



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE GUAYAQUIL
CARRERA DE INGENIERÍA AMBIENTAL

**ESTUDIO DE LA REDUCCIÓN DE HIDROCARBUROS
EN SUELOS AGRÍCOLAS MEDIANTE
BIORREMEDIACIÓN BASADA EN
MICROORGANISMOS Y ENSAYOS RÁPIDOS**

Trabajo de titulación previo a la obtención del
Título de Ingeniero Ambiental

AUTOR: JUAN MARCEL VILLAMAR DEL PEZO

TUTOR: ING. NÉSTOR MARCELO BERRONES RIVERA, M. SC.

GUAYAQUIL - ECUADOR

2025 - 2026

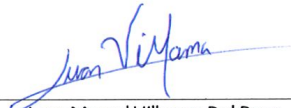
**CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE
TITULACIÓN**

Yo, **JUAN MARCEL VILLAMAR DEL PEZO** con documento de identificación No. **0930367230** manifestó que:

Soy el autor y responsable del presente trabajo; y, autorizamos a que sin fines de lucro la Universidad Politécnica Salesiana pueda usar, difundir, reproducir o publicar de manera total o parcial el presente trabajo de titulación.

Guayaquil, 26 de febrero del 2026

Atentamente,



Juan Marcel Villamar Del Pezo
C.C. No. 0930367230

**CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE
TITULACIÓN A LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA**

Yo, **JUAN MARCEL VILLAMAR DEL PEZO** con documento de identificación No. **0930367230**, expreso mi voluntad y por medio del presente documento cedo a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que soy el autor del trabajo experimental **ESTUDIO DE LA REDUCCIÓN DE HIDROCARBUROS EN SUELOS AGRÍCOLAS MEDIANTE BIORREMEDIACIÓN BASADA EN MICROORGANISMOS Y ENSAYOS RÁPIDOS**, el cual ha sido desarrollado para optar por el título de: INGENIERO AMBIENTAL, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En concordancia con lo manifestado, suscribo este documento en el momento que hacemos la entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Guayaquil, 26 de febrero del 2026

Atentamente,



Juan Marcel Villamar Del Pezo
C.C. No. 0930367230

CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, **Néstor Marcelo Berrones Rivera** con documento de identificación No. **0914078290** docente de la Universidad Politécnica Salesiana, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación **ESTUDIO DE LA REDUCCIÓN DE HIDROCARBUROS EN SUELOS AGRÍCOLAS MEDIANTE BIORREMEDIACIÓN BASADA EN MICROORGANISMOS Y ENSAYOS RÁPIDOS**, realizado por Juan Marcel Villamar Del Pezo con documento de identificación No. 0930367230, obteniendo como resultado final el trabajo de titulación bajo la opción Trabajo experimental que cumple con todos los requisitos determinados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Guayaquil, 26 de febrero del 2026

Atentamente,



Ing. Néstor Marcelo Berrones Rivera, M.
Sc. C. C. No.: 0914078290

DEDICATORIA

A mis padres, por ser el apoyo incondicional que ha sostenido cada etapa de mi camino. Gracias por enseñarme, con el ejemplo, que la constancia vence cualquier dificultad y que la honestidad y el esfuerzo son la base de todo logro. Su confianza en mí, incluso en los momentos más difíciles, me dio la fuerza necesaria para no rendirme. Esta tesis es también resultado del amor, los valores y el sacrificio que me han brindado a lo largo de mi vida.

A mis tres hermanos, compañeros de vida y de innumerables experiencias, quienes, con su alegría, su sentido del humor y su lealtad hicieron más llevadero cada desafío. Gracias por estar siempre presentes, tanto en los momentos felices como en los complicados, por escucharme, apoyarme y tenderme la mano sin condiciones. Cada uno ha dejado una huella invaluable en mi crecimiento personal, y este logro también les pertenece.

A mis abuelos, que hoy viven en mi recuerdo y en mi corazón. Gracias por el amor, la sabiduría y las enseñanzas que sembraron en mí. Sus palabras, historias y ejemplo continúan guiando mis pasos e inspirándome a avanzar con humildad, respeto y gratitud. Aunque ya no estén físicamente, su presencia permanece en cada paso que doy.

Juan Marcel Villamar Del Pezo

AGRADECIMIENTO

Deseo expresar mi sincero agradecimiento al Ingeniero Néstor Marcelo Berrones Rivera por su valioso acompañamiento durante el desarrollo de este trabajo de titulación. Su guía constante, compromiso y disposición para orientar cada etapa del proceso fueron fundamentales para lograr la culminación de esta investigación.

A lo largo del desarrollo de la tesis, el Ingeniero Berrones brindó un apoyo permanente, aportando sugerencias oportunas, compartiendo su experiencia profesional y demostrando un genuino interés por mi aprendizaje y crecimiento académico. Su paciencia, claridad al explicar los contenidos y apertura para resolver dudas permitieron enfrentar y superar los distintos desafíos que surgieron durante el proceso investigativo.

Por todo lo anterior, expreso mi más sincera gratitud al Ingeniero Néstor Marcelo Berrones Rivera, reconociendo en él no solo a un asesor comprometido, sino también a un guía inspirador que contribuyó significativamente a mi formación profesional y a la culminación exitosa de este trabajo.

Juan Marcel Villamar Del Pezo

RESUMEN

La contaminación de suelos agrícolas por hidrocarburos derivados del petróleo constituye una problemática ambiental relevante en el Ecuador, especialmente en zonas rurales donde la actividad petrolera ha generado pasivos ambientales que afectan la fertilidad del suelo, la productividad agrícola y la salud de las comunidades. Estos compuestos, caracterizados por su alta persistencia y baja biodegradabilidad, alteran las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo, disminuyendo la actividad microbiana, la disponibilidad de nutrientes y la capacidad de recuperación ecológica.

El presente estudio tuvo como objetivo evaluar la efectividad de la biorremediación basada en microorganismos para la reducción de hidrocarburos totales del petróleo (TPH) en suelos agrícolas contaminados de la parroquia Taura. La investigación se desarrolló bajo un enfoque experimental cuantitativo, aplicando un diseño de medición antes y después del tratamiento, con análisis de TPH mediante cromatografía de gases con detector de ionización de llama (GC-FID), técnica reconocida por su sensibilidad y precisión para la determinación de compuestos orgánicos en matrices ambientales.

La caracterización inicial del suelo evidenció una concentración promedio de 118 000 mg/kg de TPH, lo que indica un alto grado de contaminación.

Posteriormente, tras la aplicación del tratamiento biológico, la concentración se redujo a 70 000 mg/kg alcanzando una disminución absoluta de 48 000 mg/kg y una eficiencia de remoción del 40,7 %. Este resultado demuestra una reducción significativa de la carga contaminante y evidencia la acción de procesos de biodegradación microbiana.

De manera complementaria, se observaron mejoras en parámetros fisicoquímicos del suelo. La conductividad eléctrica disminuyó de 81 a 62 $\mu\text{S}/\text{cm}$, equivalente a una reducción aproximada del 23,5 %, lo que sugiere condiciones más favorables para la actividad biológica y el crecimiento vegetal. Asimismo, el pH se mantuvo dentro del rango adecuado para uso agrícola.

En conjunto, los resultados demuestran que la biorremediación constituye una alternativa técnica viable, sostenible y ambientalmente amigable para la recuperación progresiva de suelos contaminados por hidrocarburos, contribuyendo a la restauración de su funcionalidad ecológica y a la protección de la actividad agrícola local.

ABSTRACT

The contamination of agricultural soils by petroleum-derived hydrocarbons constitutes a significant environmental problem in Ecuador, especially in rural areas where oil-related activities have generated environmental liabilities that affect soil fertility, agricultural productivity, and the health of local communities. These compounds, characterized by their high persistence and low biodegradability, alter the physical, chemical, and biological properties of the soil, reducing microbial activity, nutrient availability, and ecological recovery capacity.

The present study aimed to evaluate the effectiveness of microorganism-based bioremediation for the reduction of total petroleum hydrocarbons (TPH) in contaminated agricultural soils from the Taura parish. The research was conducted under a quantitative experimental approach, applying a before-and-after treatment measurement design, with TPH analysis performed using gas chromatography with flame ionization detection (GC-FID), a technique recognized for its sensitivity and precision in determining organic compounds in environmental matrices.

The initial soil characterization showed an average TPH concentration of 118,000 mg/kg, indicating a high degree of contamination.

Subsequently, after applying the biological treatment, the concentration decreased to 70,000 mg/kg, achieving an absolute reduction of 48,000 mg/kg and a removal efficiency of 40.7%. This result demonstrates a significant decrease in the contaminant load and provides evidence of microbial biodegradation processes.

Additionally, improvements were observed in the soil's physicochemical parameters. Electrical conductivity decreased from 81 to 62 $\mu\text{S}/\text{cm}$, equivalent to an approximate reduction of 23.5%, suggesting more favorable conditions for biological activity and plant growth. Likewise, the pH remained within the appropriate range for agricultural use.

Overall, the results demonstrate that bioremediation constitutes a technically viable, sustainable, and environmentally friendly alternative for the progressive recovery of hydrocarbon-contaminated soils, contributing to the restoration of their ecological functionality and the protection of local agricultural activities.

ÍNDICE DE CONTENIDO

CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN	I
CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN A LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA.....	ii
CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN	iii
DEDICATORIA.....	iv
AGRADECIMIENTO	v
RESUMEN	vii
ABSTRACT	viii
1. Introducción.....	1
1.1 Delimitación	2
1.1.1 Delimitación Geográfica	2
1.2 Pregunta de investigación	3
1.3 Objetivos.....	3
1.3.1 Objetivo general	3
1.3.2 Objetivos específicos	3
1.4 Hipótesis	3
1.4.1 Hipótesis General.....	3
1.4.2 Hipótesis Específicas	3
2.0 Marco Teórico.....	4
2.1 Contexto.....	4
2.2 Contaminantes de hidrocarburos en suelos agrícolas	4
2.3 Principios de la biorremediación.....	5
2.4 Mecanismos de degradación microbiana y vegetal	5
2.5 Factores que condicionan la eficacia de la biorremediación	6
2.6 Indicadores de evaluación de la recuperación del suelo	7
2.7 Diseño experimental para suelos agrícolas.....	8
2.8 Aplicación en suelos agrícolas: retos y oportunidades	8
2.9 Estrategias emergentes e innovadoras.....	9
2.10 Consideraciones de sostenibilidad, regulaciones y buenas prácticas.....	9
3.0 METODOLOGÍA.....	11

3.1 Tipo de investigación	11
3.2 Población y muestra	11
3.3 Variables de estudio.....	12
3.3.1 Variables independientes.....	12
3.3.2 Variable dependiente	12
3.4 Procedimiento metodológico.....	12
3.4.1 Caracterización inicial del suelo.....	12
3.4.2 Herramientas para la biorremediación	14
3.4.2.1 Materiales.....	14
3.4.2.1.1 Características técnicas y beneficios del agente microbiano CONSUME POW de la marca SPARTAN.....	14
3.4.2.1.1.1 Descripción	14
3.4.2.1.1.2 Características técnicas principales	15
3.4.2.1.1.3 Beneficios principales	15
3.4.2.2 Equipos de protección o (EPP).....	15
3.4.3. Tratamiento de biorremediación.....	16
3.4.3.1 Monitoreo y evaluación.....	17
3.4.4 Extracción y análisis de muestras por medio de cromatografía de gases	18
3.4.4.1 Principio del método	18
3.4.4.2 Materiales y equipos.....	18
3.4.4.2.1 Equipos	18
3.4.4.2.2 Reactivos.....	20
3.4.4.3 Muestreos y preservación de las muestras.....	21
3.4.4.4 Preparación de la muestra.....	21
3.4.4.5 Preparación de estándares y curva de calibración.....	22
3.4.4.6 Condiciones cromatográficas típicas	22
3.4.4.7 Análisis cromatográfico	23
3.4.4.8 Cálculo de resultados	23
3.4.4.9 Presentación e interpretación de resultados	24
3.5 Diseño experimental	24
3.6 Documentación y registro	25
3.7 Caracterización inicial del suelo antes del tratamiento (línea base).....	25

3.8 Experimentación	26
3.8.1 Preparación de las unidades experimentales	26
3.8.2 Seguimiento y monitoreo experimental	26
3.9. Evaluación de resultados	27
3.9.1 Interpretación de resultados	27
3.10 Documentación, técnicas y herramientas de recolección de datos	28
3.10.1 Documentación del proceso	28
3.10.2 Técnicas y evaluación	29
3.11 Evaluación periódica de la muestra	29
4.1 Introducción	33
4.2 Resultados de Hidrocarburos Totales de Petróleo (TPH)	34
4.2.1 Concentración de TPH antes del tratamiento	35
4.2.2 Concentración de TPH después del tratamiento	36
4.2.3 Comparación antes y después del tratamiento	36
4.3 Resultados de pH del suelo	37
4.3.1 Ph antes del tratamiento	38
4.3.2 Ph después del tratamiento	39
4.3.3 Comparación del pH antes y después	39
4.4 Resultados de Conductividad Eléctrica	40
4.4.1 Conductividad eléctrica antes del tratamiento	41
4.4.2 Conductividad eléctrica después del tratamiento	41
4.4.3 Comparación antes y después del tratamiento	42
4.5 Análisis general de resultados	43
4.6 Comparativa con el Acuerdo Ministerial No. 028	43
5.1 Conclusiones	45
5.2 Recomendaciones	45
Bibliografía	47
Anexos fotográficos	52

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Técnicas y evaluación	29
Tabla 2. Concentración de TPH antes del tratamiento	35

Tabla 3. Concentración de TPH después del tratamiento	36
Tabla 4. Comparación de TPH antes y después del tratamiento.	36
Tabla 5. Valores de pH antes del tratamiento.....	38
Tabla 6. Valores de pH después del tratamiento	39
Tabla 7. Comparación del pH promedio.....	39
Tabla 8. Conductividad eléctrica antes del tratamiento	41
Tabla 9. Conductividad eléctrica después del tratamiento.....	41
Tabla 10. Comparación de la conductividad eléctrica promedio.....	42
Tabla 11. Comparación de resultados con el Acuerdo Ministerial No 028 Anexo 2 Tabla 2.	44

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1. Delimitación geográfica de la finca en Taura.....	2
Ilustración 2. Pesaje del microorganismo degradador de hidrocarburos.....	30

ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1. Cálculo de eficiencia	37
Ecuación 2. Porcentaje de reducción	42

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1. Proceso del pesaje al agente microbiano degradador de hidrocarburos para la aplicación en el suelo contaminado.....	52
Anexo 2. Proceso de aireación del suelo para bioestimar el agente microbiano.	52
Anexo 3. Proceso de la aplicación del agente microbiano al suelo contaminado.....	53
Anexo 4. Proceso de la aplicación de 1.5 litros de agua al suelo contaminado.	53
Anexo 5. Proceso de Medición de la conductividad del suelo contaminado.....	54
Anexo 6. Proceso de la medición del Ph del suelo contaminado.	54
Anexo 7. Resultados enviados del laboratorio antes del proceso del tratamiento de la biorremediación realizados por el laboratorio labcestta.	55
Anexo 8. Resultados enviados del laboratorio después del proceso del tratamiento de la biorremediación realizados por el laboratorio labcestta.	56
Anexo 9. Microorganismo seleccionado para la degradación del hidrocarburo llamado CONSUME POW de la marca SPARTAN utilizado.	57

CAPITULO 1

1. Introducción

La contaminación de los suelos por hidrocarburos en el Ecuador constituye un problema ambiental serio, complejo y de múltiples dimensiones.

