



*Estudio de la Contaminación de Suelos por Hidrocarburos en la Comunidad Virgen del Carmen y Propuesta de Remediación mediante Bioventing*

*Study of Soil Contamination by Hydrocarbons in the Virgen del Carmen Community and Remediation Proposal through Bioventing*

*Estudo da Contaminação do Solo por Hidrocarbonetos na Comunidade Virgen del Carmen e Proposta de Remediação por Bioventilação*

Rolando Fabián Zabala Vizuete <sup>I</sup>  
[rzabala@esPOCH.edu.ec](mailto:rzabala@esPOCH.edu.ec)  
<https://orcid.org/0000-0001-7541-4441>

Kerly Fernanda Espinoza Chávez <sup>II</sup>  
[kerly1994@outlook.es](mailto:kerly1994@outlook.es)  
<https://orcid.org/0000-0003-4474-43548>

Greys Carolina Herrera Morales <sup>III</sup>  
[greys.herrera@esPOCH.edu.ec](mailto:greys.herrera@esPOCH.edu.ec)  
<https://orcid.org/0000-0002-9184-0333>

Dennis Renato Manzano Vela <sup>IV</sup>  
[dennis.manzano@esPOCH.edu.ec](mailto:dennis.manzano@esPOCH.edu.ec)  
<https://orcid.org/0000-0002-7834-276X>

**Correspondencia:** [rzabala@esPOCH.edu.ec](mailto:rzabala@esPOCH.edu.ec)

Ciencias Técnica y Aplicadas  
Artículo de Investigación

\* **Recibido:** 23 de abril de 2023 \* **Aceptado:** 12 de mayo de 2023 \* **Publicado:** 02 de junio de 2023

- I. Ingeniero Forestal, Máster en Ingeniería Ambiental y Seguridad Industrial, Máster Universitario en Gestión Ambiental y Energética en las Organizaciones, Docente Investigador de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo (ESPOCH), Facultad de Recursos Naturales (FRN), Ecuador.
- II. Ingeniera Ambiental Independiente, Investigadora Independiente, Ecuador.
- III. Ingeniera en Biotecnología Ambiental, Magister Universitario en Sistemas Integrados de Gestión en mención Seguridad, Calidad y Ambiente, Investigadora de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo sede Orellana (ESPOCH), Facultad de Ciencias, Ecuador.
- IV. Ingeniero Químico, Magíster en Química mención Química-Física Escuela Superior Politécnica de Chimborazo (ESPOCH), Facultad de Recursos Naturales, Ecuador.

## Resumen

En el presente estudio se examinó el impacto de los hidrocarburos en la salud del suelo y evalúa la eficacia del método de bioventing para mitigar los daños. Los tres suelos analizados presentaron una textura arcillo-arenosa y arcillosa, y aunque la contaminación no afectó significativamente su capacidad de retención de agua, sí hubo una pérdida de nutrientes. También se observó una perturbación en la conductividad eléctrica y la salinidad debido a la contaminación por hidrocarburos, mientras que la capacidad de intercambio iónico se mantuvo alta. A pesar de un alto nivel de acidez y una pérdida de peso en la materia orgánica, se confirmó que el método de bioventing puede ser eficaz para reducir la sobrecarga de contaminación y mantener los parámetros dentro de los límites permitidos. Además, la investigación valida la hipótesis de que el bioventing es una estrategia óptima para mitigar los daños causados por los hidrocarburos. Finalmente, se sugiere que se realice un análisis de la huella de carbono para controlar los gases emitidos a la atmósfera.

**Palabras Clave:** Hidrocarburos; Suelo; Bioventing; Conductividad eléctrica; Intercambio iónico; Huella de carbono.

## Abstract

In the present study, the impact of hydrocarbons on soil health was examined and the effectiveness of the bioventing method to mitigate damage was evaluated. The three soils analyzed presented a clayey-sandy and clayey texture, and although the contamination did not significantly affect their water retention capacity, there was a loss of nutrients. A disturbance in electrical conductivity and salinity due to hydrocarbon contamination was also observed, while the ion exchange capacity remained high. Despite a high level of acidity and a weight loss in organic matter, it was confirmed that the bioventing method can be effective in reducing pollution overload and keeping the parameters within the allowed limits. In addition, the research validates the hypothesis that bioventing is an optimal strategy to mitigate damage caused by hydrocarbons. Finally, it is suggested that an analysis of the carbon footprint be carried out to control the gases emitted into the atmosphere.

**Keywords:** hydrocarbons; Floor; bioventing; Electric conductivity; ion exchange; Carbon footprint.

## Resumo

No presente estudo, o impacto dos hidrocarbonetos na saúde do solo foi examinado e a eficácia do método de bioventilação para mitigar os danos foi avaliada. Os três solos analisados apresentaram textura argilosa-arenosa e argilosa e, embora a contaminação não tenha afetado significativamente a capacidade de retenção de água, houve perda de nutrientes. Um distúrbio na condutividade elétrica e salinidade devido à contaminação por hidrocarbonetos também foi observado, enquanto a capacidade de troca iônica permaneceu alta. Apesar de um alto nível de acidez e perda de peso em matéria orgânica, foi confirmado que o método de bioventilação pode ser eficaz em reduzir a sobrecarga de poluição e manter os parâmetros dentro dos limites permitidos. Além disso, a pesquisa valida a hipótese de que a bioventilação é uma estratégia ótima para mitigar os danos causados pelos hidrocarbonetos. Por fim, sugere-se que seja realizada uma análise da pegada de carbono para controlar os gases emitidos para a atmosfera.

**Palavras-chave:** hidrocarbonetos; Chão; bioventilação; Condutividade elétrica; troca iônica; Pegada de carbono.

## Introducción

La contaminación del suelo es un problema mundial cada vez más grave que afecta tanto a la salud humana como a la integridad de los ecosistemas ((Osuna-Osuna et al., 2015)). Entre los contaminantes más persistentes y dañinos se encuentran los hidrocarburos, compuestos principalmente de carbono e hidrógeno, que se originan de las actividades relacionadas con la extracción y el refinamiento de petróleo ((González, 2015)). Estos contaminantes tienen una toxicidad alta y pueden causar graves problemas de salud en los humanos y alterar significativamente los ecosistemas ((Codesido et al., 2017)).

