



FACULTAD DE CIENCIAS AMBIENTALES

CARRERA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL

**“ANÁLISIS DE LA CONCENTRACIÓN DE LOS
HIDROCARBUROS TOTALES DE PETRÓLEO (TPH) POST
APLICACIÓN DEL MÉTODO DE ATENUACIÓN NATURAL
CONTROLADA EN EL LOTE 8 (LORETO) EN EL AÑO 2015”**

Tesis para optar el título profesional de:

INGENIERO AMBIENTAL

Presentado por:

Douglas Reyes Alván (0000-0002-2725-7864)

Asesor:

Jesus Gerardo Lopez Sangama (0000-0003-0357-3931)

Lima – Perú

2023

ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS

Lima, 20 de noviembre del 2023.

Los integrantes del Jurado de tesis:

Presidente: Mg. Yaneth Charito Vasquez Olivera
Miembro: Mg. Catherine Mariela Coronado León
Miembro: Mg. Freddy Pillpa Aliaga

Se reúnen para evaluar la tesis titulada:

“ANÁLISIS DE LA CONCENTRACIÓN DE LOS HIDROCARBUROS TOTALES DE PETRÓLEO (TPH) POST APLICACIÓN DEL MÉTODO DE ATENUACIÓN NATURAL CONTROLADA EN EL LOTE 8 (LORETO) EN EL AÑO 2015”

Presentada por la/el estudiante/bachiller:

- **Douglas Reyes Alván**

Para optar el Título Profesional de Ingeniero Ambiental

Asesorado por: Dr. Jesús Gerardo López Sangama

Luego de haber evaluado el informe final de tesis y evaluado el desempeño del tesista de la carrera de Ingeniería Ambiental en la sustentación, concluyen de manera unánime () por mayoría simple (X) calificar a:

Tesista: Douglas Reyes Alván		Nota (en letras): 16 (Dieciséis)	
Aprobado ()	Aprobado - Muy buena (X)	Aprobado - Sobresaliente ()	Desaprobado ()

Los miembros del jurado firman en señal de conformidad.

Mg. Yaneth Charito Vasquez Olivera
Presidente

Mg. Catherine Mariela Coronado León
Miembro 1

Mg. Freddy Pillpa Aliaga
Miembro 2

Dr. Jesús Gerardo López Sangama
Asesor

ANEXO: FORMATO DE DECLARACIÓN DE ORIGINALIDAD DE CONTENIDO DE INFORME FINAL DE TESIS O TRABAJO DE INVESTIGACIÓN

UNIVERSIDAD CIENTÍFICA DEL SUR

DECLARACIÓN DE ORIGINALIDAD DE CONTENIDO DE INFORME FINAL DE TESIS

Lima, 21 de mayo del 2024.

Doctor,
Carlos Zavalaga Reyes.

**Director General de Investigación, Desarrollo e Innovación.
Universidad Científica del Sur.**

Presente. –

De nuestra consideración,

Yo: **Douglas REYES ALVÁN**, egresado de la carrera de **Ingeniería Ambiental** de la Universidad Científica del Sur, en conjunto con el asesor **Dr. Jesús Gerardo LÓPEZ SANGAMA**, declaramos que este informe final de tesis titulado: **"ANÁLISIS DE LA CONCENTRACIÓN DE LOS HIDROCARBUROS TOTALES DE PETRÓLEO (TPH) POST APLICACIÓN DEL MÉTODO DE ATENUACIÓN NATURAL CONTROLADA EN EL LOTE 8 (LORETO) EN EL AÑO 2015"**, sustentado para obtener el título **Ingeniero Ambiental** es original.

Es decir, no contiene plagio parcial ni total, cuando se utilizó información de fuentes externas se reconoció la autoría mediante la adecuada citación y los resultados obtenidos son producto entero de mi investigación y no han sido falseados ni fabricados. Todo esto en cumplimiento del Código de ética en la investigación, Reglamento del Comité de Integridad Científica, Reglamento de Propiedad Intelectual, Normas y procedimientos de los trabajos de investigación para la obtención de títulos profesionales y grados académicos ¹, que afirmamos conocer en su totalidad.

Por ello, en caso de identificarse alguna situación de plagio, falsificación o fabricación de resultados, nos allanamos al proceso de investigación que establezca la Universidad y las posibles sanciones que pudieran surgir.

Firmamos en conformidad con lo declarado,



Douglas REYES ALVÁN
Tesista
DNI: 71216050



Jesús Gerardo LÓPEZ SANGAMA
Asesor de Tesis
DNI: 05248204

¹ Los documentos están en: <https://investigacion.cientifica.edu.pe/reglamentos/>

INFORME DE REVISIÓN DE ORIGINALIDAD

Título del documento evaluado. Análisis de la concentración de los hidrocarburos totales de petróleo (TPH) post aplicación del método de atenuación natural controlada en el Lote 8 (Loreto) en el año 2015

Autores. Douglas Reyes Alvan

Mecanismo de revisión de originalidad. Evaluación con Turnitin (ID 2380348845).

Resultado de la evaluación. 8%

Revisado por. Magaly Kelly Guerrero Huaracallo.

Comentarios sobre la revisión. Filtros usados: excluir fuentes de menos de 12 palabras, se excluyeron citas.



DEDICATORIA Y AGRADECIMIENTOS

Al Señor Todopoderoso por la guía espiritual en mi vida.

A mis padres y madrina por estar siempre presentes en mi
vida diaria.

A mis hermanas y sobrinas por recordarme la
responsabilidad de mis actos.

Finalmente, a mis queridos parientes por tenerme siempre
en cuenta pese a la distancia.

Al Dr. Ing. Jesús Gerardo López Sangama por la
orientación para desarrollar este trabajo de investigación.

A mis compañeros de curso por los aportes y apoyo moral
durante el desarrollo de la presente tesis.

A los catedráticos por la contribución en mi formación
académica a lo largo del periodo universitario.

ÍNDICE GENERAL

I.	RESUMEN	8
II.	ABSTRACT	9
III.	PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	10
IV.	MARCO TEÓRICO	11
V.	OBJETIVOS/HIPÓTESIS	18
VI.	METODOLOGÍA	21
VII.	RESULTADOS	29
VIII.	DISCUSIÓN	65
IX.	CONCLUSIONES	72
X.	RECOMENDACIONES	73
XI.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	75
XII.	ABREVIATURAS	90
XIII.	ANEXOS	92

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.	<i>Operacionalización de las variables a estudiar</i>	24
Tabla 2.	<i>Concentración de Nutrientes en la Estación de Bombas (Capirona)</i>	30
Tabla 3.	<i>TPH Inicial y Final en la Estación de Bombas (Capirona)</i>	30
Tabla 4.	<i>Prueba de normalidad en Capirona (Nutrientes)</i>	31
Tabla 5.	<i>Prueba de los rangos con signo de Wilcoxon en Capirona (Nutrientes)</i>	31
Tabla 6.	<i>Contrastación de la Hipótesis en Capirona (Nutrientes)</i>	32
Tabla 7.	<i>Concentración de Nutrientes en la Plataforma 74 (Valencia)</i>	33
Tabla 8.	<i>TPH Inicial y Final en la Planta 74 (Valencia)</i>	33

Tabla 9. <i>Prueba de normalidad en Valencia (Nutrientes)</i>	34
Tabla 10. <i>Prueba de los rangos con signo de Wilcoxon en Valencia (Nutrientes)</i>	34
Tabla 11. <i>Contrastación de la Hipótesis en Valencia (Nutrientes)</i>	35
Tabla 12. <i>Concentración de Nutrientes en la Plataforma 130 (Pavayacu)</i>	36
Tabla 13. <i>TPH Inicial y Final en la Planta 130 – Sitio 1 (Pavayacu)</i>	36
Tabla 14. <i>Prueba de normalidad en Pavayacu (Nutrientes)</i>	37
Tabla 15. <i>Prueba de los rangos con signo de Wilcoxon en Pavayacu (Nutrientes)</i>	37
Tabla 16. <i>Contrastación de la Hipótesis en Pavayacu (Nutrientes)</i>	38
Tabla 17. <i>Concentración de Nutrientes en la Batería 2 – Sitio 2 (Corrientes)</i>	39
Tabla 18. <i>TPH Inicial y Final en la Batería 2 – Sitio 2 (Corrientes)</i>	39
Tabla 19. <i>Prueba de normalidad en Corrientes (Nutrientes)</i>	40
Tabla 20. <i>Prueba de los rangos con signo de Wilcoxon en Corrientes (Nutrientes)</i>	40
Tabla 21. <i>Contrastación de la Hipótesis en Corrientes (Nutrientes)</i>	41
Tabla 22. <i>Variación del Aceite, Agua y Oxígeno en la Estación de Bombas (Capirona)</i>	42
Tabla 23. <i>Prueba de normalidad en Capirona (Saturación)</i>	43
Tabla 24. <i>Prueba de los rangos con signo de Wilcoxon en Capirona (Saturación)</i>	44
Tabla 25. <i>Contrastación de la Hipótesis en Capirona (Saturación)</i>	44
Tabla 26. <i>Variación del Aceite, Agua y Oxígeno en la Plataforma 74 (Valencia)</i>	45
Tabla 27. <i>Prueba de normalidad en Valencia (Saturación)</i>	46
Tabla 28. <i>Prueba de los rangos con signo de Wilcoxon en Valencia (Saturación)</i>	47
Tabla 29. <i>Contrastación de la Hipótesis en Valencia (Saturación)</i>	47
Tabla 30. <i>Variación del Aceite, Agua y Oxígeno en la Plataforma 130 (Pavayacu)</i>	48
Tabla 31. <i>Prueba de normalidad en Pavayacu (Saturación)</i>	49

Tabla 32. <i>Prueba de los rangos con signo de Wilcoxon en Pavayacu (Saturación)</i>	49
Tabla 33. <i>Contrastación de la Hipótesis en Pavayacu (Saturación)</i>	50
Tabla 34. <i>Variación del Aceite, Agua y Oxígeno en la Batería 2 – Sitio 2 (Corrientes)</i>	51
Tabla 35. <i>Prueba de normalidad en Corrientes (Saturación)</i>	52
Tabla 36. <i>Prueba de los rangos con signo de Wilcoxon en Corrientes (Saturación)</i>	52
Tabla 37. <i>Contrastación de la Hipótesis en Corrientes (Saturación)</i>	53
Tabla 38. <i>Aireación y Remoción del Suelo Contaminado en la Estación de Bombas</i>	54
Tabla 39. <i>Prueba de normalidad en Capirona (Volteos)</i>	55
Tabla 40. <i>Prueba de Friedman en Capirona (Volteos)</i>	55
Tabla 41. <i>Contrastación de la Hipótesis en Capirona (Volteos)</i>	56
Tabla 42. <i>Aireación y Remoción del Suelo Contaminado en la Plataforma 74</i>	56
Tabla 43. <i>Prueba de normalidad en Valencia (Volteos)</i>	57
Tabla 44. <i>Prueba de Friedman en Valencia (Volteos)</i>	58
Tabla 45. <i>Contrastación de la Hipótesis en Valencia (Volteos)</i>	58
Tabla 46. <i>Prueba de comparación múltiple en Valencia (Volteos)</i>	59
Tabla 47. <i>Aireación y Remoción del Suelo Contaminado en la Plataforma 130</i>	59
Tabla 48. <i>Prueba de normalidad en Pavayacu (Volteos)</i>	60
Tabla 49. <i>Prueba de Friedman en Pavayacu (Volteos)</i>	61
Tabla 50. <i>Contrastación de la Hipótesis en Pavayacu (Volteos)</i>	61
Tabla 51. <i>Aireación y Remoción del Suelo Contaminado en la Batería 2 – Sitio 2</i>	62
Tabla 52. <i>Prueba de normalidad en Corrientes (Volteos)</i>	63
Tabla 53. <i>Prueba de Friedman en Corrientes (Volteos)</i>	63
Tabla 54. <i>Contrastación de la Hipótesis en Corrientes (Volteos)</i>	64

Tabla 55. *Prueba de comparación múltiple en Corrientes (Volteos)*..... 64

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. *Estructura de la organización de las variables* 21

Figura 2. *Mapa de ubicación geográfica de las 4 zonas de estudio* 26

Figura 3. *Flujograma de desarrollo del trabajo de investigación* 28

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1. *Resolución de aprobación del proyecto de tesis* 92

Anexo 2. *Declaración jurada* 93

Anexo 3. *Constancia de uso de tesis doctoral* 94

Anexo 4. *Mapa de ubicación geográfica: zona de Capiroña (estación de bombas)*..... 96

Anexo 5. *Mapa de ubicación geográfica: zona de Valencia (planta 74)* 96

Anexo 6. *Mapa de ubicación geográfica: zona de Pavayacu (planta 130)*..... 97

Anexo 7. *Mapa de ubicación geográfica: zona de Corrientes (batería 2)* 97

I. RESUMEN

La contaminación generada por el derrame accidental o negligente de los hidrocarburos durante la extracción, procesamiento e infraestructura de transporte del petróleo es una problemática cada vez más frecuente debido al impacto negativo en la calidad del suelo. Este estudio experimental se orienta a contribuir en las indagaciones que se vienen realizando en los trabajos de rehabilitación de suelos en distintas condiciones experimentales a fin de remediar la contaminación por hidrocarburos. Por consiguiente, la presente investigación tiene como objetivo evaluar la efectividad del método de atenuación natural controlada, que consiste en aprovechar la capacidad degradadora de los microorganismos en suelos contaminados con hidrocarburos mediante la técnica de bioestimulación. Con ese fin, se analizó la variación de la concentración de Hidrocarburos Totales de Petróleo (TPH) en cuatro zonas amazónicas (Capirona, Valencia, Pavayacu y Corrientes) del Lote 8 (Loreto) en el año 2015. Para ello, se determinó la variación del TPH en función a la adición de nutrientes (N, P) en un ámbito monitoreado y se examinaron los efectos de la saturación (aireación) y el volteo (remoción) del suelo en las zonas de estudio. Los resultados han demostrado que el TPH inicial es diferente al TPH final a medida que se añadían los nutrientes al suelo y se aplicaban las técnicas revolventes y aerobias, evidenciándose una significativa disminución del TPH al término del proceso de bioremediación. En conclusión, el método de atenuación natural controlada reduce significativamente las concentraciones de hidrocarburos presentes en suelos contaminados bajo un ambiente controlado.

PALABRAS CLAVE: Hidrocarburos totales de petróleo, atenuación natural controlada, microorganismos del suelo, adición de nutrientes.

II. ABSTRACT

Contamination caused by accidental or negligent oil spills during oil extraction, processing and transport infrastructure is an increasingly frequent problem due to the negative impact on soil quality. This experimental study aims to contribute to the research being carried out in soil remediation work under different experimental conditions in order to remediate oil contamination. Therefore, the present research aims to evaluate the effectiveness of the controlled natural attenuation method, which consists of taking advantage of the degrading capacity of microorganisms in hydrocarbon-contaminated soils by means of the biostimulation technique. To this end, the variation of the concentration of Total Petroleum Hydrocarbons (TPH) in four Amazonian areas (Capirona, Valencia, Pavayacu and Corrientes) of Lot 8 (Loreto) in 2015 was analysed. For this purpose, the variation of TPH as a function of nutrient addition (N, P) was determined in a monitored field and the effects of soil saturation (aeration) and turning (turning) were examined in the study areas. The results have shown that the initial TPH is different from the final TPH as nutrients were added to the soil and as the stirring and aerobic techniques were applied, with a significant decrease in TPH at the end of the bioremediation process. In conclusion, the controlled natural attenuation method significantly reduces the concentrations of hydrocarbons present in contaminated soils under a controlled environment.