Una de las causas es la explotación petrolera en Ecuador, en especial en la región amazónica, ha generado múltiples derrames, filtraciones y liberación incontrolada de hidrocarburos al ambiente terrestre. Por ejemplo, en la revisión sobre pasivos ambientales en la Amazonía se señala que “la contaminación de suelo con hidrocarburos es un problema que afecta a la salud humana, biodiversidad y calidad del suelo. A lo largo de la historia hidrocarburífera del Ecuador, se han registrado varios casos de derrames, destacando los pasivos ambientales situados en la Amazonía ecuatoriana” (Felicita Nato et al.,2025)

Otro estudio indica que en la parroquia San Carlos (cantón Joya de los Sachas, provincia de Orellana) “la problemática de la actividad hidrocarburífera comienza por el alto impacto ambiental que presenta cada fase de la operación, afectando principalmente al suelo, por la contaminación que producen los derrames inevitables en esta zona” (Torres Ordóñez, 2019).

Las principales fuentes de contaminación del suelo incluyen:

- Derrames de crudo durante la extracción, transporte o almacenamiento.
- Fugas en infraestructura petrolera (oleoductos, tanques, pozos abandonados).
- Manejo inadecuado de residuos o sedimentos petrolíferos.
- Remoción o alteración del suelo que facilita la infiltración de hidrocarburos.

En el Ecuador amazónico se identifican múltiples focos de contaminación. Por ejemplo, en la revisión se menciona que el cantón Lago Agrio (provincia de Sucumbíos)” es el cantón con mayor cantidad de pasivos ambientales, con un total de 1.239 fuentes de contaminación”. (Felicita Nato et al.,2025)

Un estudio de caso en la zona de “Campo Charapas” (Sucumbíos) analiza suelos contaminados con crudo para identificar biomarcadores, lo que confirma que hay contaminación severa del suelo en esa región petrolera. (Cisneros Salas et al., 2022) Asimismo, una tesis en la parroquia Virgen del Carmen analiza la contaminación de suelos por hidrocarburos y propone remediación mediante bioventing, lo cual indica que la situación es reconocida a nivel comunitario.

Los hidrocarburos en el suelo provocan alteraciones fisicoquímicas y biológicas que degradan la calidad del suelo. Por ejemplo, en el estudio de la comunidad Virgen del Carmen se encontró que, pese a que la capacidad de retención de agua no se vio “significativamente” afectada, sí hubo “una pérdida de nutrientes. También se observó una perturbación en la conductividad eléctrica y la salinidad debido a la contaminación por hidrocarburos” (Zabala Vizuite et al., 2023).

Además, la presencia de hidrocarburos totales extraíbles (TEPH) no siempre se correlaciona con toxicidad real si no se considera la biodisponibilidad: un estudio ecuatoriano comparó TEPH con TBPH (hidrocarburos totales bio-disponibles) y concluyó que la regulación basada exclusivamente en TEPH podría sub- o sobreestimar el riesgo ambiental. (Romero Miño, A. 2005).

A nivel social, las comunidades agrícolas en zonas petroleras experimentan pérdidas de cosechas, muerte de animales y degradación de los recursos de subsistencia (Torres Ordóñez, 2019).

La contaminación de suelos agrícolas por hidrocarburos pesados (HP), constituye un problema ambiental crítico que impacta directamente la seguridad alimentaria y los medios de vida de las comunidades rurales. Estos compuestos, caracterizados por su alta persistencia y baja biodegradabilidad, degradan la estructura del suelo, suprimen la actividad microbiana beneficiosa y ejercen efectos fitotóxicos que imposibilitan la agricultura.

1.1 Delimitación

1.1.1 Delimitación Geográfica

El lugar de experimentación donde se levantó la información para la elaboración del presente documento se encuentra en las siguientes coordenadas:

X: 645535.22; Y: 9742378.06

Parroquia Taura, donde se tomó la muestra de suelo para el experimento.

Ilustración 1. Delimitación geográfica de la finca en Taura



Fuente: Google Earth

1.2 Pregunta de investigación

¿Cuáles son las principales causas, efectos y desafíos para la remediación de los suelos contaminados por hidrocarburos en el Ecuador, y cómo puede mejorarse la gestión ambiental para reducir su impacto en los ecosistemas y las comunidades locales?

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo general

Evaluar la efectividad de la biorremediación en la recuperación de suelos agrícolas, mediante el uso de microorganismos para la degradación de los hidrocarburos para comprobar la reducción de los niveles de hidrocarburos y la mejora de las propiedades del suelo agrícola.

1.3.2 Objetivos específicos

- Caracterizar las condiciones iniciales del suelo agrícola mediante evaluaciones físico, químicas del suelo a tratar.
- Aplicar tratamientos de biorremediación utilizando microorganismos bajo condiciones controladas para la remoción del hidrocarburo.
- Determinar la eficiencia del tratamiento biológico comparando los resultados obtenidos antes y después de la aplicación del proceso de biorremediación para medir el grado de éxito del proceso de biorremediación.

1.4 Hipótesis

1.4.1 Hipótesis General

Evaluando la efectividad de la biorremediación en la recuperación de suelos agrícolas, permitirá comprobar la reducción de los niveles de hidrocarburos y la mejora de las propiedades del suelo agrícola.

1.4.2 Hipótesis Específicas

- Caracterizando las condiciones iniciales del suelo agrícola se podrá precisar el nivel de contaminación por hidrocarburos.
- Aplicando tratamientos de biorremediación utilizando microorganismos que permitirá la remoción del hidrocarburo.
- Determinando la eficiencia del tratamiento biológico se podrá medir el grado de éxito del proceso de biorremediación.

CAPITULO 2

2.0 Marco Teórico

2.1 Contexto

La contaminación del suelo agrícola por hidrocarburos como los derivados del petróleo y sus productos de refinación es un problema ambiental serio que afecta no solo al campo, sino también a la salud humana y al equilibrio de los ecosistemas. Cuando estos compuestos se liberan durante la exploración, el transporte, el almacenamiento o el uso de combustibles, pueden filtrarse en los suelos agrícolas, alterando su estructura, disminuyendo su fertilidad y afectando la actividad biológica necesaria para cultivar alimentos sanos (Rusănescu, Istrate, & Constantin, 2025).

Además, algunos de estos compuestos, como los hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP), representan un riesgo directo para la salud, ya que pueden ser mutagénicos, teratogénicos o incluso cancerígenos, lo que pone en juego la seguridad de los alimentos que consumimos (Rusănescu et al., 2025).

Frente a esta situación, recuperar los suelos contaminados se vuelve una prioridad. No solo se trata de mantener la producción agrícola, sino también de restaurar los ecosistemas y garantizar alimentos seguros. En este sentido, la biorremediación el uso de organismos vivos capaces de degradar o transformar contaminantes surge como una alternativa prometedora, sostenible y cada vez más estudiada por la ciencia (Mekonnen, Aragaw, & Genet, 2024; León, Rico Cerda, Santoyo Pizano, Márquez Benavides, & Saucedo Martínez, 2018).

2.2 Contaminantes de hidrocarburos en suelos agrícolas

Los hidrocarburos presentes en los suelos pueden clasificarse en diferentes tipos: alifáticos, aromáticos (incluyendo los hidrocarburos aromáticos policíclicos o HAP), aceites lubricantes y otros residuos derivados del petróleo. Cada uno de estos grupos se comporta de manera distinta: varían en su solubilidad, volatilidad, tamaño molecular, afinidad por el suelo y persistencia. Por ejemplo, los HAP de mayor peso molecular tienden a unirse fuertemente a la materia orgánica y a las partículas finas del suelo, lo que reduce su disponibilidad para los microorganismos y hace que su degradación sea más lenta y difícil (Rusănescu et al., 2025).

La contaminación por hidrocarburos impacta directamente la productividad de los suelos agrícolas. Puede afectar la germinación de las semillas, el crecimiento de las raíces y la capacidad de las plantas para absorber nutrientes. Además, altera las propiedades físicas del suelo: cambia su porosidad, su capacidad para retener agua, su permeabilidad y su habilidad para intercambiar nutrientes esenciales (Mekonnen et al., 2024). En otras palabras, los suelos contaminados pierden gran parte de su capacidad para ser cultivados de manera efectiva.

2.3 Principios de la biorremediación

La biorremediación se define como el uso de organismos vivos —microorganismos, plantas, hongos o sus productos metabólicos para eliminar, transformar o inmovilizar contaminantes en el ambiente (Mekonnen et al., 2024).

Se pueden diferenciar varias categorías de intervención:

- **Atención/atenuación natural (natural attenuation).** Los procesos biológicos que ya están ocurriendo de forma espontánea en el suelo sin intervención humana directa.
- **Bioestimulación.** Adición de nutrientes, oxígeno, enmiendas orgánicas o minerales para estimular la actividad del microbiota autóctona degradadora. Ejemplo: adición de nitrógeno y fósforo para mejorar la degradación de hidrocarburos totales del petróleo (TPH). (Energies, 2022)
- **Bioaumentación:** inoculación del suelo con cepas específicas o consorcios microbianos degradadores de hidrocarburos que complementan a la microbiota nativa. Por ejemplo, ensayos con consorcios bacterianos en suelos contaminados lograron reducciones considerables de TPH (Ahmed Mohamed Taher & Saeed, 2021).
- **Fitorremediación / rizorremediación:** uso de plantas (y su rizosfera) para extraer, degradar o estabilizar contaminantes, frecuentemente combinadas con microorganismos rizosféricos o micorrízicos. (Tang, 2024)
- **Ex situ vs in situ:** Técnicas aplicadas directamente en el sitio de contaminación (in situ) o mediante excavación, tratamiento y devolución al sitio (ex situ). Las ex situ ofrecen mayor control, pero mayor coste y alteración del suelo. (Mekonnen et al., 2024)

2.4 Mecanismos de degradación microbiana y vegetal

Los microorganismos que degradan hidrocarburos lo hacen a través de diferentes rutas metabólicas. Cuando hay oxígeno disponible (condiciones aeróbicas), enzimas como las monooxigenasas y dioxigenasas incorporan oxígeno en los contaminantes, lo que facilita su fragmentación y, finalmente, su transformación en agua (H₂O) y dióxido de carbono (CO₂) (Mekonnen et al., 2024). En ambientes sin oxígeno (condiciones anaeróbicas), la degradación es más lenta, pero igualmente puede ocurrir mediante procesos reductivos o fermentativos (Mekonnen et al., 2024).

El éxito de estos procesos depende de varios factores: contar con comunidades microbianas adecuadas, con genes capaces de degradar los contaminantes, y disponer de condiciones ambientales favorables, como nutrientes, humedad y, cuando se requiere, oxígeno. Por

ejemplo, estudios recientes de metagenómica han permitido descubrir nuevas enzimas que ayudan a degradar hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP), ampliando nuestras herramientas para la limpieza de suelos contaminados (Nagy et al., 2023).

En la fitorremediación, las plantas también juegan un papel clave. Sus raíces liberan compuestos que estimulan la actividad de los microorganismos, mejoran la aireación del suelo y movilizan los contaminantes hacia zonas donde la microbiota puede actuar con mayor eficacia (Tang, 2024). De este modo, plantas y microorganismos trabajan juntos para restaurar la salud del suelo.

2.5 Factores que condicionan la eficacia de la biorremediación

La eficiencia de las estrategias de biorremediación en suelos agrícolas contaminados por hidrocarburos está condicionada por múltiples factores edáficos, químicos, biológicos y operativos:

- **Biodisponibilidad del contaminante:** Muchos hidrocarburos se adsorben a la materia orgánica y partículas finas del suelo, reduciendo su accesibilidad para microorganismos. (Rusănescu et al., 2025)
- **pH del suelo:** El pH afecta tanto la solubilidad de nutrientes como la actividad enzimática de los microorganismos. Los valores cercanos a neutros (6–9) favorecen la degradación de hidrocarburos. (Mekonnen et al., 2024)
- **Temperatura y humedad:** Estas condiciones regulan la tasa metabólica microbiana; suelos secos, fríos o anóxicos presentan menor eficacia. (Mekonnen et al., 2024)
- **Oxígeno disponible:** En suelos contaminados, la elevada demanda de carbono puede provocar agotamiento de oxígeno, favoreciendo rutas anaeróbicas menos eficientes. (Mekonnen et al., 2024)
- **Nutrientes (N, P, micronutrientes):** La biodegradación de hidrocarburos altos en carbono puede provocar desbalance en la relación C:N:P, limitando la actividad microbiana. La adición de nitrógeno, fósforo o materia orgánica puede estimular la degradación. (Energies, 2022)
- **Textura y estructura del suelo:** Suelos arcillosos o compactados dificultan la difusión de oxígeno y nutrientes, lo cual reduce la eficiencia; en cambio suelos arenosos u orgánicos suelen responder mejor. (Mekonnen et al., 2024)

- **Presencia de microorganismos degradadores adecuados:** La diversidad y abundancia de cepas autóctonas y su capacidad de adaptarse al contaminante es clave para el éxito del tratamiento. (León et al., 2018)
- **Tiempo de exposición y envejecimiento de la contaminación:** Las contaminaciones antiguas tienden a formar contaminantes más recalcitrantes (por ejemplo, hidrocarburos más ligados) y son más difíciles de degradar. (Applicable in Taher & Saeed, 2021)
- **Condiciones agrícolas del sitio y riesgos agrícolas:** En suelos agrícolas, se debe asegurar que la estrategia de biorremediación no afecte negativamente la fertilidad o productividad del suelo ni introduzca residuos tóxicos.

2.6 Indicadores de evaluación de la recuperación del suelo

La evaluación de la efectividad de una estrategia de biorremediación en suelos agrícolas contaminados debe contemplar múltiples dimensiones:

- **Reducción cuantitativa de contaminantes:** Medición de TPH, HAP u otras fracciones específicas en mg kg^{-1} antes, durante y después del tratamiento. (Rusãnescu et al., 2025)
- **Cambio en la fracción biodisponible del contaminante:** Ensayos que estiman la proporción de contaminante accesible para degradación, no sólo total presente.
- **Mineralización del contaminante:** Mediante ensayos de respiración (CO_2 producido) como indicador de degradación biológica activa. (Mekonnen et al., 2024)
- **Ecotoxicidad del suelo tratado:** Ensayos de germinación, crecimiento vegetal, lombrices u otros indicadores biológicos para evaluar la restauración funcional del terreno. (León et al., 2018)
- **Propiedades edáficas mejoradas:** Recuperación del pH, materia orgánica, capacidad de intercambio catiónico (CEC), retención de agua, estructura del suelo. (Energies, 2022)
- **Indicadores microbiológicos:** Seguimiento de biomasa microbiana, actividad enzimática, abundancia de genes funcionales (p. ej., monooxigenasas, dioxigenasas) mediante qPCR, metagenómica. (Mekonnen et al., 2024)
- **Producción o productividad agrícola:** En un contexto agrícola, un indicador clave es la capacidad de cultivo del suelo tratado —germinación, crecimiento, rendimiento y calidad del producto.

- **Costos, tiempo y viabilidad técnica:** Evaluación de la estrategia desde el punto de vista práctico, incluyendo su coste, duración necesaria, molestias al agricultor y posibilidad de implementación en escala real.