La Comunidad Virgen del Carmen en la Provincia de Orellana es un área que ha experimentado contaminación del suelo por hidrocarburos debido a su ubicación en una región de alta actividad petrolera. Las consecuencias de esta contaminación son evidentes en los impactos ambientales y de salud que enfrenta la comunidad ((Velázquez et al., 2019)). Para abordar este problema, es crucial caracterizar la calidad del suelo y los agentes contaminantes presentes, lo que puede proporcionar la base para el desarrollo de un plan de mitigación y remediación ((Vizuet, 2016, p. 11)).

Entre los métodos utilizados para remediar la contaminación del suelo por hidrocarburos, el *bioventing* ha demostrado ser prometedor. Este método se basa en la estimulación de la actividad de los microorganismos en el suelo que son capaces de degradar los hidrocarburos ((Torres, 2019, p. 13)). La implementación de *bioventing* puede, por lo tanto, ofrecer una estrategia eficaz para remediar los suelos contaminados y mejorar las condiciones de vida en las comunidades afectadas ((Cipradec, 2015, p. 77)).

El presente estudio tiene como objetivo evaluar la contaminación del suelo por hidrocarburos en la Comunidad Virgen del Carmen y proponer un plan de mitigación que incluya la implementación del método de *bioventing*. Esperamos que este estudio pueda contribuir a la recuperación de los suelos contaminados y la mejora de la salud y el bienestar de los residentes de la comunidad (Quijano, 2015, p. 23). **Área de Estudio y Métodos**

### A. Localización

El estudio se llevó a cabo en la Comunidad Virgen del Carmen, ubicada en la Parroquia Unión Milagreña, en el cantón Joya de los Sachas, uno de los cuatro cantones de la provincia de Orellana en la Amazonía ecuatoriana. Esta región se encuentra a 175 metros sobre el nivel del mar, tal como se puede observar en la figura 1.

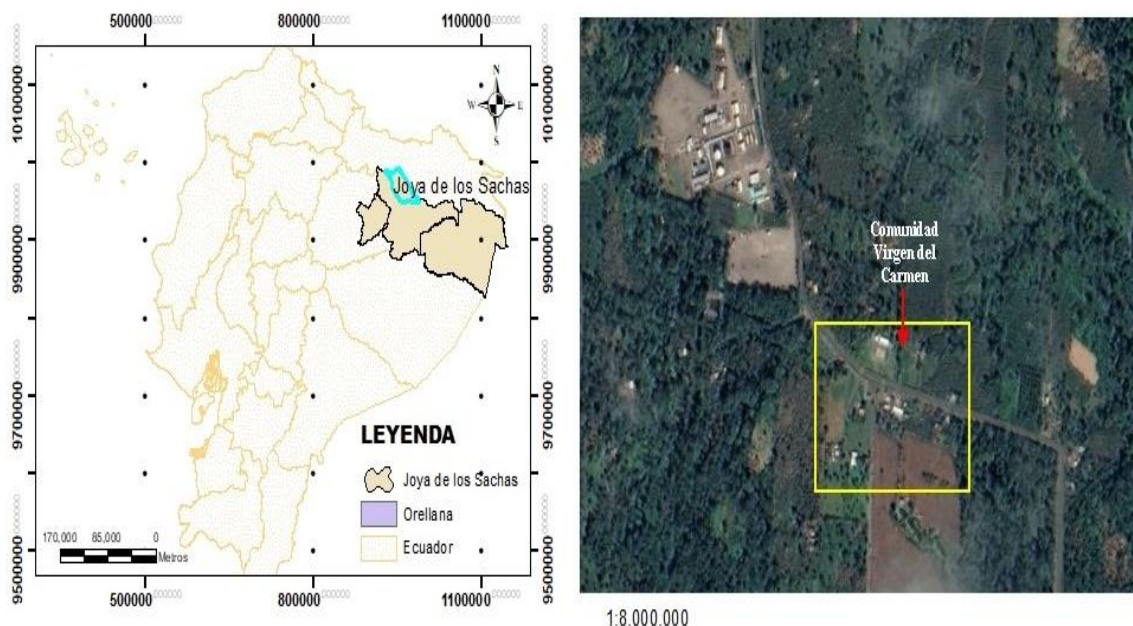


Figura 1. Localización del área de estudio

*Elaboración propia*

En esta comunidad se encuentra la estación de Enap Sipetrol S.A., cuyas actividades han impactado en el entorno, particularmente en las viviendas cercanas. Como resultado de la labor de la empresa, varias fincas en la región están contaminadas con lodos no tratados que contienen hidrocarburos, extraídos de pozos y depositados en el área sin un tratamiento adecuado.

Para la presente investigación, se seleccionaron tres fincas que presentaban niveles de contaminación particularmente altos para un estudio más detallado. Las coordenadas geográficas de los sitios de muestreo en estas fincas son las siguientes:

Tabla 1: Coordenadas Geográficas de los sitios de muestreo y tratamientos (Zona 18 M)

Fuente: Elaboración propia

<b>Puntos</b>	<b>Coordenada Este (X)</b>	<b>Coordenada Norte (Y)</b>	<b>Altitud</b>
<b>P1</b>	0298429	9957411	252 msnm
<b>P2</b>	0298560	9957055	293 msnm
<b>P3</b>	0298445	9956763	339 msnm

Se muestran las ubicaciones exactas de estas fincas en la figura 2



Figura 1. Ubicación de la zona de estudio

*Elaboración propia*

Para el análisis de la contaminación del suelo y la propuesta de remediación, se utilizó una combinación de revisión documental, análisis de muestras de suelo y observaciones de campo. El objetivo principal fue evaluar la calidad del suelo y la extensión de la contaminación por hidrocarburos, para luego proponer un plan de mitigación basado en el método de *bioventing*.

**A. Métodos**

### **Muestreo de Suelo**

En cada una de las tres fincas, se realizó una calicata: en la primera finca perteneciente al Sr. Luis Yumbo, una calicata de 1,20 metros de profundidad; en la segunda finca del Sr. Daniel Valarezo, una de 1,90 metros de profundidad; y en la tercera finca del Sr. Santos Merizalde, una calicata de 2 metros de profundidad. En cada calicata se identificaron y midieron diferentes horizontes del suelo (A, B, C y D) y se tomaron 11 submuestras de los tres primeros horizontes. Las submuestras fueron removidas y colocadas en un balde esterilizado, formando una única muestra homogénea de 2 libras por cada finca. Las muestras fueron etiquetadas con la información relevante y las calicatas cubiertas con plástico negro para prevenir la entrada de agua (Yumbo, Valarezo & Merizalde, 2023).

