (incluso cuando hay fondos de investigación disponibles), o en casos de limitaciones financieras de los autores, los costos de publicación fueron completamente absorbidos por la revista bajo nuestra política de Acceso Abierto Platino, a través del apoyo de la Asociación Científica Araucária (<https://acaria.org/>). Esta política tiene como objetivo garantizar la completa independencia entre el proceso editorial y cualquier aspecto financiero, reforzando nuestro compromiso con la integridad científica y la equidad en la difusión del conocimiento.

6. REFERENCIAS:

- Alaidaroos, B.A. (2023) Advancing Eco-Sustainable Bioremediation for Hydrocarbon Contaminants: Challenges and Solutions. *Processes*, 11, 3036. <https://doi.org/10.3390/pr11103036>
- Abubakar, A., Abioye, O.P., Aransiola, S.A., Naga Raju Maddela, Ram Prasad (2024) Crude oil biodegradation potential of lipase produced by *Bacillus subtilis* and *Pseudomonas aeruginosa* isolated from hydrocarbon contaminated soil. *Environmental Chemistry and Ecotoxicology*, 6, 26-32. <https://doi.org/10.1016/j.enceco.2023.12.001>.
- Baburam, C., Mitema, A., Tsekoa, T., Feto, NA (2022). Especies de *Bacillus* y su invaluable papel en la biorremediación de hidrocarburos de petróleo. En: Islam, MT, Rahman, M., Pandey, P. (eds.) *Bacilos en la agrobiotecnología. Bacilos en la agricultura resiliente al clima y la bioprospección*. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-85465-2_5
- Brook, T.R.; Stiver, W.H.; Zytner, R.G. (2001). Biodegradation of diesel fuel in soil under various nitrogen addition regimes. *Soil Sediment Contam.* 10, 539–553.
- Chen, Q., Li, J., Liu, M., Sun, H., Bao, M. (2017). Study on the biodegradation of crude oil by free and immobilized bacterial consortium in marine environment. – *PLoS ONE* 12: 1-23.
- Dutta, T., Kwon, E., Bhattacharya, S. S., Jeon, B. H., Deep, A., Uchimiya, M., Kim, K. H. (2017). Polycyclic aromatic hydrocarbons and volatile organic compounds in biochar and biochar-amended soil: a review. – *GCB Bioenergy* 9: 990-1004.
- Escalante Guzmán, R. M. (2002). Biodegradación de crudo de petróleo en terrarios.
- Hesnawi R.M., Adbeib M.M. (2013). Effect of nutrient source on indigenous biodegradation of diesel fuel contaminated soil. *APCBEE Procedia*. 2013. Vol. 5, p. 557-561. DOI: 10.1016/j.apcbee.2013.05.093
- Hernández, Á. R., Boada, L. D., Mendoza, Z., Ruiz-Suárez, N., Valerón, P. F., Camacho, M., Zumbado, M., Almeida-González, M., Henríquez-Hernández, L. A., Luzardo, O. P. (2017). Consumption of organic meat does not diminish the carcinogenic potential associated with the intake of persistent organic pollutants (POPs). – *Environmental Science and Pollution Research* 24: 4261-4273.
- Holt, J.G.; Krieg, N.R.; Sneath, P.H.A.; Stanley, J.T.; Williams, S.T. (1994). *Bergey's Manual of Determinative Bacteriology*, 9th ed.; Willims and Wilkins: Baltimore, MD, USA.
- Koual, M., Cano-Sancho, G., Bats, A. S., Tomkiewicz, C., Kaddouch-Amar, Y., DouayHauser, N., Ngo, C., Bonsang, H., Deloménie, M., Lecuru, F., Le Bizec, B., Marchand, P., Botton, J., Barouki, R., Antignac, J. P., Coumoul, X. (2019). Associations between persistent organic pollutants and risk of breast cancer metastasis. *Environment International* (on-line) 132: 105028. 10.1016/j.envint.2019.105028.
- Madigan, M.T.; Martinko, J.M.; Bender, K.S.; Buckley, D.H.; Stahl, D.A. Brock. (2016). *Biología dei Microrganismi*. In *Microbiologia Generale, Ambientale e Industriale*; Pearson: Milano/Torino, Italy, 2016; pp. 698–699.
- Moubasher, H. A., Hegazy, A. K., Mohamed, N. H., Moustafa, Y. M., Kabieli, H. F., Hamad, A. A. (2015). Phytoremediation of soils polluted with crude petroleum oil using *Bassia scoparia* and its associated rhizosphere microorganisms. – *International Biodeterioration and Biodegradation* (on-line) 98: 113-120. 10.1016/j.ibiod.2014.11.019.
- Nagkirti, P.; Shaikh, A.; Vasudevan, G.; Paliwal, V.; Dhakephalkar, P. (2017). Bioremediation of terrestrial oil spills.