KEY WORDS: Total Petroleum Hydrocarbons, Controlled Natural Attenuation, nutrient addition, soil saturation, soil turning.

III. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El debate sobre cómo abordar el impacto ambiental de la contaminación por hidrocarburos es permanente, ya que el mundo natural en constante cambio y la creciente actividad humana crean un entorno irreversible de entropía ambiental que exige medidas preventivas y rehabilitadoras. Yang et al. (2021) destacan la producción, el almacenamiento y la distribución del refinado de petróleo crudo como principales fuentes de contaminación por petróleo, junto con los vertidos de buques y las fugas de equipos. Así mismo, el vertimiento de embarcaciones y fugas de equipos son grandes nodos de contaminación (Schmidt, 2006, como se citó en Sandoval Del Aguila, 2008). Según estudios realizados por el Instituto de Investigaciones de la Amazonia (IIAP) (2011), más del 90% del agua de los ríos amazónicos está contaminada debido al aumento de los derrames de petróleo provocados por fallas operativas de la industria extractiva permanente de la región (como accidentes de funcionamiento de plantas u oleoductos, residuos de la explotación y exploración primaria, deterioro de materiales, fugas de hidrocarburos resultantes de fallas, robos, sabotajes, etc.). Estos vertidos también incluyen residuos humanos y residuos industriales conocidos, que suponen un riesgo para el medio ambiente y la salud humana. Lifshits et al. (2021) destacan la necesidad de soluciones eficaces para prevenir la degradación de la calidad del suelo y su impacto en las aguas subterráneas y superficiales debido a una mezcla de hidrocarburos aromáticos y alifáticos. Dado que el escenario ambiental entrópico se considera el elemento causal, la biorremediación se propone como la tecnología reactiva necesaria para restaurar el deterioro ambiental producido. Este estudio científico es significativo porque pretende apoyar la gestión sostenible de los recursos naturales de la nación, estableciendo un equilibrio entre la protección y la explotación del medio ambiente y promoviendo la preservación sin trabas de los derechos fundamentales.

IV. MARCO TEÓRICO

4.1 Fundamentación teórica

4.1.1 Atenuación natural

Dentro del grupo de métodos de remediación *in situ* asequibles, la atenuación natural sigue considerándose un método clásico de descontaminación. Su característica principal es la aplicación de procesos fisicoquímicos naturales de biodegradación e interacción del suelo con el contaminante (Zanini et al., 2021). Según Phang-Lyn & Llerena (2023), estos procedimientos se denominan procesos naturales de biotransformación. Según Atuchin et al. (2023), los procesos naturales de biotransformación incluyen la dilución, la dispersión, la volatilización, la adsorción y la biodegradación; estos procesos también incluyen reacciones químicas que tienen lugar en el suelo o el agua y ayudan a reducir la contaminación de alguna manera.

Este método se utiliza cuando los hidrocarburos halogenados o no halogenados han contaminado el suelo y las aguas subterráneas (Newell et al., 2021). Song et al. (2023) han informado de que ciertas bacterias del suelo tienen la capacidad de aumentar el proceso microbiológico, que a su vez puede descomponer el aceite mineral y devolverlo al ciclo natural en una forma no tóxica. Si se le da el tiempo suficiente, la capacidad curativa de la naturaleza puede restaurar incluso los daños medioambientales más graves causados por los hidrocarburos del petróleo (Khan et al., 2023). Antes de que el crudo se descomponga por completo, pueden pasar varias décadas, a menos que el hombre promueva el proceso apoyando a los microorganismos en esta tarea.

4.1.2 Parámetros en la remediación

En un proceso de biorremediación con hidrocarburos deben considerarse los siguientes aspectos:

a) Microorganismos:

Se debe orientar a la multiplicación, fortaleciendo las bacterias nativas del lugar aumentando su capacidad para degradar hidrocarburos (Atuchin et al., 2023). Las bacterias en la tierra nativa y la tierra contaminada se encuentran en concentraciones normales (González Henao & Ghneim-Herrera, 2021).

b) Oxígeno:

Se debe mantener una adecuada provisión de oxígeno a los microorganismos, si son microorganismo aeróbicos (Zappi et al., 2000).

c) Nutrientes:

Los nutrientes, incluidos el potasio, el fósforo y el nitrógeno, deben suministrarse a los microorganismos del suelo (Lee et al., 2022). En general, la adición de nutrientes debe coordinarse con el grado de contaminación del suelo (Gutiérrez et al., 2020). Las proporciones pueden ser las siguientes: 100C: 10N: 1K, o 50% de nitrógeno, 5% de fósforo y 1% de potasio. Según Ambust et al. (2021) los nutrientes pueden disolverse en agua o aplicarse en solución.

d) Humedad:

Según Ouédraogo et al. (2020), el rango ideal de contenido de humedad se sitúa entre el 25 y el 75% de la capacidad de campo, que es la cantidad máxima de agua que el suelo puede almacenar hasta la saturación y varía en función del tipo de suelo. Cuando la saturación de agua del suelo se sitúa entre el 30 y el 90%, las tasas de biodegradación son óptimas (X. Hu et al., 2023). Se aconseja un rango de humedad del 20% al 50% debido a la importancia de las bacterias para su supervivencia (H. Wang et al., 2020).

e) Potencial de Hidrógeno (pH):

Según Neina, (2019), el rango ideal para la biodegradación se sitúa entre 6 y 8. Sin embargo, el pH debe ser neutro, oscilando entre 7,4 y 7,8, para mantener una mayor degradabilidad durante largos periodos de tiempo, minimizando al máximo las oscilaciones (Zhang et al., 2023). En consecuencia, lo mejor es mantener un pH de 6 a 8, que es casi neutro.

f) Temperatura:

La temperatura ambiental de la zona de tratamiento debe mantenerse entre 20° C y 45° C, para la supervivencia de las bacterias (Omokhagbor Adams et al., 2020).

g) Aireación:

La aireación del suelo favorece los procesos de biodegradación del hidrocarburo (Baiyin et al., 2021), para facilitar el proceso y conseguir un intercambio de oxígeno con el suelo, se aconseja mover la tierra todos los días. (Qian et al., 2022).

h) Potencial redox:

Un potencial redox positivo sugiere que el oxígeno está presente durante la biodegradación (N. Li et al., 2022), mientras que un potencial redox negativo sugiere que se está produciendo una degradación anaeróbica debido a la existencia de un aceptor final de electrones distinto del oxígeno. Por ende, cuando el oxígeno sirve como último aceptor de electrones, los microorganismos pueden obtener más energía.

4.1.3 Fundamentos bioquímicos

La base biológica de la biorremediación es que “se produzca una secuencia de reacciones de oxidación-reducción en la cadena respiratoria o de transporte de electrones de las células para obtener energía” (Ramakrishnan et al., 2022). Según un estudio, “la cadena

comienza con un sustrato orgánico (moléculas de hidrocarburos), que es externo a la célula y sirve como donante de electrones, y que finalmente es descompuesto y consumido por la actividad metabólica de la célula” (Y. Wang et al., 2022). Mientras que, para Tessema & Yemata, (2021), “los microorganismos emplean con mayor frecuencia oxígeno, nitratos, hierro(III), sulfatos y dióxido de carbono como aceptores”. En Vasenev et al. (2021), se resalta que “la respiración microbiana se produce en condiciones aerobias cuando se utiliza oxígeno como aceptor de electrones y las actividades de biodegradación serán aerobias cuando se utilicen sulfatos como aceptor de electrones”. Por otro lado, según Pigeonneau et al. (2021), “el dióxido de carbono se crea en condiciones reductoras o anaerobias cuando se utilizan sulfatos, y los procesos de biodegradación serán anaerobios”.

4.1.4 Biorremediación de suelos

De acuerdo con la información de la tesis doctoral, la biorremediación es realizada por los microorganismos nativos presentes en el suelo y el agua, cuyo metabolismo es favorecido principalmente por el aumento de la disponibilidad de O₂ y del sustrato orgánico (contaminante).

a) Biorremediación con bioaumentación:

En Mawang et al. (2021) señaló que “se crea un sistema aeróbico en un lecho acondicionado utilizando suelo contaminado que ha sido manipulado periódicamente mediante técnicas de labranza y rellenado con agua y nutrientes (si es necesario)”. Para acelerar el ritmo natural de descomposición de un contaminante, Aguilar-Romero et al., (2022) acota que “se plantan (siembra) determinados microorganismos en el suelo una vez que ha sido así preparado. Estas bacterias pueden ser autóctonas o importadas (y tener las propiedades metabólicas adecuadas)”.

b) Biorremediación con bioestimulación:

Omokhagbor Adams et al. (2020) señala, “consiste básicamente en manejar las condiciones ambientales para controlar los factores limitantes del crecimiento microbiano y el metabolismo del contaminante en cuestión”. Además, en Lv et al. (2023) acota, “en la biorremediación intervienen microorganismos nativos del suelo y el agua, estimulados por una mayor disponibilidad de O₂ y sustrato orgánico, que se consigue mediante el laboreo mecánico del suelo superficial”. Por lo mencionado, es esencial tener una sólida comprensión de la ecología microbiana (control de variables ambientales).

c) Otros factores influyentes:

Para tratar los suelos impregnados de hidrocarburos, es necesario retirar la tierra y plantar en su lugar tierra nueva para favorecer la oxigenación de los microorganismos expuestos a los hidrocarburos (Fragkou et al., 2021). El mecanismo de reacciones de transformación y oxidación se desarrolla durante la multiplicación celular que requiere materia orgánica con un alto contenido de carbono e hidrógeno como sustrato alimentario (Podgorski et al., 2021). La presencia de enzimas a nivel microbiológico hace viables los procesos químicos de biodegradación. (Apul et al., 2022).

Es esencial ser consciente de que tanto los cambios de ionización en la estructura molecular de una enzima como las situaciones que afectan a la proteína pueden desactivar la enzima (Guo & Wen, 2021). Las dos condiciones ambientales más comunes que pueden afectar la actividad enzimática y, por lo tanto, la actividad microbiológica, son la temperatura y el pH (CHEN et al. 1999). Es importante aclarar primero que, para Asemoloye & Marchisio (2022), “el petróleo es una mezcla compleja de hidrocarburos alifáticos, alicíclicos y aromáticos antes de detallar cómo se destruyen los hidrocarburos en general”.

En el estudio de Ławniczak et al., (2020), se informó de que “también contiene una proporción menor de compuestos que no son hidrocarburos, como ácidos nafténicos, fenoles, tioles, compuestos heterocíclicos de nitrógeno, compuestos de azufre y metaloporfirinas”. En síntesis, la idea fundamental del proceso de biorremediación es la descomposición de la estructura del hidrocarburo en elementos no tóxicos como dióxido de carbono, agua y biomasa. Esto se consigue cultivando bacterias endémicas capaces de adaptarse al suelo local y a los factores medioambientales del lugar de tratamiento.

4.1.5 Aplicación de nutrientes

Podemos clasificar los nutrientes en cuatro grupos (Morris & Mohiuddin, 2023): fuentes de carbono, fósforo, nitrógeno y oligoelementos o elementos minoritarios (micronutrientes), que son cruciales para el crecimiento de los microorganismos y, por tanto, para la biodegradación. En Brown et al. (2022), “el contaminante sirve de fuente de carbono y suministra el carbono necesario para crear moléculas celulares, productos metabólicos (CO₂, agua, enzimas) y microorganismos (debido a su propia reproducción)”. Para Lewis & Stone (2023), “el elemento necesario para la creación de aminoácidos y enzimas lo proporciona la fuente de nitrógeno”.

Según Sriram et al. (2023), “el suelo necesita fertilizantes como la urea o el nitrato de amonio para satisfacer las necesidades energéticas de las actividades de reproducción y descomposición celular, como el suministro de fósforo se agota rápidamente, es necesario complementarlo con fosfato diamónico”. Por otra parte, para El Rasafi et al. (2023), “los oligoelementos proceden de diversas fuentes, como el hierro, el cobre, el zinc, el azufre, el cobalto, el manganeso, el magnesio, el calcio y otras sustancias; dependiendo de la técnica utilizada y del tipo de microorganismo implicado”.

En F. Li et al. (2022), añadió, “su concentración global es muy baja (menos de 1 ppm), entonces, dado que el suelo ya contiene una gran cantidad de estos componentes, no suelen incluirse en los procedimientos de campo”. Además, Ouriache et al. (2020) acotó, “en la dosificación de nitrógeno y fósforo se realiza en función de la concentración del contaminante de acuerdo con una relación que vincula C: N: P 100:10:1, generalmente”.

4.1.6 Actividad de los microorganismos

A continuación, se contempla de manera breve y general los sistemas que utilizan los microorganismos para degradar los diferentes tipos de hidrocarburos:

a) Degradación aeróbica:

Para D. Hu et al. (2022), “los microorganismos que utilizan hidrocarburos como sustrato deben poseer enzimas dependientes del oxígeno conocidas como monooxigenasas”. En teoría (van Leeuwen et al., 2022), la mayoría de los microbios que pueden prosperar en este tipo de entorno pueden descomponer hidrocarburos de cadena larga sin experimentar demasiados problemas. Sin embargo, romper el anillo aromático es el principal reto en la degradación de hidrocarburos aromáticos (Uddin & Wright, 2022). Como resultado, en Patel et al. (2020) resalta, “cuando los microorganismos utilizan estos compuestos aromáticos como fuente de carbono, utilizan vías altas o periféricas, que son vías metabólicas en lugar de una enzima monooxigenasa particular para cada molécula distinta”. Éstas implican la alteración de los distintos anillos aromáticos que absorben el protocatecol y el catecol (Y. J. Li et al., 2020). En otras palabras, estas dos moléculas son el resultado de las modificaciones realizadas en la amplia gama de sustancias químicas aromáticas presentes. En Xiao et al. (2021), “ciertas enzimas son capaces de escindir los anillos de estas dos moléculas, que son el punto en el que convergen todos los compuestos”.

b) Degradación anaeróbica:

En Castro et al. (2022) acota que “la comunidad científica creía que los hidrocarburos no podían descomponerse anaeróbicamente, ya que el oxígeno está ausente de todos los lugares donde se generan hidrocarburos naturales”. Pero a fines de la década de 1980, según Wartell et al, (2021), “se descubrieron algunos microorganismos que tenían cierta actividad degradante bajo condiciones completamente estrictas”. No obstante, para Bilal & Chen, (2021), “es importante recordar que la mayoría de las zonas contaminadas en las que se van a utilizar estos enfoques de biorremediación presentan condiciones anóxicas o agotan rápidamente el oxígeno”.

Hasta la fecha, el enfoque adoptado en estas circunstancias ha consistido en utilizar una bomba para introducir aire en el entorno con el fin de promover la descomposición aeróbica (Cruz Viggi et al., 2023). Evidentemente, esta técnica encarece el proceso, aparte del hecho de que, en ocasiones, la difusión de oxígeno no puede ser posible (B. Wang et al., 2021).

Con la excepción de la beta-oxidación, resalta Kharey et al. (2020), el cual también tiene lugar en condiciones anóxicas, “las pocas investigaciones realizadas hasta la fecha han demostrado que los procesos de degradación empleados en estas circunstancias son completamente diferentes de los utilizados en presencia de oxígeno”. Por otra parte, en el estudio de Bremer (2022) señaló lo siguiente: “se producen procesos de reducción o condensación con otras moléculas para activar primero los compuestos”.

4.1.7 Método de atenuación natural controlada

Para Sharma (2021), se pueden agrupar las tecnologías existentes en dos modalidades: “la biorremediación intrínseca o atenuación natural monitorizada y la biorremediación dirigida”.