### **Análisis de Laboratorio**

Las muestras fueron enviadas al Laboratorio de Análisis y Evaluación Ambiental (AQLAB) para la evaluación de los siguientes parámetros: conductividad eléctrica, bario (Ba), cadmio (Cd), níquel (Ni), plomo (Pb), hidrocarburos totales (TPH), hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP's) y el potencial de hidrógeno (pH) (AQLAB, 2023).

### **Análisis de Parámetros Físico-Químicos**

Los análisis de parámetros físico-químicos se realizaron en el laboratorio de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo Sede Orellana, donde se determinó la textura, color, plasticidad, conductividad eléctrica, salinidad, capacidad de intercambio catiónico, pH y materia orgánica del suelo. Para determinar la textura del suelo, se utilizó el método de Bouyoucos (Andrades, Moliner & Masaguer, 2015) y el Triángulo Textural de los suelos (Pellegrine, 2019). Esta metodología implicó la preparación de una suspensión de suelo, la medición de las concentraciones de arena, limo y arcilla utilizando un hidrómetro, y la clasificación de la textura del suelo utilizando el triángulo textural (Recinos Derick, 2018).

### **Plasticidad:**

Se empleó el método del límite de plástico (Ramírez, 2021, p. 44). Las muestras de suelo se secaron en un horno a 110 °C durante 24 horas, luego se trituraron y tamizaron. Las muestras tamizadas se dividieron en tres partes iguales y se acondicionaron. Para cada muestra, se pesaron 50 gramos de suelo y se mezclaron con 20 mililitros de agua destilada hasta obtener una pasta homogénea. Esta

pasta se dejó reposar durante periodos variables dependiendo de la textura del suelo (24 horas para la muestra de textura arcillosa y 12 horas para las de textura franca arcillosa-arenosa) y se volvió a mezclar durante 10 minutos. Luego se formó una esfera con la pasta y se moldeó en un crisol, dividiéndola en dos partes. De cada muestra se tomó una porción de  $1 \text{ cm}^3$  y se amasó hasta formar un cilindro con diámetro de 3 mm. Este proceso se repitió hasta que el cilindro se fisuró al llegar a los 3 mm. Los cilindros se secaron en un horno y se pesaron para calcular el límite plástico mediante las fórmulas de Pilatasig Murillo (2021, pp. 11-12).

### **Color**

Se extrajeron pequeñas muestras de cada sedimento y se compararon con la Tabla de Munsell (matrices 2.5 YR, 5 YR y 7.5 YR) para identificar el color del suelo.

### **Salinidad y Conductividad eléctrica**

Se midió la salinidad mediante la conductividad eléctrica. Se pesaron 100 gramos de cada muestra de suelo y se mezclaron con 100 mililitros de agua destilada. La conductividad eléctrica se midió con un multiparámetro previamente calibrado con una solución STD (Sólidos Totales Disueltos) 1413  $\mu\text{S}/\text{cm}$ .

### **Capacidad de intercambio catiónico (CIC)**

Se utilizó el método del acetato de amonio  $\text{C}_2\text{H}_7(\text{NO}_2)$  al 1 N a pH 7 (Vallejo et al., 2016). Las muestras de suelo se secaron en un horno a  $105 \text{ }^\circ\text{C}$  durante 24 horas, se tamizaron y se pesaron 5 gramos de suelo. Se añadió acetato de amonio  $\text{C}_2\text{H}_7(\text{NO}_2)$  al 1 N a pH 7 y se agitó. Luego, se filtró la solución y se realizaron lavados sucesivos con acetato de amonio, alcohol etílico y cloruro de sodio. Se neutralizaron las soluciones con formol y se tituló con hidróxido de sodio. Finalmente, se calcularon los valores de CIC utilizando la fórmula proporcionada por Vallejo et al. (2016).

### **pH**

Se pesaron 100 gramos de cada suelo y se mezclaron con 100 mililitros de agua destilada. Se dejó reposar la mezcla durante 30 minutos y se removió ocasionalmente. El pH se midió con un pH-metro previamente calibrado con soluciones buffer de pH 4.0, 7.0 y 9.2.

### **Textura del Suelo**

Se utilizó el método de Bouyoucos (1962), que implica la dispersión de las partículas del suelo en agua mediante el uso de un agente dispersante, seguido de la sedimentación de las partículas por gravedad. Se pesaron 100 gramos de suelo seco y se colocaron en un tubo de sedimentación. Se agregó un dispersante (hexametáfosfato de sodio) y agua destilada hasta el marcador de 1000 ml. El tubo se agitó y se dejó reposar durante 24 horas para permitir la sedimentación de las partículas. Después de este tiempo, se midió la altura de las diferentes capas de sedimento (arena, limo y arcilla). La textura del suelo se determinó utilizando el triángulo textural de USDA.

### **Materia Orgánica (MO)**

Se utilizó el método de Walkley-Black (1934), que implica la oxidación de la materia orgánica del suelo con una solución de ácido sulfúrico y dicromato de potasio. Se pesaron 10 gramos de suelo y se añadió la solución oxidante. La mezcla se agitó y se dejó reposar durante 30 minutos. Luego, se añadió sulfato ferroso y se tituló con permanganato de potasio. La cantidad de materia orgánica se calculó utilizando la fórmula proporcionada por Walkley y Black (1934).

Es importante mencionar que todas las muestras de suelo se recolectaron a una profundidad de 0 a 30 cm, con un barreno de acero inoxidable. Las muestras se almacenaron en bolsas de plástico y se etiquetaron correctamente. Las muestras se transportaron al laboratorio y se almacenaron a temperatura ambiente hasta su análisis

## **Resultados Y Discusiones**

### ***Caracterización de la calidad del suelo***

#### **Resultados del análisis de textura en suelos**

La composición de los tres suelos analizados en el laboratorio varía en cuanto a su textura. La primera y la segunda muestra corresponden a un suelo de tipo franco arcilloso-arenoso, mientras que la tercera muestra se caracteriza como un suelo arcilloso. Los suelos franco arcilloso-arenoso son conocidos por su alta capacidad de retención de agua y su bajo contenido en nutrientes,



mientras que los suelos arcillosos tienen la capacidad de almacenar el doble de agua y presentan una menor pérdida de nutrientes.