2.7 Diseño experimental para suelos agrícolas

Para valorar adecuadamente la biorremediación en suelos agrícolas, es necesario un diseño experimental robusto:

- **Caracterización inicial (línea base):** Antes de intervenir, se debe medir la concentración de contaminantes (TPH, HAP, etc.), propiedades edáficas, biomasa microbiana, ecotoxicidad, etc.
- **Selección de tratamientos comparativos:** Por ejemplo, control sin intervención; bioestimulación (nutrientes/enmiendas); bioaumentación (inoculación); combinación bioestimulación + fitorremediación.
- **Monitoreo temporal:** Muestreos en momentos definidos (por ejemplo, $t = 0$, 30 d, 60 d, 90 d, 180 d) para evaluar la evolución de contaminantes y mejoras edáficas/microbianas.
- **Diseño con réplicas y bloques (si hay variabilidad espacial):** En suelos agrícolas, la variabilidad natural puede ser alta, por lo que se recomienda replicación y aleatorización.
- **Evaluación agronómica final:** Germinación de cultivos, rendimiento, calidad del suelo para cultivo, y comparación con suelo no contaminado o previamente controlado.

2.8 Aplicación en suelos agrícolas: retos y oportunidades

En el entorno agrícola, la recuperación de suelos contaminados por hidrocarburos enfrenta retos específicos:

- Debe garantizarse que el suelo sea apto para cultivo no sólo en ausencia del contaminante, sino que mantenga la fertilidad y productividad.
- Las estrategias de biorremediación deben ser compatibles con las actividades agrícolas o permitir su coexistencia lo antes posible.
- Los tiempos de recuperación pueden ser largos, lo cual puede generar inconvenientes económicos para el agricultor.

- Existe el potencial de transferencia de contaminantes a cultivos o entrada en la cadena alimentaria, por lo que se requiere asegurar seguridad alimentaria.
- Sin embargo, también hay oportunidades: el uso de residuos agrícolas como enmiendas (por ejemplo, estiércol, compost, biochar) puede favorecer la biorremediación con beneficios secundarios para la fertilidad del suelo (Campos Romero, Li Villacorta, Llaque Fernández, Valderrama Puscan & Calvanapón Alva, 2024).
- Otra ventaja es la integración de fitorremediación con cultivos de cobertura o plantas útiles, que permiten la rehabilitación mientras se generan beneficios secundarios para el agricultor (Tang, 2024).

2.9 Estrategias emergentes e innovadoras

La investigación reciente apunta a varias líneas de innovación dentro de la biorremediación de suelos agrícolas afectados por hidrocarburos:

- Uso de consorcios microbianos diseñados o modificados genéticamente para degradar fracciones recalcitrantes de hidrocarburos. (Mekonnen et al., 2024)
- Aplicación de enmiendas orgánicas y materiales como biochar, humatos o estiércol para mejorar la estructura del suelo, la disponibilidad de nutrientes y la actividad microbiana (Energies, 2022; ES Food Agrofor., 2025)
- Integración de fitorremediación asistida por microorganismos (rizosfera) y estudios de omica (metagenómica, metatranscriptómica) para entender la dinámica microbiana durante la biorremediación. (Tang, 2024)
- Uso de tecnologías de sensado, monitoreo remoto y modelación para optimizar el diseño de intervenciones a escala del campo.
- Aproximaciones híbridas que combinan técnicas físicas-químicas con biológicas para lograr degradaciones más rápidas cuando los contaminantes son densamente concentrados o antiguos (Rashid et al., 2025).

2.10 Consideraciones de sostenibilidad, regulaciones y buenas prácticas

Para que una estrategia de biorremediación sea aplicable en suelos agrícolas, debe considerarse:

- **Regulación ambiental:** Conocer los límites aceptables de residuos de hidrocarburos en suelos agrícolas en la normativa correspondiente, y asegurar que los resultados de la remediación cumplan dichos requisitos. (León et al., 2018)
- **Compatibilidad con agricultura:** Seleccionar técnicas que no comprometan la fertilidad o la futura producción agrícola del suelo.
- **Coste-beneficio:** Evaluar económicamente la intervención, considerando tiempo, insumos, interrupción de la producción agrícola y monitoreo.
- **Participación del agricultor y comunidad:** Involucrar al propietario del suelo, comunicar los beneficios, tiempos esperados y cuidados posteriores, para asegurar la aceptación y la implementación adecuada.
- **Monitoreo post-remediación:** Una vez alcanzados los objetivos, se debe continuar el monitoreo para asegurar que no haya reinfestación, lixivia.

CAPITULO 3

3.0 METODOLOGÍA

3.1 Tipo de investigación

La presente investigación corresponde a un estudio de tipo aplicada, de acuerdo con lo establecido en el Manual de Frascati (OCDE, 2015), ya que busca generar conocimiento con una finalidad práctica y directa: la reducción de la concentración de hidrocarburos totales del petróleo (TPH) en suelos agrícolas contaminados mediante procesos de biorremediación. Este enfoque se fundamenta en la utilización de microorganismos con capacidad metabólica para degradar compuestos hidrocarbonados bajo condiciones controladas, permitiendo evaluar su eficiencia y viabilidad técnica para una posible aplicación a escala real.

La investigación adopta un enfoque experimental, debido a que se manipulan deliberadamente variables independientes, tales como el tipo de tratamiento biológico, el microorganismo utilizado, el tiempo de exposición y las condiciones fisicoquímicas del suelo, con el fin de observar su efecto sobre la variable dependiente, que corresponde a la reducción de la concentración de hidrocarburos y la mejora de la calidad del suelo. Asimismo, el estudio tiene un carácter cuantitativo, ya que los resultados obtenidos se expresan mediante valores numéricos que permiten realizar comparaciones estadísticas entre tratamientos.

3.2 Población y muestra

La población de estudio está constituida por suelos agrícolas ubicados en zonas aledañas a la parroquia Taura, potencialmente afectados por contaminación con hidrocarburos. La muestra se obtendrá mediante un muestreo representativo del área de estudio, considerando criterios de homogeneidad, accesibilidad y nivel de contaminación.

El tamaño de la muestra se calculará empleando una fórmula estadística para poblaciones finitas, considerando un nivel de confianza del 95 %, un margen de error aceptable y una desviación estándar estimada a partir de estudios previos o pruebas piloto.

$$n = \frac{N * \sigma^2 * Z^2}{(N - 1) * e^2 + \sigma^2 * Z^2}$$

O= Desviación estándar de la población.

N= tamaño de la población.

Z= valor de la distribución normal para 95% de confianza.

e = Margen de error o precisión deseada

3.3 Variables de estudio

3.3.1 Variables independientes

La variable independiente constituye el factor manipulado o el agente causal cuya influencia se evalúa sobre el sistema ambiental bajo estudio. En el diseño experimental, esta representa los niveles de tratamiento, concentraciones de insumos o variaciones operativas que determinan el comportamiento y la respuesta de las variables dependientes.

Dentro de esta investigación se tomarán en cuenta las siguientes variables independiente comprendida como:

- Tipo de tratamiento de biorremediación.
- Tipo de microorganismo degradador de hidrocarburos.
- Tiempo de exposición al tratamiento.
- Condiciones fisicoquímicas del suelo (pH, humedad, conductividad eléctrica).

3.3.2 Variable dependiente

La variable dependiente representa el fenómeno ambiental que se desea mitigar o monitorear, cuya respuesta está condicionada por las alteraciones de las variables independientes. Su medición cuantitativa permite evaluar la eficiencia del tratamiento o la magnitud del impacto ambiental estudiado mediante indicadores técnicos normalizados.

Para el presente trabajo se han considerado como variables dependientes las siguientes:

- Concentración de hidrocarburos totales del petróleo (TPH) en el suelo.
- Respuesta de bioindicadores.

3.4 Procedimiento metodológico

3.4.1 Caracterización inicial del suelo

La caracterización inicial del suelo constituye una etapa fundamental, ya que permite establecer la línea base del estado fisicoquímico y contaminante del suelo antes de la aplicación del tratamiento biológico. Para ello, se realizará un muestreo sistemático mediante una cuadrícula previamente definida en el área de estudio, garantizando la representatividad espacial.

Las muestras se recolectaron a dos profundidades (0–10 cm y 20–30 cm), utilizando herramientas estériles para evitar contaminación cruzada. Posteriormente, las muestras fueron almacenadas en envases herméticos, debidamente etiquetados, rotulados, y transportados al laboratorio para su análisis correspondiente.

Las propiedades fisicoquímicas para determinar incluyen el pH, medido mediante potenciómetro en suspensión suelo-agua; la conductividad eléctrica, determinada con conductímetro; y la cuantificación de metales pesados, realizada mediante la Determinación de Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos y análisis instrumental.

Adicionalmente, se determinó la concentración de hidrocarburos totales de petróleo (HTP) como principal indicador del grado de contaminación del suelo. Para ello, las muestras fueron sometidas a procesos de extracción con solventes orgánicos y posterior cuantificación mediante técnicas instrumentales, como cromatografía de gases o espectroscopía infrarroja, según la disponibilidad del laboratorio. Este análisis permitió identificar tanto la presencia como la magnitud de la contaminación, estableciendo valores de referencia que sirvieron como línea base para evaluar la eficiencia del tratamiento de biorremediación.

Con el fin de complementar la evaluación ambiental, se realizó un monitoreo periódico de las condiciones del suelo, registrando parámetros como humedad, temperatura, textura y contenido de materia orgánica, los cuales influyen directamente en la movilidad y degradación natural de los hidrocarburos. Estos factores edáficos permiten comprender la dinámica del contaminante y su interacción con los microorganismos presentes, facilitando la interpretación de los resultados posteriores y la selección de estrategias de remediación más adecuadas.

Finalmente, toda la información obtenida durante la caracterización inicial fue sistematizada en una base de datos comparativa, que servirá como punto de partida para los monitoreos sucesivos durante y después del tratamiento biológico. Esta línea base posibilita evaluar cambios temporales en la concentración de contaminantes y en las propiedades fisicoquímicas del suelo, permitiendo medir objetivamente la eficacia del proceso de recuperación y verificar el cumplimiento de los límites establecidos por la normativa ambiental vigente.

3.4.2 Herramientas para la biorremediación

3.4.2.1 Materiales

La selección adecuada de los materiales empleados en los procesos de biorremediación de suelos contaminados con hidrocarburos constituye un aspecto clave para garantizar la eficiencia del tratamiento, la confiabilidad de los resultados analíticos y la seguridad durante las actividades de campo y laboratorio. La biorremediación se fundamenta en la estimulación de microorganismos autóctonos o en la adición de consorcios microbianos capaces de degradar compuestos orgánicos complejos, por lo que requiere tanto insumos biológicos como herramientas de muestreo, control y monitoreo ambiental que permitan evaluar la evolución del proceso (Atlas y Bartha, 2002).

Asimismo, la correcta recolección y conservación de las muestras exige el uso de materiales estériles, recipientes herméticos y equipos de medición fisicoquímica que eviten la alteración de las características originales del suelo, asegurando la representatividad y trazabilidad de los datos obtenidos. De acuerdo con criterios técnicos establecidos por organismos ambientales, el empleo de herramientas apropiadas minimiza la contaminación cruzada, reduce errores analíticos y mejora la reproducibilidad de los ensayos de laboratorio (EPA, 2007). De igual manera, la incorporación de enmiendas como nutrientes, agentes aireadores o materiales orgánicos favorece la actividad microbiana y optimiza la biodegradación de hidrocarburos (Vidali, 2001).

Para los muestreos realizados en campo se utilizaron los siguientes materiales:

- Tierra contaminada con hidrocarburos
- Recipiente esterilizado
- Agua destilada
- Agente microbiano

3.4.2.1.1 Características técnicas y beneficios del agente microbiano CONSUME POW de la marca SPARTAN

3.4.2.1.1.1 Descripción

El producto CONSUME POW de la marca Spartan es un agente microbiano formulado para biorremediación de suelos y aguas contaminadas con hidrocarburos. Está compuesto por una mezcla de microorganismos seleccionados y nutrientes que aceleran la biodegradación de contaminantes orgánicos.

3.4.2.1.1.2 Características técnicas principales

- Microorganismos activos: mezcla de bacterias capaz de degradar hidrocarburos de petróleo y sus derivados.
- Modo de acción: los microorganismos consumen el contaminante como fuente de carbono y energía, produciendo CO₂ y biomasa.
- Forma de presentación: polvo/gránulos para reconstitución y aplicación.
- Aplicación: se reconstituye en agua y se mezcla con el suelo o sedimentos a tratar.
- pH de trabajo: óptimo entre ~6.5 y 8.5.
- Temperatura de operación: entre 15 °C y 45 °C, ideal para ambientes terrestres y húmedos.

3.4.2.1.1.3 Beneficios principales

- Aumento de la tasa de degradación de hidrocarburos respecto al proceso natural.
- No genera residuos tóxicos adicionales.
- Compatible con biorremediación in situ y ex situ.
- Reduce el impacto ambiental de suelos contaminados.
- Acelera los procesos naturales de biodegradación.
- Reduce la concentración de compuestos tóxicos en el suelo.
- Mejora la estructura microbiológica del suelo.
- Es una alternativa menos invasiva que tratamientos fisicoquímicos.

3.4.2.2 Equipos de protección o (EPP)

Para garantizar la seguridad del personal durante el muestreo de suelos contaminados, es obligatorio el uso correcto de Equipos de Protección Personal (EPP). Estos elementos actúan como una barrera crítica frente a riesgos químicos y biológicos, previniendo el contacto dérmico o la inhalación de agentes nocivos. Su implementación rigurosa asegura la integridad física del técnico y la validez del procedimiento operativo.

A continuación, se detallan los equipos utilizados en el muestreo in situ, son los siguientes:

- **Guantes de nitrilo:** Utilizados para proteger las manos del contacto directo con suelos contaminados, hidrocarburos, solventes y otros agentes químicos, además de prevenir la contaminación cruzada de las muestras durante la recolección y manipulación.

- **Mascarilla:** Empleada para evitar la inhalación de vapores orgánicos, material particulado, polvo del suelo o aerosoles potencialmente contaminados, reduciendo el riesgo de exposición a compuestos tóxicos presentes en los hidrocarburos.
- **Botas plásticas:** Destinadas a aislar los pies del contacto directo con suelos húmedos o contaminados, proporcionando impermeabilidad y facilitando la limpieza y desinfección posterior al trabajo de campo.
- **Goggles o gafas de seguridad:** Con ventilación indirecta para evitar salpicaduras en los ojos.
- **Botas de PVC o Nitrilo:** Con puntera de acero y suela antideslizante, resistentes a la corrosión por hidrocarburos.

A continuación, se detallan los equipos utilizados durante los análisis en laboratorio.

- **Mascarilla:** Utilizada para minimizar la inhalación de vapores de solventes, gases y partículas generadas durante la manipulación de reactivos químicos y procesos de extracción o digestión de muestras.
- **Cofia:** Empleada para cubrir el cabello y evitar la contaminación de las muestras, manteniendo condiciones adecuadas de higiene y bioseguridad dentro del laboratorio.
- **Mandil:** Bata o delantal de laboratorio confeccionado en material resistente a sustancias químicas, destinado a proteger la piel y la ropa del contacto con reactivos, solventes, salpicaduras y derrames accidentales.
- **Guantes:** Utilizados para la manipulación segura de muestras, reactivos y equipos, previniendo la exposición directa a sustancias peligrosas y garantizando la integridad y esterilidad de los procedimientos analíticos.

3.4.3. Tratamiento de biorremediación

La biorremediación se define como una biotecnología sustentable que utiliza el potencial metabólico de microorganismos, plantas o enzimas para degradar contaminantes en el entorno. Según Azubuike et al. (2020), esta estrategia es fundamental para restaurar ecosistemas impactados, ofreciendo una alternativa de bajo costo y alta eficiencia frente a los métodos fisicoquímicos convencionales. Su éxito depende de la optimización de factores ambientales que favorezcan la actividad biológica en el sitio afectado

La selección de los microorganismos degradadores se basará en su capacidad demostrada para metabolizar hidrocarburos, priorizando cepas nativas o adaptadas a condiciones similares al suelo de estudio. Estos microorganismos pueden pertenecer a géneros bacterianos y fúngicos ampliamente reportados en procesos de biorremediación.