Por un lado, Müller et al. (2021) resalta, “el uso de procesos biológicos, químicos y físicos para reducir los contaminantes naturales sin interferencias externas”. Telesiński & Kiepas-Kokot (2021) sugieren que “la biorremediación selectiva implica la estimulación por el hombre de las comunidades microbianas nativas”. En la presente investigación se llevó a cabo un seguimiento del proceso que permita constatar que se está produciendo una disminución de la contaminación. Yadav et al. (2021) acota lo siguientes condiciones para que los contaminantes se encuentren mayoritariamente biodisponibles: “suministro de oxígeno, mantenimiento de la humedad óptima, temperatura óptima, densidad del suelo aceptable y garantizar la presencia de las cantidades necesarias de N (nitrógeno) y P (fósforo)”. Ji et al. (2023) resalta, “el enfoque de la atenuación natural controlada es el reducir los niveles de concentración de contaminantes (% TPH) al utilizar la bioestimulación para aumentar la capacidad degradadora de los hidrocarburos en los microorganismos que habitan en el suelo”. En el estudio de Tumolo et al. (2022), la ANC involucra lo siguiente: “se añaden nitrato amónico y fosfato diamónico (nutrientes básicos que facilitan el metabolismo microbiano), se utilizan las respuestas biológicas resultantes de la oxigenación y se emplean prácticas mecánicas (mezcla con suelo nativo y aireación del suelo)”.

V. OBJETIVOS/HIPÓTESIS

5.1. Objetivo general

Analizar la variación de la concentración de Hidrocarburos Totales de Petróleo (TPH) en la base de datos cuando se utilizó el método de atenuación natural controlada, en las zonas de estudio de Capirona, Valencia, Pavayacu y Corrientes en el Lote 8 (Loreto) en el año 2015.

5.2. Objetivos específicos

- a. Comparar la variación de la concentración de Hidrocarburos Totales de Petróleo (TPH) en la base de datos luego de utilizar nutrientes (N, P), en las zonas de estudio de Capirona, Valencia, Pavayacu y Corrientes en el Lote 8 (Loreto) en el año 2015.
- b. Establecer una comparación de la variación de la concentración de Hidrocarburos Totales de Petróleo (TPH) en la base de datos luego de utilizar técnicas de saturación del suelo, en las zonas de estudio de Capirona, Valencia, Pavayacu y Corrientes en el Lote 8 (Loreto) en el año 2015.
- c. Interpretar la variación de la concentración de Hidrocarburos Totales de Petróleo (TPH) en la base de datos luego de emplear volteos del suelo, en las zonas de estudio de Capirona, Valencia, Pavayacu y Corrientes en el Lote 8 (Loreto) en el año 2015.

5.3. Hipótesis general

La utilización del método de atenuación natural controlada permite reducir la variación del porcentaje de Hidrocarburos Totales de Petróleo (TPH) según la base de datos en los sitios contaminados del Lote 8 (Loreto).

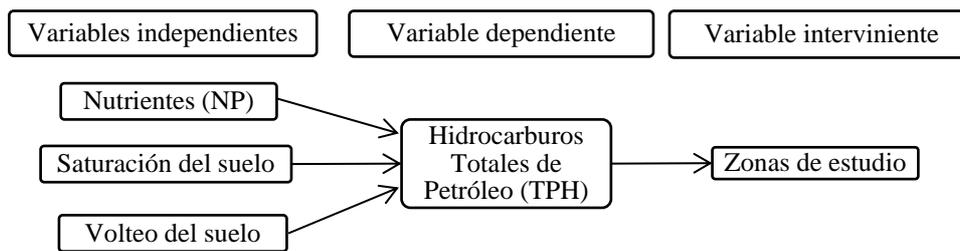
5.2. Hipótesis específicas

- a. La adición de nutrientes del método de atenuación natural controlada permite reducir el porcentaje de Hidrocarburos Totales de Petróleo (TPH) según la base de datos en los sitios contaminados del Lote 8 (Loreto) en el año 2015.
- b. Las técnicas de saturación del suelo del método de atenuación natural controlada permiten reducir el porcentaje de Hidrocarburos Totales de Petróleo (TPH) según la base de datos en los sitios contaminados del Lote 8 (Loreto) en el año 2015.

- c. El empleo de volteos en el suelo del método de atenuación natural controlada permite reducir el porcentaje de Hidrocarburos Totales de Petróleo (TPH) según la base de datos en los sitios contaminados del Lote 8 (Loreto) en el año 2015.

En la **Figura 1** se muestra la estructura propuesta en el presente trabajo de investigación:

Figura 1. Estructura de la organización de las variables



Nota: Adaptado según la base de datos de la tesis doctoral.

VI. METODOLOGÍA

El proceso metodológico de la presente investigación consistió en analizar la base de datos (data) producto de la tesis doctoral del Ing. Jesús Gerardo López Sangama que se llevó a cabo en el Lote 8 en la región de Loreto, Perú, en el año 2015 en una zona contaminada por hidrocarburos y que fue parcialmente evaluada, implementándose posteriormente para efectos de este estudio el método de atenuación controlada, programado mediante el Flujograma del desarrollo del trabajo de investigación que se menciona subsiguientemente (6.5), a fin de verificar la hipótesis causal planteada respecto de la presencia de resultados significativos en la remediación ambiental. El aspecto sustantivo del estudio se halla referido al análisis de la concentración de los Hidrocarburos Totales de Petróleo (TPH) contaminantes de suelos amazónicos con la post aplicación del método de atenuación natural controlada, examinando los datos y las causales de la forma cómo se habría producido el daño ambiental, discutir la viabilidad

de esta técnica de biorremediación implementada para este proceso y determinar si ha cumplido el propósito de recuperación del suelo contaminado, el grado de efectividad logrado y la relevancia científica del estudio.

6.1. Diseño de la investigación

El tipo de investigación es post experimental, cuantitativa y correlacional. Post experimental, por cuanto el objetivo del estudio consiste en someter una hipótesis causal a una prueba experimental que por razones diversas no se dispone de control, manipulando una variable independiente que será utilizada aleatoriamente por el operador para determinar los efectos que se producirán en la variable dependiente (Hernández Pina et al., 2001, como se citó en Bernal, 2010), evidenciándose que los sujetos o unidades de observación no han sido asignados con criterios azarosos. Cuantitativa, porque se evaluará la propiedad estadística y el valor de resultados de la base de datos (data) de la prueba experimental. Y Correlacional, porque en este caso se examinarán las relaciones entre variables y sus resultados, pero de ningún modo implica que una es la causa de la otra (Salkind, 1998, como se citó en Bernal, 2010); es decir, fluye un análisis de asociaciones, pero no de relaciones causales para verificar si un cambio de un factor incide directamente en el cambio de otro.

6.2. Variables de la investigación

6.2.1 Variables independientes

a) Nutrientes:

Para Shahane & Shivay (2021) los macronutrientes más importantes para el crecimiento bacteriano son el nitrógeno (N) y el fósforo (P). Para su medición se empleó una fórmula para conocer la cantidad en Kg de N y P que se requiere en cada proceso intermedio.

b) Saturación del suelo:

La aireación es un proceso que puede ser cuantificado por medio de mediciones directas como también por modelos numéricos (Tristá et al., 2020). En este caso se realizó la comparación para determinar la diferencia del volumen de aceite y el volumen de agua presentes en cada proceso de remoción según la base de datos.

c) Volteos del suelo:

El contenido de hidrocarburos disminuye cuanto más remociones se practican en el suelo a intervenir (World Scientific, 2023). Por consiguiente, para el análisis se consideró el número de volteos en periodos de separaciones de quince días para su medición.

6.2.2 Variable dependiente

a) Hidrocarburos Totales de Petróleo (TPH):

En general, se utilizan métodos analíticos que proporcionan un resultado dentro de un rango específico y varían en amplitud y extensión (Omokpariola et al., 2022). En consecuencia (Sayed et al., 2021), el método utilizado para determinar la cantidad de HTP en una muestra variará. En esta situación, se utilizó la cromatografía de gases para determinar la concentración de HTP en los suelos contaminados en forma de porcentaje.

6.2.3 Variable interviniente

a) Zonas de estudio:

En el presente trabajo de investigación se consideraron los suelos contaminados con concentraciones de hidrocarburos (TPH) de las áreas amazónicas de Capirona (Estación de Bombas), Valencia (Planta 74), Pavayacu (Planta 130) y Corrientes (Batería 2) del Lote 8 concesionado para la explotación de hidrocarburos, ubicado entre los distritos de

Trompeteros y Tigre (éste último en el caso de Pavayacu), de la provincia y región Loreto, Perú.

6.3 Análisis estadístico

Utilizando la base de datos (data), se realizó un análisis estadístico de la prueba experimental, consistente en determinar el efecto ocasionado por la variable independiente seleccionada (adición de nutrientes, saturación del suelo, volteos del suelo), respecto al impacto ambiental suscitado sobre la variable dependiente (concentración de TPH). Así mismo, esta relación ha sido conjugada entre las variables intervinientes (zonas de estudio de los sitios Capirona, Valencia, Pavayacu y Corrientes), para la determinación de la variación de la concentración de TPH, tal como se muestra en la **Tabla 1**.

Tabla 1. Operacionalización de las variables a estudiar

Variable	Clasificación por su naturaleza	Por investigación	Escala de medición	Criterio de Medición
Nutrientes	Cualitativa	Independiente	Nominal	a. TPH inicial b. TPH final
Saturación	Cualitativa	Independiente	Nominal	a. Volumen de aceite b. Volumen de agua
Volteos	Cualitativa	Independiente	Ordinal	a. Primera remoción b. Segunda remoción c. Tercera remoción
TPH	Cuantitativa	Dependiente	De razón	Medición directa (en %)
Zona	Cualitativa	Interviniente	Nominal	d. Capirona e. Valencia f. Pavayacu g. Corrientes

Nota: En la tabla 1 se exponen las variables descritas en el **apartado 6.2. Variables de investigación**. Adaptado según la de base de datos de la tesis doctoral del Dr. Jesús G. López Sangama.

A continuación, se presenta el procedimiento que se siguió para el análisis estadístico de los datos:

- a. Se estudió el efecto de la variable dependiente, por medio del uso del programa IBM SPSS Statistics Version 26.
- b. Los grupos de datos a analizar para nutrientes, saturación y volteos fueron TPH inicial y final, volumen de aceite inicial y final, y primera, segunda y tercera remoción.
- c. Se efectuó un análisis exploratorio de datos para aplicar la prueba de Normalidad y conocer si los datos se distribuyen normalmente o no.
- d. En base al resultado anterior, se determinó que el tipo de prueba estadística a ser aplicada sería una prueba no paramétrica.
- e. En ese sentido, se ejecutó la prueba de los Rangos con Signo de Wilcoxon y la prueba de Friedman, a fin de contrastar la hipótesis al tratarse de dos grupos relacionados y tres grupos relacionados respectivamente.
- f. A partir de los intervalos de confianza al 95% se determinó si existe o no una diferencia significativa en las concentraciones de TPH.

En el Capítulo VII Resultados, se efectuó correspondiente Análisis exploratorio de datos (AED) elaborándose para tal efecto las Tablas y Gráficas, que sirvieron para interpretar las frecuencias y porcentajes conseguidos de la base de datos (data) utilizando el programa IBM SPSS Statistics version 26.

6.4 Área de estudio

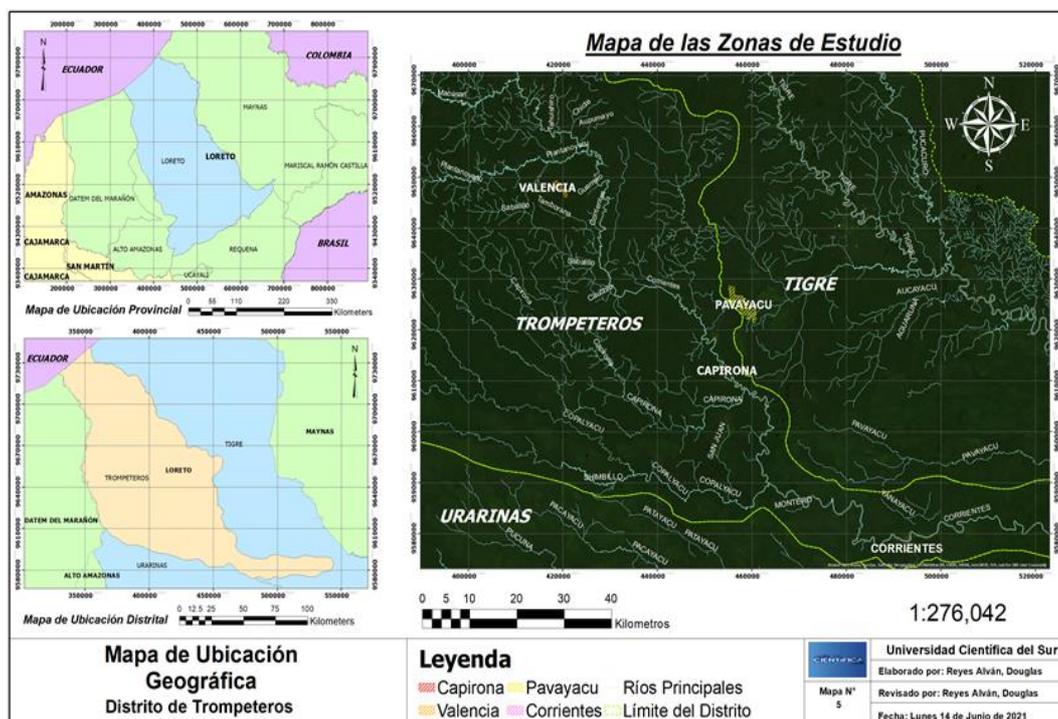
El área de estudio es el especificado en los datos a analizar y corresponden a zonas del Lote 8 de los distritos de Trompeteros y Tigre, según las siguientes coordenadas:

- Capirona (18S 454885.00 E, 9611948.00 S).

- Valencia (18S 421034.00 E, 9646839.00 S).
- Pavayacu (18S 459782.00, E 9623953.00 S).
- Corrientes (18S 492844.00, E 9577272.00 S).

Así mismo, en esta zona de investigación y en relación con la bibliografía de referencia, se determinó la existencia de antecedentes negativos anteriores y actualmente continúan presentándose estratos contaminantes con un alto nivel de concentración de TPH superior a los Estándares de Calidad Ambiental (ECA) permitidos para suelo (D.S N° 011-2017-MINAM - ECA para suelo y D.S. N° 037-2008-PCM-LMP de efluentes líquidos para el subsector hidrocarburos - MINAM).

Figura 2. Mapa de ubicación geográfica de las 4 zonas de estudio



Nota: Las zonas que fueron objeto de evaluación de datos se muestran en este mapa. Adaptado de Google Earth (2021).

En los **Anexos (2, 3, 4 y 5)** se muestran las zonas de estudios demarcados mediante el sistema de coordenadas UTM (Universal Transverse Mercator) 18S.