- Feasibility Assessment. In Optimization and Applicability of Bioprocess; Springer: Singapore, 2017; pp. 141–173.
15. Pandolfo, E., Barra Caracciolo, A., & Rolando, L. (2023). Recent Advances in Bacterial Degradation of Hydrocarbons. *Water*, 15(2), 375. <https://doi.org/10.3390/w15020375>
 16. Ruiz, O.N.; Radwan, O.; Striebich, R.C. (2021). GC–MS hydrocarbon degradation profile data of *Pseudomonas frederiksbergensis* SI8, a bacterium capable of degrading aromatics at low temperatures. *Data Brief* 2021, 35, 106864.
 17. Saimmai, A., Kaewrueng, J. & Maneerat, S. Used lubricating oil degradation and biosurfactant production by SC-9 consortia obtained from oil-contaminated soil. (2012) *Ann Microbiol.* 62, 1757–1767. <https://doi.org/10.1007/s13213-012-0434-7>
 18. Sharma, S., Verma, R., Pandey, L.M. (2019) Crude oil degradation and biosurfactant production abilities of isolated *Agrobacterium fabrum* SLAJ731. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, 21,101322. <https://doi.org/10.1016/j.bcab.2019.101322>.
 19. Wang D, Lin J, Lin J, Wang W, Li S. (2019) Biodegradation of Petroleum Hydrocarbons by *Bacillus subtilis* BL-27, a Strain with Weak Hydrophobicity. *Molecules*. 24(17):3021. doi: 10.3390/molecules24173021.
 20. Yan, J.; Wang, L.; Fu, P.P.; Yu, H. (2004). Photomutagenicity of 16 polycyclic aromatic hydrocarbons from the US EPA priority pollutant list. *Mutat. Res. Gen. Toxicol. Environ. Mutagen.* 2004, 557, 99–108. [CrossRef] [PubMed]

