

UNIVERSIDAD PERUANA UNIÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental



**Biorremediación de suelos altoandinos contaminados con diésel,
empleando compostaje en biopilas y adicionando enmiendas
orgánicas**

Tesis para obtener el Título Profesional de Ingeniero Ambiental

Autor:

Henry Cotacallapa Florez

Asesor:

MSc. Franklyn Elard Zapana Yucra

Juliaca, octubre de 2025

DECLARACIÓN JURADA DE ORIGINALIDAD DE TESIS

Yo, MSc. Franklyn Elard Zapana Yucra, docente de la Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental, de la Universidad Peruana Unión.

DECLARO:

Que la presente investigación titulada: **“BIORREMEDIACIÓN DE SUELOS ALTOANDINOS CONTAMINADOS CON DIÉSEL, EMPLEANDO COMPOSTAJE EN BIOPILAS Y ADICIONANDO ENMIENDAS ORGÁNICAS”** del autor **Henry Cotacallapa Florez**, tiene un índice de similitud de 11% verificable en el informe del programa Turnitin, y fue realizada en la Universidad Peruana Unión bajo mi dirección.

En tal sentido asumo la responsabilidad que corresponde ante cualquier falsedad u omisión de los documentos como de la información aportada, firmo la presente declaración en la ciudad de Juliaca, a los 05 días del mes de noviembre del año 2025.



MSc. Franklyn Elard Zapana Yucra

Asesor

ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS



En Puno, Juliaca, Villa Chullunquiari, a 23 día(s) del mes de Octubre del año 2020, siendo las 11:00 horas, se reunieron los miembros del jurado en la Universidad Peruana Unión Campus Juliaca, bajo la dirección del

(de la) presidente(a):

Ing. Enrique Mamani Quela el (la) secretario(a): Msc. Miguel Angel Salcedo
Enriquez y los demás miembros: Mtro. Juan Eduardo Vigo

Rivera Ing. Yvonika Haydes Pari Mamani y el (la) asesor(a) Msc. Francelyn Claud Zapana
Yuna

con el propósito de administrar el acto académico de sustentación de la tesis titulado:
"Biorremediación de suelos albañinos contaminados con diesel, empleando compostaje en kiapilas y adicionando enmiendas orgánicas"

del(los) bachiller(es): a) Henry Botacallapa Flores

b)

c)

conducente a la obtención del título profesional de:

Ingeniero Ambiental
(Denominación del Título Profesional)

El Presidente inició el acto académico de sustentación invitando al (a la) / a (los) (las) candidato(a)s hacer uso del tiempo determinado para su exposición. Concluida la exposición, el Presidente invitó a los demás miembros del jurado a efectuar las preguntas, y aclaraciones pertinentes, las cuales fueron absueltas por al (a la) / a (los) (las) candidato(a)s. Luego, se produjo un receso para las deliberaciones y la emisión del dictamen del jurado.

Posteriormente, el jurado procedió a dejar constancia escrita sobre la evaluación en la presente acta, con el dictamen siguiente:

Bachiller (a): Henry Botacallapa Flores

CALIFICACIÓN	ESCALAS			Mérito
	Vigesimal	Literal	Cualitativa	
<u>Aprobado</u>	<u>18</u>	<u>A-</u>	<u>Muy Bueno</u>	<u>Sobresaliente</u>

Bachiller (b):

CALIFICACIÓN	ESCALAS			Mérito
	Vigesimal	Literal	Cualitativa	

Bachiller (c):

CALIFICACIÓN	ESCALAS			Mérito
	Vigesimal	Literal	Cualitativa	

(*) Ver parte posterior

Finalmente, el Presidente del jurado invitó al (a la) / a (los) (las) candidato(a)s a ponerse de pie, para recibir la evaluación final y concluir el acto académico de sustentación procediéndose a registrar las firmas respectivas.

[Firma]
Presidente/a

[Firma]
Secretario/a

Asesor/a

[Firma]
Miembro

Miembro

[Firma]
Bachiller (a)

Bachiller (b)

Bachiller (c)

Dedicatoria

Con todo mi amor y gratitud, dedico este logro a mis queridos padres, Melitón Cutipa y Rufina Mamani, quienes con su esfuerzo, sacrificio y sabias enseñanzas han sido mi mayor fuente de inspiración, su amor incondicional y su ejemplo de vida trazaron el camino que hoy recorro con orgullo y humildad.

A mi hermano, Efraín Cutipa, por su constante apoyo, confianza y aliento en cada paso de este camino, su presencia ha sido un pilar fundamental en los momentos de desafío y superación.

Y con todo mi corazón, a mi amado hijo, Josué Abraham Cotacallapa, mi más grande motivación y razón de seguir adelante, cada esfuerzo y cada logro son por él y para él, con la esperanza de brindarle un futuro lleno de oportunidades, amor y felicidad.

Agradecimiento

Agradezco profundamente a Dios, creador del universo, por ser fuente de sabiduría, fortaleza y guía constante a lo largo de todo este proceso académico y personal.

Expreso mi sincero agradecimiento a la Universidad Peruana Unión, por brindarme la formación académica, científica y ética que ha sido fundamental para mi desarrollo profesional.

A mis queridos padres, Melitón Cutipa y Rufina Mamani, les debo mi más profundo reconocimiento por su amor incondicional, esfuerzo y sacrificio, que han hecho posible la culminación de este logro.

Al asesor MSc. Franklyn Zapana, por su orientación, valiosos aportes y constante disposición para guiarme durante el desarrollo de esta investigación.

A los ingenieros Sergio Corrales y Gary Terroba, por compartir sus conocimientos técnicos, experiencias profesionales y por su apoyo durante el proceso experimental y de análisis.

Al Lic. Jhonathan Murillo, por su colaboración, compromiso y respaldo que hicieron posible la ejecución y finalización de este trabajo de investigación.

Índice

Dedicatoria.....	iv
Agradecimiento.....	v
Resumen.....	7
Abstract.....	8
Introducción	9
Materiales y Métodos.....	10
Resultados y Discusión.....	12
Reducción de HTP-F2.....	13
Comparación Entre los Tratamientos.....	13
Anomalía y Limitaciones	14
Comparación de los Resultados con Respecto a las Alturas.....	15
Comparación de la Remoción de HTP-F2 con el Estándar de Calidad Ambiental.....	16
Cambios en las Propiedades Fisicoquímicas del Suelo.....	16
<i>Materia Orgánica (MO)</i>	16
<i>Nitrógeno Total (NT)</i>	17
<i>Fósforo (P)</i>	17
<i>Potasio (K)</i>	17
<i>Densidad Aparente del Suelo (DA)</i>	18
<i>Potencial de Hidrogeno (pH)</i>	18
<i>Conductividad Eléctrica (CE)</i>	18
Implicaciones para las Estrategias de Remediación.....	19
Conclusiones.....	20
Referencias Bibliográficas	21
Figuras y Tablas.....	28
Anexos	38
Anexo 1. Evidencia de la Sumisión del Artículo a Revista Científica.....	38
Anexo 2. Resolución Para la Sustentación.....	39

**Biorremediación de suelos altoandinos contaminados con diésel, empleando
compostaje en biopilas y adicionando enmiendas orgánicas**
**Bioremediation of high andean soils contaminated with diesel, using composting in biopiles
and adding organic amendments**

Henry Cotacallapa Florez: henrycotacallapa@upeu.edu.pe; Franklyn Elard Zapana Yucra:
Franklyn.zy@upeu.edu.pe

Resumen

Este estudio evaluó la efectividad del compostaje en biopilas con enmiendas orgánicas para remediar suelos contaminados con diésel en condiciones altoandinas. La investigación tiene enfoque cuantitativo, tipo experimental de diseño pre-post. Se aplicaron cuatro tratamientos y tres alturas diferentes dentro de las biopilas: un control sin enmiendas y tres tratamientos que incorporaron combinaciones de top soil, estiércol de alpaca, desechos orgánicos, compost e ichu a proporción de 75%:19%:6% de suelo contaminado, enmiendas y material poroso por un periodo de 90 días. Los resultados demostraron que el compostaje en biopilas redujo significativamente los hidrocarburos totales de petróleo donde el tratamiento T4 que combina top soil, estiércol de alpaca, desechos orgánicos, compost e ichu logra reducción promedio de 84,60%; también mejora las propiedades del suelo como la materia orgánica (>4,51 veces), nitrógeno total (>4,22 veces), fósforo (>6,78 veces), potasio (>1,47 veces), densidad aparente (<0,83 veces), pH (>1,06 veces) y la conductividad eléctrica (>23,05 veces). La presencia de procesos de fitorremediación localizado, evidenciada por el crecimiento de pequeñas plantas y hongos, contribuye en remediación de la biopila. La variación en la reducción de hidrocarburos con respecto a las alturas entre biopilas se pudo observar donde la cercana al techo presentó temperatura máxima de 61,8 °C, mientras el nivel inferior de 36,8 °C; la correlación de Spearman ($\rho = -0.827$) demostró una relación inversa muy fuerte y significativa entre temperatura y concentración de hidrocarburos, confirmando a mayor temperatura menor concentración de hidrocarburos. Esto resalta el compostaje en biopilas con enmiendas orgánicas como estrategia sustentable y rentable.

Palabras clave: hidrocarburos totales de petróleo; compost; ichu, estiércol de alpaca, desechos orgánicos.