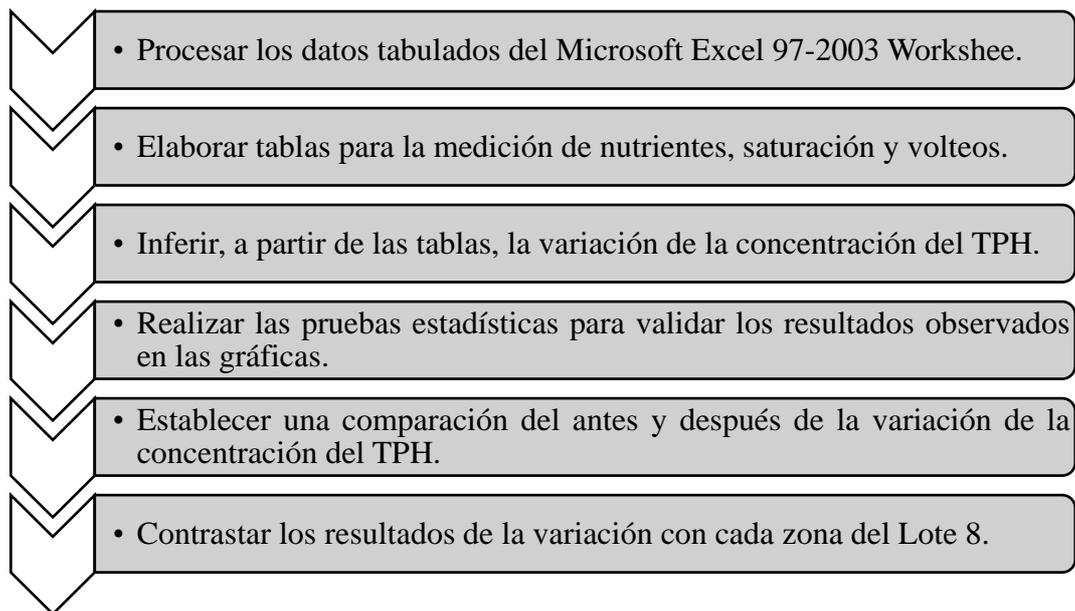
Respecto de los mapas se puede apreciar en cada zona la existencia de diversos cuerpos de agua (lagunas, ríos principales y secundarios), además de encontrarse rodeado por densas zonas de bosques amazónicos.

6.5 Desarrollo de la investigación

El presente estudio se sustenta en la base de datos (big data) inédita obtenida de las investigaciones realizadas por el Dr. Jesús G. López Sangama en la región Loreto el año 2015 al aplicar el método de atenuación natural controlada (ANC), disponiéndose de relevante información que ha sido recopilada para el para el análisis correspondiente. La base de datos fue sometida en su totalidad a la fase experimental y de laboratorio respectivo, como el método de la Retorta y la Cromatografía de Gases para comprobar la variación de las concentraciones de TPH (%) en los sitios contaminados, habilitándose una fuente de investigación suficiente y trascendental post aplicación de la ANC y que fue sintetizada en las Tablas utilizadas para el análisis correspondiente y que permitió un estudio dirigido a verificar la biorremediación en los suelos amazónicos afectados con el derrame de hidrocarburos.

La evaluación analítica efectuada a las Tablas y Gráficos, proporcionó información concreta sobre las concentraciones de nutrientes requeridos para remediar el suelo contaminado en diversos procesos, así como los niveles de saturación del suelo y la remoción edáfica (volteos), permitiendo determinar la reducción de TPH en niveles cuantificables y vinculables a los estándares legales permisibles en la normativa nacional y se arribó a conclusiones satisfactorias que proporcionaron información valiosa como aporte al campo científico que investiga la biorremediación de suelos contaminados por TPH (%). Para tal efecto, se diseñó un flujograma de trabajo que orientó la conducción de la investigación (**Figura 3**).

Figura 3. *Flujograma de desarrollo del trabajo de investigación*



En la actividad procedimental se desarrollaron diversas etapas, iniciándose con una actividad preliminar de actualizar el formato de la base de datos a Microsoft EXCEL Office 365 para un adecuado manejo del programa. Posteriormente y, en primer lugar, se procedió a ordenar y organizar los datos de tal manera que se encuentren agrupados por zonas de estudio de la siguiente forma: Capirona (Estación de Bombas), Valencia (Planta 74), Pavayacu (Planta 130) y Corrientes (Batería 2). En segundo lugar, se elaboraron gráficas de comparación entre la variable dependiente (TPH), las variables independientes (nutrientes, saturación y volteos) y la variable interviniente (zona de estudio). La relación por cada una de las cuatro zonas a estudiar fue la siguiente: concentración de TPH (%) vs adición de nutrientes (N, P), concentración de TPH (%) vs captación de oxígeno y agua (ml), y concentración de TPH (%) vs número de volteos realizados (procesos intermedios). Cada gráfica tiene la finalidad de mostrar el nivel porcentual de TPH que habría variado en función de la variable independiente y de las variables intervinientes (**Título VII**).

En tercer lugar, se realizó el análisis estadístico descrito en el **Subcapítulo 6.3**, de la información relacionada a las concentraciones de TPH iniciales y finales cada una de las cuatro zonas de estudio, cuyo propósito fue en determinar si existía una diferencia significativa entre el TPH inicial y TPH final (**Subcapítulo 7.4**). Finalmente, según lo especificado en el **Título VIII** se prosiguió con contrastar los resultados obtenidos de las gráficas (nutrientes, saturación y volteos) en cada zona, para precisar el nivel de efectividad de remediación en base a la variación de concentración de TPH (%).

VII. RESULTADOS

7.1 Determinación de biorremediación por adición de nutrientes (N , P)

Objetivo específico 1: Comparar la variación de la concentración de Hidrocarburos Totales de Petróleo (TPH) en la base de datos luego de utilizar nutrientes (N, P), en las zonas de estudio de Capirona, Valencia, Pavayacu y Corrientes en el Lote 8 (Loreto) en el año 2015.

7.1.1 Capirona

La prueba experimental de biorremediación de suelos contaminados (BSC) por concentraciones de hidrocarburos (TPH) realizada por el Dr. Jesús G. López Sangama, consistió en la adición de nutrientes [(N, P), nitrato de amonio (NH_4NO_3) y fosfato diamónico ($\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$), sobre un volumen caracterizado de 175.37 m^3 en la zona de estudio de Capirona (Lote 8), determinándose en la fase inicial una concentración del 4.05 % TPH habiéndose incorporado en este período un total de 923.80 Kg de nutrientes, para posteriormente observar una disminución gradual de estas cantidades durante la ejecución de cuatro procesos programados con nuevos agregados aleatorios, hasta verificar una incorporación efectiva de 228.03 Kg, con lo que finalmente se llegó a obtener una reducción total de las concentraciones de TPH en 1.0 %.

Tabla 2. Concentración de Nutrientes en la Estación de Bombas (Capirona)

CAPIRONA	INICIAL	P1	P2	FINAL
<i>TPH (%)</i>	4.05	2.9	1.94	1.00
<i>NH₄NO₃ (kg)</i>	894.80	640.21	427.94	220.88
<i>(NH₄)₂HPO₄ (kg)</i>	209.95	150.22	100.41	51.83
<i>N₂ (kg)</i>	839.82	600.87	401.64	207.3
<i>P (kg)</i>	83.98	60.09	40.16	20.73
<i>TOTAL (N+P)</i>	923.80	660.95	441.80	228.03

Adaptado según la base de datos de la tesis doctoral del Dr. Jesús G. López Sangama.

De la evaluación de estos resultados experimentales se verificó que los niveles de las concentraciones de los nutrientes (N, P) observados representan la biorremediación cuantitativa de las concentraciones contaminantes de TPH (%) estableciéndose una relación directamente proporcional entre ambas variables. Esta situación se logra apreciar en los datos consignados en la **Tabla 2** donde se muestra información sobre la cantidad inicial de nutrientes requeridos para la biorremediación, que gradualmente van decreciendo en cada proceso hasta lograr un nivel de estabilización aceptable conforme se efectúa la recuperación del componente edáfico contaminado.

7.1.2 Análisis estadístico para Capirona (Nutrientes)

Tabla 3. TPH Inicial y Final en la Estación de Bombas (Capirona)

MUESTRA	P. INICIAL	P. FINAL
<i>I</i>	13.88	1.14
<i>II</i>	9.48	1.15
<i>III</i>	3.78	1.13
<i>IV</i>	1.30	1.15
<i>V</i>	4.37	1.14
<i>VI</i>	1.89	1.11
<i>VII</i>	1.11	0.00
<i>VIII</i>	1.40	1.18
<i>PROMEDIO</i>	4.65	1.00

Adaptado según la base de datos de la tesis doctoral del Dr. Jesús G. López Sangama.

Prueba de normalidad

Se consideraron ocho datos de la **Tabla 3** para el TPH – inicial y el TPH – final ($n < 30$). Entonces debido al tamaño de la muestra, la prueba a elegir fue “Shapiro-Wilk”. Se establecieron las siguientes hipótesis: hipótesis nula (**H₀**) los datos se distribuyen normalmente, e hipótesis alterna (**H_a**) los datos no se distribuyen normalmente.

Tabla 4. Prueba de normalidad en Capirona (Nutrientes)

	Pruebas de normalidad					
	Kolmogorov-Smirnov ^a			Shapiro-Wilk		
	Estadístico	gl	Sig.	Estadístico	gl	Sig.
Proceso Inicial	,274	8	,078	,791	8	,023
Proceso Final	,482	8	,000	,465	8	,000

a. Corrección de significación de Lilliefors

Nota: Nivel de significancia al 5 %. Fuente SPSS.

De acuerdo con la **Tabla 4**, en la prueba de “Shapiro-Wilk” se obtuvieron los siguientes niveles de significancia para el TPH – inicial y el TPH – final (0,023; 0,000). Por lo tanto, en ambos casos al ser menores del 5 %, la hipótesis alterna es aceptada. Como la distribución de los datos no es normal, se aplicará la prueba no paramétrica de Wilcoxon para dos grupos relacionados.

Tabla 5. Prueba de los rangos con signo de Wilcoxon en Capirona (Nutrientes)

Resumen de prueba de rangos con signo de Wilcoxon para muestras relacionadas	
N total	8
Estadístico de prueba	,000
Error estándar	7,141
Estadístico de prueba estandarizado	-2,521
Sig. asintótica (prueba bilateral)	,012

Nota: Rangos obtenidos del análisis estadístico. Fuente SPSS.

Se tomaron en cuenta las siguientes hipótesis al ejecutarse la prueba de Wilcoxon (**Tabla 5**): hipótesis nula (**H₀**) las medianas de la concentración del TPH inicial y final son

iguales, e hipótesis alterna (**Ha**) las medianas de la concentración del TPH inicial y final no son iguales.

Tabla 6. *Contrastación de la Hipótesis en Capirona (Nutrientes)*

Resumen de contrastes de hipótesis				
	Hipótesis nula	Prueba	Sig.	Decisión
1	La mediana de diferencias entre Proceso Inicial y Proceso Final es igual a 0.	Prueba de rangos con signo de Wilcoxon para muestras relacionadas	,012	Rechace la hipótesis nula.

Se muestran significaciones asintóticas. El nivel de significación es de .050.

Nota: **SIG** = 0.012 < 0.05 entonces se rechaza la **H₀**. Fuente SPSS.

Según la información de la **Tabla 6**, con un nivel de significación del 5 % se puede afirmar que el TPH – inicial no es el mismo que el TPH – final porque existe una diferencia significativa entre las medianas. El análisis final de la base de datos experimental ha permitido determinar que la adición de nutrientes (N, P) consignados han sido suficientes para satisfacer el proceso de biorremediación de suelos contaminados con hidrocarburos (TPH) mediante el método de la ANC, habiéndose facilitado la biodegradación y logrado una significativa reducción de los niveles de contaminación iniciales de TPH hasta conseguir concentraciones finales de TPH (< 3 %) como el estándar legalmente permisible de acuerdo a la norma ambiental nacional.

7.1.3 Valencia

En la zona de Valencia, la prueba experimental respecto de la adición de nutrientes (N, P), fue aplicada sobre un volumen de 330.98 m³ de BSC, con una concentración preliminar de 3.39 % TPH incorporándose en la fase inicial un total de 1,459.82 Kg de nutrientes [(N, P), nitrato de amonio (NH₄NO₃) y fosfato diamónico (NH₄)₂HPO₄], para posteriormente en cuatro procesos sucesivos decrecer los aportes de nutrientes con nuevos agregados aleatorios, hasta verificar una incorporación efectiva de 378.31 Kg, con lo que se obtuvo al final un nivel de TPH de 0.88 %.

Tabla 7. Concentración de Nutrientes en la Plataforma 74 (Valencia)

VALENCIA	INICIAL	P1	P2	FINAL
TPH (%)	3.39	2.81	2.32	0.88
NH₄NO₃ (kg)	1,414	1,168.73	966.65	366.44
(NH₄)₂HPO₄ (kg)	331.78	274.23	226.81	85.98
N₂ (kg)	1,327.11	1,096.91	907.25	343.92
P (kg)	132.71	109.69	90.72	34.39
TOTAL (N+P)	1,459.82	1,206.60	997.97	378.31

Adaptado según la base de datos de la tesis doctoral del Dr. Jesús G. López Sangama.

La base de datos experimentales sometida a examen indica que el consumo de nutrientes (N, P) utilizados en la prueba representan cuantitativamente y en una proporción directa, los niveles de reducción de las concentraciones contaminantes de TPH (%) de los suelos afectados. En la **Tabla 7** se aprecia la correlación proporcional entre la biorremediación de los suelos contaminados con concentraciones de hidrocarburos (TPH) y la disminución de los nutrientes que fueron consumidos en este proceso.

7.1.4 Análisis estadístico para Valencia (Nutrientes)

Tabla 8. TPH Inicial y Final en la Planta 74 (Valencia)

MUESTRA	P. INICIAL	P. FINAL
I	2.63	1.09
II	1.89	1.15
III	2.77	0.71
IV	2.94	0.57
PROMEDIO	2.56	0.88

Adaptado según la base de datos de la tesis doctoral del Dr. Jesús G. López Sangama.

Prueba de normalidad

Se consideraron cuatro datos de la **Tabla 8** para el TPH – inicial y el TPH – final ($n < 30$). En consecuencia y debido al tamaño de la muestra, la prueba a elegir fue “Shapiro-Wilk”. Se establecieron las siguientes hipótesis: hipótesis nula (**H₀**) los datos se distribuyen normalmente, e hipótesis alterna (**H_a**) los datos no se distribuyen normalmente.

Tabla 9. Prueba de normalidad en Valencia (Nutrientes)

	Pruebas de normalidad					
	Kolmogorov-Smirnov ^a			Shapiro-Wilk		
	Estadístico	gl	Sig.	Estadístico	gl	Sig.
Proceso Inicial	,312	4	.	,864	4	,275
Proceso Final	,270	4	.	,881	4	,344

a. Corrección de significación de Lilliefors

Nota: Nivel de significancia al 5 %. Fuente SPSS.

De acuerdo con la **Tabla 9**, en la prueba de “Shapiro-Wilk” se obtuvieron los siguientes niveles de significancia para el TPH – inicial y el TPH – final: (0,275; 0,344). Por lo tanto, en ambos casos al ser mayores del 5 %, la hipótesis nula es aceptada. Aunque la distribución de los datos es normal, el tamaño de la muestra es muy pequeño, por lo cual es recomendable realizar la prueba no paramétrica de Wilcoxon para dos grupos relacionados al tratarse de pocos datos.

Tabla 10. Prueba de los rangos con signo de Wilcoxon en Valencia (Nutrientes)

Resumen de prueba de rangos con signo de Wilcoxon para muestras relacionadas	
N total	4
Estadístico de prueba	,000
Error estándar	2,739
Estadístico de prueba estandarizado	-1,826
Sig. asintótica (prueba bilateral)	,068

Nota: Rangos obtenidos del análisis estadístico. Fuente SPSS.

Se tomaron en cuenta las siguientes hipótesis al ejecutarse la prueba de Wilcoxon (**Tabla 10**): hipótesis nula (**H₀**) las medianas de la concentración del TPH inicial y final son iguales, e hipótesis alterna (**H_a**) las medianas de la concentración del TPH inicial y final no son iguales.

Tabla 11. *Contrastación de la Hipótesis en Valencia (Nutrientes)*

Resumen de contrastes de hipótesis				
	Hipótesis nula	Prueba	Sig.	Decisión
1	La mediana de diferencias entre Proceso Inicial y Proceso Final es igual a 0.	Prueba de rangos con signo de Wilcoxon para muestras relacionadas	,068	Conserve la hipótesis nula.