*Tabla 2. Caracterización de suelos por agregado*

<b>Muestra</b>	<b>Arena %</b>	<b>Limo %</b>	<b>Arcilla %</b>	<b>Clase textural</b>
<b>1</b>	74,88 %	35,04 %	60,16 %	Franco arcillo-arenoso
<b>2</b>	84,72 %	44,16 %	59,44 %	Franco arcillo-arenoso
<b>3</b>	38,88 %	27,04 %	88,16 %	Arcilla

Fuente: Elaboración propia

Los índices de plasticidad para cada tipo de suelo muestran mínimas variaciones porcentuales. Así, la primera muestra de suelo tiene un índice de plasticidad del 29,87%. La segunda muestra presenta un índice de plasticidad más bajo, del 26,36%, en comparación con las otras dos. La última muestra de suelo tiene un índice de plasticidad del 29,13%. Esto indica que todas las muestras de suelo tienen un índice de plasticidad moderado, lo que sugiere una presencia media de arcilla

### **Resultados del límite de plasticidad.**

*Tabla 3. Resultados de análisis de plasticidad*

<b>Muestra 1</b>	<b>Análisis 1</b>	<b>Análisis 2</b>	<b>Análisis 3</b>
<b>Nombre o número de tara</b>	YC 1	YC 2	YC 3
<b>Peso de la tara</b>	12,87	12,66	12,70
<b>Peso del suelo húmedo + tara</b>	20,50	19,38	20,56
<b>Peso del suelo seco + tara</b>	18,75	17,92	18,65
<b>Peso del agua</b>	1,75	1,46	1,91
<b>Peso del suelo seco</b>	5,88	5,26	5,95

<b>Porcentaje de humedad</b>	29,76 %	27,76 %	32,10 %
<b>Porcentaje total de plasticidad</b>	<b>29,87 %</b>		
<b>Muestra 2</b>	<b>Análisis</b>	<b>Análisis</b>	<b>Análisis</b>
	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>
<b>Nombre o número de tara</b>	DV 1	DV 2	DV 3
<b>Peso de la tara</b>	12,85	12,64	12,69
<b>Peso del suelo húmedo + tara</b>	20,80	19,58	21,25
<b>Peso del suelo seco + tara</b>	18,92	17,95	19,98
<b>Peso del agua</b>	1,88	1,63	1,27
<b>Peso del suelo seco</b>	6,07	5,31	7,29
<b>Porcentaje de humedad</b>	30,97 %	30,69 %	17,42 %
<b>Porcentaje total de plasticidad</b>	<b>26,36 %</b>		
<b>Muestra 3</b>	<b>Análisis</b>	<b>Análisis</b>	<b>Análisis</b>
	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>
<b>Nombre o número de tara</b>	SM 1	SM 2	SM3
<b>Peso de la tara</b>	12,82	12,60	12,68
<b>Peso del suelo húmedo + tara</b>	19,55	20,23	19,67
<b>Peso del suelo seco + tara</b>	17,97	18,88	17,85
<b>Peso del agua</b>	1,58	1,35	1,82
<b>Peso del suelo seco</b>	5,15	6,28	5,17
<b>Porcentaje de humedad</b>	30,68 %	21,49 %	35,20
<b>Porcentaje total de plasticidad</b>	<b>29,13 %</b>		

Fuente: Elaboración propia

### Resultados de la salinidad y conductividad eléctrica del suelo

Como se ha notado, hay una mínima variación entre los suelos examinados, lo cual fue considerado para su análisis correspondiente. Por lo tanto, si la conductividad eléctrica supera los 16, los suelos se vuelven extremadamente salinos, lo que significa que los tres suelos estudiados presentan una alta concentración de sales solubles. Esta situación, cuando se combinan con hidrocarburos, puede afectar de manera significativa a los suelos.

*Tabla 4: Resultados de conductividad eléctrica y salinidad*

<b>Análisis</b>	<b>Conductividad eléctrica</b>	<b>Temperatura</b>
	<b>uS/m</b>	
<b>Muestra 1</b>	30,3 uS/m	31,6 °C
<b>Muestra 2</b>	30,6 uS/m	32,3 °C
<b>Muestra 3</b>	30,8 uS/m	32,5 °C

Fuente: Elaboración propia

### **Resultados del pH de los suelos**

Se pudo observar que los valores de pH variaron en respuesta a la presencia de hidrocarburos. En este sentido, la primera muestra de suelo resultó ser altamente ácida, la segunda muestra fue levemente ácida, y finalmente, la tercera muestra demostró ser moderadamente ácida. Los niveles de pH resultaron ser altos y medios, lo cual no resulta particularmente favorable o beneficioso para estos tipos de suelos.

*Tabla 5: Resultados del pH del suelo*

<b>Análisis</b>	<b>pH</b>	<b>Interpretación</b>
<b>Muestra 1</b>	5,22	Fuertemente ácido
<b>Muestra 2</b>	6,38	Ligeramente ácido
<b>Muestra 3</b>	5,90	Medianamente ácido

Fuente: Elaboración propia

Al contrastar los resultados referentes a la calidad del suelo con los hallazgos recientes sobre la recuperación del suelo, se evidenció una disminución en la concentración de contaminantes. El bario mostró una concentración de 245 ppm, un valor dentro del rango aceptable. Igualmente, los metales como el cadmio, níquel y plomo contribuyeron a la reducción de la alta concentración del contaminante. Por otro lado, los TPH y HAP's no fueron completamente eliminados, aunque sí se logró reducir significativamente su concentración. El potencial de hidrógeno, por su parte, retornó a un estado normal, lo que indica que el método de *bioventing* fue efectivo para reducir la presencia de estos elementos, incluso hasta niveles considerados normales de acuerdo a los límites establecidos en la normativa ambiental en vigor para la recuperación del suelo, según el Anexo 2 del TULSMA. Por último, no se realizó análisis en el tercer suelo ya que se utilizó como referencia de un suelo contaminado para comparar con los otros dos suelos sometidos al método de *bioventing*

### Criterios de Remediación de la muestra 1

Tabla 6: Criterios de remediación muestra 1

Ítems	Parámetros	Unidad	Límite máximo permisible	Resultado del análisis
1	Conductividad eléctrica	uS/cm	200	13,11
2	Bario	mg/kg	750	220
3	Cadmio	mg/kg	2	<1,17
4	Níquel	mg/kg	50	25,7
5	Plomo	mg/kg	60	<25,0
6	Hidrocarburos Totales (TPH)	mg/kg	150	<1000
7	Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos (HAP's)	mg/kg	0,1	<0,075
8	Potencial de hidrogeno (pH)	-	6 a 8	6,36