Abstract

This study evaluated the effectiveness of composting in biopiles with organic amendments to remediate diesel-contaminated soils under high Andean conditions. The research used a quantitative approach and a pre-post experimental design. Four treatments and three different heights within the biopiles were applied: a control without amendments and three treatments that incorporated combinations of top soil, alpaca manure, organic waste, compost, and ichu at a ratio of 75%:19%:6% of contaminated soil, amendments, and porous material for a period of 90 days. The results demonstrated that composting in biopiles significantly reduced total petroleum hydrocarbons, with the T4 treatment, which combined top soil, alpaca manure, organic waste, compost, and ichu, achieving an average reduction of 84.60%. It also improves soil properties such as organic matter (>4.51 times), total nitrogen (>4.22 times), phosphorus (>6.78 times), potassium (>1.47 times), bulk density (<0.83 times), pH (>1.06 times), and electrical conductivity (>23.05 times). The presence of localized phytoremediation processes, evidenced by the growth of small plants and fungi, contributes to the remediation of the biopile. The variation in hydrocarbon reduction with respect to height between biopiles was observed, where the one closest to the roof had a maximum temperature of 61.8°C, while the lower level was 36.8°C. Spearman's correlation ($\rho = -0.827$) demonstrated a very strong and significant inverse relationship between temperature and hydrocarbon concentration, confirming that higher temperatures indicate lower hydrocarbon concentrations. This highlights composting in biopiles with organic amendments as a sustainable and profitable strategy.

Keywords: total petroleum hydrocarbons; compost; ichu, alpaca manure, organic waste.

Introducción

La contaminación del suelo con hidrocarburos es una preocupación mundial debido a las actividades industriales y extractivas, liberación de petróleo, derivados del petróleo y otros compuestos orgánicos contaminantes afecta a diversos ecosistemas, desde los urbanos hasta los rurales y las zonas protegidas, estos contaminantes pueden persistir durante décadas en el suelo, generando efectos adversos sobre la salud humana, la calidad del agua y el equilibrio ecológico (Rodríguez et al., 2019).

A pesar de los avances en la remediación de suelos contaminados, existe una necesidad constante de desarrollar técnicas más eficientes y sostenibles, por otro lado, el compostaje en biopilas, que combina residuos orgánicos y materiales contaminados para acelerar la degradación de hidrocarburos, ha demostrado ser una opción prometedora en diferentes contextos, incluidas las zonas altamente contaminadas, sin embargo, es necesaria una mayor investigación y adaptación de esta técnica debido a la dependencia de condiciones como la temperatura, el pH, los microorganismos y la aireación particularmente en las condiciones de las regiones altoandinas, (Mekonnen et al., 2024).

En Perú, la actividad minera es una fuente importante de contaminación del suelo (Instituto Nacional de Estadística e Informática, 2014; Ministerio de Ambiente del Perú, 2016), especialmente en las zonas altoandinas donde se encuentran numerosos yacimientos minerales, aunque se han implementado normas y regulaciones ambientales para controlar y prevenir la contaminación, persisten los impactos negativos debido a la falta de medidas de remediación efectivas (Bedoya et al., 2023; Ccanccapa et al., 2023; Cruzado et al., 2021; Moreno et al., 2024; Saka et al., 2024).

Para la extracción de yacimientos minerales mediante la actividad minera a cielo abierto se utilizan equipos de maquinaria pesada (excavadora hidráulica, cargadora frontal y camión volquete) para el desbroce de cobertura vegetal, remoción de material, transporte de mineral, transporte de grava lavada y sedimentos; para el lavado del mineral se utilizan bombas de agua; generador de energía eléctrica, todos los equipos mencionados para su funcionamiento utilizan diésel, y por lo tanto generan contaminación (Abdullah et al., 2020).

La remediación de suelos contaminados en estas regiones se ve desafiada por las características del ambiente altoandino, tales como: baja temperatura, altitud, escasez de agua y presencia de suelos frágiles dificultando la aplicación de técnicas convencionales de remediación y ponen de manifiesto la necesidad de encontrar soluciones adaptadas a estas condiciones específicas (Abdullah et al., 2020). La necesidad de utilizar hidrocarburos en las empresas mineras de Puno ha generado contaminación de suelos, que normalmente son trasladados a un área destinada para tal fin, pero existen dificultades para su remediación (II Perú Remedia, 2022). Por esta razón, la presente investigación tiene como objetivo evaluar la biorremediación de suelos altoandinos contaminados con diésel, empleando compostaje en biopilas y adicionando enmiendas orgánicas.

Materiales y Métodos

De acuerdo a lo establecido por Hernández & Mendoza (2018), Se utilizó un enfoque cuantitativo, tipo experimental con un diseño pre-post con un grupo control, conformado por 4 tratamientos y 3 alturas diferentes dentro de cada uno de ellos, considerando como muestra control al T1, en total son 12 unidades experimentales. Los ensayos se realizaron de la siguiente manera: Análisis de Hidrocarburos Totales de Petróleo (HTP) para la fracción 2 (C10 – C28) y

análisis de propiedades físico-químicas del suelo en ensayo inicial (2 muestras) y ensayo final (24 muestras); generando un total de 26 muestras. La duración del tratamiento fue de 90 días, equivalente a 3 meses. Para la relación porcentual entre el suelo contaminado, la adición de enmiendas y el medio poroso, se aplicó la proporción ajustada 75%:19%:6% como en la Tabla 1, de manera similar a la investigación de (Curasi & Luque, 2019) que utilizaron la proporción de (80%:20%).

El sitio experimental se ubicó en las instalaciones de un proyecto minero, asentado en el Paraje Morocollo, comunidad de Santa Rosa de Phoquera, distrito de Ananea, provincia de San Antonio de Putina, departamento de Puno (Latitud: 14°39'47.82"S, Longitud: 69°26'8.09"O, Elevación: 4896 msnm). Se selecciona un área abierta al aire libre denominado cancha de volatilización, se construye una estructura de madera, las paredes y el techo fue de policarbonato de 6 mm, la base de concreto con su respectivo colector de lixiviados.

El diseño de las biopilas (Figura 1, Figura 2, Figura 3) fue realizado a escala de banco tomando los criterios de Gutiérrez et al. (2020). Se aplicaron principios básicos del diseño de compost tradicional, un sistema de compostaje aeróbico, la morfología fue una geometría de pirámide truncada con un ángulo de 45° y una altura de 0,20 m, las dimensiones de 1,10 x 0,95 m. La pendiente de 2% para evitar el almacenamiento de lixiviados en la base de las biopilas como lo indica Iturbe et al. (2002).

Para la construcción de las unidades experimentales (pilotes) se realiza montaje de andamio de tres niveles y/o repisas utilizando materiales como cinta de madera de 2" x 2" y tabloncillos de madera de 1 1/2". La base de las biopilas fue de geomembrana de polietileno de alta densidad HDPE de 1,5 mm con dimensiones de 1,30 x 1,10 m.

Respecto del seguimiento y control de las unidades experimentales se considera a Gutiérrez et al. (2021), es decir, homogeneización y aireación cada 15 días de forma manual, humidificación cada 4 días tomando en consideración el porcentaje de humedad de las biopilas y monitoreo diario (temperatura, humedad y pH del suelo).

La recolección del suelo contaminado con hidrocarburos se realiza en diferentes áreas del proyecto minero: (almacén de combustible, área de mantenimiento, casa fuerza, área de motobombas, estacionamiento de equipo pesado). El suelo se recolecta de zonas visibles y evidente presencia de derrame de diésel, luego se homogeneiza y cuartea el material necesario para asegurar la mayor similitud de composición entre pilas, siguiendo la guía para muestreo de suelos (Ministerio de Ambiente, 2014).

Para los resultados se homogeneiza el compost producido y se toma 1.250 kg. de muestra por cada unidad experimental para el ensayo según lo exigido por el laboratorio. El laboratorio emplea el método “EPA METHOD 8015C Rev. 03 2007” para la concentración de HTP, mientras que para los ensayos físico-químicos se emplea el “Methods of analysis for soils, plants and waters. University of California, División of Agricultural Sciences E.U.A. 1988, 195p”.

Resultados y Discusión

La técnica de compostaje en biopilas demuestra eficiencias variables en la remediación de suelos contaminados con diésel en condiciones altoandinas, como lo demuestra la reducción significativa de los hidrocarburos totales de petróleo (HTP-F2) y las mejoras en varias características fisicoquímicas del suelo en los tratamientos (Tabla 2 y Tabla 3).

Reducción de HTP-F2

La concentración inicial de HTP de 11.907,50 mg/kg se redujo significativamente en todos los tratamientos. El tratamiento más efectivo fue el T4, que logra una concentración final promedio de HTP-F2 de 1.833,23 mg/kg, lo que representa una eficiencia de remediación de 84,60%. Los tratamientos T2 y T3 también mostraron reducciones promedio considerables de 2422,69 mg/kg y 2715,87 mg/kg, 79,65% y 77,19% de remediación respectivamente, lo que demuestra su potencial para la biorremediación en las condiciones estudiadas. El tratamiento T1 logra una reducción menor, con una concentración promedio final de TPH-F2 de 8259,00 mg/kg (30,64% de remoción), lo que resalta la importancia de las enmiendas orgánicas para mejorar la degradación de los hidrocarburos. Estos hallazgos se alinean con los estudios que enfatizan el papel de las enmiendas orgánicas en la estimulación de la actividad microbiana como por ejemplo *Actinobacteria*, *Alphaproteobacteria*, *Eisenia fétida*, *Gammaproteobacteria*, *Pseudomonas*, *Rhodococcus* y *Sphingomonas*; asimismo la aceleración de los procesos de degradación de los hidrocarburos (Alinouri et al., 2024; Alves et al., 2019; Fei et al., 2024; Kebede et al., 2021; Siddique et al., 2024; Yergeau et al., 2012).