Se muestran significaciones asintóticas. El nivel de significación es de .050.

Nota: **SIG** = 0.068 \geq 0.05 entonces se acepta la **H₀**. Fuente SPSS.

Según la información de la **Tabla 11**, con un nivel de significación del 5 % se puede afirmar que el TPH – inicial es el mismo que el TPH – final porque no se presenta una diferencia significativa entre las medianas. Sin embargo, eso no quiere decir que no haya habido una disminución en las concentraciones del TPH en la Plataforma 74. Estadísticamente la reducción ha sido mínima, por lo que no es observable en valores numéricos relevantes (**Tabla 7**). Como evaluación final de la biorremediación se pudo determinar que la eficacia de la reducción de las concentraciones iniciales de TPH (%) contaminantes de suelos resultaron satisfactorias al emplear la adición de nutrientes (N, P) facilitándose la biodegradación hasta conseguir concentraciones finales de TPH (< 3 %), como el límite máximo permisible según los estándares de calidad ambiental nacional en aquel periodo.

7.1.5 Pavayacu

Respecto a la zona de Pavayacu (Lote 8), la prueba experimental relacionado a la adición de nutrientes (N, P), fue aplicada sobre un volumen de 562.76 m³ de BSC y con un índice de 2.26 % (TPH), incorporándose en la fase inicial 1,653.22 Kg de nutrientes [(N, P), nitrato de amonio (NH₄NO₃) y fosfato diamónico (NH₄)₂HPO₄], habiendo decrecido en cuatro procesos sucesivos con las nuevas adiciones tentativas programadas, obteniéndose un grado de estabilización del consumo de nutrientes en 623.41 Kg, finalizando la fase experimental con un 0.85 % de TPH.

Tabla 12. Concentración de Nutrientes en la Plataforma 130 (Pavayacu)

PAVAYACU	INICIAL	P1	P2	FINAL
TPH (%)	2.26	2.01	1.71	0.85
NH₄NO₃ (kg)	1,601.33	1,421.92	333.63	603.84
(NH₄)₂HPO₄ (kg)	375.73	1,214.45	284.96	141.68
N₂ (kg)	1,502.93	1,334.54	1,139.82	566.73
P (kg)	150.29	133.45	113.98	56.67
TOTAL (N+P)	1,653.22	1,467.99	1,253.80	623.41

Adaptado según la base de datos de la tesis doctoral del Dr. Jesús G. López Sangama.

Los resultados analizados de la base de datos experimental permitieron determinar que el consumo de nutrientes (N, P) se halla vinculado directamente a la reducción de las concentraciones de contaminantes TPH (%) y representa cuantitativamente la biorremediación alcanzada. Esto quedó demostrado con la información consolidada en la **Tabla 12** donde se observa la correlación directamente proporcional entre ambos factores causales reflejada en que el incremento de la recuperación del suelo contaminado ha originado un consumo específico de los nutrientes (N, P) aplicados en todo el proceso de investigación.

7.1.6 Análisis estadístico para Pavayacu (Nutrientes)

Tabla 13. TPH Inicial y Final en la Planta 130 – Sitio 1 (Pavayacu)

MUESTRA	P. INICIAL	P. FINAL
I	3.74	1.13
II	1.31	0.56
III	1.16	1.14
IV	1.16	0.56
V	1.16	0.00
VI	1.21	1.13
VII	2.37	2.31
VIII	3.36	0.00
PROMEDIO	1.93	0.85

Adaptado según la base de datos de la tesis doctoral del Dr. Jesús G. López Sangama.

Prueba de normalidad

Se consideraron ocho datos de la **Tabla 13** para el TPH – inicial y el TPH – final ($n < 30$). Por lo tanto y debido al tamaño de la muestra, la prueba a elegir fue “Shapiro-Wilk”. Se establecieron las siguientes hipótesis: hipótesis nula (**H₀**) los datos se distribuyen normalmente, e hipótesis alterna (**H_a**) los datos no se distribuyen normalmente.

Tabla 14. Prueba de normalidad en Pavayacu (Nutrientes)

	Pruebas de normalidad					
	Kolmogorov-Smirnov ^a			Shapiro-Wilk		
	Estadístico	gl	Sig.	Estadístico	gl	Sig.
Proceso Inicial	,343	8	,006	,747	8	,008
Proceso Final	,227	8	,200*	,897	8	,269

*. Esto es un límite inferior de la significación verdadera.

a. Corrección de significación de Lilliefors

Nota: Nivel de significancia al 5 %. Fuente SPSS.

De acuerdo con la **Tabla 14**, en la prueba de “Shapiro-Wilk” se obtuvieron los siguientes niveles de significancia para el TPH – inicial y el TPH – final (0,008; 0,269). Por consiguiente, solo en el primer caso no sigue el supuesto de normalidad, mientras que en el segundo caso si lo cumple. En ese sentido, resultó factible aplicar la prueba no paramétrica de Wilcoxon para dos grupos relacionados. Se tomaron en cuenta las siguientes hipótesis al ejecutarse la prueba de Wilcoxon: hipótesis nula (**H₀**) las medianas de la concentración del TPH inicial y final son iguales, e hipótesis alterna (**H_a**) las medianas de la concentración del TPH inicial y final no son iguales.

Tabla 15. Prueba de los rangos con signo de Wilcoxon en Pavayacu (Nutrientes)

Resumen de prueba de rangos con signo de Wilcoxon para muestras relacionadas	
N total	8
Estadístico de prueba	,000
Error estándar	7,141
Estadístico de prueba estandarizado	-2,521
Sig. asintótica (prueba bilateral)	,012

Nota: Rangos obtenidos del análisis estadístico. Fuente SPSS.

Se tomaron en cuenta las siguientes hipótesis al ejecutarse la prueba de Wilcoxon (**Tabla 15**): hipótesis nula (**H₀**) las medianas de la concentración del TPH inicial y final son iguales, e hipótesis alterna (**H_a**) las medianas de la concentración del TPH inicial y final no son iguales.

Tabla 16. *Contrastación de la Hipótesis en Pavayacu (Nutrientes)*

Resumen de contrastes de hipótesis				
	Hipótesis nula	Prueba	Sig.	Decisión
1	La mediana de diferencias entre Proceso Inicial y Proceso Final es igual a 0.	Prueba de rangos con signo de Wilcoxon para muestras relacionadas	,012	Rechaza la hipótesis nula.

Se muestran significaciones asintóticas. El nivel de significación es de .050.

Nota: **SIG** = 0.012 < 0.05 entonces se rechaza la **H₀**. Fuente SPSS.

Según la información de la **Tabla 16**, con un nivel de significación del 5 % se puede afirmar que el TPH – inicial no es el mismo que el TPH – final porque existe una diferencia significativa entre las medianas. Los resultados generales de la biorremediación permitieron obtener datos conclusivos importantes respecto de la validez del método de la adición de nutrientes (N, P) para lograr una efectiva reducción de las concentraciones iniciales de TPH (%) contaminantes de suelos, logrando obtener concentraciones finales de TPH (< 3 %), según los límites máximos permisibles dispuestos por la norma nacional de calidad ambiental.

7.1.7 Corrientes

En la zona de estudio de Corrientes (Lote 8) de mayor extensión, la prueba experimental de adición de nutrientes (N, P), fue implementada sobre un volumen 1,221.09 m³ de BSC, con un índice porcentual de 10.21 % TPH, incorporándose en la fase inicial 16,209.44 Kg de nutrientes [(N, P), nitrato de amonio (NH₄NO₃) y fosfato diamónico (NH₄)₂HPO₄], para luego en cuatro procesos sucesivos decrecer los aportes de nutrientes hasta

equilibrarse en 2,065.60 Kg, logrando como resultado un grado de estabilización del consumo de nutrientes en 1.3 % TPH.

Tabla 17. *Concentración de Nutrientes en la Batería 2 – Sitio 2 (Corrientes)*

CORRIENTES	INICIAL	P1	P2	FINAL
TPH (%)	10.21	5.95	3.74	1.3
NH₄NO₃ (kg)	1,5700.7	9,140.32	5,746.69	2,000.77
(NH₄)₂HPO₄ (kg)	3,683.96	2,144.66	1,348.39	469.45
N₂ (kg)	14,735.85	8,578.62	5,393.55	1,877.82
P (kg)	1,473.59	857.86	539.35	187.78
TOTAL (N+P)	16,209.44	9,436.48	5,932.90	2,065.60

Adaptado según la base de datos de la tesis doctoral del Dr. Jesús G. López Sangama.

El proceso concluyó con un índice de 1.30 % de TPH. Del análisis de estos resultados experimentales se logró comprobar y contrastar las informaciones de biorremediación que se estaban suscitando en condiciones semejantes en las otras zonas de estudio. En la **Tabla 17**, se hallan sintetizados los datos recopilados de las pruebas de campo y de laboratorio aplicados a esta zona de Corrientes, que indican con certeza que la biorremediación de suelos contaminados se produjo en una correlación directamente proporcional al consumo de los nutrientes (N, P) utilizados en todo el proceso del experimento, con lo que se demuestra la reducción cuantitativa de las concentraciones contaminantes de TPH (%) en los componentes edáficos afectados.

7.1.8 Análisis estadístico

Tabla 18. *TPH Inicial y Final en la Batería 2 – Sitio 2 (Corrientes)*

MUESTRA	P. INICIAL	P. FINAL
I	3.73	0.96
II	4.59	2.00
III	5.66	1.80
IV	6.86	0.86
V	7.86	0.91
VI	13.44	2.78
VII	9.37	1.89
VIII	12.92	0.42
IX	10.68	0.91

X	12.66	0.49
PROMEDIO	8.75	1.30

Adaptado según la base de datos de la tesis doctoral del Dr. Jesús G. López Sangama.

Prueba de normalidad

Se consideraron diez datos de la **Tabla 18** para el TPH – inicial y el TPH – final ($n < 30$).

Por lo tanto y debido al tamaño de la muestra, la prueba a elegir fue “Shapiro-Wilk”. Se establecieron las siguientes hipótesis: hipótesis nula (**H₀**) los datos se distribuyen normalmente, e hipótesis alterna (**H_a**) los datos no se distribuyen normalmente.

Tabla 19. Prueba de normalidad en Corrientes (Nutrientes)

	Kolmogorov-Smirnov ^a			Shapiro-Wilk		
	Estadístico	gl	Sig.	Estadístico	gl	Sig.
Proceso Inicial	,161	10	,200 [*]	,928	10	,432
Proceso Final	,272	10	,035	,895	10	,194

*. Esto es un límite inferior de la significación verdadera.

a. Corrección de significación de Lilliefors

Nota: Nivel de significancia al 5 %. Fuente SPSS.

De acuerdo con la **Tabla 19**, en la prueba de “Shapiro-Wilk” se obtuvieron los siguientes niveles de significancia para el TPH – inicial y el TPH – final: (0,432; 0,194). Por lo tanto, en ambos casos al ser mayores del 5 %, la hipótesis nula es aceptada. Aunque la distribución de los datos es normal, el tamaño de la muestra es muy pequeño, por lo cual es recomendable efectuar la prueba no paramétrica de Wilcoxon para dos grupos relacionados al tratarse de pocos datos. Se tomaron en cuenta las siguientes hipótesis al ejecutarse la prueba de Wilcoxon: hipótesis nula (**H₀**) las medianas de la concentración del TPH inicial y final son iguales, e hipótesis alterna (**H_a**) las medianas de la concentración del TPH inicial y final no son iguales.

Tabla 20. Prueba de los rangos con signo de Wilcoxon en Corrientes (Nutrientes)

Resumen de prueba de rangos con signo de Wilcoxon para muestras relacionadas

N total	10
Estadístico de prueba	,000
Error estándar	9,811
Estadístico de prueba estandarizado	-2,803
Sig. asintótica (prueba bilateral)	,005

Nota: Rangos obtenidos del análisis estadístico. Fuente SPSS.

Se tomaron en cuenta las siguientes hipótesis al ejecutarse la prueba de Wilcoxon (**Tabla 20**): hipótesis nula (**H₀**) las medianas de la concentración del TPH inicial y final son iguales, e hipótesis alterna (**H_a**) las medianas de la concentración del TPH inicial y final no son iguales.

Tabla 21. Contrastación de la Hipótesis en Corrientes (Nutrientes)

Resumen de contrastes de hipótesis

	Hipótesis nula	Prueba	Sig.	Decisión
1	La mediana de diferencias entre Proceso Inicial y Proceso Final es igual a 0.	Prueba de rangos con signo de Wilcoxon para muestras relacionadas	,005	Rechace la hipótesis nula.

Se muestran significaciones asintóticas. El nivel de significación es de .050.

Nota: **SIG** = 0.005 < 0.05 entonces se rechaza la **H₀**. Fuente SPSS.

Según la información de la **Tabla 21**, con un nivel de significación del 5 % se puede afirmar que-el TPH – inicial no es el mismo que el TPH – final porque se observa una diferencia significativa entre las medianas. Manteniendo una similitud estadística con las demás zonas de estudio, se ha podido verificar la biorremediación de manera satisfactoria al constatar la eficacia de la reducción de las concentraciones iniciales de TPH (%) contaminantes de suelos al utilizarse la metodología de la adición de nutrientes (N, P) hasta conseguir concentraciones finales de TPH (< 3 %), límite máximo permisible según los estándares de calidad ambiental nacional.

7.2 Determinación de biorremediación por saturación del suelo

Objetivo específico 2: Establecer una comparación de la variación de la concentración de Hidrocarburos Totales de Petróleo (TPH) en la base de datos luego de utilizar técnicas de saturación del suelo, en las zonas de estudio de Capirona, Valencia, Pavayacu y Corrientes en el Lote 8 (Loreto) en el año 2015.

7.2.1 Capirona

Se tomaron ocho muestras de suelo en la Estación de Bombas, en donde se obtuvieron los valores iniciales de volúmenes de aceite y volúmenes de agua, efectuándose las mediciones en periodos semanales, advirtiéndose posteriormente una reducción de estos compuestos en las muestras de la fase final. Los resultados verificaron finalmente una correlación totalizadora entre ambos valores, excepto en las muestras dos y cinco, en las cuales el agua adquiere un mayor volumen (de 4.0 ml a 4.8 ml y de 2.4 ml a 4.3 ml, respectivamente). Se pudo observar que la variación de las cantidades de agua y aceite durante la remediación del suelo contaminado finalmente se ven reflejadas en los índices porcentuales de oxígeno captado, mostrados en inversa proporción a la reducción de los elementos biodegradadores, como un elemento coadyuvante para la regeneración del suelo contaminado, debido a la proporción correlacional de agua y aire en los poros del suelo. La **Tabla 22** resume el comportamiento edáfico por saturación.

Tabla 22. Variación del Aceite, Agua y Oxígeno en la Estación de Bombas (Capirona)

<i>Aceite y agua en la biodegradación</i>						
<i>INICIO</i>		<i>FINAL</i>		<i>Captación de oxígeno</i>		
V aceite (ml)	V agua (ml)	V aceite (ml)	V agua (ml)	V perdido de aceite	V perdido de agua	V captado de oxígeno
2.2	5.2	0.2	3.7	2.0	1.5	3.5
1.6	4.0	0.2	4.8	1.4	0.8	1.4
0.8	4.2	0.2	4.2	0.6	0.0	0.6
0.2	6.2	0.2	4.8	0.0	1.4	1.4
0.7	2.4	0.2	4.3	0.5	1.9	0.5

0.3	7.0	0.2	4.6	0.1	2.4	2.5
0.2	6.8	0.0	4.6	0.2	2.2	2.4
0.2	5.6	0.2	4.8	0.0	0.8	0.8

Adaptado según la base de datos de la tesis doctoral del Dr. Jesús G. López Sangama.