Previo a la aplicación del tratamiento, el suelo será preparado mediante aireación mecánica para mejorar la disponibilidad de oxígeno, ajuste del pH a valores cercanos a la neutralidad (6,5–7,5) y adición controlada de nutrientes, principalmente nitrógeno y fósforo, con el fin de estimular la actividad microbiana (bioestimulación).

El tratamiento biológico consistirá en la inoculación de los microorganismos seleccionados y su mezcla homogénea con el suelo. Se mantendrá una humedad adecuada mediante la adición periódica de agua y se realizará aireación cada 2 a 3 días para favorecer condiciones aerobias. El proceso tendrá una duración aproximada de 30 a 60 días, dependiendo del nivel de contaminación.

3.4.3.1 Monitoreo y evaluación

La contaminación de suelos por hidrocarburos representa un desafío crítico para la gestión ambiental, debido a la persistencia de compuestos tóxicos que alteran las propiedades fisicoquímicas del sustrato. De acuerdo con Osuji et al. (2022), el monitoreo sistemático y la evaluación técnica son herramientas indispensables para determinar la extensión de la pluma de contaminación y los riesgos de migración hacia acuíferos. Estos procesos permiten cuantificar la degradación del ecosistema y fundamentar la selección de estrategias de remediación efectivas. La integración de indicadores geoquímicos precisos es vital para garantizar el cumplimiento de los estándares de calidad ambiental vigentes.

Durante la etapa de tratamiento, se ejecutó un monitoreo sistemático de parámetros fisicoquímicos como pH y conductividad eléctrica, además de la concentración de hidrocarburos. Tras concluir el proceso, se recolectaron muestras postratamiento con el fin de cuantificar la eficiencia de remoción y el rendimiento del sistema.

La evaluación del desempeño se fundamentó en un análisis comparativo de las concentraciones de hidrocarburos totales de petróleo (TPH) pre y postratamiento. Se estableció como criterio de éxito una eficiencia de remoción superior al 70 %, integrada a la restauración de las propiedades fisicoquímicas del suelo y a la respuesta biológica positiva en las especies vegetales testigo.

3.4.4 Extracción y análisis de muestras por medio de cromatografía de gases

3.4.4.1 Principio del método

La determinación de Hidrocarburos Totales de Petróleo (TPH) en suelos mediante cromatografía de gases se basa en la extracción de los compuestos hidrocarbonados presentes en la matriz del suelo, seguida de su separación, identificación y cuantificación por cromatografía de gases equipada con un detector de ionización llamado (GC-FID).

El detector FID responde proporcionalmente a la cantidad de carbono presente en los compuestos orgánicos, lo que lo hace especialmente adecuado para la cuantificación de mezclas complejas de hidrocarburos alifáticos y aromáticos típicos del petróleo. El resultado se expresa como concentración total de hidrocarburos, generalmente en mg/kg de suelo seco.

3.4.4.2 Materiales y equipos

La determinación de hidrocarburos totales de petróleo (TPH) en suelos requiere la utilización de materiales y equipos especializados que aseguren la integridad de la muestra, la eficiencia del proceso de extracción y la confiabilidad de la cuantificación instrumental. La cromatografía de gases acoplada a detector de ionización de llama (GC-FID) continúa siendo una de las técnicas más empleadas por su alta sensibilidad, selectividad y respuesta lineal frente a compuestos orgánicos derivados del petróleo. De acuerdo con la U.S. Environmental Protection Agency (EPA, 2021), la correcta selección de instrumental, recipientes inertes y dispositivos de medición calibrados minimiza errores analíticos y pérdidas por volatilización. Por ello, es fundamental emplear equipamiento de laboratorio certificado que garantice precisión, exactitud y trazabilidad metrológica en estudios de contaminación ambiental.

3.4.4.2.1 Equipos

Los equipos analíticos constituyen el eje central del procedimiento cromatográfico, ya que permiten la separación, detección y cuantificación de mezclas complejas de hidrocarburos presentes en los extractos orgánicos del suelo. La técnica GC-FID destaca por su robustez, reproducibilidad y capacidad para analizar fracciones alifáticas y aromáticas en un amplio rango de concentraciones. Estudios recientes señalan que la adecuada calibración de balanzas analíticas, sistemas de evaporación, centrifugas y agitadores reduce la incertidumbre experimental y mejora la recuperación de analitos (ISO, 2022). En consecuencia, la implementación de instrumentación moderna y mantenimientos periódicos garantiza resultados confiables y comparables entre campañas de monitoreo ambiental.

Los equipos utilizados para el análisis de TPH son los siguientes:

- **Cromatógrafo de gases (GC) con detector de ionización de llama (FID)**
Equipo principal de análisis instrumental utilizado para separar, detectar y cuantificar los hidrocarburos presentes en el extracto orgánico de las muestras de suelo. El detector FID responde proporcionalmente al contenido de carbono, permitiendo la determinación precisa de hidrocarburos totales del petróleo (TPH).
- **Columna capilar no polar (por ejemplo, 5 % fenil-95 % dimetilpolisiloxano)**
Encargada de la separación cromatográfica de los compuestos orgánicos según su volatilidad y afinidad con la fase estacionaria. Su naturaleza no polar favorece la resolución de hidrocarburos alifáticos y aromáticos típicos del petróleo.
- **Balanza analítica (precisión $\pm 0,0001$ g)**
Utilizada para pesar con alta exactitud las muestras de suelo, reactivos y estándares, garantizando la precisión en los cálculos de concentración y reduciendo errores gravimétricos.
- **Equipo de agitación mecánica o agitador orbital**
Permite mezclar homogéneamente el suelo con el solvente de extracción, favoreciendo la transferencia eficiente de los hidrocarburos desde la matriz sólida hacia la fase líquida.
- **Centrífuga de laboratorio**
Facilita la separación rápida de fases sólido-líquido tras la extracción, permitiendo recuperar el sobrenadante orgánico libre de partículas sólidas que puedan interferir en el análisis cromatográfico.
- **Evaporador rotatorio o sistema de concentración por flujo de nitrógeno**
Empleado para concentrar el extracto orgánico mediante evaporación controlada del solvente, incrementando la sensibilidad del análisis y permitiendo alcanzar volúmenes finales adecuados para la inyección en el GC.
- **Estufa de secado (40–60 °C)**
Utilizada para eliminar la humedad del suelo previo al análisis, evitando interferencias por agua residual y permitiendo expresar los resultados en base a peso seco.
- **Tamiz de 2 mm**
Permite homogenizar la muestra y retirar fragmentos gruesos como piedras o restos vegetales, asegurando uniformidad granulométrica y representatividad analítica.
- **Viales de vidrio con tapa hermética y septum**
Recipientes destinados al almacenamiento de extractos y soluciones estándar, evitando pérdidas por volatilización y contaminación externa; el septum permite la inyección directa al cromatógrafo.

- **Pipetas automáticas y micropipetas**
Utilizadas para medir y transferir volúmenes pequeños de solventes, extractos y estándares con alta precisión y reproducibilidad.
- **Matraces aforados y probetas graduadas**
Empleados para preparar soluciones patrón, diluciones y medir volúmenes de reactivos con exactitud volumétrica, garantizando la correcta preparación de estándares y curvas de calibración.

3.4.4.2 Reactivos

La pureza y calidad de los reactivos empleados en la extracción y análisis de TPH influyen directamente en la exactitud de los resultados cromatográficos, ya que impurezas químicas pueden generar interferencias o picos adicionales en el cromatograma. Por esta razón, se recomienda utilizar solventes grado cromatográfico, estándares certificados y gases de alta pureza que garanticen estabilidad y mínima contaminación del sistema. Investigaciones recientes en análisis ambiental destacan que la utilización de materiales de referencia certificados mejora la trazabilidad y la comparabilidad de los datos entre laboratorios (Wang et al., 2020). Asimismo, agentes deshidratantes y reactivos acondicionados favorecen la eficiencia de la extracción y la recuperación de hidrocarburos.

- **Solvente orgánico de alta pureza (por ejemplo: diclorometano, pentano o mezcla de hidrocarburos grado GC)**
Utilizado para extraer los hidrocarburos presentes en el suelo debido a su alta capacidad de solubilización de compuestos no polares. Su grado cromatográfico minimiza interferencias y contaminantes durante el análisis instrumental.
- **Sulfato de sodio anhidro (Na_2SO_4)**
Actúa como agente deshidratante, eliminando la humedad residual del extracto orgánico para evitar emulsiones, mejorar la eficiencia de concentración y proteger la columna cromatográfica.
- **Estándar patrón de hidrocarburos (mezcla C10–C40 o equivalente)**
Mezcla de referencia empleada para la calibración del equipo, construcción de la curva de calibración y verificación del desempeño analítico, permitiendo cuantificar los TPH presentes en las muestras.
- **Gas portador (helio o nitrógeno, grado cromatográfico)**

Responsable de transportar los compuestos vaporizados a través de la columna cromatográfica, asegurando una separación eficiente y estable durante el análisis.

- **Aire sintético e hidrógeno para el detector FID**

Gases necesarios para generar la llama del detector de ionización, donde los compuestos orgánicos se ionizan produciendo una señal eléctrica proporcional a su concentración.

3.4.4.3 Muestreos y preservación de las muestras

El muestreo constituye una de las etapas más críticas en la evaluación de suelos contaminados, ya que la representatividad de los resultados depende directamente de la correcta recolección, conservación y transporte de las muestras. La pérdida de compuestos volátiles, la degradación biológica o la contaminación cruzada pueden alterar significativamente la concentración real de hidrocarburos presentes en la matriz. Según la norma ASTM D4547-21 (2021), las muestras de suelos contaminados deben manipularse en recipientes inertes, mantenerse refrigeradas y analizarse en el menor tiempo posible para preservar su estabilidad química. Estas medidas garantizan la calidad de los datos y la reproducibilidad de los ensayos.

Las muestras de suelo deben recolectarse siguiendo protocolos de muestreo ambiental, evitando la contaminación cruzada.

- Se recomienda recolectar al menos 500 g de suelo por punto de muestreo.
- Las muestras se almacenan en recipientes de vidrio ámbar con tapa hermética.
- Se conservan a 4 °C y se analizan lo antes posible para minimizar pérdidas por volatilización.
- Antes del análisis, las muestras se secan al aire o en estufa a baja temperatura (≤ 40 °C) y se tamizan a 2 mm para homogenizar la matriz.

3.4.4.4 Preparación de la muestra

La preparación de la muestra tiene como objetivo aislar y transferir los hidrocarburos desde la matriz sólida del suelo hacia una fase orgánica compatible con el sistema cromatográfico. Este proceso incluye etapas de secado, homogenización, extracción y concentración, las cuales incrementan la eficiencia de recuperación de los analitos y reducen interferencias provenientes de la materia orgánica o la humedad residual. Estudios recientes en remediación de suelos contaminados indican que la estandarización de los métodos de extracción mejora la reproducibilidad y la exactitud del análisis cuantitativo (Kuppusamy et al., 2020). Por tanto, una adecuada preparación es esencial para obtener resultados representativos del contenido real de TPH.

1. Pesar aproximadamente 10 g de suelo seco en un matraz o frasco de extracción.

2. Agregar una cantidad conocida de sulfato de sodio anhidro para eliminar la humedad residual.
3. Añadir un volumen adecuado del solvente de extracción (por ejemplo, 20–30 mL).
4. Someter la mezcla a agitación mecánica durante un tiempo determinado (30–60 minutos) para favorecer la transferencia de los hidrocarburos al solvente.
5. Dejar reposar o centrifugar la muestra para separar la fase líquida del residuo sólido.
6. Recuperar el extracto orgánico y filtrarlo si es necesario.
7. Concentrar el extracto mediante evaporación controlada hasta un volumen final conocido (por ejemplo, 1 o 2 mL).

3.4.4.5 Preparación de estándares y curva de calibración

La cuantificación precisa de hidrocarburos mediante GC-FID requiere la construcción de curvas de calibración empleando soluciones patrón de concentración conocida, lo que permite establecer una relación lineal entre la respuesta instrumental y la masa del analito. La calibración asegura la trazabilidad de las mediciones y reduce errores sistemáticos asociados a variaciones instrumentales. De acuerdo con guías analíticas modernas, el uso de estándares certificados y múltiples niveles de concentración mejora la confiabilidad estadística y la exactitud del método (EURACHEM, 2020). En este contexto, la verificación del coeficiente de correlación y la validación periódica del sistema son prácticas esenciales en análisis ambientales.

- Preparar soluciones estándar de TPH a diferentes concentraciones dentro del rango esperado de las muestras.
- Inyectar cada estándar en el GC-FID bajo las mismas condiciones analíticas que las muestras.
- Construir una curva de calibración relacionando el área total del cromatograma (o el área integrada del rango de hidrocarburos) con la concentración conocida.
- La curva debe presentar un coeficiente de correlación ($R^2 \geq 0,995$).

3.4.4.6 Condiciones cromatográficas típicas

Las condiciones cromatográficas constituyen un factor determinante en la separación eficiente, detección y cuantificación de los hidrocarburos presentes en los extractos de suelo. Parámetros como temperatura del inyector, programa térmico del horno, tipo de columna, flujo del gas portador y configuración del detector influyen directamente en la resolución de los picos, el tiempo de retención y la sensibilidad del análisis. De acuerdo con la U.S. EPA (2021), la optimización de estas variables permite mejorar la reproducibilidad del método y minimizar interferencias entre compuestos de diferente volatilidad y peso molecular. La estandarización de las condiciones instrumentales garantiza resultados comparables entre

corridas analíticas y diferentes laboratorios, fortaleciendo la confiabilidad de la determinación de TPH.

- Modo de inyección: split o splitless (según concentración).
- Temperatura del inyector: 250–300 °C.
- Programa de temperatura del horno:
Inicio a 50 °C (1–2 min),
- Incremento gradual hasta 300 °C,
- Mantenimiento final para eluir hidrocarburos pesados.
- Gas portador: helio, flujo constante.
- Detector FID:
- Temperatura: 300 °C
- Flujo de hidrógeno y aire según especificaciones del equipo.

3.4.4.7 Análisis cromatográfico

El análisis cromatográfico corresponde a la etapa de separación y registro instrumental de los compuestos orgánicos extraídos del suelo, permitiendo identificar y cuantificar la fracción total de hidrocarburos presentes. Durante esta fase, el extracto es vaporizado e introducido en la columna cromatográfica, donde los analitos se separan según su afinidad con la fase estacionaria y su volatilidad. Investigaciones recientes destacan que la correcta integración de picos y el control de calidad del cromatograma son esenciales para evitar sobreestimaciones o subestimaciones de la concentración real de contaminantes (González-Gaya et al., 2022). Por tanto, la interpretación cuidadosa del perfil cromatográfico asegura mediciones precisas y reproducibles en estudios ambientales.

1. Inyectar un volumen conocido del extracto.
2. Registrar el cromatograma obtenido.
3. Integrar el área correspondiente al rango de hidrocarburos definido
4. Comparar el área obtenida con la curva de calibración para determinar la concentración.

3.4.4.8 Cálculo de resultados

El cálculo de la concentración de hidrocarburos totales del petróleo se basó en la conversión de la respuesta instrumental obtenida del cromatograma a unidades de masa por peso seco de suelo, integrando factores como volumen final del extracto, masa de muestra y diluciones realizadas. Esta etapa es fundamental para transformar los datos analíticos en información cuantitativa comparable con estándares normativos y criterios de calidad ambiental. Según EURACHEM (2020), la aplicación de ecuaciones correctamente validadas y el control de la

incertidumbre de medición incrementan la confiabilidad de los resultados. La estandarización de los cálculos asegura coherencia entre diferentes campañas de monitoreo y facilita la interpretación estadística posterior.