Comparación Entre los Tratamientos

Entre los tratamientos evaluados, el T4 que combinaba tierra vegetal, estiércol de alpaca, desechos orgánicos, compost e ichu, supera consistentemente a los demás en términos de degradación de hidrocarburos y mejora de la calidad del suelo. Este tratamiento logra la mayor reducción en hidrocarburos totales de petróleo (HTP-F2) y mejora significativamente la materia orgánica del suelo, el nitrógeno total y el pH, lo que indica una mejora bien equilibrada en la salud del suelo. Este tratamiento puede ser más efectivo debido a la variedad de enmiendas que

aporta diversidad de materia y nutrientes, así como una heterogeneidad, en el sentido de porosidad que coadyuva a la aireación para la comunidad bacteriana. También, la composición diversa de enmiendas orgánicas en el T4 crea efectos sinérgicos, fomentando una comunidad microbiana más diversa y activa capaz de degradar hidrocarburos de manera efectiva (Fei et al., 2024).

En comparación, T2 y T3 también demuestra mejoras significativas sobre el tratamiento de control (T1), y T3 en promedio arroja mejores resultados. Esto podría atribuirse a la inclusión de compost y desechos orgánicos en T3, que proporciona una gama más rica de nutrientes a diferencia de la composición más simple de T2. Estos nutrientes pueden haber apoyado el crecimiento y la actividad microbiana de manera más efectiva, lo que resulta en una mayor tasa de degradación de hidrocarburos. Sin embargo, tanto T2 como T3 resaltaron la importancia de las enmiendas orgánicas para mejorar las condiciones del suelo y facilitar la biorremediación en ambientes altoandinos.

El tratamiento de control (T1), que no se añade enmiendas orgánicas, obtiene una eficacia limitada para reducir los HTP-F2 y mejorar la calidad del suelo. Esto pone en relieve los desafíos de depender únicamente de la descomposición natural en entornos extremos como las tierras altas de los andes, donde las bajas temperaturas y la escasez de nutrientes limitan la actividad microbiana (Abdullah et al., 2020). Estos resultados enfatizan la necesidad de incorporar enmiendas orgánicas para lograr resultados de remediación significativos en tales condiciones.

Anomalía y Limitaciones

El T4 presenta una anomalía, donde la medición T4A3 muestra una concentración de HTP-F2 significativamente menor (800,18 mg/kg). Este resultado puede estar relacionado con

factores ambientales localizados, como una temperatura relativamente baja en esa área de muestra en particular (máximo de 39,90 °C), que podría haber influido en la actividad microbiana. Además, la presencia de crecimiento de plantas pequeñas y hongos (Figura 4 y Figura 5) sugiere que un proceso de fitorremediación pudo haber contribuido a la eliminación de hidrocarburos como sucede en otros estudios (Alves et al., 2019; Hernández et al., 2017; Nematí et al., 2024). Los efectos combinados de la biorremediación y la fitorremediación podrían explicar la mayor reducción de TPH-F2. Se necesitan más estudios para explorar las interacciones entre estos procesos y su impacto en la eficiencia de la remediación. Además, se debe estudiar el posible efecto de la volatilización, el cual puede estar influyendo en todos los tratamientos, incluyendo el tratamiento sin enmiendas T1 (Zheng et al., 2021).

Comparación de los Resultados con Respecto a las Alturas

Durante el transcurso del experimento, se observa una variabilidad notable en la tasa de degradación de hidrocarburos totales de petróleo (HTP-F2), la cual se correlaciona con la altura dentro de los bancos de las biopilas. Las biopilas ubicadas a menor distancia del techo (nivel A1, -0,50 m) presenta temperaturas más elevadas que aquellas situadas a mayor profundidad (nivel A2, -1,25 m; nivel A3, -1,80 m), lo que favorece un incremento en la movilización y degradación de los hidrocarburos. Esto coincide con lo reportado en otras investigaciones, donde se evidencia que el aumento de temperatura promueve la biodegradación de hidrocarburos (Babaei et al., 2020; Wang et al., 2013).

En la figura 6 se puede identificar que las temperaturas son diferentes: a) el nivel A1 tiene máximo 61,8 °C y mínimo 18,4 °C, b) el nivel A2 tiene máximo 49,4 °C y mínimo 13,9 °C,

c) el nivel A3 tiene máximo 36,8 °C y mínimo 10,7 °C y d) la temperatura ambiente máximo 23,1 °C y mínimo 6,2 °C.

Se analiza la tabla 3 con una correlación de Spearman donde el resultado ($\rho = -0.827$; $p = 0.002$) indica que existe una correlación significativa ($p < 0.05$) muy fuerte e inversa entre la temperatura y la concentración de HTP-F2. Esto significa que, a medida que la temperatura es mayor en los niveles de los estantes, la concentración de HTP-F2 disminuye.

Comparación de la Remoción de HTP-F2 con el Estándar de Calidad Ambiental

Cabe señalar que los tratamientos T2, T3 y T4 cumplen con el DS N° 011-2017-MINAM: estándar de calidad ambiental (ECA) para suelos en la categoría de suelos comerciales/industriales/extractivos (máximo 5.000,00 mg/kg) (Presidencia de la República, 2017), resultando significativamente diferentes y menores (T-Student para una muestra, valor de prueba = 5000), en contraste con el tratamiento T1 quien no resulta significativa la diferencia (Figura 7).

Cambios en las Propiedades Físicoquímicas del Suelo

La adición de enmiendas orgánicas en los tratamientos T2, T3 y T4 mejora varias propiedades clave del suelo en comparación con las condiciones de control e iniciales (Olivia et al., 2021).

Materia Orgánica (MO)

El contenido de MO aumenta notablemente en todos los tratamientos con enmiendas, los niveles promedio más altos de MO se observan en T4 (3,66 %), y seguidamente el T3 y T2 con (3,53 y

3,52 %) respectivamente, en comparación con el valor inicial de 0,81 % (Figura 8). Lo que demuestra la eficacia de los aportes orgánicos combinados. El enriquecimiento de MO es crucial para proporcionar nutrientes a las comunidades microbianas responsables de la degradación de hidrocarburos (Bher et al., 2022).

Nitrógeno Total (NT)

Los niveles de NT mejoran significativamente en todos los tratamientos que se adiciona enmiendas orgánicas obteniendo un promedio de T2 (0,13 %), T3 (0,13 %) y T4 (0,13 %) en comparación con el valor inicial de 0,03 % (Figura 9). La adición de enmiendas ricas en nitrógeno, como el estiércol de alpaca, probablemente mejora la concentración del nitrógeno, lo que favorece el crecimiento microbiano (Burghardt & Schneider, 2018).

Fósforo (P)

El contenido de P es significativamente diferente y mayor entre los 3 tratamientos donde se adiciona enmiendas orgánicas con respecto al inicio, siendo el resultado promedio T4 (17,62 ppm), T3 (14,58 ppm) y T2 (10,97 ppm), donde T4 es superior en más de 6,78 veces con respecto al valor inicial de 2,60 ppm (Figura 10). Lo que constituye una mejora en la calidad de suelo, a diferencia del tratamiento de otros autores que no lograron diferencias significativas (Romaniuk et al., 2007).

Potasio (K)

Se genera una disminución menor del T2 (390,98 ppm) con respecto al inicio 918,80 ppm, mientras que T3 y T4 (1631,89 y 1346,79 ppm) son significativamente superiores, siendo 1,78

veces mejor el T3 (Figura 11), a diferencia del método de otros autores donde ocurre lo contrario reduciéndose 4.5 veces con respecto al suelo testigo (Trujillo et al., 2012).

Densidad Aparente del Suelo (DA)

Se observaron reducciones promedio significativas en los tratamientos T3 (1,00 gr/cm³), y seguidamente T2 y T4 (1,05 y 1.06 gr/cm³) respectivamente, en comparación con el valor inicial de 1,28 gr/cm³ (Figura 12). La reducción de densidad sugiere una mejor aireación y porosidad que favorecen la degradación microbiana (Bodor et al., 2024; Jiang et al., 2021; Takemi et al., 2022).

Potencial de Hidrogeno (pH)

Los tratamientos T3 (8,81 pH) y T4 (7,80 pH) tiene un incremento moderadamente alcalino, T2 (6,50 pH) una reducción ligeramente ácida (Figura 13). El pH ligeramente alcalino observado en estos tratamientos favorece en la degradación de hidrocarburos, como se reporta en estudios similares (Kebede et al., 2021; Siddique et al., 2024).

Conductividad Eléctrica (CE)

Todos los tratamientos tuvieron un incremento significativo promedio de T1 (16,95 mmhos/cm) no es un suelo salino, mientras que los T2, T3 y T4 (36,50, 61,27 y 74,67 mmhos/cm) respectivamente (Figura 14) se considera moderada a fuerte salinidad, indicando un exceso en la disponibilidad de nutrientes o presencia de sales. El aumento de la CE influye en el crecimiento y desarrollo de las plantas (Martins et al., 2024).

Implicaciones para las Estrategias de Remediación

La reducción significativa de los HTP y la mejora de los parámetros de calidad del suelo lograda por el T4 demuestran su potencial como una estrategia viable de remediación de suelos contaminados con diésel en las regiones altoandinas. La integración de enmiendas orgánicas disponibles localmente, como el estiércol de alpaca y el ichu, no solo mejora la eficiencia, también respalda prácticas de remediación sostenibles y rentables (Hazen et al., 2003). Los estudios futuros deberían enfocarse en ampliar el proceso, analizar los impactos a largo plazo y evaluar el comportamiento de las comunidades microbianas para que la técnica sea más eficiente. También, se debería considerar la altura o distancia al techo como factor experimental, o bien utilizar mecanismos de control térmico.