Fuente: Elaboración propia

## Criterios de Remediación de la muestra 2

Tabla 7: Criterios de remediación muestra 2

Ítems	Parámetros	Unidad	Límite máximo permisible	Resultado del análisis
1	Conductividad eléctrica	uS/cm	200	15,63
2	Bario	mg/kg	750	245
3	Cadmio	mg/kg	2	<1,17
4	Níquel	mg/kg	50	21,5
5	Plomo	mg/kg	60	<25,0
6	Hidrocarburos Totales (TPH)	mg/kg	150	<1000
7	Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos (HAP's)	mg/kg	0,1	<0,075
8	Potencial de hidrogeno (pH)	-	6 a 8	6,39

Fuente: Elaboración propia

## Criterios de Calidad del suelo de la muestra 3

Tabla 8: Criterios de remediación muestra 2

Ítems	Parámetros	Unidad	Límite máximo permisible	Resultado del análisis
1	Conductividad eléctrica	uS/cm	200	225,3
2	Bario	mg/kg	200	388,9
3	Cadmio	mg/kg	0.5	0,91
4	Níquel	mg/kg	19	45,0
5	Plomo	mg/kg	19	34,0
6	Hidrocarburos Totales (TPH)	mg/kg	<150	300

7	Hidrocarburos Aromáticos mg/kg	0.1	0,2
	Policíclicos (HAP's)		
8	Potencial de hidrogeno (pH) -	6 a 8	6,24

Fuente: Elaboración propia

## Conclusiones

La incidencia de hidrocarburos en el suelo provoca un considerable deterioro en su salud, alterando sus funciones esenciales y desestabilizando su estructura. La textura de los tres suelos examinados, arcillo-arenosa y arcillosa, indica que la contaminación no ha influido significativamente en su capacidad de retención de agua, aunque sí se observa una pérdida de nutrientes. Además, la plasticidad de estos suelos exhibe rangos similares, sugiriendo un nivel de humedad intermedio en cuanto a su flexibilidad. Estos suelos también presentan tonalidades marrón oscuro y rojo, lo que sugiere un bajo contenido de materia orgánica.

Por otro lado, la conductividad eléctrica y salinidad presentan una elevada concentración, indicando una perturbación de la solubilidad del suelo como resultado de la contaminación por hidrocarburos. Sin embargo, la capacidad de intercambio iónico no parece verse gravemente afectada, ya que el porcentaje de capacidad de intercambio catiónico es altamente elevado, lo que sugiere un alto contenido de nutrientes y una sólida capacidad de retención de agua. A pesar de esto, los niveles de pH son altos, indicando una considerable acidez, lo que limita la mejora de las propiedades del suelo. Por último, la materia orgánica muestra una marcada pérdida de peso, lo que implica un grave impacto en la formación del suelo y una alteración de sus propiedades fisicoquímicas.

La calidad del suelo ha sido gravemente impactada por la contaminación por hidrocarburos, ya que han provocado una alteración significativa de los compuestos fisicoquímicos del suelo y han excedido los límites máximos permitidos de conductividad eléctrica, potencial de hidrógeno, bario, cadmio, níquel, plomo, hidrocarburos totales y hidrocarburos aromáticos policíclicos establecidos en el Anexo-2 del TULSMA.

La aplicación del método de *bioventing* ha jugado un papel crucial en la disminución y degradación de los contaminantes presentes en el suelo. Esta conclusión se infiere al contrastar los suelos contaminados con aquellos expuestos al tratamiento de *bioventing*, donde se observa una notable

disminución en los elementos metálicos, compuestos fisicoquímicos y volátiles perturbados por los hidrocarburos. Este método ha contribuido a reducir la sobrecarga de contaminación y a mantener los parámetros dentro de los límites permitidos según el Anexo-2 del TULSMA.

En conclusión, se acepta la hipótesis propuesta en la investigación, es decir, que el tratamiento dos es óptimo para mitigar el exceso de contaminación causado por los hidrocarburos durante su mayor tiempo de exposición al método de *bioventing*. Por último, se recomienda realizar un análisis de la huella de carbono para controlar los gases emitidos a la atmósfera.

## Referencias

1. ACUERDO MINISTERIAL 097-A. Libro VI, Anexo 4: Norma de calidad de aire ambiental.
2. AGNELLO, A.C., BAGARD, M., VAN HULLEBUSCH, E.D., ESPOSITO, G. y HUGUENOT, D."Comparative bioremediation of heavy metals and petroleum hydrocarbons co-contaminated soil by natural attenuation, phytoremediation, bioaugmentation and bioaugmentation-assisted phytoremediation". Science of the Total Environment [en línea], 2016, (Francia) vol. (563), pp. 693-703.[Consulta: 18 de enero de 2022]. ISSN 18791026. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969715308779>
3. ALVARO, C., AROCENA, L., MARTÍNEZ, M. y NUDELMAN, N. "Biodegradación aerobia de fracciones de hidrocarburos provenientes de la actividad petrolera en un suelo de la región Patagonia Norte, Argentina". Revista Internacional de Contaminacion Ambiental [en línea], 2017, (Mexico) 33(2) pp. 247-257. [Consulta: 18 de ene. de 22] ISSN 01884999.Disponible en: [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S018849992017000200247&script=sci\\_arttext](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S018849992017000200247&script=sci_arttext)
4. BAROIS, I. et al. El suelo y el petróleo: Estudio de caso de biorremediación en pasivo ambiental de Papantla,México [en línea]. Veracruz-México: Instituto de Ecología A.C, 2018. [Consulta: 18 de ene. de 22]. Disponible en: <http://www.unirioeditora.com.ar/wp-content/uploads/2018/08/978-987-688-230-9.pdf>