La concentración de TPH en el suelo se calcula mediante la siguiente expresión general:

$$TPH \left(\frac{mg}{kg} \right) = \frac{CxV}{m}$$

Donde:

- C = concentración obtenida del cromatograma (mg/L),
- V = volumen final del extracto (L),
- m = masa de la muestra de suelo seco (kg).

Los resultados se reportan en mg de TPH por kg de suelo seco.

3.4.4.9 Presentación e interpretación de resultados

La presentación e interpretación de los resultados analíticos permitió evaluar el grado de contaminación del suelo y determinar la eficacia de las estrategias de remediación aplicadas. La comparación de las concentraciones de TPH con límites regulatorios nacionales o internacionales facilita la toma de decisiones sobre la necesidad de acciones correctivas o tratamientos adicionales. Estudios recientes en gestión ambiental resaltan la importancia de integrar datos químicos con indicadores fisicoquímicos y biológicos para obtener una evaluación integral del riesgo ecológico (Varjani et al., 2021). En consecuencia, una adecuada interpretación de los resultados fortalece la validez técnica del estudio y respalda conclusiones científicamente sustentadas.

Los resultados obtenidos se comparan con normativas ambientales vigentes para evaluar el grado de contaminación del suelo. La cromatografía de gases permite además observar el perfil del hidrocarburo, lo cual puede aportar información sobre el origen y grado de degradación del contaminante.

3.5 Diseño experimental

El diseño experimental constituye la estructura metodológica que organiza la aplicación de tratamientos, el control de variables y la recolección sistemática de datos, con el propósito de garantizar resultados válidos y estadísticamente confiables. En estudios de biorremediación, la planificación experimental permite evaluar objetivamente la influencia de factores como microorganismos, nutrientes y tiempo de exposición sobre la degradación de hidrocarburos. De acuerdo con Montgomery (2020), un diseño adecuado reduce la variabilidad, mejora la precisión de las estimaciones y facilita la comparación entre

tratamientos. Por ello, la implementación de esquemas experimentales controlados resulta esencial para demostrar la efectividad del proceso de descontaminación.

La presente investigación tiene un enfoque cuantitativo, de tipo experimental aplicada, con nivel explicativo, cuyo objetivo es evaluar la eficiencia de un consorcio microbiano comercial en la reducción de hidrocarburos presentes en suelos agrícolas bajo condiciones controladas de laboratorio.

El diseño corresponde a un experimento de un solo grupo con medición antes y después, el cual permite cuantificar la variación de la concentración de hidrocarburos totales del petróleo (HTP) como resultado de la aplicación del tratamiento biológico.

3.6 Documentación y registro

Todo el proceso experimental será documentado mediante registros sistemáticos en cuadernos de laboratorio y bases de datos digitales, incluyendo condiciones iniciales, resultados de monitoreo, incidencias y análisis finales.

3.7 Caracterización inicial del suelo antes del tratamiento (línea base)

La caracterización inicial del suelo, conocida como línea base, representa el punto de referencia indispensable para evaluar la magnitud de la contaminación y los cambios generados por los procesos de remediación. Esta etapa permite describir las propiedades fisicoquímicas, biológicas y contaminantes del suelo antes de cualquier intervención, facilitando comparaciones temporales objetivas. Investigaciones recientes señalan que establecer una línea base confiable es esencial para interpretar la eficacia de la biorremediación y evitar sesgos en los resultados (Kuppusamy et al., 2020). En este contexto, la obtención de datos preliminares precisos fortalece la validez científica del estudio y la toma de decisiones ambientales.

La caracterización inicial del suelo, también denominada línea base, tiene como finalidad establecer el estado fisicoquímico del suelo previo a la aplicación de los tratamientos de biorremediación. Esta etapa es fundamental, ya que permite contar con valores de referencia que servirán para comparar los cambios generados durante y después del proceso experimental.

En esta fase se determinarán variables clave como el pH, la humedad y la conductividad eléctrica del suelo, las cuales influyen directamente en la actividad microbiana y en la

biodisponibilidad de los hidrocarburos. El pH se medirá mediante un electrodo potenciométrico en una suspensión suelo-agua; la humedad se determinará por el método gravimétrico; y la conductividad eléctrica se evaluará utilizando un conductímetro calibrado.

Adicionalmente, se elaborará un plan de muestreo y monitoreo que defina claramente los procedimientos de muestreo, la frecuencia de recolección, la ubicación de los puntos de muestreo y los métodos analíticos a emplear, garantizando la reproducibilidad y confiabilidad de los resultados. Finalmente, se establecerá un cronograma de actividades experimentales y de monitoreo, el cual permitirá organizar las etapas del estudio y asegurar el cumplimiento de los tiempos definidos.

3.8 Experimentación

La fase experimental comprende la preparación, ejecución, seguimiento y finalización de los tratamientos de biorremediación aplicados al suelo contaminado.

3.8.1 Preparación de las unidades experimentales

El suelo contaminado será recolectado y, de ser necesario, homogenizado para asegurar una distribución uniforme de los contaminantes. Posteriormente, se pesará una cantidad definida de suelo para cada unidad experimental, garantizando condiciones iniciales comparables entre tratamientos.

Antes del inicio del experimento, se ajustarán las condiciones iniciales del suelo, tales como humedad, pH y conductividad eléctrica, de acuerdo con los rangos óptimos para la actividad microbiana. Luego, se asignarán los tratamientos según el diseño experimental establecido, incluyendo la aplicación de microorganismos degradadores, nutrientes y condiciones de aireación.

El experimento iniciará en el día cero (día 0), momento en el cual se aplicarán los tratamientos biológicos y se registrarán las condiciones iniciales del suelo, realizando el muestreo correspondiente a la línea base.

3.8.2 Seguimiento y monitoreo experimental

El seguimiento y monitoreo experimental permiten evaluar de manera continua la evolución de las condiciones del suelo y la eficiencia del tratamiento biológico aplicado. La medición periódica de parámetros fisicoquímicos y contaminantes facilita la identificación de tendencias, variaciones operativas y posibles limitaciones del proceso de biodegradación. Según Azubuike et al. (2020), el monitoreo sistemático es una práctica esencial en proyectos

de biorremediación, ya que proporciona información para optimizar variables como humedad, aireación y disponibilidad de nutrientes. De esta forma, el control permanente del sistema asegura la estabilidad del experimento y mejora el desempeño del tratamiento.

Durante el período experimental se llevará a cabo un monitoreo periódico en los días previamente definidos. Se realizarán muestreos del suelo en cada unidad experimental siguiendo un protocolo estandarizado que contemple profundidad de muestreo, volumen y número de submuestras.

Las variables a medir incluirán pH, conductividad y la concentración de hidrocarburos totales del petróleo. Asimismo, se registrarán las condiciones del experimento, tales como temperatura ambiente, cambios observados en las unidades experimentales e incidencias relevantes.

El mantenimiento del experimento consistirá en asegurar que las condiciones establecidas se mantengan lo más constantes posible, realizando ajustes de humedad y aireación, cuando el diseño experimental lo requiera. Cualquier evento imprevisto, como contaminación cruzada, fallas técnicas o condiciones climáticas extremas, será debidamente documentado. Al finalizar el período experimental, se efectuará un muestreo final y el análisis de todas las variables evaluadas, con el fin de determinar la eficiencia de los tratamientos aplicados.

3.9. Evaluación de resultados

La evaluación de resultados comprende el análisis integral de los datos obtenidos durante el proceso experimental, con el fin de determinar la efectividad de los tratamientos aplicados y la significancia de los cambios observados. Esta etapa incorpora herramientas estadísticas que permiten comparar concentraciones iniciales y finales, identificar tendencias y establecer relaciones causa-efecto entre variables. Estudios recientes destacan que la aplicación de métodos estadísticos robustos incrementa la confiabilidad de las conclusiones en investigaciones ambientales (Zhang et al., 2021). En consecuencia, la evaluación cuantitativa respalda la validez científica de los hallazgos y sustenta la toma de decisiones técnicas.

El análisis de los datos obtenidos incluirá una verificación de la calidad de la información, identificando valores atípicos, inconsistencias o posibles errores de medición. Posteriormente, se aplicarán métodos estadísticos adecuados para evaluar la significancia de los resultados y comparar la efectividad de los tratamientos.

3.9.1 Interpretación de resultados

La interpretación de resultados implica contextualizar los datos obtenidos dentro del marco ambiental, normativo y experimental, permitiendo comprender la magnitud real de la recuperación del suelo tratado. Esta fase integra información química, biológica y estadística para determinar si la reducción de hidrocarburos refleja una mejora funcional del ecosistema edáfico. De acuerdo con revisiones recientes, la combinación de indicadores fisicoquímicos y bioensayos proporciona una evaluación más completa de la eficacia de la biorremediación (Sharma et al., 2022). Por tanto, una interpretación integral facilita la formulación de conclusiones sólidas y recomendaciones aplicables a escala real.

La interpretación de los resultados se centrará en relacionar la reducción de los hidrocarburos totales del petróleo (TPH) y la mejora de la calidad del suelo con los tratamientos de biorremediación aplicados.

Cuando sea pertinente, se evaluará la viabilidad agrícola del suelo tratado mediante el uso de plantas testigo, analizando parámetros como germinación y crecimiento, con el objetivo de determinar si el suelo recuperado es apto para uso agrícola.

Con base en los resultados obtenidos, se formularán recomendaciones y estrategias de aplicación a escala real, proponiendo parámetros operativos óptimos como humedad, aireación, inoculación microbiana y dosificación de nutrientes. Asimismo, se documentarán las lecciones aprendidas, los imprevistos surgidos y las acciones correctivas implementadas, proponiendo ajustes para futuras aplicaciones bajo diferentes condiciones de sitio o escala.

3.10 Documentación, técnicas y herramientas de recolección de datos

3.10.1 Documentación del proceso

Todo el proceso experimental será documentado de manera sistemática. Cada unidad experimental contará con un código identificador que incluya la fecha de inicio y las condiciones iniciales del tratamiento.

Se llevo un cuaderno de laboratorio o un fichero electrónico, como una hoja de cálculo o base de datos, donde se registrarán la fecha, hora, condiciones ambientales relevantes, valores de pH, conductividad eléctrica, humedad y observaciones generales. Cada muestreo deberá indicar claramente la profundidad, volumen, número de muestras y método de extracción utilizado.

Se elaboro informes intermedios de avance y un informe final, cambios de condiciones, fallas de equipo o cualquier evento relevante. Finalmente, se redactará un acta de cierre del experimento con los resultados finales, análisis estadístico, interpretación y recomendaciones.

3.10.2 Técnicas y evaluación

Tabla 1 Técnicas y evaluación

Técnicas	Las técnicas empleadas incluirán el muestreo de suelo mediante trépano o barreno, homogenización y fraccionamiento de las muestras. La humedad del suelo se determinará por secado en estufa a 105 °C hasta peso constante, mientras que el pH se medirá con electrodo en suspensión suelo-agua.
Evaluación	La evaluación de la planta testigo se realizó mediante el análisis visual y biométrico del estado de la planta, considerando parámetros de germinación y crecimiento. El registro y análisis estadístico de los datos se llevará a cabo utilizando herramientas informáticas como Excel, R o SPSS, permitiendo la elaboración de gráficos y el análisis de varianza.

Elaborado por: Juan Villamar 2026

3.11 Evaluación periódica de la muestra

- **Semana 1**

Durante los dos primeros días se procedió al montaje del experimento utilizando suelo recolectado en la finca ubicada en Taura. Se extrajo un volumen total de 0,023 m³ de suelo, el cual fue contaminado de manera controlada mediante la adición de 2,3 litros de diésel, con el propósito de simular condiciones de contaminación por hidrocarburos.

En el tercer día se tomó una muestra representativa de 500 g de suelo contaminado para la caracterización inicial de los parámetros fisicoquímicos. El análisis de pH presentó un valor de 5,72, mientras que la conductividad eléctrica registró 81 µS/cm. La determinación de hidrocarburos totales de petróleo (TPH) se programó para su cuantificación posterior en la semana 5.

Posteriormente, se aplicó el tratamiento de biorremediación mediante la inoculación de un microorganismo degradador de hidrocarburos en dosis variables entre 2,3 g (dosis mínima) y 9,25 g (dosis máxima). Además, se añadieron 1,5 litros de agua para mantener condiciones adecuadas de humedad y se realizó aireación del sistema durante aproximadamente una hora, con el fin de favorecer la actividad metabólica microbiana.

- **Semana 2 y 3**

Durante estas dos semanas se efectuó un monitoreo periódico del proceso de biorremediación en los días 2, 4, 9 y 11. En cada fecha se realizaron mediciones de pH y conductividad eléctrica para evaluar la evolución de las condiciones del suelo.

Los valores de pH obtenidos fueron 6,05; 6,12; 6,17 y 6,24, evidenciando una ligera tendencia hacia la neutralidad, lo cual favorece la actividad microbiológica. Por su parte, la conductividad eléctrica registró valores de 72, 69, 67 y 62 $\mu\text{S}/\text{cm}$, mostrando una disminución progresiva asociada a cambios en la composición iónica del medio.

Después de cada monitoreo se reforzó el tratamiento mediante la adición del microorganismo, riego con agua para mantener la humedad óptima y aireación mecánica, con el objetivo de garantizar condiciones aerobias adecuadas y estimular la degradación biológica de los hidrocarburos.

Ilustración 2. Pesaje del microorganismo degradador de hidrocarburos



Fuente: Cámara de Juan Villamar

- **Semana 4**

En esta etapa se llevó a cabo el seguimiento final del proceso de biorremediación, centrado en la evaluación del estado del suelo tras varias semanas de tratamiento continuo. Durante el segundo día se realizó la recolección de la muestra postratamiento, tomando 500 g de suelo de manera representativa y homogénea del sistema experimental, con el fin de asegurar la confiabilidad de los análisis posteriores.

Esta muestra fue acondicionada, etiquetada y almacenada bajo condiciones controladas para evitar alteraciones fisicoquímicas o pérdidas de compuestos volátiles antes de su análisis. El objetivo principal de esta fase fue disponer del material necesario para la determinación final de los hidrocarburos totales de petróleo (TPH) y así comparar los resultados con los valores iniciales obtenidos al inicio del experimento.

Asimismo, se verificaron las condiciones operativas del tratamiento, tales como humedad, aireación y distribución del microorganismo, con el propósito de garantizar que el proceso se hubiera desarrollado de manera adecuada hasta el cierre experimental. Con los datos obtenidos se procedería posteriormente al cálculo de la eficiencia de remoción de hidrocarburos, aplicando la ecuación de porcentaje de reducción (Ecuación 1), lo que permitiría cuantificar el desempeño del método de biorremediación implementado.

- **Semana 5**

Durante la última semana, específicamente el primer día, las muestras de suelo correspondientes al estado inicial y al postratamiento fueron enviadas y analizadas por el laboratorio LABCESTTA, utilizando un cromatógrafo de gases equipado con detectores FID (Detector de Ionización de Llama), los cuales permiten la medición cuantitativa de compuestos orgánicos volátiles (COV) e hidrocarburos. Este equipo es idóneo para la detección de fracciones de hidrocarburos (TPH) presentes en matrices ambientales, debido a su alta sensibilidad y selectividad frente a compuestos orgánicos volatilizables.