Conclusiones

Este estudio demuestra que la técnica de compostaje en biopila es una estrategia eficaz y viable para la remediación de suelos altoandinos contaminados con diésel, logrando reducir los hidrocarburos totales de petróleo (HTP) en un rango de 77,19 a 84,60%. El limitado desempeño del tratamiento de control T1 (30,64 %) resalta la indispensable necesidad de utilizar enmiendas. La mayor eficiencia de remediación se observó en el tratamiento T4, que combinó tierra vegetal, estiércol de alpaca, desechos orgánicos, compost e ichu, no solo por alcanzar la mayor reducción de HTP, sino también por mejorar significativamente las propiedades fisicoquímicas del suelo. La adición de estas enmiendas orgánicas disponibles localmente incrementó el contenido de materia orgánica, el nitrógeno total y el pH, a la vez que disminuyó la densidad del suelo hasta en un 16,93% en T4, mejorando la aireación y porosidad. Los factores como la cercanía al techo influyeron en la temperatura y, por ende, en la eficacia de la degradación por niveles, introduciendo cierta variabilidad, los resultados globales son prometedores. La Fitorremediación observada por el crecimiento de pequeñas plantas y hongos en una biopila influencia de manera positiva en la reducción de HTP-F2. Asimismo, el marcado aumento de la conductividad eléctrica y la disponibilidad de nutrientes (hasta 23,05 veces mayor) crea condiciones que favorecen la actividad microbiana.

Referencias Bibliográficas

- Abdullah, S. R. S., Al-Baldawi, I. A., Almansoori, A. F., Purwanti, I. F., Al-Sbani, N. H., y Sharuddin, S. S. N. (2020). Plant-assisted remediation of hydrocarbons in water and soil: Application, mechanisms, challenges and opportunities. *Chemosphere*, *247*, 125932. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.125932>
- Alinouri, M., Saeedi, R., Coulon, F., Villaseñor, J., Godini, K., Ghamari, F., Hesampoor, F., Asghari, F., Sartaj, M., y Koolivand, A. (2024). Biodegradation of oily waste sludge using vermiremediation and composting process bioaugmented with isolated hydrocarbon-degrading bacteria: Performance and ecotoxicity assessment. *Environmental Nanotechnology, Monitoring & Management*, *22*, 100992. <https://doi.org/10.1016/j.enmm.2024.100992>
- Alves, D., Villar, I., y Mato, S. (2019). Thermophilic composting of hydrocarbon residue with sewage sludge and fish sludge as cosubstrates: Microbial changes and TPH reduction. *Journal of Environmental Management*, *239*, 30–37. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.03.028>
- Babaei, A. A., Safdari, F., Alavi, N., Bakhshoodeh, R., Motamedi, H., y Paydary, P. (2020). Co-composting of oil-based drilling cuttings by bagasse. *Bioprocess and Biosystems Engineering*, *43*(1), 1–12. <https://doi.org/10.1007/s00449-019-02195-6>
- Bedoya-Perales, N. S., Maus, D., Neimaier, A., Escobedo-Pacheco, E., y Pumi, G. (2023). Assessment of the variation of heavy metals and pesticide residues in native and modern potato (*Solanum tuberosum* L.) cultivars grown at different altitudes in a typical mining region in Peru. *Toxicology Reports*, *11*, 23–34. <https://doi.org/10.1016/j.toxrep.2023.06.005>

- Bher, A., Mayekar, P. C., Auras, R. A., y Schvezov, C. E. (2022). Biodegradation of Biodegradable Polymers in Mesophilic Aerobic Environments. *International Journal of Molecular Sciences*, 23(20), 12165. <https://doi.org/10.3390/ijms232012165>
- Bodor, A., Feigl, G., Kolossa, B., Mészáros, E., Laczi, K., Kovács, E., Perei, K., y Rákhely, G. (2024). Soils in distress: The impacts and ecological risks of (micro)plastic pollution in the terrestrial environment. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 269, 115807. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2023.115807>
- Burghardt, W., y Schneider, T. (2018). Bulk density and content, density and stock of carbon, nitrogen and heavy metals in vegetable patches and lawns of allotments gardens in the northwestern Ruhr area, Germany. *Journal of Soils and Sediments*, 18(2), 407–417. <https://doi.org/10.1007/s11368-016-1553-8>
- Ccancapa-Cartagena A, Chavez-Gonzales FD, Paredes B, Vera C, Gutierrez G, Valencia R, (2023). Seasonal differences in trace metal concentrations in the major rivers of the hyper-arid southwestern Andes basins of Peru. *Journal Environ Manage*, 344, 118493. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.118493>.
- Cruzado-Tafur, E., Torró, L., Bierla, K., Szpunar, J., y Tauler, E. (2021). Heavy metal contents in soils and native flora inventory at mining environmental liabilities in the Peruvian Andes. *Journal of South American Earth Sciences*, 106, 103107. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2020.103107>
- Curasi Rafael, N., y Luque Soncco, M. A. (2019). *Efectividad de los bioestimuladores de compost, lombricompost y abono verde en la biorremediación de suelos contaminados con aceite automotriz* [Universidad Peruana Unión]. <https://repositorio.upeu.edu.pe/handle/20.500.12840/3079>

- Fei-Baffoe, B., Amuah, E. E. Y., Annan, E. L., Sulemana, A., Sackey, L. N. A., Miezah, K., Benti, J., Nang, D. B., y Kazapoe, R. W. (2024). Synergistic use of cattle bile, compost and fertilizer amendments in enhancing the bioremediation of hydrocarbon-contaminated soils. *Cleaner and Circular Bioeconomy*, 9, 100116.
<https://doi.org/10.1016/j.clcb.2024.100116>
- Gutiérrez Benítez, O., Castro Rodríguez, D. J., Viera Ribot, O. M., Casals Pérez, E., y Rabassa Rabassa, D. (2020). Diseño ingeniero y montaje de unidades experimentales para la biorremediación de residuos petrolizados a escala de banco. *Tecnología Química*, 40(3), 580–597.
- Gutiérrez-Benítez, O., Castro-Rodríguez, D. J., Viera-Ribot, O. M., Casals-Pérez, E., y Rabassa-Rabassa, D. (2021). Cinética de la degradación de hidrocarburos mediante biopilas a escala de banco. *Tecnología Química*, 41(2), 346–366.
- Hazen, T. C., Tien, A. J., Worsztynowicz, A., Altman, D. J., Ulfig, K., y Manko, T. (2003). Biopiles for Remediation of Petroleum-Contaminated Soils: A Polish Case Study. En V. Šašek, J. A. Glaser, y P. Baveye (Eds.), *The Utilization of Bioremediation to Reduce Soil Contamination: Problems and Solutions* (pp. 229–246). Springer Netherlands.
https://doi.org/10.1007/978-94-010-0131-1_21
- Hernández Sampieri, R., y Mendoza Torres, C. P. (2018). *Metodología de la investigación: Las rutas cuantitativa, cualitativa y mixta* (First edition). McGraw-Hill Education.
- Hernández Valencia, I., Navas, G., y Infante, C. (2017). FITORREMEDIACIÓN DE UN SUELO CONTAMINADO CON PETRÓLEO EXTRA PESADO CON *Megathyrus maximus*. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 33(3), 495–503.
<https://doi.org/10.20937/RICA.2017.33.03.12>

II Perú Remedia: 4 claves para remediar las zonas impactadas por la contaminación de hidrocarburos. (2022, septiembre 16). Profonanpe.

<https://profonanpe.org.pe/iiperuremedia-4-claves-para-remediar-las-zonas-impactadas-por-la-contaminacion-de-hidrocarburos/>

Instituto Nacional de Estadística e Informática. (2014). *Anuario de Estadísticas Ambientales, Capítulo 7.*

https://www.inei.gov.pe/media/MenuRecursivo/publicaciones_digitales/Est/Lib1197/cap07.pdf

Iturbe-Argüelles, R., Flores-Torres, C., Chávez-López, C., y Roldán-Martín, A. (2002).

Saneamiento de suelos contaminados con amiento de suelos contaminados. *Ingeniería Investigación y Tecnología*, 3(1), 25–35.

<https://doi.org/10.22201/fi.25940732e.2002.03n1.004>

Jiang, J., Wang, S., Wang, L., Lv, Q., Yang, Y., Chen, K., Liu, L., y Wang, X. (2021). The improvement of pore characteristics, remediation efficiency, and biotoxicity of petroleum-contaminated soil with the addition of bulking agent on field-scale biopile treatment. *Journal of Soils and Sediments*, 21(8), 2855–2864.

<https://doi.org/10.1007/s11368-021-02992-1>

Kebede, G., Tafese, T., Abda, E. M., Kamaraj, M., y Assefa, F. (2021). Factors Influencing the Bacterial Bioremediation of Hydrocarbon Contaminants in the Soil: Mechanisms and Impacts. *Journal of Chemistry*, 2021(1), 9823362. <https://doi.org/10.1155/2021/9823362>

Martins do Carmo, A. P., Mendonça Freitas, M. S., Corrêa Machado, L., dos Santos Silva, L., Calenzani Petri, D. J., Vimercati, J. C., Matos, C. R. R., Mathias, L., Curcino Vieira, I. J., y Cordeiro de Carvalho, A. J. (2024). Electrical conductivity of nutrient solutions affects

- the growth, nutrient levels, and content and composition of essential oils of *Acmella oleracea* (L.) R. K. Jansen from southeastern Brazil. *Journal of Agriculture and Food Research*, 15, 100968. <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2024.100968>
- Mekonnen, B. A., Aragaw, T. A., y Genet, M. B. (2024). Bioremediation of petroleum hydrocarbon contaminated soil: A review on principles, degradation mechanisms, and advancements. *Frontiers in Environmental Science*, 12. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2024.1354422>
- Ministerio de Ambiente del Perú. (2016). *Evaluación Preliminar de la Contaminación Ambiental causada por la Pequeña Minería y Minería Artesanal en la Zona Urbana del Distrito de Chala- Arequipa, Perú*. SINIA | Sistema Nacional de Información Ambiental. <https://sinia.minam.gob.pe/documentos/evaluacion-preliminar-contaminacion-ambiental-causada-pequena-mineria>
- Ministerio de Ambiente [MINAM]. (2014). *Guía para el Muestreo de Suelos*. <https://www.minam.gob.pe/calidadambiental/wp-content/uploads/sites/22/2013/10/GUIA-PARA-EL-MUESTREO-DE-SUELOS-final.pdf>
- Moreno-Aguirre, S. B., Vértiz-Osores, J. J., Paredes-Espinal, C. E., Meseth, E., Vílchez-Ochoa, G. L., Espino-Ciudad, J. A., y Flores del Pino, L. (2024). Ecological risk of metals in Andean water resources: A framework for early environmental assessment of mining projects in Peru. *Heliyon*, 10(9), e30739. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e30739>
- Nemati, B., Baneshi, M. M., Akbari, H., Dehghani, R., y Mostafaii, G. (2024). Phytoremediation of pollutants in oil-contaminated soils by *Alhagi camelorum*: Evaluation and modeling. *Scientific Reports*, 14(1), 5502. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-56214-y>