7.2.2 Análisis estadístico

Prueba de normalidad

Se consideraron ocho datos de la **Tabla 22** para el volumen de aceite inicial y el volumen de aceite final ($n < 30$). Entonces debido al tamaño de la muestra, la prueba a elegir fue “Shapiro-Wilk”. Se establecieron las siguientes hipótesis: hipótesis nula (**H₀**) los datos se distribuyen normalmente, e hipótesis alterna (**H_a**) los datos no se distribuyen normalmente.

Tabla 23. Prueba de normalidad en Capirona (Saturación)

	Kolmogorov-Smirnov ^a			Shapiro-Wilk		
	Estadístico	gl	Sig.	Estadístico	gl	Sig.
Volumen Inicial	,237	8	,200*	,806	8	,033
Volumen Final	,513	8	,000	,418	8	,000

*. Esto es un límite inferior de la significación verdadera.

a. Corrección de significación de Lilliefors

Nota: Nivel de significancia al 5 %. Fuente SPSS.

De acuerdo con la **Tabla 23**, en la prueba de “Shapiro-Wilk” se obtuvieron los siguientes niveles de significancia para el volumen de aceite inicial y el volumen de aceite final (0,033; 0,000). Por consiguiente, la hipótesis alternativa se acepta en ambos casos, ya que la diferencia es inferior al 5%. Dada la distribución no normal de los datos, se utilizará la prueba no paramétrica de Wilcoxon para dos grupos relacionados.

Tabla 24. Prueba de los rangos con signo de Wilcoxon en Capirona (Saturación)

Resumen de prueba de rangos con signo de Wilcoxon para muestras relacionadas

N total	8
Estadístico de prueba	,000
Error estándar	4,770
Estadístico de prueba estandarizado	-2,201
Sig. asintótica (prueba bilateral)	,028

Nota: Rangos obtenidos del análisis estadístico. Fuente SPSS.

Se tomaron en cuenta las siguientes hipótesis al ejecutarse la prueba de Wilcoxon (**Tabla 24**): hipótesis nula (**H₀**) las medianas de la concentración del volumen de aceite inicial y del volumen de aceite final son iguales, e hipótesis alterna (**H_a**) las medianas de la concentración del volumen de aceite inicial y del volumen de aceite final no son iguales.

Tabla 25. Contrastación de la Hipótesis en Capirona (Saturación)

Resumen de contrastes de hipótesis

	Hipótesis nula	Prueba	Sig.	Decisión
1	La mediana de diferencias entre Volumen Inicial y Volumen Final es igual a 0.	Prueba de rangos con signo de Wilcoxon para muestras relacionadas	,028	Rechace la hipótesis nula.

Se muestran significaciones asintóticas. El nivel de significación es de ,050.

Nota: **SIG** = 0.028 < 0.05 entonces se rechaza la **H₀**. Fuente SPSS.

Según la información de la **Tabla 25**, con un nivel de significación del 5 % se puede afirmar que, el volumen de aceite inicial no es el mismo que el volumen de aceite final porque se presenta una diferencia significativa entre las medianas. Los resultados de la biorremediación para el sitio de Capirona, han permitido verificar la efectividad de la ANC mediante los procesos de saturación de suelos contaminados con hidrocarburos (% TPH), obteniéndose datos significativos tanto a nivel experimental como en el análisis estadístico que confirman la validez de la data empleada en la presente investigación, de acuerdo a los estándares de calidad ambiental de suelos y los límites máximos permisibles

regulados por ley (D.S N° 011-2017-MINAM - ECA para suelo y D.S. N° 037-2008-PCM-LMP de efluentes líquidos para el sub sector hidrocarburos - MINAM).

7.2.3 Valencia

En esta zona de la Plataforma 74 se consiguieron cuatro muestras de suelo, habiéndose obtenido los valores iniciales de los volúmenes de aceite y volúmenes de agua experimentales, para luego ir programándose las mediciones en periodos de siete días, advirtiéndose posteriormente una reducción de estos niveles de valores en las muestras de la fase final que se hallan reflejados en los volúmenes de oxígeno captados producto de la saturación experimental, resultados que verifican finalmente una correlación totalizadora entre ambas variables, excepto en la muestra uno y cuatro (de 3.4 m. a 6.2 ml y de 4.4 ml a 5.4 ml respectivamente), donde el agua adquiere un mayor volumen. El análisis de la prueba experimental permite determinar una visible variación de la cantidad de agua y aceite durante la remediación del suelo contaminado, presentándose una captación de oxígeno en inversa proporción a la reducción de los elementos biodegradadores, ocasionando la recuperación del suelo contaminado debido a la adecuada proporción de agua y gas en los poros del suelo. Los atributos organolépticos permiten inferir que el suelo contaminado se ha remediado, particularmente por la aireación como factor importante de la biodegradación por atenuación natural controlada. La **Tabla 22** expresa la situación edáfica desarrollada por la saturación.

Tabla 26. Variación del Aceite, Agua y Oxígeno en la Plataforma 74 (Valencia)

<i>Aceite y agua en la biodegradación</i>						
<i>INICIO</i>		<i>FINAL</i>		<i>Captación de oxígeno</i>		
V aceite (ml)	V agua (ml)	V aceite (ml)	V agua (ml)	V perdido de aceite	V perdido de agua	V captado de oxígeno
0.4	3.4	0.2	6.2	0.2	2.8	0.2
0.3	5.3	0.2	4.9	0.1	0.4	0.5
0.4	4.8	0.1	4.6	0.3	0.2	0.5
0.5	4.4	0.1	5.4	0.4	1.0	0.4

Adaptado según la base de datos de la tesis doctoral del Dr. Jesús G. López Sangama.

7.2.4 Análisis estadístico para Valencia (Saturación)

Prueba de normalidad

Se consideraron cuatro datos de la **Tabla 26** para el volumen de aceite inicial y el volumen de aceite final ($n < 30$). Por lo tanto, debido al tamaño de la muestra, la prueba a elegir fue “Shapiro-Wilk”. Se establecieron las siguientes hipótesis: hipótesis nula (**H₀**) los datos se distribuyen normalmente, e hipótesis alterna (**H_a**) los datos no se distribuyen normalmente.

Tabla 27. Prueba de normalidad en Valencia (Saturación)

	Kolmogorov-Smirnov ^a			Shapiro-Wilk		
	Estadístico	gl	Sig.	Estadístico	gl	Sig.
Volumen Inicial	,250	4	.	,945	4	,683
Volumen Final	,307	4	.	,729	4	,024

a. Corrección de significación de Lilliefors

Nota: Nivel de significancia al 5 %. Fuente SPSS.

De acuerdo con la **Tabla 27**, en la prueba de “Shapiro-Wilk” se obtuvieron los siguientes niveles de significancia para el volumen de aceite inicial y el volumen de aceite final (0,683; 0,024). En consecuencia, sólo en el primer caso falla el supuesto de normalidad, mientras que en el segundo no. En este sentido, resultó razonable aplicar la prueba no paramétrica de Wilcoxon a dos grupos relacionados.

Tabla 28. Prueba de los rangos con signo de Wilcoxon en Valencia (Saturación)

Resumen de prueba de rangos con signo de Wilcoxon para muestras relacionadas

N total	4
Estadístico de prueba	,000
Error estándar	2,739
Estadístico de prueba estandarizado	-1,826
Sig. asintótica (prueba bilateral)	,068

Nota: Rangos obtenidos del análisis estadístico. Fuente SPSS.

Se tomaron en cuenta las siguientes hipótesis al ejecutarse la prueba de Wilcoxon (**Tabla 28**): hipótesis nula (**H₀**) las medianas de la concentración del volumen de aceite inicial y del volumen de aceite final son iguales, e hipótesis alterna (**H_a**) las medianas de la concentración del volumen de aceite inicial y del volumen de aceite final no son iguales.

Tabla 29. Contrastación de la Hipótesis en Valencia (Saturación)

Resumen de contrastes de hipótesis

	Hipótesis nula	Prueba	Sig.	Decisión
1	La mediana de diferencias entre Volumen Inicial y Volumen Final es igual a 0.	Prueba de rangos con signo de Wilcoxon para muestras relacionadas	,068	Conserve la hipótesis nula.

Se muestran significaciones asintóticas. El nivel de significación es de ,050.

Nota: **SIG** = 0.068 \geq 0.05 entonces se acepta la **H₀**. Fuente SPSS.

Según la información de la **Tabla 29**, con un nivel de significación del 5 % se puede afirmar que, el volumen de aceite inicial es el mismo que el volumen de aceite final porque no existe una diferencia significativa entre las medianas de los volúmenes. Sin embargo, esto no significa que no se ha presentado una disminución en las concentraciones del TPH en la Plataforma 74. Estadísticamente la reducción ha sido mínima, pero no observable en valores numéricos relevantes (**Tabla 26**). Respecto del sitio Valencia los resultados de biorremediación mediante la ANC y los procesos de saturación de suelos han sido alcanzados satisfactoriamente, de acuerdo a lo contrastado

en el análisis estadístico formulado y que se adecuan a lo dispuesto en los estándares de calidad ambiental de suelos y los límites máximos permisibles regulados por ley (D.S N° 011-2017-MINAM - ECA para suelo y D.S. N° 037-2008-PCM-LMP de efluentes líquidos para el subsector hidrocarburos - MINAM).

7.2.5 Pavayacu

En el sitio de la Plataforma 130, se recogieron ocho muestras de suelo, determinándose los valores iniciales de volúmenes de aceite y volúmenes de agua, para posteriormente efectuar las mediciones en periodos semanales, notándose una disminución del nivel de las muestras obtenidas en la fase final que se hallan reflejadas en los volúmenes de oxígeno captado producto de la saturación experimental, resultados que verifican finalmente una correlación totalizadora entre ambas variables. La Tabla 26 resume el comportamiento edáfico por saturación. En efecto, se puede observar una manifiesta captación de oxígeno en inversa proporción a la reducción de los elementos biodegradadores promovida por la variación de la cantidad de agua y aceite durante la remediación del suelo contaminado, debiéndose notar que es la única zona de estudio que no presenta valores confrontacionales, situación conducente a la regeneración del suelo contaminado. El análisis permite deducir la presencia de un suelo limpio y en consecuencia, se puede afirmar que la aireación fue un factor importante para la biodegradación por atenuación natural controlada.

Tabla 30. *Variación del Aceite, Agua y Oxígeno en la Plataforma 130 (Pavayacu)*

<i>Aceite y agua en la biodegradación</i>						
<i>INICIO</i>		<i>FINAL</i>		<i>Captación de oxígeno</i>		
V aceite (ml)	V agua (ml)	V aceite (ml)	V agua (ml)	V perdido de aceite	V perdido de agua	V captado de oxígeno
0.6	5.6	0.2	4.5	0.4	1.1	1.5
0.2	5.4	0.1	4.2	0.1	1.2	1.3
0.2	5.6	0.2	4.3	0.0	1.3	1.3
0.2	5.6	0.1	4.5	0.1	1.1	1.2

0.2	6.2	0.0	5.0	0.2	1.2	1.4
0.2	6.4	0.2	4.0	0.0	2.4	2.4
0.4	5.4	0.4	4.8	0.0	0.6	0.6
0.6	5.2	0.0	4.4	0.6	0.8	1.4

Adaptado según la base de datos de la tesis doctoral del Dr. Jesús G. López Sangama.

7.2.6 Análisis estadístico

Prueba de normalidad

Se consideraron ocho datos de la **Tabla 30** para el volumen de aceite inicial y el volumen de aceite final ($n < 30$). Consecuentemente, debido al tamaño de la muestra, la prueba a elegir fue “Shapiro-Wilk”. Se establecieron las siguientes hipótesis: hipótesis nula (**H₀**) los datos se distribuyen normalmente, e hipótesis alterna (**H_a**) los datos no se distribuyen normalmente.

Tabla 31. Prueba de normalidad en Pavayacu (Saturación)

	Pruebas de normalidad					
	Kolmogorov-Smirnov ^a			Shapiro-Wilk		
	Estadístico	gl	Sig.	Estadístico	gl	Sig.
Volumen Inicial	,377	8	,001	,693	8	,002
Volumen Final	,226	8	,200*	,899	8	,283

*. Esto es un límite inferior de la significación verdadera.

a. Corrección de significación de Lilliefors

Nota: Nivel de significancia al 5 %. Fuente SPSS.

De acuerdo con la **Tabla 31**, en la prueba de “Shapiro-Wilk” se obtuvieron los siguientes niveles de significancia para el Vol. de aceite inicial y el Vol. de aceite final (0,002; 0,283). La prueba no paramétrica de Wilcoxon se aplicó a dos grupos relacionados, puesto que solamente se incumplió en el primer caso y se aceptó el supuesto de normalidad en el segundo.

Tabla 32. Prueba de los rangos con signo de Wilcoxon en Pavayacu (Saturación)

Resumen de prueba de rangos con signo de Wilcoxon para muestras relacionadas

N total	8
Estadístico de prueba	,000
Error estándar	3,691
Estadístico de prueba estandarizado	-2,032
Sig. asintótica (prueba bilateral)	,042

Nota: Rangos obtenidos del análisis estadístico. Fuente SPSS.

Se tomaron en cuenta las siguientes hipótesis al ejecutarse la prueba de Wilcoxon (**Tabla 32**): hipótesis nula (**H₀**) las medianas de la concentración del volumen de aceite inicial y del volumen de aceite final son iguales, e hipótesis alterna (**H_a**) las medianas de la concentración del volumen de aceite inicial y del volumen de aceite final no son iguales.

Tabla 33. Contrastación de la Hipótesis en Pavayacu (Saturación)

Resumen de contrastes de hipótesis

	Hipótesis nula	Prueba	Sig.	Decisión
1	La mediana de diferencias entre Volumen Inicial y Volumen Final es igual a 0.	Prueba de rangos con signo de Wilcoxon para muestras relacionadas	,042	Rechaza la hipótesis nula.

Se muestran significaciones asintóticas. El nivel de significación es de ,050.

Nota: **SIG** = 0.042 < 0.05 entonces se rechaza la **H₀**. Fuente SPSS.

Según la información de la **Tabla 33**, con un nivel de significación del 5 % se puede aseverar que, el volumen de aceite inicial no es el mismo que el volumen de aceite final porque se distingue una diferencia significativa entre las medianas. El sitio de Pavayacu ha superado de manera óptima la biorremediación de suelos contaminados con hidrocarburos (% TPH) con la aplicación de la ANC y los procesos de saturación de suelos contaminados con hidrocarburos (% TPH), encuadrándose en los estándares de calidad ambiental de suelos y los límites máximos permisibles regulados por ley (ECA y LPM del MINAM).

7.2.7 Corrientes:

En la zona de Batería 2 – Sitio 2, se recogieron diez muestras de suelo obteniéndose valores iniciales de volúmenes de aceite y volúmenes de agua, que fueron programados para una medición cada siete días, verificándose posteriormente una reducción del nivel de las muestras en la fase final que se hallan reflejados en los volúmenes de oxígeno captado producto de la saturación experimental, excepto en las muestras uno y dos (de 4.8 ml a 6.2 ml, y de 4.2 ml a 7.2 ml, respectivamente), donde el valor del agua se incrementó. En similares condiciones a las demás zonas de estudio, se puede apreciar la sustantiva variación de la cantidad de agua y aceite durante la remediación del suelo contaminado, que ocasiona un incremento de captación de oxígeno en inversa proporcionalidad a la reducción de los elementos biodegradadores, para restablecer la composición nativa del suelo contaminado. La **Tabla 34** recoge la secuencia de biodegradación del suelo bajo estas condiciones de saturación.