5. BARREZUETA-UNDA, S., CERVANTES-ALAVA, A., ULLAURI-ESPINOZA, M., BARRERA-LEON, J. y CONDOY-GOROTIZA, A. "Evaluación Del Método De Ignición Para Determinar Materia Orgánica En Suelos De La Provincia El Oro-Ecuador". FAVE Sección Ciencias Agrarias [en línea], 2020,(Ecuador) 19(2), pp. 25-36.[Consulta: 25 de enero del 2022]. ISSN 1666-7719. Disponible en: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=8025564>
6. BONADEO, E. et al. El funcionamiento del sistema suelo-planta. [en línea]. Río Cuarto-Argentina: UniRío, 2017. [Consultada: 18 de ene. de 22]. Disponible en: <http://www.unirioeditora.com.ar/wp-content/uploads/2018/08/978-987-688-230-9.pdf>
7. CHÁVEZ, A. Comparación de dos métodos para la determinación de la capacidad de intercambio catiónico en suelos calizos de la región central de Honduras (Trabajo de titulación)(pregrado). [en línea]. Escuela Agrícola Panamericana. (Zamorano-Honduras).2015. pp. 1-22.[Consulta: 25 de enero del 2022]. Disponible en: <https://bdigital.zamorano.edu/bitstream/11036/4564/1/CPA-2015-021.pdf>
8. CIPRADEC. Actualización del 1 PDOT 2015-2025 CIPRADEC 2015.
9. CORNEJO, C. Ciclos del carbono y oxígeno [blog]. [Consulta: 17 de enero del 2021]. disponible en: [http://www.secst.cl/colegioonline/docs/26052020\\_626am\\_5ecd0ade71d6e.pdf](http://www.secst.cl/colegioonline/docs/26052020_626am_5ecd0ade71d6e.pdf)
10. COSTA, M., & OCETE, C. Ciclo del nitrógeno. [En línea]. 2018. [ Consultada: 18 de ene. de 22]. Disponible en:
11. DEL MORAL, M. & RODRIGUEZ, J. Mercaptano [blog][Consulta: 23 de enero del 2022]. Disponible en: <https://www.ejemplode.com/38-quimica/4860-mercaptano.html>
12. FERNÁNDEZ, M. et al." Dinámica de la salinidad en los suelos" [en línea],2014, (México) 1(5), pp. 1-10.[Consulta 18 de enero del 2022]. ISSN 2007-5782. Disponible en:[http://cbs1.xoc.uam.mx/e\\_bios/docs/2014/05\\_SALINIDAD\\_EN\\_SUELOS\\_ESPANO L.pdf](http://cbs1.xoc.uam.mx/e_bios/docs/2014/05_SALINIDAD_EN_SUELOS_ESPANO L.pdf)
13. FLORES BARRETO, CARLOS & MENDOZA SIGUENCIA, JORGE. Biorremediación de suelo contaminado con hidrocarburos por derrames de la estación de servicio en el



- campamento de Guarumales-celec. (Trabajo de titulación) (Maestría). [En línea] Universidad de Cuenca, Ciencias químicas, Ingeniería ambiental. (Cuenca- Ecuador). 2017. Página 1-129 [Consulta: 3 de enero de 2022]. Disponible en: <http://dspace.ucuenca.edu.ec/bitstream/123456789/27211/1/tesis.pdf>
14. FUENTES DECKER, S.N. Biorremediación de suelos contaminados con fluidos de producción ( Trabajo de Titulación) (Maestría). [En línea] Universidad de Guayaquil, Ingeniería química, Ingeniería ambiental. (Guayaquil-Ecuador). 2016. pp.1-47. [Consulta: 4 de enero de 2022]. Disponible en: <http://repositorio.ug.edu.ec/bitstream/redug/35522/1/Caso%20de%20Estudio%20Remediacion%20de%20Suelos%20Contaminados.pdf>
15. GARCÍA, L. Metodología de campo para determinar la profundidad, la densidad aparente, materia orgánica e infiltración del agua en el suelo [en línea] Managua - Nicaragua: Grupo SEVEN, 2017. [Consulta: 18 de enero del 2022]. Disponibles en <https://cenida.una.edu.ni/documentos/NP33G216m.pdf>
16. GARY, J.H.. & HANDWERK, G.E. Refino de Petróleo [en línea]. Barcelona-España: Editorial Reverté, 2010. [Consulta: 17 de enero del 2022]. Disponible en: <https://books.google.co.ve/books?id=uGK8J8fK4F4C&printsec=copyright#v=onepage&q&f=false>
17. GAVANDE, A. Estructura y estabilidad estructural del suelo.[blog]. 2019. [Consultado: 18 de enero del 2022]. Disponible en: [https://aulavirtual.agro.unlp.edu.ar/pluginfile.php/42966/mod\\_resource/content/1/TEMA%206%20-%20ESTRUCTURA%20Y%20ESTABILIDAD%20ESTRUCTURAL%2026-3-19.pdf#:~:text=La%20estabilidad%20de%20la%20estructura,el%20pisoteo%2C%20manipulaciones%20mec%C3%A1nicas\).&text=Para%20la%20producci%C3%B3n%20agropecuaria%20la,estructura%20es%20una%20propiedad%20fundamental.](https://aulavirtual.agro.unlp.edu.ar/pluginfile.php/42966/mod_resource/content/1/TEMA%206%20-%20ESTRUCTURA%20Y%20ESTABILIDAD%20ESTRUCTURAL%2026-3-19.pdf#:~:text=La%20estabilidad%20de%20la%20estructura,el%20pisoteo%2C%20manipulaciones%20mec%C3%A1nicas).&text=Para%20la%20producci%C3%B3n%20agropecuaria%20la,estructura%20es%20una%20propiedad%20fundamental.)
18. GAVANDE, A. Porosidad y aireación densidad real y aparente.[blog]. 2019. [Consulta: 18 de enero del 2022]. Disponible en:

[https://aulavirtual.agro.unlp.edu.ar/pluginfile.php/42969/mod\\_resource/content/1/POROSIDAD%20Y%20AIREACION%2026-3-19.pdf](https://aulavirtual.agro.unlp.edu.ar/pluginfile.php/42969/mod_resource/content/1/POROSIDAD%20Y%20AIREACION%2026-3-19.pdf)