- Olivia, L.-C., Minerva, G.-C., Rocío, P.-J., y Francisco José, M.-P. (2021). Assessment of biopiles treatment on polluted soils by the use of *Eisenia andrei* bioassay. *Environmental Pollution*, 275, 116642. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.116642>
- Presidencia de la República. (2017). *DECRETO SUPREMO-N° 011-2017-MINAM. Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para Suelo*.
<http://busquedas.elperuano.pe/normaslegales/aprueban-estandares-de-calidad-ambiental-eca-para-suelo-decreto-supremo-n-011-2017-minam-1593392-5/>
- Rodríguez-Eugenio, N., McLaughlin, M., y Pennock, D. (2019). *La contaminación del suelo: Una realidad oculta* (FAO). <https://www.fao.org/3/i9183es/i9183es.pdf>
- Romaniuk, R., Brandt, J. F., Rios, P. R., y Giuffré, L. (2007). Atenuación natural y remediación inducida en suelos contaminados con hidrocarburos. *Ciencia del suelo*, 25(2), 139–149.
- Saka, U. M., Pacheco-Hague, K., Duzgun, S., y Smith, N. (2024). An analysis of the impact of CO2 emissions from deforestation and mining in Madre de Dios, Perú. *The Extractive Industries and Society*, 20, 101526. <https://doi.org/10.1016/j.exis.2024.101526>
- Siddique, A., Al Disi, Z., AlGhouti, M., y Zouari, N. (2024). Diversity of hydrocarbon-degrading bacteria in mangroves rhizosphere as an indicator of oil-pollution bioremediation in mangrove forests. *Marine Pollution Bulletin*, 205, 116620.
<https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2024.116620>
- Takemi, M., Masataka, S., Yoichiro, K., y Yoshiyuki, A. (2022). Estimation of bulk density of livestock waste compost materials (Part 2) -Study on mixtures of dairy cow manure and secondary materials-. *Agricultural Facilities*, 53(1), 13–19.
- Trujillo-Narcía, A., Rivera-Cruz, M. del C., Lagunes-Espinoza, L. del C., Palma-López, D. J., Soto-Sánchez, S., y Ramírez-Valverde, G. (2012). Efecto de la restauración de un fluvisol

- contaminado con petróleo crudo. *Revista internacional de contaminación ambiental*, 28(4), 360–374.
- Wang, R., Liu, Q., y Tang, J. (2013). Degradation of Petroleum Hydrocarbons in Composting Process of Cattle Manure under Different Conditions. *Journal of Pure and Applied Microbiology*. <https://microbiologyjournal.org/degradation-of-petroleum-hydrocarbons-in-composting-process-of-cattle-manure-under-different-conditions/>
- Yergeau, E., Sanschagrin, S., Beaumier, D., y Greer, C. W. (2012). Metagenomic Analysis of the Bioremediation of Diesel-Contaminated Canadian High Arctic Soils. *PLOS ONE*, 7(1), e30058. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0030058>
- Zheng, Y.-M., Xi, B.-D., Shan, G.-C., Yu, M.-D., Cui, J., Wei, K.-H., Liu, H.-B., y He, X.-S. (2021). High proportions of petroleum loss ascribed to volatilization rather than to microbial degradation in greenhouse-enhanced biopile. *Journal of Cleaner Production*, 303, 127084. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127084>

Figuras y Tablas

Tabla 1

Distribución de tratamientos

Tratamiento	Altura	Distribución de enmiendas
T1	A1	Grupo de control: 12,00 kg de tierra contaminada
	A2	
	A3	
T2	A1	12,00 kg de tierra contaminada
	A2	1,50 kg de tierra vegetal
	A3	1,50 kg de estiércol de alpaca 1,00 kg de ichu
T3	A1	12,00 kg de tierra contaminada
	A2	1,50 kg de residuos orgánicos
	A3	1,50 kg de compost 1,00 kg de ichu
T4	A1	12,00 kg de tierra contaminada
	A2	0,75 kg de tierra vegetal
	A3	0,75 kg de estiércol de alpaca 0,75 kg de residuos orgánicos 0,75 kg de compost 1,00 kg de ichu

Tabla 2

Análisis estadístico de los resultados mediante prueba paramétrica

Tratamiento	Materia orgánica (%)	Densidad aparente (gr/cm ³)	Humedad (%)	Potencial de hidrogeno (pH)
Inicio	0.81±0.01 ^a	1.28±0.01 ^f	5.72±0.01 ^b	7.39±0.01 ^g
T1A1	1.00±0.01 ^b	1.69±0.01 ^b	5.94±0.01 ^c	6.40±0.01 ^a
T1A2	1.43±0.01 ^c	1.61±0.01 ^a	6.13±0.01 ^f	6.80±0.01 ^f
T1A3	1.49±0.01 ^d	1.58±0.01 ^a	6.15±0.01 ^g	6.71±0.01 ^e
T2A1	3.56±0.01 ^h	1.07±0.01 ^d	6.70±0.01 ⁱ	6.43±0.01 ^b
T2A2	3.40±0.01 ^e	1.02±0.01 ^c	7.00±0.01 ^k	6.49±0.01 ^c
T2A3	3.59±0.01 ⁱ	1.06±0.01 ^e	6.90±0.01 ^j	6.58±0.01 ^d
T3A1	3.53±0.01 ^g	1.01±0.01 ^l	6.57±0.01 ^h	8.75±0.01 ^j
T3A2	3.49±0.01 ^f	1.00±0.01 ⁱ	6.90±0.01 ^j	8.80±0.01 ^k

Tratamiento	Materia orgánica (%)	Densidad aparente (gr/cm ³)	Humedad (%)	Potencial de hidrogeno (pH)
T3A3	3.56±0.01 ^h	1.00±0.01 ^k	6.00±0.01 ^c	8.87±0.01 ^l
T4A1	3.56±0.01 ^h	1.07±0.01 ^j	5.98±0.01 ^d	7.71±0.01 ^h
T4A2	3.56±0.01 ^h	1.12±0.01 ^h	6.00±0.01 ^c	7.84±0.01 ⁱ
T4A3	3.85±0.01 ^j	1.00±0.01 ^g	5.00±0.01 ^a	7.84±0.01 ⁱ

Nota. Resultados; según ANOVA - Tukey ($p \leq 0,05$). Los valores medios en la misma columna con letras diferentes (a, b, c, d, e, f, g, h, i, j, k, l) indican diferencias significativas. Media \pm desviación estándar (DE).

Tabla 3

Análisis estadístico de los resultados mediante prueba no paramétrica

Tratamiento	HTP-F2 (>C10-C28)	Nitrógeno total (%)	Fósforo (ppm)	Potasio (ppm)	C.E. (mmhos/cm)
Inicio	11907.50±0.01 ^c	0.03±0.01 ^a	2.60±0.01 ^a	918.80±0.01 ^b	3.24±0.01 ^a
T1A1	5780.79±0.01 ^b	0.04±0.01 ^{ab}	4.40±0.01 ^{ab}	234.58±0.01 ^a	23.70±0.01 ^b
T1A2	8520.82±0.01 ^{bc}	0.05±0.01 ^{ab}	3.20±0.01 ^a	156.39±0.01 ^a	11.91±0.01 ^b
T1A3	10475.39±0.01 ^c	0.06±0.01 ^b	3.75±0.01 ^a	156.39±0.01 ^a	15.25±0.01 ^b
T2A1	1693.16±0.01 ^a	0.13±0.01 ^c	10.90±0.01 ^c	390.98±0.01 ^a	28.50±0.01 ^b
T2A2	2208.74±0.01 ^a	0.12±0.01 ^c	10.50±0.01 ^c	312.78±0.01 ^a	34.70±0.01 ^b
T2A3	3366.17±0.01 ^{ab}	0.13±0.01 ^c	11.50±0.01 ^c	469.17±0.01 ^a	46.30±0.01 ^b
T3A1	1982.46±0.01 ^a	0.13±0.01 ^c	13.25±0.01 ^{cd}	1867.70±0.01 ^c	22.70±0.01 ^b
T3A2	3096.06±0.01 ^{ab}	0.13±0.01 ^c	14.25±0.01 ^d	1339.21±0.01 ^c	75.80±0.01 ^c
T3A3	3069.08±0.01 ^{ab}	0.13±0.01 ^c	16.25±0.01 ^d	1688.75±0.01 ^c	85.30±0.01 ^c
T4A1	1619.01±0.01 ^a	0.12±0.01 ^c	15.40±0.01 ^d	1600.00±0.01 ^c	47.4±0.01 ^b
T4A2	2047.44±0.01 ^a	0.12±0.01 ^c	18.95±0.01 ^e	1300.00±0.01 ^c	92.70±0.01 ^c
T4A3	800.18 [*]	0.14±0.01 ^c	18.50±0.01 ^e	1140.38±0.01 ^c	83.90±0.01 ^c

Nota. HTP-F2=Hidrocarburos totales de petróleo fracción 2. Resultados; según KRUSKAL WALLIS - Dunn test ($p \leq 0,05$). Los valores medios en la misma columna con letras diferentes (a, b, c, d, e) indican diferencias significativas. Media \pm desviación estándar (DE). *Anomalía