Los resultados indicaron una concentración inicial de 118 000 mg/kg antes del tratamiento y una concentración de 70 000 mg/kg después del proceso de biorremediación. Estos valores evidencian que, aunque se logró una disminución significativa de la contaminación, las concentraciones finales aún superan los límites máximos permisibles establecidos por la normativa ambiental vigente. (ANEXO 7 Y 8)

No obstante, el cálculo de eficiencia mostró una reducción del 40,7 % de los hidrocarburos totales presentes en el suelo, lo que demuestra la efectividad parcial del tratamiento biológico aplicado y su potencial como alternativa para la remediación de suelos contaminados.

Justificación de la aplicación de 1.5 litros de agua en el suelo contaminado

La técnica utilizada corresponde a biorremediación por humectación controlada del suelo, un procedimiento que busca optimizar la humedad del sustrato para favorecer la actividad microbiana para a la degradación de hidrocarburos.

Sin embargo, se aplicaron 1.5 litros de agua debido a que el experimento se realizó durante temporada de lluvia, lo cual genera un ambiente de elevada humedad natural y ponerle de más lo estaría sobresaturando de humedad, ya que esta condición de lluvia favorece la actividad metabólica de los microorganismos biorremediadores y evita la lixiviación excesiva de nutrientes o contaminantes.

Además, el procedimiento no se realizó dentro del laboratorio debido a que las muestras contenían altos niveles de hidrocarburos, y causaría una acumulación de olores en espacios cerrados debido a la mala ventilación. Al realizarse al aire libre, con elevada humedad ambiental y lluvia, se garantizó una mayor disponibilidad de agua en el suelo, lo cual es crítico para la supervivencia y eficiencia de los microorganismos en la biorremediación, evitando al mismo tiempo riesgos de exposición dentro del laboratorio.

CAPITULO 4

4.1 Introducción

La evaluación de la contaminación por hidrocarburos en suelos constituye una de las principales líneas de investigación en estudios ambientales actuales, debido a los impactos que estos compuestos generan sobre la estructura, funcionalidad y calidad del sistema edáfico. Los Hidrocarburos Totales de Petróleo (TPH) tienden a persistir en el suelo, afectando la porosidad, reduciendo la infiltración de agua, alterando la actividad microbiana y limitando la disponibilidad de nutrientes, lo que compromete los procesos de regeneración natural del ecosistema (Varjani et al., 2020).

En este contexto, la determinación cuantitativa de TPH mediante técnicas instrumentales como la cromatografía de gases acoplada a detector de ionización de llama (GC-FID) se ha consolidado como uno de los métodos más confiables para el análisis de fracciones hidrocarbonadas, gracias a su alta sensibilidad, reproducibilidad y capacidad de separar mezclas complejas de compuestos orgánicos presentes en matrices ambientales (Wang et al., 2022). Esta técnica permite establecer concentraciones precisas antes y después de la aplicación de tratamientos de remediación, facilitando la evaluación de la eficiencia de los procesos de descontaminación.

Asimismo, el análisis del pH y de la conductividad eléctrica complementa la caracterización integral del suelo, ya que estos parámetros controlan la movilidad de contaminantes, la biodisponibilidad de nutrientes y la actividad metabólica de los microorganismos degradadores. Estudios recientes señalan que valores de pH cercanos a la neutralidad favorecen la biodegradación de hidrocarburos, mientras que la conductividad eléctrica permite inferir cambios en la concentración de sales y compuestos iónicos generados durante los procesos de remediación (Khan et al., 2021; Adewuyi & Olowu, 2023).

La determinación de los parámetros fisicoquímicos del suelo, particularmente el potencial de hidrógeno (pH) y la conductividad eléctrica (CE), constituye una etapa fundamental en la caracterización ambiental de suelos contaminados por hidrocarburos y en el seguimiento de procesos de biorremediación. Estos indicadores permiten evaluar el estado químico del sustrato, la disponibilidad de nutrientes, la actividad microbiana y las condiciones que favorecen o limitan la degradación biológica de los contaminantes.

El pH del suelo representa la acidez o alcalinidad del medio edáfico y controla múltiples procesos geoquímicos y biológicos. Desde el punto de vista microbiológico, el pH influye directamente en la actividad enzimática, la estabilidad de las membranas celulares y la solubilidad de nutrientes esenciales como nitrógeno, fósforo y micronutrientes. Valores extremos de pH pueden inhibir el crecimiento de microorganismos degradadores de hidrocarburos, reduciendo la eficiencia de la biorremediación. Diversos estudios reportan que la mayoría de las bacterias heterótrofas implicadas en la biodegradación de compuestos orgánicos presentan un desempeño óptimo en rangos cercanos a la neutralidad (pH 6,5–8,0). Por tanto, el monitoreo del pH permite verificar que el suelo mantenga condiciones adecuadas para el metabolismo microbiano y, en caso necesario, aplicar enmiendas correctivas.

Por otra parte, la conductividad eléctrica (CE) es un indicador indirecto de la concentración de sales solubles e iones presentes en la solución del suelo. Este parámetro permite estimar el grado de salinidad y la movilidad de especies químicas disueltas. En contextos de contaminación por hidrocarburos, la CE puede alterarse debido a la presencia de subproductos de degradación, nutrientes añadidos durante la bioestimulación o cambios en la composición iónica del suelo. Valores elevados de salinidad pueden generar estrés osmótico en los microorganismos y en las plantas, disminuyendo la actividad biológica y la capacidad de recuperación del suelo. En consecuencia, la medición de la CE facilita el control de condiciones adversas que podrían afectar la eficacia del tratamiento biológico.

Por lo tanto, el presente capítulo expone los resultados obtenidos en las muestras de suelo analizadas antes y después del tratamiento aplicado, comparando las concentraciones de TPH, pH y conductividad eléctrica, con el fin de determinar la efectividad del proceso de remediación y evidenciar la mejora en las propiedades fisicoquímicas del suelo.

4.2 Resultados de Hidrocarburos Totales de Petróleo (TPH)

La cuantificación de Hidrocarburos Totales de Petróleo (TPH) en suelos constituye uno de los principales indicadores para evaluar el grado de contaminación por derivados del petróleo y la efectividad de los procesos de remediación ambiental. Estos compuestos están conformados por mezclas complejas de hidrocarburos alifáticos, aromáticos, resinas y asfaltenos, los cuales tienden a adsorberse a las partículas del suelo, generando persistencia y efectos adversos sobre sus propiedades físicas, químicas y biológicas. La acumulación de TPH puede provocar disminución de la porosidad, reducción del intercambio gaseoso, alteración de la actividad microbiana y limitaciones en el crecimiento vegetal, comprometiendo la funcionalidad del ecosistema edáfico (Varjani et al., 2020).

Desde el punto de vista analítico, la cromatografía de gases acoplada a detector de ionización de llama (GC-FID) se ha consolidado como una de las técnicas más empleadas para la determinación de TPH en matrices ambientales, debido a su elevada sensibilidad para compuestos orgánicos, capacidad de separación de mezclas complejas y precisión cuantitativa. Esta metodología permite integrar áreas cromatográficas correspondientes a fracciones específicas de carbono (por ejemplo, C10–C40), proporcionando resultados reproducibles y comparables en estudios de monitoreo ambiental (Wang et al., 2022).

En estudios de remediación, la comparación de las concentraciones de TPH antes y después del tratamiento es fundamental para estimar la eficiencia de remoción del contaminante y determinar la recuperación progresiva del suelo. La disminución de estos compuestos suele asociarse con procesos de biodegradación microbiana, volatilización de fracciones ligeras, oxidación química o transformación natural de hidrocarburos complejos en moléculas más simples y menos tóxicas (Khan et al., 2021).

Por consiguiente, en el presente apartado se exponen los resultados obtenidos del análisis cromatográfico de TPH en las muestras de suelo, estableciendo una comparación entre las condiciones iniciales y finales, con el fin de evaluar el impacto del tratamiento aplicado sobre la reducción de la carga contaminante.

4.2.1 Concentración de TPH antes del tratamiento

La Tabla 2 muestra las concentraciones iniciales de Hidrocarburos Totales de Petróleo presentes en las muestras de suelo antes de la aplicación del tratamiento.

Tabla 2. Concentración de TPH antes del tratamiento

Muestra	TPH (mg/kg)
S-1	118000

Elaborado por: Juan Villamar, (2026).

La cuantificación inicial de Hidrocarburos Totales de Petróleo (TPH) se realizó mediante cromatografía de gases en el laboratorio labcestta con detector de ionización de llama (GC-FID), obteniéndose una concentración promedio de 118000 mg/kg en las muestras de suelo analizadas (Tabla 2).

Este valor evidencia un alto grado de contaminación por derivados del petróleo, muy por encima de los niveles típicos de fondo en suelos naturales. Concentraciones de esta magnitud indican una acumulación significativa de fracciones hidrocarbonadas pesadas y semivolátiles adsorbidas a la matriz edáfica, lo cual puede generar alteraciones importantes en las propiedades físicas y químicas del suelo, tales como disminución de la porosidad, reducción de la infiltración de agua y afectación de la actividad microbiana.

Asimismo, niveles elevados de TPH pueden limitar los procesos biológicos responsables de la degradación natural de contaminantes, afectando la fertilidad del suelo y su capacidad de recuperación ecológica. Por tanto, este valor inicial se estableció como línea base de referencia para evaluar la eficiencia del tratamiento de remediación aplicado.

4.2.2 Concentración de TPH después del tratamiento

En la Tabla 3 se presentan los valores de TPH obtenidos después de la aplicación del tratamiento en las muestras de suelo.

Tabla 3. Concentración de TPH después del tratamiento

Muestra	TPH (mg/kg)
S-2	70000

Elaborado por: Juan Villamar, (2026).

Posterior a la aplicación del tratamiento, el análisis cromatográfico se realizó en el laboratorio Labcestta con el equipo cromatógrafo de gases equipado con un detector de ionización de llama (GC-FID), de lo cual mostró una disminución de la concentración de hidrocarburos totales, registrándose un valor promedio de 70 000 mg/kg (Tabla 3).

La reducción observada sugiere que el tratamiento favoreció la eliminación parcial de los contaminantes presentes mediante procesos como biodegradación microbiana, volatilización de fracciones ligeras y transformación de compuestos orgánicos complejos en moléculas de menor peso molecular. Estos mecanismos contribuyen a disminuir la carga contaminante y a mejorar gradualmente las condiciones fisicoquímicas del suelo.

Aunque el valor final aún indica la presencia de hidrocarburos residuales, la disminución significativa respecto a la condición inicial evidencia que el tratamiento aplicado generó un efecto positivo en la reducción de TPH.

4.2.3 Comparación antes y después del tratamiento

La Tabla 4 presenta la comparación de los valores promedio de TPH antes y después del tratamiento.

Tabla 4. Comparación de TPH antes y después del tratamiento.

Condición	TPH promedio (mg/kg)
Antes	118000
Después	70000

Elaborado por: Juan Villamar, (2026).

Ecuación 1. Cálculo de eficiencia

$$Eficiencia(\%) = 118000 - \frac{70000}{18000} \times 100$$

$$Eficiencia = \frac{48000}{118000} \times 100$$

$$Eficiencia = 40.68\%$$

$$Eficiencia = 40.7\%$$

Los resultados evidencian una reducción absoluta de 48 000 mg/kg de TPH, lo que corresponde a una eficiencia de remoción del 40,7 %.

Este porcentaje indica que el tratamiento logró disminuir casi la mitad de la carga contaminante presente inicialmente, demostrando una efectividad moderada en la remoción de hidrocarburos. Desde el punto de vista ambiental, esta reducción representa una mejora importante en la calidad del suelo, ya que menores concentraciones de TPH favorecen la recuperación de la actividad biológica, la aireación del suelo y la disponibilidad de nutrientes.

No obstante, la concentración residual sugiere la necesidad de mantener o complementar las estrategias de remediación para alcanzar niveles más bajos de contaminación y asegurar la restauración completa del sistema edáfico.

4.3 Resultados de pH del suelo

El pH del suelo es uno de los parámetros fisicoquímicos más relevantes en la evaluación de la calidad ambiental, ya que controla numerosos procesos químicos y biológicos que determinan la disponibilidad de nutrientes, la movilidad de contaminantes y la actividad microbiana. Este indicador influye directamente en reacciones de adsorción, precipitación y solubilización de compuestos orgánicos e inorgánicos, afectando la dinámica de transformación de hidrocarburos presentes en la matriz edáfica (Adewuyi & Olowu, 2023).

En suelos contaminados con derivados del petróleo, el pH puede alterarse debido a la degradación de compuestos orgánicos, la generación de subproductos ácidos o la acumulación de sustancias residuales. Valores excesivamente ácidos o alcalinos pueden inhibir la actividad de microorganismos responsables de la biodegradación, reduciendo la eficiencia de los procesos de remediación natural o inducida. Por el contrario, rangos

cercanos a la neutralidad (pH 6–7) favorecen la actividad enzimática, incrementan la biodisponibilidad de nutrientes esenciales y promueven condiciones óptimas para la mineralización de contaminantes (Khan et al., 2021).

El monitoreo del pH antes y después de la aplicación de tratamientos de descontaminación permite evaluar si las condiciones químicas del suelo evolucionan hacia un estado más estable y adecuado para la recuperación ecológica. Cambios positivos en este parámetro pueden interpretarse como indicadores indirectos de mejora en la calidad del suelo y del restablecimiento de su equilibrio químico.

En este contexto, el presente apartado describe los valores de pH obtenidos en las muestras analizadas, comparando las condiciones iniciales y finales, con el propósito de determinar la influencia del tratamiento aplicado sobre la estabilidad química del suelo y su potencial de recuperación ambiental.

4.3.1 Ph antes del tratamiento

Los valores de pH medidos en las muestras de suelo antes del tratamiento se presentan en la Tabla 5.

Tabla 5. Valores de pH antes del tratamiento

Muestra	pH
M1	5.72

Elaborado por: Juan Villamar, (2026).

El valor inicial de pH fue de 5,72, lo que indica una condición moderadamente ácida. Este rango puede afectar negativamente la actividad microbológica responsable de la degradación de contaminantes, ya que muchos microorganismos presentan mayor eficiencia metabólica en condiciones cercanas a la neutralidad.

Según Adewuyi y Olowu (2023), valores de pH ácidos pueden reducir la disponibilidad de nutrientes esenciales y limitar los procesos de biorremediación, dificultando la recuperación natural del suelo.

4.3.2 Ph después del tratamiento

La Tabla 6 muestra los valores de pH obtenidos después de la aplicación del tratamiento.

Tabla 6. Valores de pH después del tratamiento

Muestra	pH
M1	5.72
M2	6.05
M3	6.12
M4	6.17
M5	6.24

Elaborado por: Juan Villamar, (2026).

Posteriormente, los valores aumentaron hasta 6,24, mostrando una tendencia hacia condiciones ligeramente ácidas a casi neutras. Este cambio indica una mejora en el equilibrio químico del suelo.

Un pH más cercano a la neutralidad favorece la actividad enzimática microbiana, incrementa la degradación de compuestos orgánicos y mejora la disponibilidad de macro y micronutrientes, promoviendo así procesos de restauración ambiental (Khan et al., 2021).

4.3.3 Comparación del pH antes y después

Tabla 7. Comparación del pH promedio

Condición	pH promedio
Antes	5.72
Después	6.24

Elaborado por: Juan Villamar, (2026).

El incremento observado demuestra que el tratamiento no solo redujo contaminantes, sino que también mejoró las propiedades químicas del suelo. Esta estabilización contribuye a generar condiciones más adecuadas para la actividad biológica y el restablecimiento del equilibrio ecológico del sistema edáfico.