19. GOBIERNO DE CANARIAS. Composición del suelo [blog]. 2021.[Consulta: 10 de enero del 2022]. Disponible en: [https://www.gobiernodecanarias.org/medioambiente/temas/calidad-del-suelo/el\\_suelo\\_en\\_canarias/que\\_es\\_el\\_suelo/composicion\\_del\\_suelo/](https://www.gobiernodecanarias.org/medioambiente/temas/calidad-del-suelo/el_suelo_en_canarias/que_es_el_suelo/composicion_del_suelo/)
20. GOBIERNO DE MÉXICO. Características del petróleo [blog]. 2017. [Consulta: 10 de enero del 2022]. Disponible en: [https://www.sgm.gob.mx/Web/MuseoVirtual/Aplicaciones\\_geologicas/Caracteristicas-del-petroleo.html#:~:text=L%C3%ADquido%20natural%20oleaginoso%20e%20inflamable,cambio%20de%20presi%C3%B3n%20y%20temperatura.](https://www.sgm.gob.mx/Web/MuseoVirtual/Aplicaciones_geologicas/Caracteristicas-del-petroleo.html#:~:text=L%C3%ADquido%20natural%20oleaginoso%20e%20inflamable,cambio%20de%20presi%C3%B3n%20y%20temperatura.)
21. GONZÁLEZ MORO, A.Relaciones catiónicas y su interpretación en los análisis de suelos. [en línea]. [Consulta: 25 de enero del 2022] Disponible en: <http://aqmlaboratorios.com/relaciones-cationicas-analisis-de-suelos/>
22. GUERRA TORRALBO, J.C.Mecánica de los suelos conceptos básicos y aplicaciones. [en línea].1 [Madrid-España: Editorial Dextra, 2018. [Consulta: 9 de Enero del 2022]. Disponible en: [https://www.puce.edu.ec/sitios/documentos\\_DGA/9\\_20\\_2002\\_2007-01\\_13271\\_1708183726\\_S\\_1.pdf](https://www.puce.edu.ec/sitios/documentos_DGA/9_20_2002_2007-01_13271_1708183726_S_1.pdf)
23. GUTIERREZ, J. Suelos Spodosoles [blog]. [Consulta: 18 de enero del 2022]. Disponible en: <https://es.scribd.com/presentation/372371512/Suelos-Espodosoles-y-Alfisos>
24. IGAC. Muestreo de suelos Muestreo de aguas para análisis físicoquímico y biológico.[blog]. Bogota: Instituto Geografico Agustin Codazzi. [Consulta: 06 de enero del 2022]. Disponible en: <https://www.igac.gov.co/sites/igac.gov.co/files/guiademuestreo.pdf>
25. IÑESTA BURGOS, J.& GARCÍA FERNÁNDEZ. P.A. El petróleo: El recorrido de la energía. [en línea]. Madrid-España: Comunidad de Madrid, 2002. [Consulta: 19 de enero del 2022]. Disponible en: <https://www.fenercom.com/wp-content/uploads/2019/05/recorrido-de-la-energia-el-petroleo.pdf>

26. INIA. Semana de la Ciencia y Tecnología Jornada de Puertas Abiertas [blog]. [Consulta: 18 de enero del 2022]. Disponible en: <http://inia.uy/Documentos/P%C3%BAblicos/INIA%20Tacuaremb%C3%B3/2015/El%20Suelo%2020%20de%20mayo.pdf>
27. MAHAR, A., WANG, P., ALI, A., AWASTHI, M.K., LAHORI, A.H., WANG, Q., LI, R. y ZHANG, Z. Challenges and opportunities in the phytoremediation of heavy metals contaminated soils [en línea], 2016, vol. 126, pp. 11-121. [Consulta: 18 de enero del 2022]. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0147651315302116>
28. MANDAL, A. ¿Qué es la hipoxia?[blog]. [Consulta: 22 de enero del 2022]. Disponible en: <https://www.news-medical.net/health/What-is-Hypoxia.aspx>
29. MORO GONZÁLEZ, A. Relaciones catiónicas y su interpretación en los análisis de suelos. [blog]. [Consulta: 18 de enero del 2022]. Disponible en: <http://aqmlaboratorios.com/relaciones-cationicas-analisis-de-suelos/>
30. NIETO, M. Áridos o arenas de construcción [blog]. [Consulta: 22 de enero del 2022]. Disponible en: <https://es.slideshare.net/EsmeNieto/ridos-o-arenas-de-construccion>
31. ORTEGA, G. Significado de fiordo[blog][Consulta: 22 de enero del 2022]. Disponible en: <https://significado.com/fiordo/>
32. ORTEGA MIRANDA, G. El suelo: Características. [blog]. [Consultado el 18 de enero del 22]. Disponible en: <https://www.abc.com.py/edicion-impres/suplementos/escolar/el-suelo-caracteristicas-1724350.html>
33. OTZEN, T. y MANTEROLA, C. "Técnicas de Muestreo sobre una Población a Estudio". International Journal of Morphology [en línea], 2017, Chile 35(1), pp. 227-232. [Consulta: 18 de enero del 2022]. Disponible en: <https://scielo.conicyt.cl/pdf/ijmorphol/v35n1/art37.pdf>
34. PÁEZ HOFFMANN, M.A. "Evaluación del método fenton aplicado a suelos contaminados con hidrocarburos procedentes de pasivos ambientales del bloque 61".[en línea].2019,

- (Ecuador). [Consulta: 18 de enero del 2022]. Disponible en: <https://repositorio.uisek.edu.ec/handle/123456789/3473>
35. PAWAR, R. "The Effect of Soil pH on Bioremediation of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHS)". *Journal of Bioremediation & Biodegradation* [en línea], 2015, 06(3), pp. 1-14 [Consulta: 12 de febrero del 2022]. Disponible en: <https://www.omicsonline.org/open-access/the-effect-of-soil-ph-on-bioremediation-of-polycyclic-aromatic-hydrocarbons-pahs-2155-6199-1000291.php?aid=52038>
36. PELLEGRINE, A. Textura y color del suelo. *Suelos* [blog]. [Consulta: 18 de enero del 2022]. Disponible en: [https://aulavirtual.agro.unlp.edu.ar/pluginfile.php/42831/mod\\_resource/content/1/TEMA%203%20-%20TEXTURA%20Y%20COLOR.pdf](https://aulavirtual.agro.unlp.edu.ar/pluginfile.php/42831/mod_resource/content/1/TEMA%203%20-%20TEXTURA%20Y%20COLOR.pdf)
37. QUIJANO, G.C. Evaluación de la degradación de hidrocarburos totales del petróleo por bioestimulación con abonos orgánicos asociados a especies arbóreas (Trabajo de titulación)(Maestría). [En línea] ECOSUR.(Tabasco-Mexico). 2015. pp.1-109 [Consulta: 18 de enero del 2022]. Disponible en: [https://www.researchgate.net/publication/279751879\\_Evaluacion\\_de\\_la\\_degradacion\\_de\\_hidrocarburos\\_totales\\_del](https://www.researchgate.net/publication/279751879_Evaluacion_de_la_degradacion_de_hidrocarburos_totales_del)
38. RECINOS, Derick. Determinación de Textura por el método de Bouyucos [blog]. [Consulta: 31 de enero del 2022]. Disponible en: <https://es.scribd.com/document/387041125/DETERMINACION-DE-TEXTURA-POR-EL-METODO-DE-BOUYUCOS-docx>.
39. RODRÍGUEZ OCHOA, E.P. Biorremediación de los suelos contaminados con hidrocarburos provenientes de la estación de Secoya utilizando un consorcio bacteriano aerobio a escala de laboratorio (Trabajo de Titulación) (Pregrado). [en línea]. Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Facultad de ciencias, Escuela de ingeniería ambiental. (Riobamba-Ecuador). 2018. pp 1-114 [Consulta: 18 de enero del 2022]. Disponible en: <http://dspace.esPOCH.edu.ec/bitstream/123456789/10468/1/96T00495.pdf>
40. SIGTIERRAS. Mapa de órdenes de suelos del Ecuador.[blog]. [Consulta: 18 de enero del 2022]. Disponible en: <http://www.sigtierras.gob.ec/mapa-de-ordenes-de-suelos/>