Tabla 4

Temperaturas promedio y concentraciones finales de HTP-F2

Muestra	Temperatura de muestras (°C)	HTP-F2 (mg/kg)
T1A1	35,10	5780,79
T1A2	28,53	8520,82
T1A3	23,82	10475,39
T2A1	44,24	1693,16
T2A2	32,81	2208,74
T2A3	25,29	3366,17
T3A1	44,88	1982,46
T3A2	32,35	3096,06
T3A3	29,93	3069,08
T4A1	45,44	1619,01
T4A2	33,75	2047,44
T4A3	27,26	800,18

Figura 1

Vista de planta del diseño de biopilas

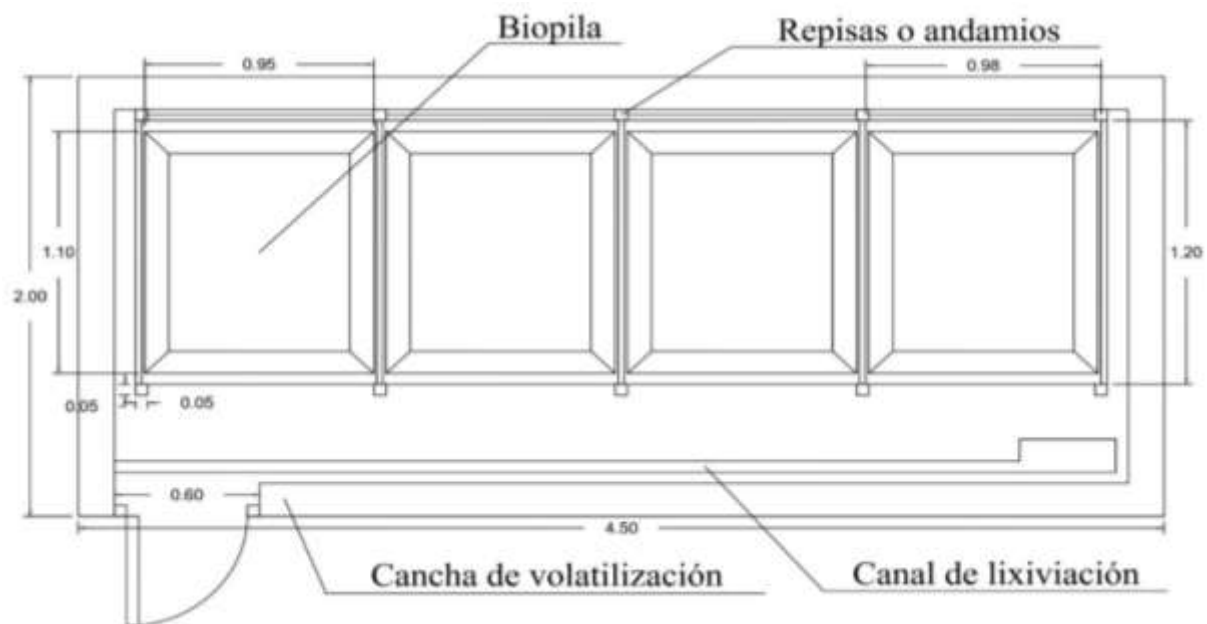


Figura 2

Vista frontal del diseño de biopilas

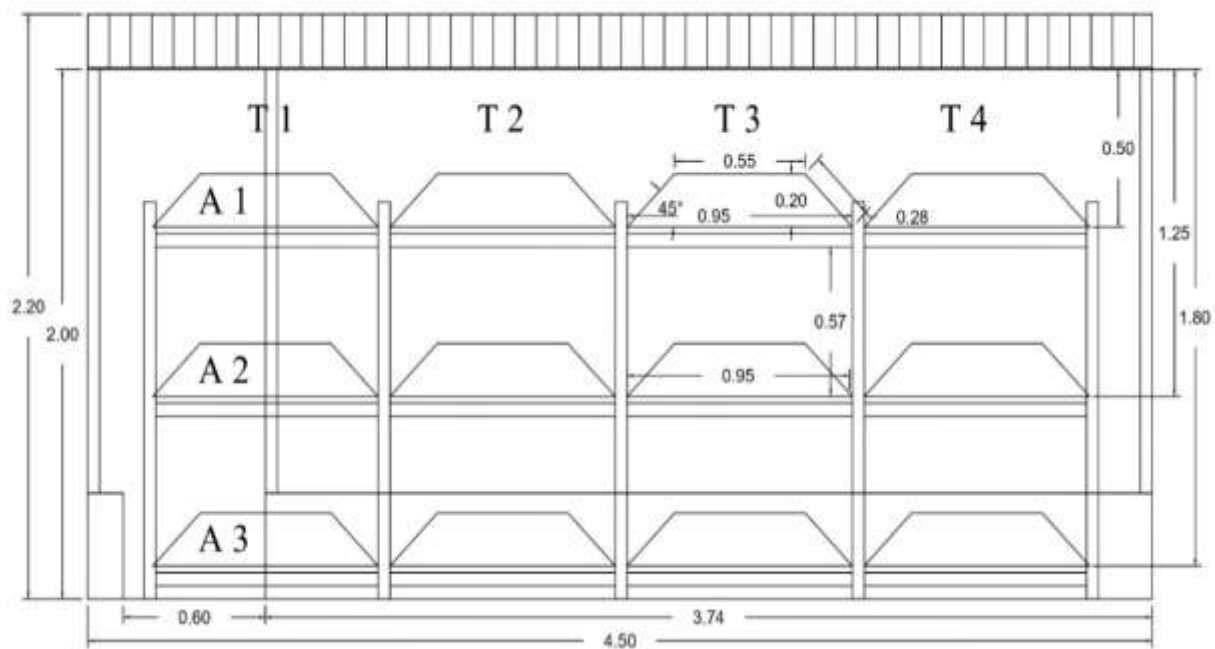
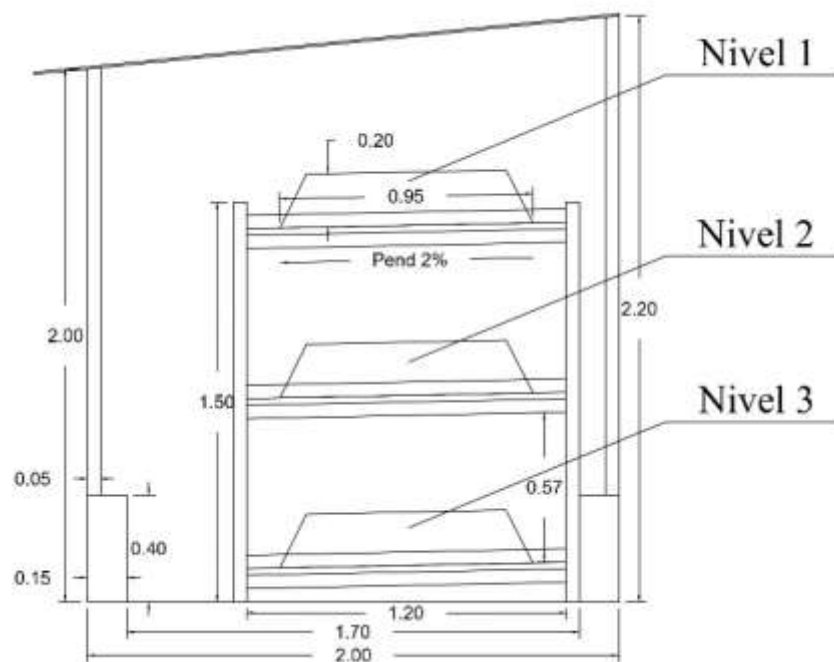


Figura 3

Vista lateral del diseño de biopilas

**Figura 4**

Crecimiento de pequeñas plantas en elT4A3.



Figura 5

Crecimiento de hongos en el T4A3

**Figura 6**

Variabilidad de la temperatura según los niveles de los estantes de las biopilas

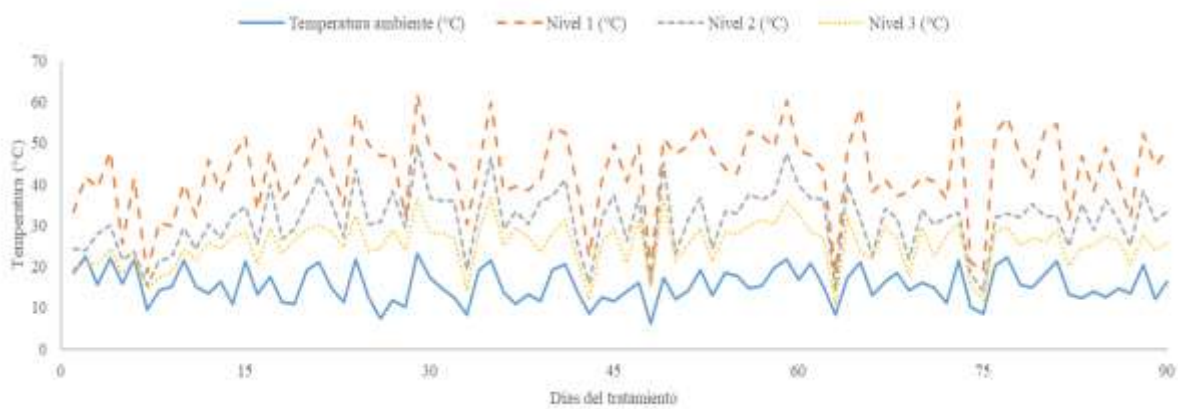
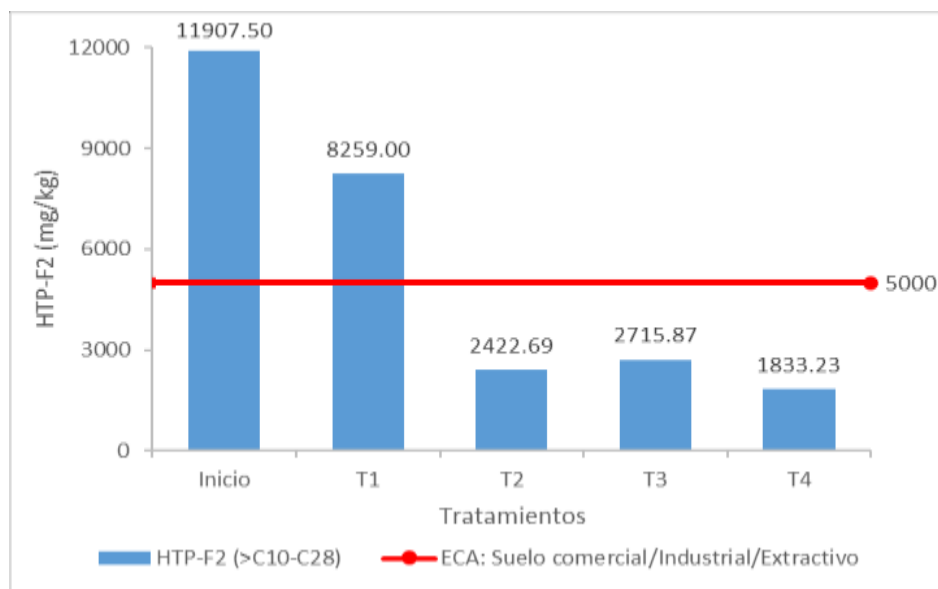