Tabla 34. *Variación del Aceite, Agua y Oxígeno en la Batería 2 – Sitio 2 (Corrientes)*

<i>Aceite y agua en la biodegradación</i>						
<i>INICIO</i>		<i>FINAL</i>		<i>Captación de oxígeno</i>		
V aceite (ml)	V agua (ml)	V aceite (ml)	V agua (ml)	V perdido de aceite	V perdido de agua	V captado de oxígeno
0.6	4.8	0.2	6.2	0.4	1.4	0.4
0.8	4.2	0.4	7.2	0.4	3	0.4
1.0	5.2	0.4	4.8	0.6	0.4	1.0
1.2	6.2	0.2	5.0	1.0	1.2	2.2
1.4	7.2	0.2	5.2	1.2	2	3.2
1.6	8.2	0.6	5.2	1.0	3.0	4.0
1.8	9.2	0.4	4.6	1.4	4.6	6.0
2.0	10.2	0.1	3.9	1.9	6.3	8.2
2.2	11.2	0.2	5.4	2.0	5.8	7.8
2.4	12.2	0.1	4.2	2.3	8.0	10.3

Adaptado según la base de datos de la tesis doctoral del Dr. Jesús G. López Sangama.

7.2.8 Análisis estadístico

Prueba de normalidad

Se consideraron diez datos de la **Tabla 34** para el volumen de aceite inicial y el volumen de aceite final ($n < 30$). Entonces debido al tamaño de la muestra, la prueba a elegir fue “Shapiro-Wilk”. Se establecieron las siguientes hipótesis: hipótesis nula (**H₀**) los datos se distribuyen normalmente, e hipótesis alterna (**H_a**) los datos no se distribuyen normalmente.

Tabla 35. Prueba de normalidad en Corrientes (Saturación)

	Pruebas de normalidad					
	Kolmogorov-Smirnov ^a			Shapiro-Wilk		
	Estadístico	gl	Sig.	Estadístico	gl	Sig.
Volumen Inicial	,096	10	,200*	,970	10	,892
Volumen Final	,289	10	,017	,869	10	,098

*. Esto es un límite inferior de la significación verdadera.

a. Corrección de significación de Lilliefors

Nota: Nivel de significancia al 5 %. Fuente SPSS.

De acuerdo con la **Tabla 35**, en la prueba de “Shapiro-Wilk” se obtuvieron los siguientes niveles de significancia para el volumen de aceite inicial y el volumen de aceite final (0,892; 0,098). Por lo tanto, en ambos casos, se acepta la hipótesis nula por ser superior al 5%. El tamaño de la muestra es relativamente pequeño, aunque la distribución de los datos es normal. Por esta razón, se sugiere realizar la prueba no paramétrica de Wilcoxon para dos grupos relacionados al tratar de pocos datos.

Tabla 36. Prueba de los rangos con signo de Wilcoxon en Corrientes (Saturación)

Resumen de prueba de rangos con signo de Wilcoxon para muestras relacionadas

N total	10
Estadístico de prueba	,000
Error estándar	9,798
Estadístico de prueba estandarizado	-2,807
Sig. asintótica (prueba bilateral)	,005

Nota: Rangos obtenidos del análisis estadístico. Fuente SPSS.

Se tomaron en cuenta las siguientes hipótesis al ejecutarse la prueba de Wilcoxon (**Tabla 36**): hipótesis nula (**H₀**) las medianas de la concentración del volumen de aceite inicial y del volumen de aceite final son iguales, e hipótesis alterna (**H_a**) las medianas de la concentración del volumen de aceite inicial y del volumen de aceite final no son iguales.

Tabla 37. Contrastación de la Hipótesis en Corrientes (Saturación)

Resumen de contrastes de hipótesis				
	Hipótesis nula	Prueba	Sig.	Decisión
1	La mediana de diferencias entre Volumen Inicial y Volumen Final es igual a 0.	Prueba de rangos con signo de Wilcoxon para muestras relacionadas	,005	Rechace la hipótesis nula.

Se muestran significaciones asintóticas. El nivel de significación es de ,050.

Nota: **SIG** = 0.005 < 0.05 entonces se rechaza la **H₀**. Fuente SPSS.

Según la información de la **Tabla 37**, con un nivel de significación del 5 % se puede afirmar que; el volumen de inicial no es el mismo que el volumen de aceite final porque existe una diferencia significativa entre las medianas. En el sitio de Corrientes, igualmente se logró verificar la validez de la ANC y la efectividad de los procesos de saturación de suelos permitiendo la descontaminación biodegradadora según los estándares de calidad ambiental de suelos y los límites máximos permisibles regulados por ley (ECA y LPM del MINAM).

7.3 Determinación de biorremediación por volteo del suelo

Objetivo específico 3: Interpretar la variación de la concentración de Hidrocarburos Totales de Petróleo (TPH) en la base de datos luego de emplear volteos del suelo, en las zonas de estudio de Capirona, Valencia, Pavayacu y Corrientes en el Lote 8 (Loreto) en el año 2015.

7.3.1 Capirona

El procedimiento de aireación y remoción del suelo contaminado fue realizado en ocho muestras experimentales de volteo, implementadas en tres etapas de ejecución y habiéndose programado los periodos de aireación con una frecuencia de quince días. En la primera etapa se obtuvieron valores con un promedio de 2.03 % TPH, para la segunda etapa se promedió 1.83 % TPH y finalmente en la tercera etapa un promedio de 1.00% TPH, tal como se resume en la **Tabla 38**. También se puede observar que la aireación por remoción facilitó la biodegradación en función del valor de TPH (%), notándose que cuantas más remociones se practicaban, éstas disminuían en los valores de TPH (%), debido a la oxigenación de las bacterias, metabolismo y destrucción de la cadena carbonosa en la transformación a otros compuestos químicos.

Tabla 38. *Aireación y Remoción del Suelo Contaminado en la Estación de Bombas*

<i>Estación de Bombas</i>			
<i>Volteos para la aireación</i>			
	Primera remoción	Segunda remoción	Tercera remoción
Volteos	TPH (%)	TPH (%)	TPH (%)
I	4.2	3.2	1.14
II	3.0	2.9	1.15
III	2.5	2.5	1.13
IV	0.8	0.7	1.15
V	3.0	2.7	1.14
VI	1.0	1.1	1.11
VII	1.0	1.0	0.00
VIII	0.7	0.5	1.18
PROMEDIO	2.03	1.83	1.00

Adaptado según la base de datos de la tesis doctoral del Dr. Jesús G. López Sangama.

7.3.2 Análisis estadístico

Prueba de normalidad

Se consideraron ocho datos de la **Tabla 38** para la primera remoción, segunda remoción y tercera remoción ($n < 30$). Por lo tanto, debido al tamaño de la muestra, la prueba a elegir fue “Shapiro-Wilk”. Se establecieron las siguientes hipótesis: hipótesis nula (**H₀**)

los datos se distribuyen normalmente, e hipótesis alterna (**Ha**) los datos no se distribuyen normalmente.

Tabla 39. Prueba de normalidad en Capirona (Volteos)

	Pruebas de normalidad					
	Kolmogorov-Smirnov ^a			Shapiro-Wilk		
	Estadístico	gl	Sig.	Estadístico	gl	Sig.
1ra Remoción	,281	8	,062	,864	8	,131
2da Remoción	,245	8	,174	,862	8	,126
3ra Remoción	,482	8	,000	,465	8	,000

a. Corrección de significación de Lilliefors

Nota: Nivel de significancia al 5 %. Fuente SPSS.

De acuerdo con la **Tabla 39**, en la prueba de “Shapiro-Wilk” se obtuvieron los siguientes niveles de significancia para la primera remoción, segunda remoción y tercera remoción (0,131; 0,126; 0,000). Solamente la 1ra y 2da remoción supera la prueba de normalidad, mientras que la 3ra remoción es la única que no lo supera. Por lo tanto, se aplicará la prueba no paramétrica de Friedman para tres o más grupos relacionados.

Tabla 40. Prueba de Friedman en Capirona (Volteos)

Resumen de la prueba de Friedman para muestras relacionadas para análisis de la varianza de dos factores por rangos	
N total	8
Estadístico de prueba	1,867 ^a
Grado de libertad	2
Sig. asintótica (prueba bilateral)	,393

a. No se realizan múltiples comparaciones porque la prueba global ha retenido la hipótesis nula de ninguna diferencia.

Nota: Rangos obtenidos del análisis estadístico. Fuente SPSS.

Se tomaron en cuenta las siguientes hipótesis al ejecutarse la prueba de Wilcoxon (**Tabla 40**): hipótesis nula (**Ho**) las medianas de la concentración del TPH en las tres remociones son iguales, e hipótesis alterna (**Ha**) al menos una de las medianas de la concentración del TPH en las tres remociones no son iguales.

Tabla 41. Contrastación de la Hipótesis en Capirona (Volteos)

Resumen de contrastes de hipótesis				
	Hipótesis nula	Prueba	Sig.	Decisión
1	Las distribuciones de 1ra Remoción, 2da Remoción y 3ra Remoción son iguales.	Prueba de Friedman para muestras relacionadas para análisis de la varianza de dos factores por rangos	,393	Conserve la hipótesis nula.

Se muestran significaciones asintóticas. El nivel de significación es de ,050.

Nota: **SIG** = 0.393 < 0.05 entonces se acepta la **H₀**. Fuente SPSS.

Según la información de la **Tabla 41**, con un nivel de significación del 5 % se puede afirmar que las concentraciones del TPH en la primera remoción, la segunda remoción y la tercera remoción son similares porque no se observa una diferencia significativa entre las medianas. No obstante, eso no quiere decir que no haya habido una disminución en las concentraciones del TPH en la Estación de Bombas. Estadísticamente la reducción ha sido mínima, por lo que no es observable en valores numéricos relevantes (**Tabla 38**). La implementación de la ANC y los procedimientos de biodegradación por volteo de suelos (remoción) correspondiente al sitio de Capirona, permitieron verificar la eficacia del método que facilitaron la volatilización de los contaminantes y el estímulo de la actividad microbiana.

7.3.3 Valencia

El procedimiento de aireación y remoción del suelo contaminado fue aplicado en cuatro muestras experimentales de volteo implementadas en tres etapas, habiéndose programado los periodos de aireación con una frecuencia de quince días.; la primera etapa con valores promedio de 2.025 % TPH, la segunda etapa se promedió 1.50 % TPH y finalmente en la tercera etapa se obtuvo un promedio de 0.8795 % TPH, tal como se resume en la **Tabla 42**.

Tabla 42. Aireación y Remoción del Suelo Contaminado en la Plataforma 74

Plataforma 74

<i>Volteos para la aireación</i>			
	Primera remoción	Segunda remoción	Tercera remoción
Volteos	TPH (%)	TPH (%p)	TPH (%)
I	2.1	1.5	1.0923
II	1.8	1.0	1.1468
III	2.0	1.5	0.7101
IV	2.2	2.0	0.5687
TOTAL	2.025	1.5	0.8795

Adaptado según la base de datos de la tesis doctoral del Dr. Jesús G. López Sangama.

7.3.4 Análisis estadístico

Prueba de normalidad

Se consideraron cuatro datos de la **Tabla 42** para la primera remoción, segunda remoción y tercera remoción ($n < 30$). Entonces debido al tamaño de la muestra, la prueba a elegir fue “Shapiro-Wilk”. Se establecieron las siguientes hipótesis: hipótesis nula (**H₀**) los datos se distribuyen normalmente, e hipótesis alterna (**H_a**) los datos no se distribuyen normalmente.

Tabla 43. Prueba de normalidad en Valencia (Volteos)

	Pruebas de normalidad					
	Kolmogorov-Smirnov ^a			Shapiro-Wilk		
	Estadístico	gl	Sig.	Estadístico	gl	Sig.
1ra Remoción	,192	4	.	,971	4	,850
2da Remoción	,250	4	.	,945	4	,683
3ra Remoción	,270	4	.	,881	4	,344

a. Corrección de significación de Lilliefors

Nota: Nivel de significancia al 5 %. Fuente SPSS.

De acuerdo con la **Tabla 43**, en la prueba de “Shapiro-Wilk” se obtuvieron los siguientes niveles de significancia para la primera remoción, la segunda remoción y la tercera remoción: (0,850; 0,683; 0,344). Por lo tanto, en los tres casos al ser mayores del 5 %, la hipótesis nula es aceptada. Aunque la distribución de los datos es normal, el tamaño de la muestra es muy pequeño, por lo cual es recomendable realizar la prueba no paramétrica de Friedman para tres o más grupos relacionados al tratarse de pocos datos.

Tabla 44. Prueba de Friedman en Valencia (Volteos)

Resumen de la prueba de Friedman para muestras relacionadas para análisis de la varianza de dos factores por rangos

N total	4
Estadístico de prueba	6,500
Grado de libertad	2
Sig. asintótica (prueba bilateral)	,039

Nota: Rangos obtenidos del análisis estadístico. Fuente SPSS.

Se tomaron en cuenta las siguientes hipótesis al ejecutarse la prueba de Wilcoxon (**Tabla 44**): hipótesis nula (**H₀**) las medianas de la concentración del TPH en las tres remociones son iguales, e hipótesis alterna (**H_a**) al menos una de las medianas de la concentración del TPH en las tres remociones no son iguales.

Tabla 45. Contrastación de la Hipótesis en Valencia (Volteos)

Resumen de contrastes de hipótesis

	Hipótesis nula	Prueba	Sig.	Decisión
1	Las distribuciones de 1ra Remoción, 2da Remoción y 3ra Remoción son iguales.	Prueba de Friedman para muestras relacionadas para análisis de la varianza de dos factores por rangos	,039	Rechace la hipótesis nula.

Se muestran significaciones asintóticas. El nivel de significación es de .050.

Nota: **SIG** = 0.039 < 0.05 entonces se rechaza la **H₀**. Fuente SPSS.

Según la información de la **Tabla 45**, con un nivel de significación del 5 % se puede afirmar que las concentraciones del TPH en la primera remoción, la segunda remoción y la tercera remoción no son similares porque existe una diferencia significativa entre las medianas. Por lo mencionado, se decidió a ejecutar una prueba de comparaciones múltiples para detectar cuál es la mediana que está causando esta diferencia relevante con respecto al resto de medianas.

Tabla 46. Prueba de comparación múltiple en Valencia (Volteos)

Comparaciones por parejas					
Sample 1-Sample 2	Estadístico de prueba	Desv. Error	Desv. Estadístico de prueba	Sig.	Sig. ajustada ^a
3ra Remoción-2da Remoción	,500	,707	,707	,480	1,000
3ra Remoción-1ra Remoción	1,750	,707	2,475	,013	,040
2da Remoción-1ra Remoción	1,250	,707	1,768	,077	,231

Cada fila prueba la hipótesis nula que las distribuciones de la Muestra 1 y la Muestra 2 son iguales. Se visualizan las significaciones asintóticas (pruebas bilaterales). El nivel de significación es de .05.

a. Los valores de significación se han ajustado mediante la corrección Bonferroni para varias pruebas.

Nota: Rangos obtenidos del análisis estadístico. Fuente SPSS.

Conforme se muestra en la **Tabla 46**, el grupo de la tercera remoción y la primera remoción presentan un nivel de significación de 0,040 ($\alpha = 0.05$). Entonces se puede afirmar que la mediana de la tercera remoción no es similar al de la primera remoción. Respecto al sitio de Valencia, se verificó la efectividad de la ANC y los procedimientos de biodegradación aerobia por volteo de suelos (remoción) demostrándose la reducción de las tasas contaminantes de hidrocarburos (% TPH).