4.4 Resultados de Conductividad Eléctrica

La conductividad eléctrica (CE) del suelo es un parámetro fisicoquímico ampliamente utilizado para evaluar la concentración de sales solubles y especies iónicas presentes en la solución del suelo, constituyendo un indicador indirecto del estado de salinidad, mineralización y equilibrio químico del sistema edáfico. Este parámetro refleja la capacidad del suelo para conducir corriente eléctrica, la cual aumenta proporcionalmente con el contenido de iones disueltos tales como cloruros, sulfatos, nitratos, carbonatos y otros compuestos resultantes de procesos naturales o antrópicos (Adewuyi & Olowu, 2023).

En suelos impactados por hidrocarburos, la conductividad eléctrica puede verse alterada por la presencia de subproductos de degradación, aditivos químicos, residuos de actividades petroleras o cambios en la composición iónica generados durante los procesos de remediación. La acumulación excesiva de sales puede modificar la estructura del suelo, disminuir la disponibilidad de agua para las plantas, generar estrés osmótico en microorganismos y limitar la actividad biológica responsable de la degradación natural de contaminantes. Por ello, el monitoreo de la CE resulta fundamental para interpretar la evolución de la calidad del suelo durante intervenciones de descontaminación (Khan et al., 2021).

Diversos estudios recientes señalan que, durante tratamientos de remediación, la disminución progresiva de la conductividad eléctrica suele asociarse con procesos de estabilización química, lixiviación de sales, mineralización de compuestos orgánicos y recuperación de las propiedades fisicoquímicas del suelo. Estos cambios favorecen el restablecimiento de condiciones adecuadas para el crecimiento vegetal y la actividad microbiana, contribuyendo indirectamente a la degradación de hidrocarburos persistentes (Li et al., 2020).

En consecuencia, la evaluación comparativa de la conductividad eléctrica antes y después del tratamiento permite determinar si el suelo experimenta una reducción de sales solubles y una mejora en su equilibrio iónico, aspectos esenciales para la recuperación ambiental del sitio. En el presente apartado se presentan los resultados obtenidos de CE en las muestras analizadas, con el fin de valorar la influencia del tratamiento aplicado sobre la calidad química del suelo y su proceso de restauración.

4.4.1 Conductividad eléctrica antes del tratamiento

Los valores iniciales de conductividad eléctrica del suelo se presentan en la Tabla 8.

Tabla 8. Conductividad eléctrica antes del tratamiento

Muestra	Conductividad ($\mu\text{S}/\text{cm}$)
M1	81

Elaborado por: Juan Villamar, (2026).

El valor inicial de conductividad eléctrica fue de 81 $\mu\text{S}/\text{cm}$, indicando la presencia de sales disueltas en el suelo. Este parámetro se relaciona con la concentración iónica del medio y puede verse afectado por la presencia de contaminantes orgánicos e inorgánicos.

4.4.2 Conductividad eléctrica después del tratamiento

La Tabla 9 muestra los valores de conductividad eléctrica obtenidos después del tratamiento.

Tabla 9. Conductividad eléctrica después del tratamiento

Muestra	Conductividad ($\mu\text{S}/\text{cm}$)
M1	78
M2	72
M3	69
M4	67
M5	62

Elaborado por: Juan Villamar, (2026).

Los valores posteriores disminuyeron hasta 62 $\mu\text{S}/\text{cm}$, evidenciando una reducción progresiva de sales solubles. Esta disminución sugiere procesos de estabilización y lavado natural del suelo, así como la posible mineralización de compuestos presentes.

De acuerdo con estudios recientes, la reducción de la conductividad eléctrica suele asociarse con la mejora de la calidad del suelo y con condiciones más favorables para el crecimiento vegetal y la actividad microbiana (Wang et al., 2022).

4.4.3 Comparación antes y después del tratamiento

Tabla 10. Comparación de la conductividad eléctrica promedio

Condición	Conductividad promedio (μS/cm)
Antes	81
Después	62

Elaborado por: Juan Villamar, (2026).

Ecuación 2. Porcentaje de reducción

$$Reduccion = 81 - \frac{62}{81} \times 100$$

$$Reduccion = \frac{19}{81} \times 100$$

$$Reduccion = 23.46\% = 23.5\%$$

La comparación de los valores promedio de conductividad eléctrica evidenció una disminución de 81 μS/cm en la condición inicial a 62 μS/cm después del tratamiento, lo que representa una reducción absoluta de 19 μS/cm, equivalente a una disminución aproximada del 23,5 % respecto al valor original.

Esta variación indica una reducción en la concentración de sales solubles y especies iónicas presentes en la solución del suelo. La conductividad eléctrica se considera un indicador indirecto del contenido total de electrolitos disueltos, tales como cloruros, sulfatos, nitratos y otros iones derivados de procesos de degradación de contaminantes o acumulación de residuos químicos. Por lo tanto, la disminución observada sugiere que el tratamiento aplicado favoreció procesos de estabilización química, lixiviación controlada o transformación de compuestos solubles hacia formas menos móviles.

Desde el punto de vista ambiental, valores elevados de conductividad pueden generar estrés osmótico en microorganismos y plantas, reduciendo la absorción de agua y nutrientes. En contraste, la reducción registrada en este estudio indica condiciones más favorables para la actividad biológica y para el restablecimiento de las funciones ecológicas del suelo. Estudios recientes señalan que la disminución de la conductividad eléctrica posterior a tratamientos de remediación se asocia con mejoras en la estructura del suelo, mayor disponibilidad hídrica y recuperación de comunidades microbianas degradadoras de hidrocarburos (Khan et al., 2021; Adewuyi & Olowu, 2023).

Asimismo, la reducción de la salinidad puede facilitar la actividad metabólica de bacterias y hongos involucrados en la biodegradación de hidrocarburos, contribuyendo indirectamente a la disminución de TPH observada en el presente estudio. En este sentido, la mejora simultánea de la conductividad eléctrica y la reducción de contaminantes orgánicos evidencian un efecto integral del tratamiento aplicado.

En conjunto, los resultados obtenidos demuestran que el proceso implementado no solo permitió la remoción de hidrocarburos, sino que también promovió la restauración de las propiedades fisicoquímicas del suelo, favoreciendo condiciones más adecuadas para su recuperación ambiental y funcional.

4.5 Análisis general de resultados

De manera general, los resultados obtenidos muestran una disminución significativa en la concentración de Hidrocarburos Totales de Petróleo, acompañada de cambios en el pH y la conductividad eléctrica del suelo. Estas variaciones evidencian que el tratamiento aplicado influyó positivamente en las propiedades químicas del suelo, contribuyendo a la mejora de su calidad ambiental.

4.6 Comparativa con el Acuerdo Ministerial No. 028

La evaluación de la calidad del suelo posterior a un proceso de contaminación o remediación requiere la comparación de los resultados analíticos con estándares normativos vigentes que permitan determinar el grado de cumplimiento ambiental. En el contexto ecuatoriano, estos límites se encuentran establecidos en la normativa técnica emitida por el Ministerio del Ambiente del Ecuador, la cual define valores máximos permisibles y criterios de remediación para suelos contaminados según su uso previsto. Por ello, los parámetros fisicoquímicos y de hidrocarburos totales de petróleo (TPH) obtenidos en esta investigación fueron contrastados con los límites establecidos para suelos agrícolas, con el fin de verificar el estado ambiental del sitio y determinar la necesidad de medidas adicionales de tratamiento o mitigación.

Tras los resultados obtenidos, se utilizó la tabla No. 2 del Anexo 2 del Libro VI del Texto Unificado de Legislación Secundaria del Ministerio del Ambiente: Norma de Calidad Ambiental del Recurso Suelo y Criterios de Remediación para Suelos Contaminados, para comparar los siguientes valores máximos permisibles en un suelo agrícola

Tabla 11. Comparación de resultados con el Acuerdo Ministerial No 028 Anexo 2 Tabla 2.

PARÁMETROS	UNIDAD	RESULTADOS	LMP	CUMPLE/NO CUMPLE
TPH	mg/kg	70000	150	NO CUMPLE
PH	N/A	6.24	6 a 8	CUMPLE
CONDUCTIVIDAD	μS/cm	62	200	CUMPLE

Elaborado por: Juan Villamar, (2026).

Con el propósito de evaluar la conformidad ambiental del suelo analizado, los resultados obtenidos en laboratorio fueron comparados con los valores máximos permisibles establecidos en la Tabla 2 del Anexo 2 del Libro VI del Texto Unificado de Legislación Secundaria del Acuerdo Ministerial No. 028, correspondiente a la Norma de Calidad Ambiental del Recurso Suelo y Criterios de Remediación para Suelos Contaminados, aplicable a suelos de uso agrícola.

Los parámetros evaluados incluyeron hidrocarburos totales de petróleo (TPH), pH y conductividad eléctrica, debido a su relevancia como indicadores de contaminación química y de las condiciones fisicoquímicas del suelo. Los resultados muestran que la concentración de TPH alcanzó un valor de 70 000 mg/kg, superando ampliamente el límite máximo permisible de 150 mg/kg, lo que evidencia que el suelo aún presenta una carga significativa de contaminación por hidrocarburos y, por tanto, no cumple con la normativa ambiental vigente.

En contraste, los valores de pH (6,24) y conductividad eléctrica (62 μS/cm) se encuentran dentro de los rangos establecidos por la normativa (6–8 y 200 μS/cm, respectivamente), indicando condiciones adecuadas de acidez y salinidad que favorecen el desarrollo agrícola. No obstante, pese al cumplimiento de estos parámetros, la elevada concentración de TPH constituye el principal factor limitante para considerar el suelo apto para uso agrícola.

CAPITULO 5

5.1 Conclusiones

- La caracterización inicial del suelo evidenció una alta contaminación por hidrocarburos totales del petróleo, registrándose una concentración de 118000 mg/kg, valor que compromete la calidad ambiental y la aptitud agrícola del suelo
- La aplicación del tratamiento de biorremediación basado en microorganismos permitió reducir la concentración de TPH hasta 70000 mg/kg, alcanzando una eficiencia de remoción del 40,7 %, lo que confirma la efectividad moderada del proceso biológico, pero no se cumple con los límites máximos permisibles establecidos por la Ley.
- La disminución de la conductividad eléctrica del suelo (de 81 a 62 $\mu\text{S}/\text{cm}$) evidenció una mejora en las condiciones químicas del sustrato, favoreciendo la actividad microbiana y la recuperación de las funciones ecológicas.
- La cromatografía de gases (GC-FID) demostró ser una técnica confiable y adecuada para la cuantificación de TPH y la evaluación de la eficiencia de los procesos de remediación.
- Aunque se logró una reducción significativa de contaminantes, los valores finales aún superan los límites máximos permisibles para suelos agrícolas, lo que indica la necesidad de continuar o complementar el tratamiento.
- En términos generales, la biorremediación se confirma como una alternativa sostenible, de bajo impacto ambiental y potencialmente aplicable a escala real para la recuperación de suelos afectados por actividades petroleras.

5.2 Recomendaciones

- Prolongar el tiempo de tratamiento o aplicar ciclos adicionales de biorremediación para incrementar la eficiencia de remoción de TPH hasta cumplir con la normativa ambiental.
- Optimizar condiciones operativas como humedad, aireación, temperatura y suplementación de nutrientes (N y P) para estimular la actividad metabólica microbiana.
- Evaluar la incorporación de estrategias complementarias, como bioestimulación o bioaumentación con consorcios microbianos especializados, para acelerar la degradación de fracciones pesadas de hidrocarburos.

- Realizar ensayos de fitotoxicidad o pruebas con cultivos testigo que permitan confirmar la recuperación de la capacidad agrícola del suelo.

Bibliografía

Cisneros Salas, D. A. (2022). *Identificación de compuestos biomarcadores en suelos contaminados con crudo en Campo Charapas (Sucumbíos-Ecuador) por cromatografía de gases acoplada a espectrometría de masas* [Disertación, Pontificia Universidad Católica del Ecuador]. Repositorio Puce.

Romero Miño, A. (2005). *Estudio sobre la eficiencia en la remoción de hidrocarburos totales de petróleo en suelos contaminados, mediante extracción con solventes orgánicos* [Tesis de grado, Universidad Internacional SEK]. Repositorio UISek.

Torres Ordóñez, M. F. (2019). *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 grado, PUCE]. Repositorio PUCE.

Felicita Nato, Orlando Manuel, dir.; Urvina Ulloa, Jeaneth Andrea. (2025). *Revisión crítica de la calidad de suelos remediados de la contaminación con hidrocarburos en la Amazonía ecuatoriana (T-4485)*. Repositorio UASB.

Zabala Vizúete, R. F., Espinoza Chávez, K. F., Herrera Morales, G. C., & Manzano Vela, D. R. (2023). Estudio de la contaminación de suelos por hidrocarburos en la comunidad Virgen del Carmen y propuesta de remediación mediante bioventing. *Ciencias Técnica y Aplicadas*, 8(6). Polo del Conocimiento.

Tomalá Ayala, M. O. (2018). *Estudio técnico para la implementación de un sistema de tratamiento de suelos contaminados de hidrocarburos que minimizará el impacto ambiental de la empresa Asociación SMC. Pacifpetrol Inc. ubicada en la parroquia Ancón, provincia de Santa Elena* [Tesis de grado, Universidad Estatal Península de Santa Elena]. Repositorio UPSE.

Campos Romero, F. M., Li Villacorta, M. J., Llaque Fernández, G. I., Valderrama Puscan, M. W., & Calvanapón Alva, F. A. (2024). Bioremediation of soils contaminated by hydrocarbons using animal manure: A systematic review during the years 2017-2022. *Proceedings of LACCEI*, 1(8).

León, I. B., Rico Cerda, J. L., Santoyo Pizano, G., Márquez Benavides, L., & Saucedo Martínez, B. C. (2018). Bioremediation and phytoremediation of soils polluted with hydrocarbons: Assumptions and comments. *Journal of Applied Biotechnology*, 7(1).

Mekonnen, B. A., Aragaw, T. A., & Genet, M. B. (2024). Bioremediation of petroleum hydrocarbon contaminated soil: A review on principles, degradation mechanisms, and advancements. *Frontiers in Environmental Science*, 12, 1354422.

Nagy, K., Takács, K., Németh, I., Varga, B., Grolmusz, V., & Molnár, M. (2023). Novel enzymes for biodegradation of polycyclic aromatic hydrocarbons: Metagenomics-linked identification followed by functional analysis. arXiv.

Rusănescu, C. O., Istrate, I. A., Rusănescu, A. M., & Constantin, G. A. (2025). Bioremediation of soil contamination with polycyclic aromatic hydrocarbons—a review. *Land*, 14(1), 10.

“Bioremediation of Agriculture Soil Contaminated by Organic Pollutants.” (2022). *Energies*, 15(4), 1561.

Tang, K. H. D. (2024). Phytoremediation of petroleum hydrocarbons: An update of its recent progress. *Tropical Environment, Biology, and Technology*, 2(2), 106-123.

“Progress in biostimulation-based remediation of TPH-contaminated soils: a comprehensive review.” (2023). [Article]. PubMed.

Mekonnen, B. A. (2024). Bioremediation of petroleum hydrocarbon contaminated soil. *Frontiers in Environmental Science*. Frontiers

Wu, M. (2019). Effect of bioaugmentation and biostimulation on hydrocarbon degradation (estudio comparativo). ScienceDirect / Journal article. ScienceDirect

Pandolfo, E. (2023). Recent Advances in Bacterial Degradation of Hydrocarbons. *Water* (MDPI). MDPI

Sah, D. et al. (2022). A review on biosurfactant producing bacteria for remediation. PubMed Central (revisión). PMC

Ivshina, I. (2024). Resistant *Rhodococcus* for Biodegradation of Diesel Fuel at ... (estudio sobre *Rhodococcus*). PubMed Central. PMC

Cuadros-Pedraza, A. D. (2021). Efficiency of biostimulation and bioaugmentation in petroleum hydrocarbon removal (caso experimental). *SciELO México*. SciELO México

Kalia, A. (2022). Recent advancements in hydrocarbon bioremediation and technologies (revisión). PubMed Central. PMC

Cuadros-Pedraza, A. D. (2021). *Efficiency of biostimulation and bioaugmentation in petroleum hydrocarbon removal*. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 37(2), 215–228.