Figura 7

Remoción de hidrocarburos totales de petróleo fracción 2

**Figura 8**

Concentración inicial y final de materia orgánica

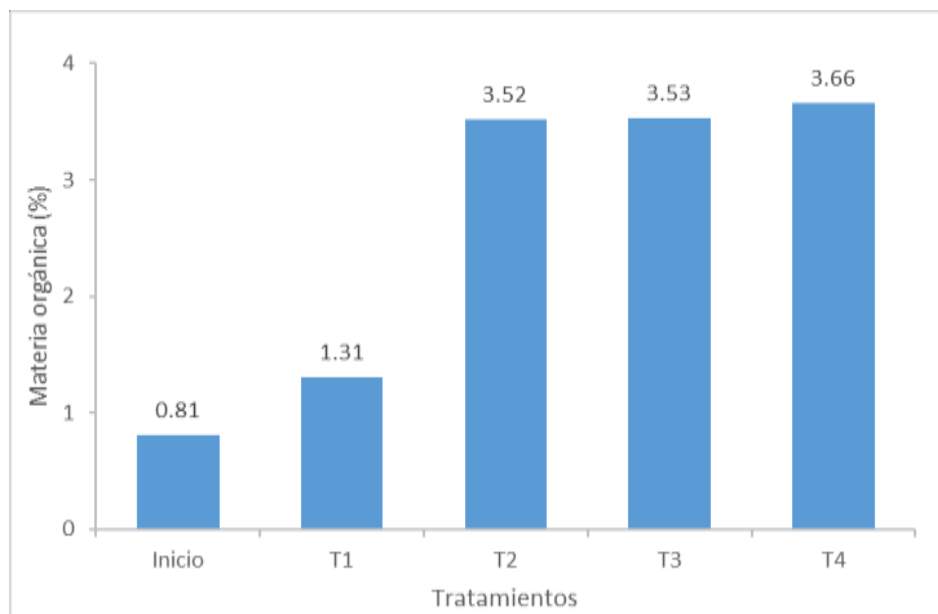
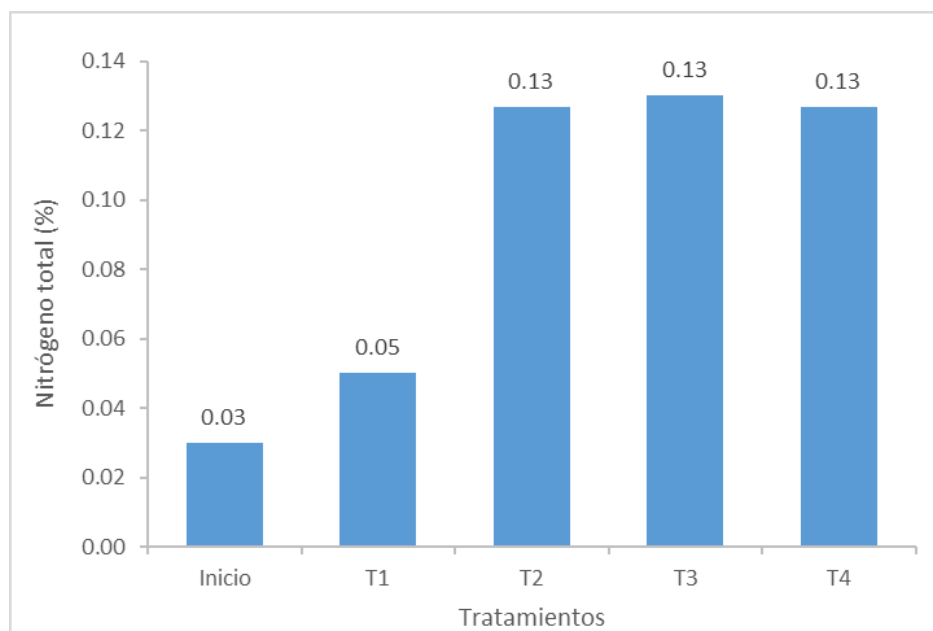


Figura 9

Concentración inicial y final de nitrógeno total

**Figura 10**

Concentración inicial y final de fósforo

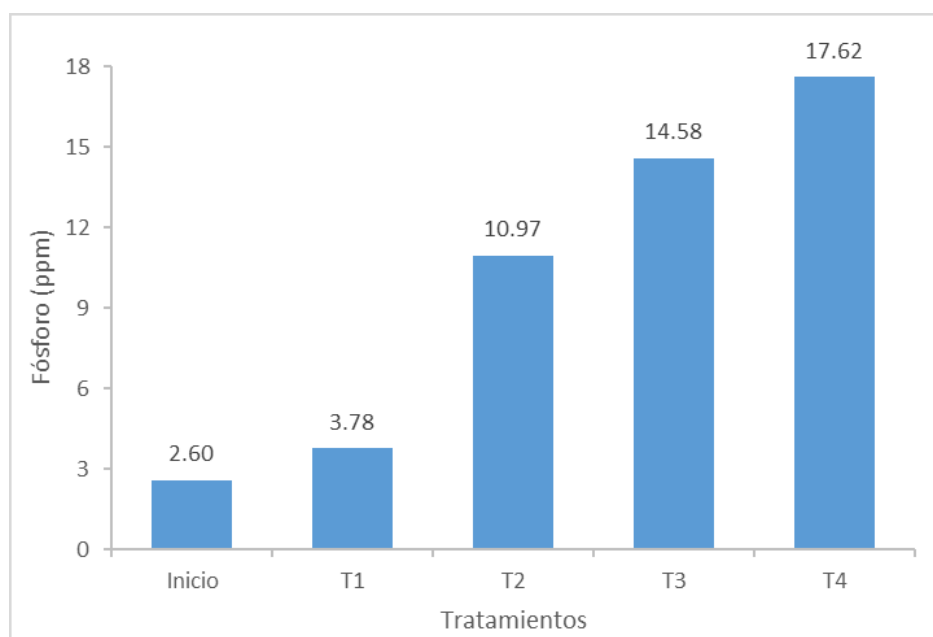
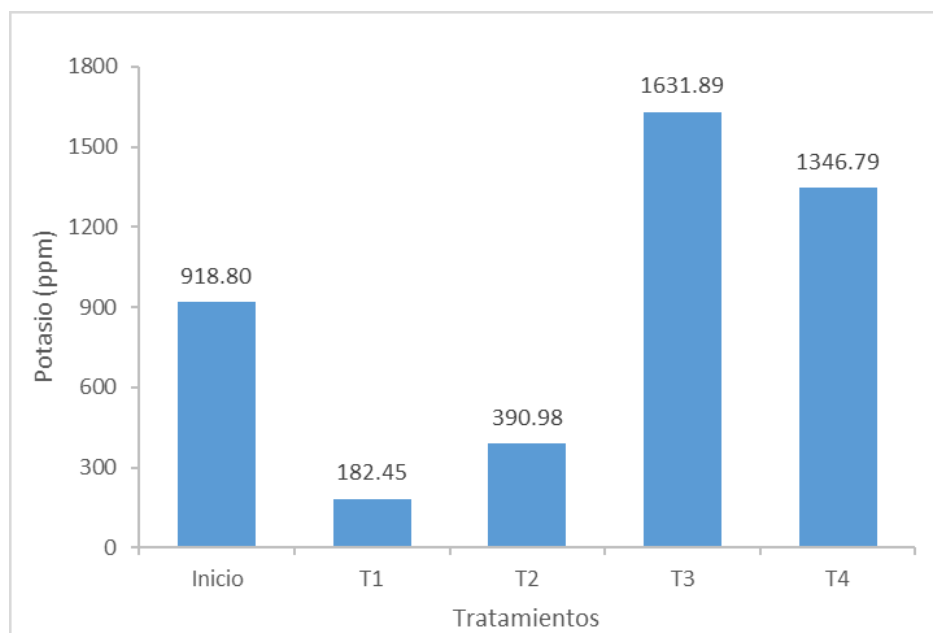