41. SIMBAÑA CAZAR, C.J. Biorremediación de suelos contaminados con hidrocarburos de la parroquia Taracoa en Francisco de Orellana, mediante el hongo *Pleurotus ostreatus*. (Trabajo de titulación) (Pregrado) [en línea] Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Facultad de ciencias, Escuela de ciencias Químicas. (Riobamba-Ecuador). 2016. pp 1-97 [Consulta: 18 de enero del 2022]. Disponible en: <http://dspace.espech.edu.ec/bitstream/123456789/4916/1/236T0192.pdf>
42. SOLA REDONDO, F. La textura de los suelos agrícolas [blog]. [Consulta: 22 de enero del 2022]. Disponible en: <https://www.universidadderiego.com/la-textura-en-los-suelos-agricolas/>.
43. SUAREZ BELTRAN, R.M. Guía de métodos de biorremediación para la recuperación de suelos contaminados por hidrocarburos. (Trabajo de titulación) (maestría). [en línea] Universidad Libre.(Bogota-Colombia). 2013. pp 1-60 [Consulta: 18 de enero del 2022]. Disponible en: <https://repository.unilivre.edu.co/bitstream/handle/10901/10607/TRABAJO%20FINAL%20cd.pdf?sequence=1>
44. TANG, J., ZHU, W., KOOKANA, R. y KATAYAMA, A. "Characteristics of biochar and its application in remediation of contaminated soil". *Journal of Bioscience and Bioengineering* [en línea], 2013 (China) 116(6) pp. 653-659. [Consulta: 12 de febrero del 2022]. Disponible en: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-84886444859&doi=10.1016%2Fj.jbiosc.2013.05.035&partnerID=40&md5=bd96dc593ce42ee717e547957d9417ad>.
45. TORRES ORDÓÑEZ, M.F.. Percepción social respecto a suelos contaminados por hidrocarburos en la Parroquia San Carlos, perteneciente al Cantón Joya de los Sachas, Provincia de Orellana, Ecuador (Trabajo de titulación) (pregrado) Universidad Católica del Ecuador, Facultad de ciencias humanas, Escuela de ciencias geográficas. (Quito-Ecuador). 2019. pp 1-91 [Consulta: 18 de enero 2022]. Disponible en: <http://repositorio.puce.edu.ec/bitstream/handle/22000/17431/PERCEPCI%c3%93N%20SOCIAL%20RESPECTO%20A%20SUELOS%20CONTAMINADOS%20POR%20HI->

DROCARBUROS%20EN%20LA%20PARROQUIA%20SAN%20CARLOS%2c%20P.pdf?sequence=1&isAllowed=y

46. VELÁSQUEZ ARIAS, J. "Contaminación de suelos y cuerpos de agua por hidrocarburos en Colombia. Análisis de la fitorremediación como estrategia biotecnológica de recuperación". Revista de investigación agraria y ambiental. [en línea], 2017, (Colombia) 8(1), pp.151-168 [Consulta: 18 de enero del 2022]. Disponible en: <https://hemeroteca.unad.edu.co/index.php/riaa/article/view/1846/2227>
47. VELÁSQUEZ ARIAS, J.A. Contaminación de suelos y cuerpos de agua por hidrocarburos en Colombia Fitorremediación como estrategia biotecnológica de recuperación (Trabajo de titulación) (Pregrado) [en línea]. Universidad Nacional Abierta y a Distancia. 2016. pp. 1-51 [Consulta: 26 de enero 2022]. Disponible en: [http://siar.minam.gob.pe/puno/sites/default/files/archivos/public/docs/tesis\\_contaminacion\\_de\\_suelos\\_y\\_cuerpos\\_de\\_agua\\_por\\_hidrocarburos\\_en\\_colombia.pdf](http://siar.minam.gob.pe/puno/sites/default/files/archivos/public/docs/tesis_contaminacion_de_suelos_y_cuerpos_de_agua_por_hidrocarburos_en_colombia.pdf).
48. VILCA ROLDAN, G.C. Mecanismos naturales de remediación de suelos contaminados por hidrocarburos (Trabjado de titulación) (maestría). [en línea] Universidad Científica del Sur, Facultad de ciencias ambientales, Escuela de ingeniería ambiental. (Lima-Perú). 2019. pp. 1-24 [Consulta: 18 de enero del 2022]. Disponible en: <https://repositorio.cientifica.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12805/2090/TB-Vilca%20G-Ext.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
49. VIZUETE GARCÍA, R.A. Remediación socio ambiental y su incidencia en suelos contaminados con hidrocarburos en el campo sachá en el año 2015 (Trabajo de Titulación) (M2016. pp.aestría). [en línea] Universidad Tecnológica Indoamérica. (Ambato-Ecuador).2016. pp. 1-139 [Consulta: 18 de enero del 2022]. Disponible en: <http://repositorio.uti.edu.ec/bitstream/123456789/343/1/Trabajo%2093%20Vizuete%20Garcia%20Ricardo%20Abel.pdf>
50. VIZUETE GARCÍA, R.A. et al. "Biorremediación de suelos contaminados con hidrocarburos a base de bacterias utilizadas como bioproductos". [en línea], 2020 , (Ecuador) 17(1), pp 179-180. [Consulta: 18 de enero del 2022].. ISSN 2256-3938.

Disponible en: [http://www.scielo.org.co/scielo.php?pid=S1794-44492020000100177&script=sci\\_abstract&tlng=es](http://www.scielo.org.co/scielo.php?pid=S1794-44492020000100177&script=sci_abstract&tlng=es)

51. WUANA, R.A. y OKIEIMEN, F.E. "Heavy Metals in Contaminated Soils: A Review of Sources, Chemistry, Risks and Best Available Strategies for Remediation". *ISRN Ecology* [en línea], 2011(1), pp. 402647. [Consulta: 12 de febrero del 2021]. Disponible en: <https://doi.org/10.5402/2011/402647>.

© 2023 por los autores. Este artículo es de acceso abierto y distribuido según los términos y condiciones de la licencia Creative Commons Atribución-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional (CC BY-NC-SA 4.0) (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>).