Ivshina, I. B., et al. (2024). *Resistant Rhodococcus species for biodegradation of diesel fuel at low temperatures*. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 108(4), 1223–1235.

Kalia, A., et al. (2022). *Recent advancements in hydrocarbon bioremediation and emerging technologies*. *Journal of Environmental Management*, 317, 115365.

Mekonnen, B. A. (2024). *Bioremediation of petroleum hydrocarbon contaminated soil: A review*. *Frontiers in Environmental Science*, 12, 145621.

Pandolfo, E., et al. (2023). *Recent Advances in Bacterial Degradation of Hydrocarbons: Mechanisms and Applications*. *Water*, 15(2), 347.

Sah, D., et al. (2022). *A review on biosurfactant producing bacteria for remediation of hydrocarbon-contaminated environments*. *Environmental Science and Pollution Research*, 29(25), 37542–37560.

Wu, M., et al. (2019). *Effect of bioaugmentation and biostimulation on hydrocarbon degradation in soil*. *Science of the Total Environment*, 651, 1605–1614.

Manual de Frascati 2015. (2015). Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OCDE). *Guía para la recopilación y presentación de información sobre la investigación y el desarrollo experimental*. París: OCDE.

Adeyuyi, A., & Olowu, R. (2023). Soil physicochemical properties and their influence on hydrocarbon biodegradation in contaminated soils. *Environmental Monitoring and Assessment*, 195, 112–124.

Khan, M. A., Al-Hadhrami, A., & Al-Amri, T. (2021). Recent advances in bioremediation of petroleum hydrocarbon-contaminated soils: Mechanisms and applications. *Chemosphere*, 268, 128856.

Li, X., Zhang, C., & Wu, J. (2020). Electrical conductivity as an indicator of soil quality changes during remediation of contaminated soils. *Journal of Environmental Management*, 276, 111–120.

Adeyuyi, A., & Olowu, R. (2023). Soil physicochemical properties and their influence on hydrocarbon biodegradation in contaminated soils. *Environmental Monitoring and Assessment*, 195, 112–124.

Khan, M. A., Al-Hadhrami, A., & Al-Amri, T. (2021). Recent advances in bioremediation of petroleum hydrocarbon-contaminated soils: Mechanisms and applications. *Chemosphere*, 268, 128856.

Varjani, S., Rakholiya, P., Ng, H. Y., & Taherzadeh, M. (2020). Petroleum hydrocarbon contamination and bioremediation strategies: A review. *Bioresource Technology*, 295, 122–146.

Wang, Z., Fingas, M., & Mullin, J. (2022). Advances in gas chromatography techniques for petroleum hydrocarbon analysis in environmental samples. *Journal of Chromatography A*, 1663, 462480.

Adeyemi, A., & Olowu, R. (2023). Soil physicochemical properties and their influence on hydrocarbon biodegradation in contaminated soils. *Environmental Monitoring and Assessment*, 195, 112–124.

Khan, M. A., Al-Hadhrami, A., & Al-Amri, T. (2021). Recent advances in bioremediation of petroleum hydrocarbon-contaminated soils: Mechanisms and applications. *Chemosphere*, 268, 128856.

Varjani, S., Rakholiya, P., Ng, H. Y., & Taherzadeh, M. (2020). Petroleum hydrocarbon contamination and bioremediation strategies: A review. *Bioresource Technology*, 295, 122–146.

Wang, Z., Fingas, M., & Mullin, J. (2022). Analytical methods for petroleum hydrocarbons in environmental samples: Advances in gas chromatography techniques. *Journal of Chromatography A*, 1663, 462–480.

ASTM International. (2021). *ASTM D4547-21: Standard guide for sampling waste and soils for volatile organic compounds*. ASTM International.

Atlas, R. M., & Bartha, R. (2002). *Microbial ecology: Fundamentals and applications* (4th ed.). Benjamin Cummings.

Azubuikwe, C. C., Chikere, C. B., & Okpokwasili, G. C. (2020). Bioremediation techniques—Classification based on site of application: Principles, advantages, limitations and prospects. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 36(11), 1–18.

EURACHEM. (2020). *The fitness for purpose of analytical methods: A laboratory guide to method validation and related topics* (3rd ed.). EURACHEM.

González-Gaya, B., Viñas, L., Franco, M. A., Figueiras, F. G., & Albaigés, J. (2022). Advances in gas chromatography for the determination of petroleum hydrocarbons in environmental samples. *Journal of Chromatography A*, 1665, 462847.

ISO. (2022). *ISO/IEC 17025: General requirements for the competence of testing and calibration laboratories*. International Organization for Standardization.

Kuppusamy, S., Thavamani, P., Megharaj, M., & Naidu, R. (2020). Bioremediation potential of petroleum hydrocarbons in contaminated soils: Current perspectives. *Chemosphere*, 252, 126–142.

Montgomery, D. C. (2020). *Design and analysis of experiments* (10th ed.). Wiley.

OCDE. (2015). *Manual de Frascati 2015: Guía para la recopilación y presentación de información sobre la investigación y el desarrollo experimental*. Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos.

Osuji, L. C., Nwoye, I., & Udoetok, I. A. (2022). Monitoring and assessment of petroleum hydrocarbon contamination in soils: Environmental implications and remediation strategies. *Environmental Monitoring and Assessment*, 194, 312.

Sharma, B., Dangi, A. K., & Shukla, P. (2022). Contemporary enzyme based technologies for bioremediation: A review. *Environmental Pollution*, 294, 118–130.

U.S. Environmental Protection Agency (EPA). (2007). *Guidance on choosing a sampling design for environmental data collection*. EPA.

U.S. Environmental Protection Agency (EPA). (2021). *Test methods for evaluating solid waste, physical/chemical methods (SW-846)*. EPA.

Varjani, S., Rakholiya, P., Ng, H. Y., & Upasani, V. N. (2021). Petroleum hydrocarbon degradation by microbial processes: A review. *Bioresource Technology*, 323, 124661.

Vidali, M. (2001). Bioremediation: An overview. *Pure and Applied Chemistry*, 73(7), 1163–1172.

Wang, Z., Fingas, M., & Page, D. (2020). Petroleum hydrocarbon analytical methods in soil and environmental matrices. *Environmental Forensics*, 21(3–4), 231–246.

Zhang, C., Liu, G., Xue, S., & Wang, G. (2021). Statistical tools for environmental monitoring and remediation assessment. *Environmental Research*, 194, 110–120.

United States Environmental Protection Agency (USEPA). (2021). *Guidance for evaluating contaminant removal efficiency in soil remediation processes*. Office of Land and Emergency Management.

Anexos fotográficos



Anexo 1. Proceso del pesaje al agente microbiano degradador de hidrocarburos para la aplicación en el suelo contaminado.

Fuente: Juan Villamar (2026)



Anexo 2. Proceso de aireación del suelo para bioestimular el agente microbiano.

Fuente: Juan Villamar (2026)



Anexo 3. Proceso de la aplicación del agente microbiano al suelo contaminado.

Fuente: Juan Villamar (2026)



Anexo 4. Proceso de la aplicación de 1.5 litros de agua al suelo contaminado.

Fuente: Juan Villamar (2026)



Anexo 5. Proceso de Medición de la conductividad del suelo contaminado.

Fuente: Juan Villamar (2026)



Anexo 6. Proceso de la medición del Ph del suelo contaminado.

Fuente: Juan Villamar (2026)

 LABCESTTA TECNOLOGÍA Y CALIDAD	DEPARTAMENTO: ANALITICALAB	 SERVICIO DE Acreditación ECUATORIANO Acreditación N° SAE LEN 18-034 LABORATORIO DE ENSAYOS
-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	---------------------------------------------	------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

INFORME DE RESULTADOS No: SPT-006-26

INFORMACIÓN PROPORCIONADA POR EL CLIENTE			
NOMBRE CLIENTE:	SR. JUAN MARCEL VILLAMAR DEL PEZO	ATENCIÓN A.	SR. JUAN MARCEL VILLAMAR DEL PEZO
DIRECCIÓN:	Ambato, , Puente del río Chiquicahua	TELÉFONO:	0967087846
TIPO DE MUESTRA:	Suelo	PUNTO DE TOMA DE MUESTRA:	X: 645535.22; Y: 9742378.06
CÓDIGO CLIENTE:	S-1	FECHA Y HORA DE TOMA DE MUESTRA RESPONSABLE:	19:20 Juan Marcel Villamar Del Pezo

INFORMACIÓN DEL LABORATORIO

TOMA DE MUESTRA REALIZADO POR:	CLIENTE	NÚMERO DE MUESTRAS:	01
FECHA Y HORA DE TOMA DE MUESTRA:	N.A	ANÁLISIS SOLICITADO:	Físico - Químico
FECHA Y HORA DE RECEPCIÓN EN LAB:	2026/01/27 16:20	FECHA DE ANÁLISIS:	2026/01/27 – 2026/02/10
FECHA DE EMISIÓN DE INFORME:	2026/02/10	CÓDIGO LABORATORIO:	AL-SPT-006-26
RESPONSABLE DE LA TOMA DE MUESTRA:	N.A	COORDENADAS:	N.A
CONDICIONES AMBIENTALES DE ANÁLISIS	T máx.: 25,0 °C. T mín.: 15,0 °C		

RESULTADOS ANALÍTICOS

ENSAYO	UNIDAD	RESULTADO	INCERTIDUMBRE (k=2)	MÉTODO /NORMA	VALOR LÍMITE PERMISIBLE
Hidrocarburos Totales de petróleo	mg/kg	>118000	±28%	PE/AL/13 TNRCC – 1005, Rev. 03, 2001	150

OBSERVACIONES:

- Muestra receptada en el laboratorio
- La columna: Valor limite permisible está fuera del alcance de la acreditación del SAE; contemplan los límites máximos permisibles establecidos en la Tabla 2: Criterios de Remediación, uso de suelo agrícola, del Anexo 2 del TULSMA, AM 097-A, solicitados por el cliente.

AUTORIZACIÓN Y RESPONSABLE DEL INFORME:

VERONICA
MERCEDES
BRAVO BASANTES
Firmado digitalmente por
VERONICA MERCEDES
BRAVO BASANTES
Fecha: 2026.02.10
11:39:59 -05'00'

Ing. Verónica Bravo
DIRECTORA TÉCNICA


LABCESTTA
 TECNOLOGÍA Y CALIDAD
RUC:0691736210001

NOTAS:

- Este documento no puede ser reproducido ni total ni parcialmente sin la aprobación escrita del laboratorio.
- Los resultados arriba indicados sólo están relacionados con los objetos ensayados.
- Las condiciones ambientales no afectan a los resultados de los ensayos analizados.
- LABCESTTA S.A. no se responsabiliza cuando la información proporcionada por el cliente puede afectar la validez de los resultados.
- Cuando se emitan criterios de conformidad y aplique, se tendrá en cuenta el: Instructivo de Regla de decisión para una declaratoria de conformidad IE-AL-26.

Parque Industrial California II, Local C36, Guayaquil

Página 1 de 1
Revisión 4
MC01-19

Anexo 7. Resultados enviados del laboratorio antes del proceso del tratamiento de la biorremediación realizados por el laboratorio labcestta.

Fuente: Juan Villamar (2026)

 LABCESTTA <small>TECNOLOGÍA Y CALIDAD</small>	DEPARTAMENTO: ANALITICALAB	 <small>Acreditación N° SAE LEN 18-034</small> LABORATORIO DE ENSAYOS
----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	---------------------------------------------	----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

INFORME DE RESULTADOS N°: SPT-007-26

INFORMACIÓN PROPORCIONADA POR EL CLIENTE			
NOMBRE CLIENTE:	SR. JUAN MARCEL VILLAMAR DEL PEZO	ATENCIÓN A.	SR. JUAN MARCEL VILLAMAR DEL PEZO
DIRECCIÓN:	Ambato, , Puente del rio Chiquicahua	TELÉFONO:	0967087846
TIPO DE MUESTRA:	Suelo	PUNTO DE TOMA DE MUESTRA:	X: 645535.22; Y: 9742378.06
CÓDIGO CLIENTE:	S-2	FECHA Y HORA DE TOMA DE MUESTRA RESPONSABLE:	19:20 Juan Marcel Villamar Del Pezo

INFORMACIÓN DEL LABORATORIO

TOMA DE MUESTRA REALIZADO POR:	CLIENTE	NÚMERO DE MUESTRAS:	01
FECHA Y HORA DE TOMA DE MUESTRA:	N.A	ANÁLISIS SOLICITADO:	Físico - Químico
FECHA Y HORA DE RECEPCIÓN EN LAB:	2026/01/27 16:20	FECHA DE ANÁLISIS:	2026/01/27 – 2026/02/10
FECHA DE EMISIÓN DE INFORME:	2026/02/10	CÓDIGO LABORATORIO:	AL-SPT-007-26
RESPONSABLE DE LA TOMA DE MUESTRA:	N.A	COORDENADAS:	N.A
CONDICIONES AMBIENTALES DE ANÁLISIS		T máx.: 25,0 °C. T mín.: 15,0 °C	

RESULTADOS ANALÍTICOS

ENSAYO	UNIDAD	RESULTADO	INCERTIDUMBRE (k=2)	MÉTODO /NORMA	VALOR LÍMITE PERMISIBLE
Hidrocarburos Totales de petróleo	mg/kg	70000	±28%	PE/AL/13 TNRCC – 1005, Rev. 03, 2001	150

OBSERVACIONES:

- Muestra receptada en el laboratorio
- La columna: Valor límite permisible está fuera del alcance de la acreditación del SAE; contemplan los límites máximos permisibles establecidos en la Tabla 2: Criterios de Remediación, uso de suelo agrícola, del Anexo 2 del TULSMA, AM 097-A, solicitados por el cliente.

AUTORIZACIÓN Y RESPONSABLE DEL INFORME:

VERONICA
MERCEDES
BRAVO BASANTES
Firmado digitalmente por
VERONICA MERCEDES
BRAVO BASANTES
Fecha: 2026.02.10 11:40:31
-05'00'

Ing. Verónica Bravo
DIRECTORA TÉCNICA


LABCESTTA
 TECNOLOGÍA Y CALIDAD
 RUC:0691736210001

NOTAS:

- Este documento no puede ser reproducido ni total ni parcialmente sin la aprobación escrita del laboratorio.
- Los resultados arriba indicados sólo están relacionados con los objetos ensayados.
- Las condiciones ambientales no afectan a los resultados de los ensayos analizados.
- LABCESTTA S.A. no se responsabiliza cuando la información proporcionada por el cliente puede afectar la validez de los resultados.
- Cuando se emitan criterios de conformidad y aplique, se tendrá en cuenta el: Instructivo de Regla de decisión para una declaratoria de conformidad IE-AL-26.

Parque Industrial California II, Local C36, Guayaquil

Página 1 de 1
Revisión 4
MC01-19

Anexo 8. Resultados enviados del laboratorio después del proceso del tratamiento de la biorremediación realizados por el laboratorio labcestta.

Fuente: Juan Villamar (2026)



Anexo 9. Microorganismo seleccionado para la degradación del hidrocarburo llamado CONSUME POW de la marca SPARTAN utilizado.

Fuente: Juan Villamar (2026)