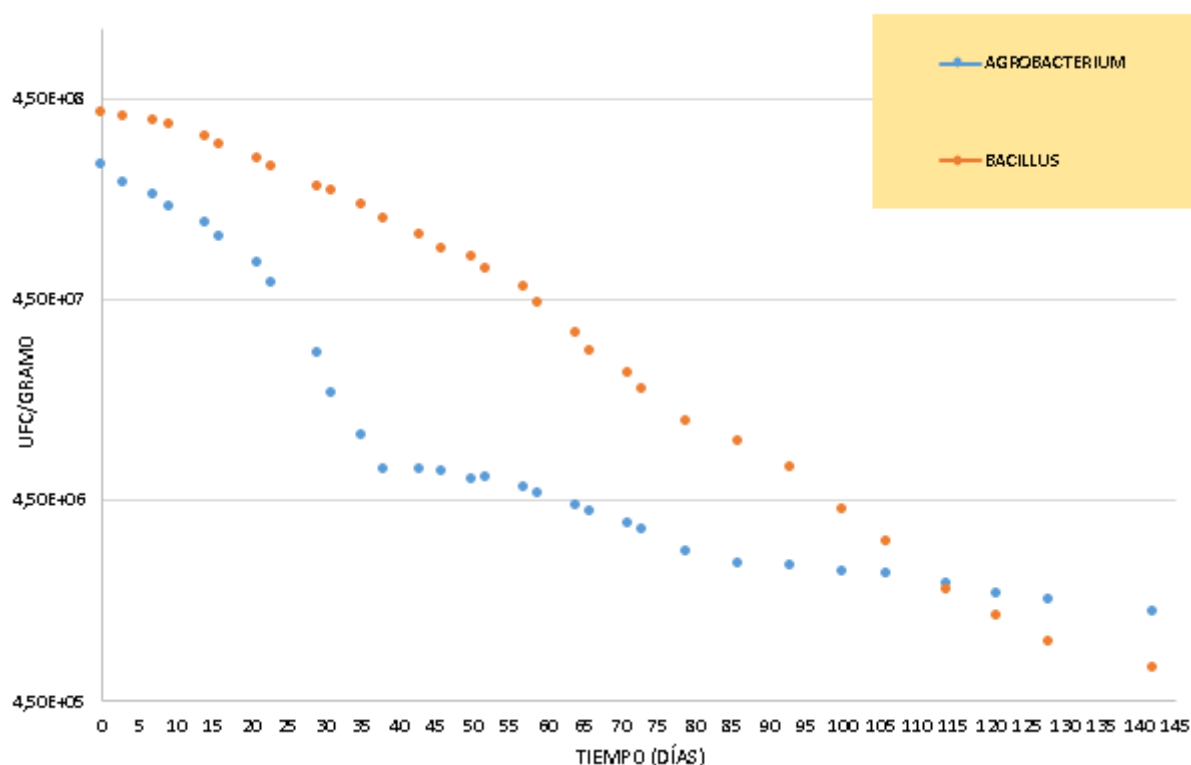


Figura 1. UFC/gramo del consorcio bacteriano vs Tiempo (días).

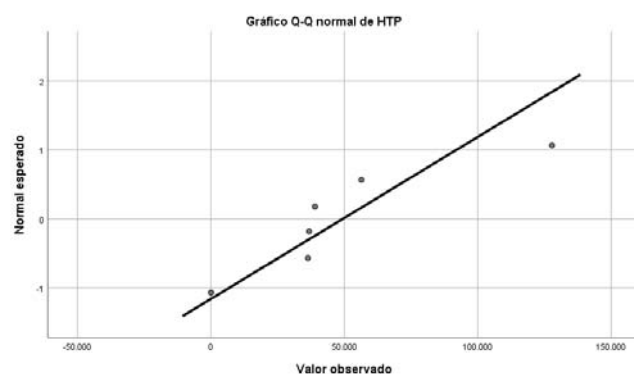


Figura 2. Normalidad de HTP versus el valor observado.

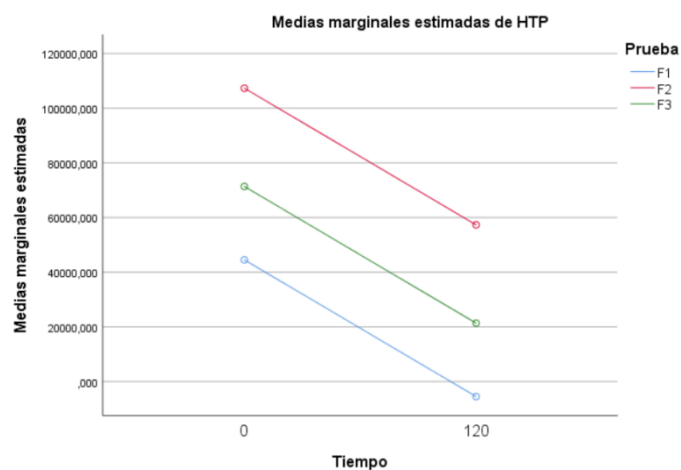


Figura 3. Medias marginales estimadas de HTP.