Figura 11

Concentración inicial y final de potasio

**Figura 12**

Concentración inicial y final de densidad aparente

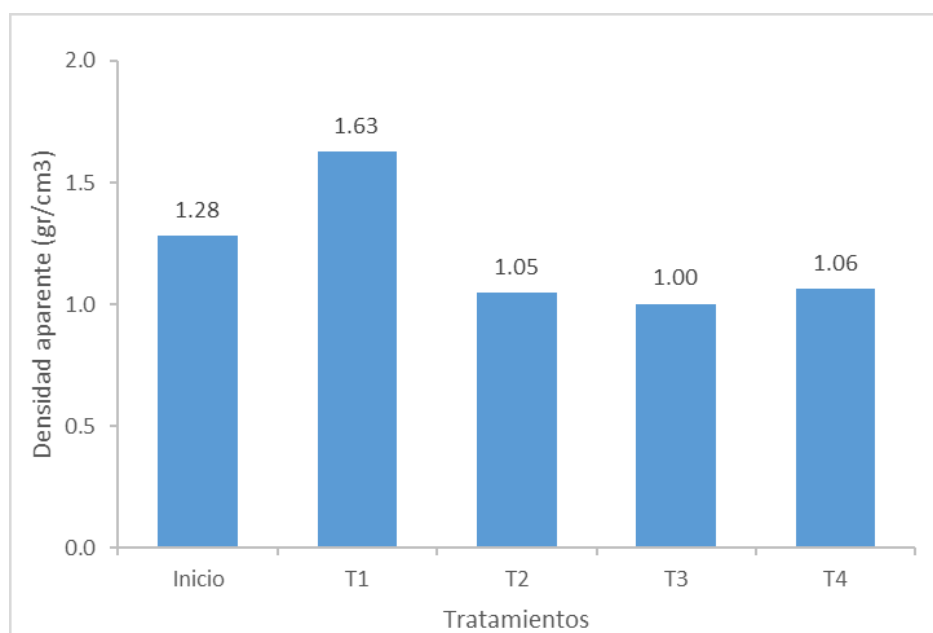
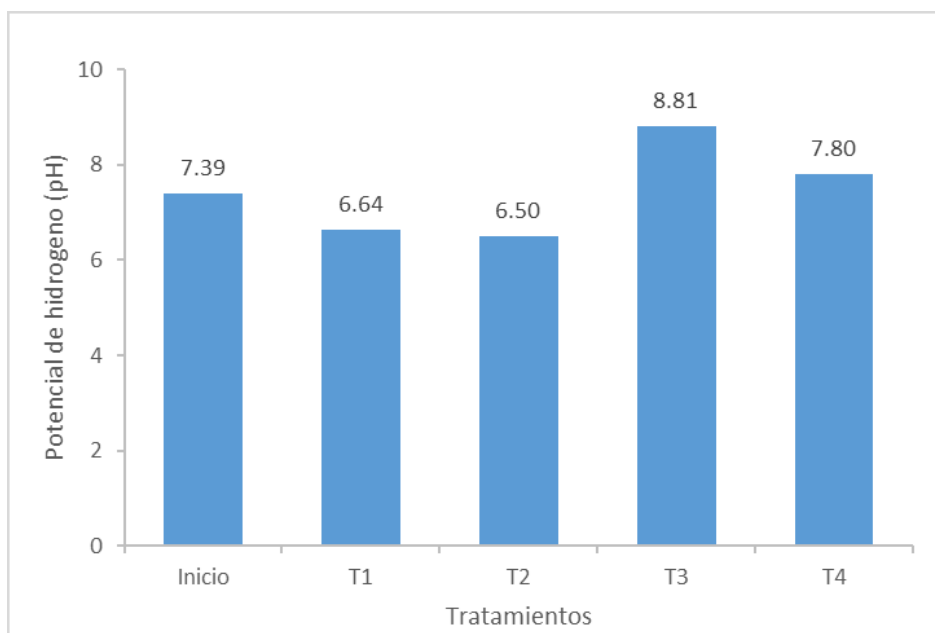
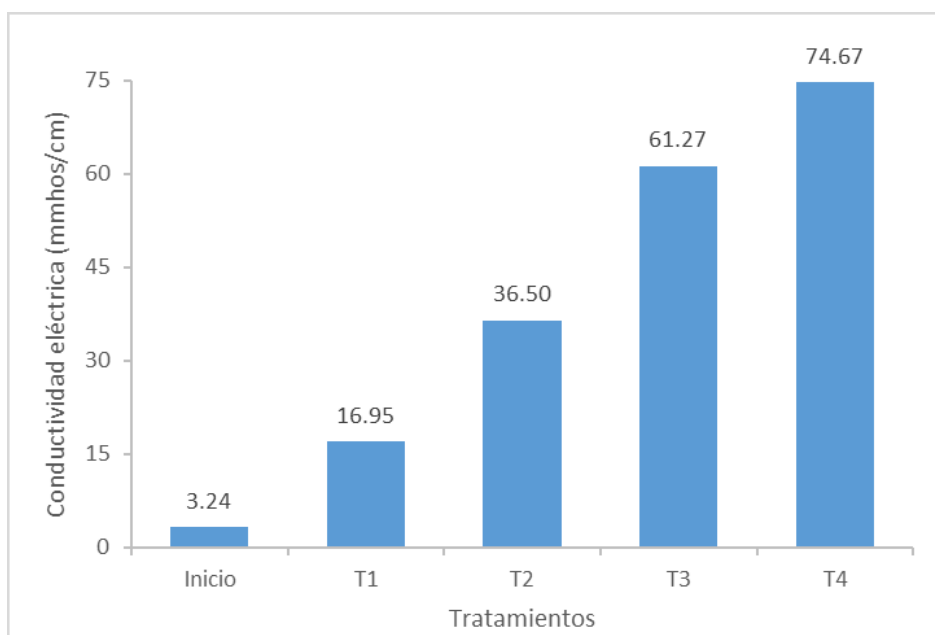


Figura 13

Concentración inicial y final de potencial de hidrógeno

**Figura 14**

Concentración inicial y final de conductividad eléctrica



Anexos

Anexo 1. Evidencia de la Sumisión del Artículo a Revista Científica

----- Forwarded message -----

De: **Carlos Alberto Vieira de Azevedo** <noreply.ojs@scielo.org>

Date: vie, 15 ago. 2025, 6:35 p. m.

Subject: Agradecimento pela submissão

To: Franklyn Zapana Yucra <franklyn04.elard@gmail.com>

Franklyn Zapana Yucra:

Obrigado por submeter o manuscrito, "Biorremediação de solos andinos contaminados com diesel, utilizando compostagem em biopilhas e adição de aditivos orgânicos" ao periódico Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental. Após a submissão do artigo, não são permitidas alterações posteriores do nome dos autores, seja na sequência, substituição ou adição.

Com o sistema de gerenciamento de periódicos on-line que estamos usando, você poderá acompanhar seu progresso através do processo editorial efetuando login no site do periódico:

URL da Submissão: <https://submission.scielo.br/index.php/rbeaa/authorDashboard/submission/299630>

Usuário: franklyn_zapana1

Se você tiver alguma dúvida, entre em contato conosco (revistagiambi@gmail.com). Agradecemos por considerar este periódico para publicar o seu trabalho.

Anexo 2. Resolución Para la Sustentación



“AÑO DE LA RECUPERACIÓN Y CONSOLIDACIÓN DE LA ECONOMÍA PERUANA”

RESOLUCIÓN N° 0562-2025/UPeU-FIA-CF-T

Lima, Naña, 16 de setiembre de 2025

VISTO:

El expediente del (de la) bachiller **Henry Cotacallapa Florez** identificado(a) con código universitario N° **201410584**, de la Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental de la Facultad de Ingeniería y Arquitectura de la Universidad Peruana Unión;

CONSIDERANDO:

Que la Universidad Peruana Unión tiene autonomía académica, administrativa y normativa, dentro del ámbito establecido por la Ley Universitaria N° 30220 y el Estatuto de la Universidad;

Que la Facultad de Ingeniería y Arquitectura de la Universidad Peruana Unión, mediante sus reglamentos académicos y administrativos, ha establecido las formas y procedimientos para la sustentación de la tesis en formato artículo;

Que el Comité Dictaminador ha emitido su dictamen aprobando el informe de tesis titulado "Biorremediación de suelos altoandinos contaminados con diésel, empleando compostaje en biopilas y adicionando enmiendas orgánicas", presentado por el (la) bachiller **Henry Cotacallapa Florez**, reuniendo de esta manera las condiciones previas para la declaratoria de expedito para la programación de la sustentación;

Estando a lo acordado en la sesión del Consejo de la Facultad de Ingeniería y Arquitectura de la Universidad Peruana Unión, celebrada el 16 de setiembre de 2025, y en aplicación del Estatuto y el Reglamento General de investigación de la Universidad;

SE RESUELVE:

1. Declarar expedito al (a la) bachiller **Henry Cotacallapa Florez**, para que sustente la tesis en formato artículo titulada "Biorremediación de suelos altoandinos contaminados con diésel, empleando compostaje en biopilas y adicionando enmiendas orgánicas", conducente a la obtención del título profesional de Ingeniero Ambiental, el 03 de octubre a las 11:00 horas, en la modalidad presencial, en el Salón de Actos Wellesley Muir.
2. Designar el Jurado de Sustentación, encargado de gestionar la sustentación respectiva, el mismo que queda constituido por los siguientes miembros:

Presidente: Ing. Enrique Mamani Cuña
 Secretario: MSc. Miguel Angel Salcedo Enriquez
 Asesor: MSc. Franklyn Elard Zapana Yucra
 Vocal 1: Mtro. Juan Eduardo Vigo Rivera
 Vocal 2: Ing. Verónica Haydeé Pari Mamani

Regístrese, comuníquese y archívese.



Dra. Erika Inés Acaña Salinas
DECANA

cc:
 -Bachiller
 -Jurado
 -Secretaría General
 -Archivo



Lic. Gina Marita Tito Tolentino
SECRETARIA ACADÉMICA