7.3.5 Pavayacu

El procedimiento de aireación y remoción del suelo contaminado fue administrado en ocho muestras experimentales de volteo, implementadas en tres etapas de remoción con una periodicidad de quince días; la primera etapa con valores promedio de 1.7375 % TPH, la segunda etapa con un promedio de 1.6 % TPH y finalmente en la tercera etapa se alcanzó un promedio de 0.85 % TPH, tal como se muestra en la **Tabla 47**.

Tabla 47. Aireación y Remoción del Suelo Contaminado en la Plataforma 130

Plataforma 130			
Volteos para la aireación			
	Primera remoción	Segunda remoción	Tercera remoción
Volteos	TPH (%)	TPH (%)	TPH (%)
I	3.5	3.1	1.1
II	1.2	1.0	0.6
III	1.1	0.9	1.1
IV	0.9	0.9	0.6

V	0.9	1.1	0.0
VI	0.8	0.7	1.1
VII	2.2	2.1	2.3
VIII	3.3	3.0	0.0
PROMEDIO	1.7375	1.6	0.85

Adaptado según la base de datos de la tesis doctoral del Dr. Jesús G. López Sangama.

7.3.6 Análisis estadístico

Prueba de normalidad

Se consideraron ocho datos de la **Tabla 47** para la primera remoción, segunda remoción y tercera remoción ($n < 30$). En consecuencia y debido al tamaño de la muestra, la prueba a elegir fue “Shapiro-Wilk”. Se establecieron las siguientes hipótesis: hipótesis nula (**H₀**) los datos se distribuyen normalmente, e hipótesis alterna (**H_a**) los datos no se distribuyen normalmente.

Tabla 48. Prueba de normalidad en Pavayacu (Volteos)

	Pruebas de normalidad					
	Kolmogorov-Smirnov ^a			Shapiro-Wilk		
	Estadístico	gl	Sig.	Estadístico	gl	Sig.
1ra Remoción	,310	8	,023	,789	8	,022
2da Remoción	,318	8	,017	,793	8	,024
3ra Remoción	,189	8	,200*	,931	8	,522

*. Esto es un límite inferior de la significación verdadera.

a. Corrección de significación de Lilliefors

Nota: Rangos obtenidos del análisis estadístico. Fuente SPSS.

De acuerdo con la **Tabla 48**, en la prueba de “Shapiro-Wilk” se obtuvieron los siguientes niveles de significancia para la Primera Remoción, Segunda Remoción y Tercera Remoción (0,022; 0,024; 0,522). Solamente la 1ra y 2da remoción supera la prueba de normalidad, mientras que la 3ra remoción es la única que no lo supera. Por lo tanto, se aplicará la prueba no paramétrica de Friedman para tres o más grupos relacionados.

Tabla 49. Prueba de Friedman en Pavayacu (Volteos)

Resumen de la prueba de Friedman para muestras relacionadas para análisis de la varianza de dos factores por rangos

N total	8
Estadístico de prueba	2,067 ^a
Grado de libertad	2
Sig. asintótica (prueba bilateral)	,356

a. No se realizan múltiples comparaciones porque la prueba global ha retenido la hipótesis nula de ninguna diferencia.

Nota: Rangos obtenidos del análisis estadístico. Fuente SPSS.

Se tomaron en cuenta las siguientes hipótesis al ejecutarse la prueba de Wilcoxon (**Tabla 49**): hipótesis nula (**H₀**) las medianas de la concentración del TPH en las tres remociones son iguales, e hipótesis alterna (**H_a**) al menos una de las medianas de la concentración del TPH en las tres remociones no son iguales.

Tabla 50. Contrastación de la Hipótesis en Pavayacu (Volteos)

Resumen de contrastes de hipótesis

	Hipótesis nula	Prueba	Sig.	Decisión
1	Las distribuciones de 1ra Remoción, 2da Remoción y 3ra Remoción son iguales.	Prueba de Friedman para muestras relacionadas para análisis de la varianza de dos factores por rangos	,356	Conserve la hipótesis nula.

Se muestran significaciones asintóticas. El nivel de significación es de .050.

Nota: **SIG** = 0.356 > 0.05 entonces se acepta la **H₀**. Fuente SPSS.

Según la información de la **Tabla 50**, con un nivel de significación del 5 % se puede decir que, las concentraciones del TPH en la primera remoción, la segunda remoción y la tercera remoción son similares porque no se observa una diferencia significativa entre las medianas. No obstante, esto no significa que no haya existido una disminución en las concentraciones del TPH en la Plataforma 130. Estadísticamente la reducción ha sido mínima, por lo que no es observable en valores numéricos relevantes (**Tabla 47**). En el sitio de Pavayacu la aplicación de la ANC y los procedimientos de biodegradación

aerobia por volteo de suelos (remoción) fueron efectivos como tratamientos de recuperación.

7.3.7 Corrientes

El procedimiento de aireación y remoción del suelo contaminado fue ejecutado en diez muestras experimentales de volteo, implementadas en tres diferentes etapas de remoción, con una periodicidad de quince días; la primera etapa con valores promedio de 5.45 % TPH, en la segunda etapa se promedió 3.79 % TPH y finalmente en la tercera etapa se logró promedio de 1.30 % TPH, tal como se indica en la **Tabla 51**.

Tabla 51. Aireación y Remoción del Suelo Contaminado en la Batería 2 – Sitio 2

<i>Batería 2 – Sitio 2</i>			
<i>Volteos para la aireación</i>			
	Primera remoción	Segunda remoción	Tercera remoción
Volteos	TPH (%)	TPH (%)	TPH (%)
I	3.6	3.0	0.96
II	3.9	2.9	2.00
III	4.1	3.5	1.80
IV	4.5	3.1	0.86
V	5.0	3.9	0.91
VI	6.1	4.1	2.78
VII	8.1	6.1	1.89
VIII	7.5	4.1	0.42
IX	5.5	4.2	0.91
X	6.2	3.0	0.49
PROMEDIO	5.45	3.79	1.30

Adaptado según la base de datos de la tesis doctoral del Dr. Jesús G. López Sangama.

7.3.8 Análisis estadístico

Prueba de normalidad

Se consideraron diez datos de la **Tabla 51** para la primera remoción, segunda remoción y tercera remoción ($n \geq 30$). Por lo tanto, debido al tamaño de la muestra, la prueba a elegir fue “Kolmogorov-Smirnov”. Se establecieron las siguientes hipótesis: hipótesis

nula (**H₀**) los datos se distribuyen normalmente, e hipótesis alterna (**H_a**) los datos no se distribuyen normalmente.

Tabla 52. Prueba de normalidad en Corrientes (Volteos)

Pruebas de normalidad						
	Kolmogorov-Smirnov ^a			Shapiro-Wilk		
	Estadístico	gl	Sig.	Estadístico	gl	Sig.
1ra Remoción	,133	10	,200 [*]	,937	10	,522
2da Remoción	,235	10	,126	,817	10	,023
3ra Remoción	,272	10	,035	,895	10	,194

*. Esto es un límite inferior de la significación verdadera.

a. Corrección de significación de Lilliefors

Nota: Nivel de significancia al 5 %. Fuente SPSS.

De acuerdo con la **Tabla 52**, en la prueba de “Shapiro-Wilk” se obtuvieron los siguientes niveles de significancia para la primera remoción, la segunda remoción y la tercera remoción (0,522; 0,023; 0,194). Solamente la 1ra y 3ra remoción supera la prueba de normalidad, mientras que la 2da remoción es la única que no lo supera. Por lo tanto, se aplicará la prueba no paramétrica de Friedman para tres o más grupos relacionados.

Tabla 53. Prueba de Friedman en Corrientes (Volteos)

Resumen de la prueba de Friedman para muestras relacionadas para análisis de la varianza de dos factores por rangos	
N total	10
Estadístico de prueba	20,000
Grado de libertad	2
Sig. asintótica (prueba bilateral)	,000

Nota: Rangos obtenidos del análisis estadístico. Fuente SPSS.

Se tomaron en cuenta las siguientes hipótesis al ejecutarse la prueba de Wilcoxon (**Tabla 53**): hipótesis nula (**H₀**) las medianas de la concentración del TPH en las tres remociones son iguales, e hipótesis alterna (**H_a**) al menos una de las medianas de la concentración del TPH en las tres remociones no son iguales.

Tabla 54. *Contrastación de la Hipótesis en Corrientes (Volteos)*

Resumen de contrastes de hipótesis				
	Hipótesis nula	Prueba	Sig.	Decisión
1	Las distribuciones de 1ra Remoción, 2da Remoción y 3ra Remoción son iguales.	Prueba de Friedman para muestras relacionadas para análisis de la varianza de dos factores por rangos	,000	Rechace la hipótesis nula.

Se muestran significaciones asintóticas. El nivel de significación es de ,050.

Nota: **SIG** = 0.000 < 0.05 entonces se rechaza la **H₀**. Fuente SPSS.

Según la información de la **Tabla 54**, con un nivel de significación del 5 % se puede afirmar que, las concentraciones del TPH en la primera remoción, la segunda remoción y la tercera remoción no son iguales porque se distingue una diferencia significativa entre las medianas. Por lo mencionado, se decidió a ejecutar una prueba de comparaciones múltiples para detectar cuál es la mediana que está causando diferencia relevante con respecto al resto de medianas.

Tabla 55. *Prueba de comparación múltiple en Corrientes (Volteos)*

Comparaciones por parejas					
Sample 1-Sample 2	Estadístico de prueba	Desv. Error	Desv. Estadístico de prueba	Sig.	Sig. ajustada ^a
3ra Remoción-2da Remoción	1,000	,447	2,236	,025	,076
3ra Remoción-1ra Remoción	2,000	,447	4,472	,000	,000
2da Remoción-1ra Remoción	1,000	,447	2,236	,025	,076

Cada fila prueba la hipótesis nula que las distribuciones de la Muestra 1 y la Muestra 2 son iguales. Se visualizan las significaciones asintóticas (pruebas bilaterales). El nivel de significación es de ,05.

a. Los valores de significación se han ajustado mediante la corrección Bonferroni para varias pruebas.

Nota: Rangos obtenidos del análisis estadístico. Fuente SPSS.

Conforme se muestra en la **Tabla 55**, el grupo de la tercera remoción y la primera remoción presentan un nivel de significación de 0,000 ($\alpha = 0.05$). En consecuencia, se puede afirmar que la mediana de la tercera remoción no es igual al de la primera remoción. Finalmente, los resultados en el sitio de Corrientes permitieron verificar la eficacia de la ANC y los procedimientos de biodegradación aerobia por volteo de suelos (remoción) en condiciones parecidas a las demás zonas de estudio, particularmente en los aspectos de

volatilización de los contaminantes y el estímulo de la actividad microbiana descontaminante.

VIII. DISCUSIÓN

La valoración científica obtenida de los resultados de la presente investigación, han permitido confirmar que la atenuación natural controlada (ANC) puede reducir el porcentaje de Hidrocarburos Totales de Petróleo (TPH) en sitios contaminados con hidrocarburos en la Amazonía peruana, según la norma nacional regulatoria para sitios contaminados, con el agregado que esta técnica de biorremediación puede combinarse con otras metodologías innovadoras para incrementar su eficacia. Se debe enfatizar que este estudio estuvo dirigido a analizar una parte inédita de un conjunto de pruebas experimentales realizadas en la región amazónica de Loreto, Perú en 2015 y que se hallan contenidas en una amplia base de datos (data) y parcialmente utilizada en la tesis doctoral del Dr. Jesús G. López Sangama. El objetivo consistió en efectuar el análisis de una nueva información no procesada y debidamente recopilada para aplicar el método de la ANC, siguiendo la línea metodológica del diseño de la investigación programada (VI. Metodología, párrafo 1) y el flujograma de trabajo estructurado (**Figura 3**) para este fin, buscando determinar el comportamiento y variación de las concentraciones de hidrocarburos (TPH) en los datos experimentales consignados. Esta importancia se relievra además considerando los graves antecedentes y secuelas no resueltas de más de 50 años de contaminación por hidrocarburos ocurridas en la Amazonía peruana, tal como se menciona en el Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo y el Estudio Técnico Independiente del Lote 8 (PNUD – ETI 2022) que alerta sobre esta problemática y resalta la ausencia de políticas de remediación ambiental consecuencia directa de una escasa información científica pertinente. Respecto a la metodología de la investigación sustentada en la ANC y en base de los resultados obtenidos se efectuó el análisis

estadístico correspondiente, comprobándose que estos datos estaban catalogados como valores porcentuales de hidrocarburos totales de petróleo (% TPH) y de esta forma fueron consignados sistémicamente. Bajo esta perspectiva al final de la investigación analítica se pudo determinar que estos indicadores se encontraban por debajo de lo bióticamente permisible (< 3 % TPH), verificados según los estándares de calidad ambiental (ECA) y los límites máximos permisibles (LMP), entre otras normas nacionales obligatorias de gestión ambiental (ECA de suelo, y LMP – MINAM).

Los Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para suelo del Ministerio del Ambiente (2017) respecto a la concentración de TPH establece tres categorías de suelos: suelo agrícola, suelo residencial/parques y suelo comercial/industrial/extractivo (ECA para suelo, MINAM, 2017). Según estas disposiciones, el caso aplicable a la zona de investigación corresponde al suelo agrícola (zona de producción forestal), donde las concentraciones de TPH no deben ser mayores a parámetros en 200 mg/kg para PPH F1 o fracción de hidrocarburos ligera (C6 - C10), 1200 m/kg para TPH F2 o fracción de hidrocarburos media (> C10 a C28) y 3000 mh/kg para TPH F3 o fracción de hidrocarburos pesada (> 28 a C40). En las zonas de estudio los parámetros de TPH F1 (fracción ligera) no se registraron por la irrelevancia de las muestras del suelo contaminado, resaltando las muestras TPH F2 (fracción media) y TPH F3 (fracción pesada) que superaron todos los valores contaminantes permisibles del ECA para suelo, constituyéndose la fracción F3 en la mayor cantidad muestral existente y por lo tanto fue el elemento vinculante de nocividad ambiental.

En ese sentido, las técnicas de bioaumentación y bioestimulación fueron verificadas en la interrelación conjunta de los procesos de adición de nutrientes (N, P), mediciones de la saturación del suelo y volteo del suelo (aireación), efectuándose el seguimiento de la

actividad microbiológica de los agentes nativos del suelo y la degradación natural de los hidrocarburos (TPH) según la exposición existente en la data disponible.

Siguiendo esa misma línea, en las investigaciones de Cuadros-Pedraza (2021) se estudiaron y compararon dos procesos de biorremediación. La técnica de bioestimulación (M1) consistió en añadir 50 ml de bacterias *Pseudomona* a la biorremediación del suelo, mientras que la técnica de bioaumentación (M2) consistió en añadir 50 ml de *humus* derivado de lombrices rojas de California, ambos creados orgánicamente en el laboratorio. La técnica de bioaumentación redujo el contenido de TPH hasta en un 75,4%, mientras que el sistema de bioestimulación lo hizo en un 54,9% durante el mismo periodo de tiempo (12 semanas).

En función al orden metodológico planteado para el análisis de la base datos (data) investigada y habiéndose post utilizado la ANC mediante la técnica de adición de nutrientes (N, P), se puede afirmar que la hipótesis específica 1 planteada en la investigación es aceptada, por cuanto se ha comprobado la eficiencia de la reducción de las concentraciones iniciales de TPH contaminantes en suelos, facilitándose la biodegradación hasta conseguir concentraciones finales de TPH menores al 3 % TPH (< 3000 mg/kg) en los cuatro sitios contaminados de la Amazonía peruana.

El estudio constató que la caracterización de las muestras edáficas para la adición de nutrientes se realizó después de una preparación suficiente del suelo en las cuatro áreas de estudio, observándose que la evolución de las muestras representativas del suelo con concentración contaminante de TPH utilizadas en la fase experimental, mostraron finalmente una reducción significativa bajo una relación inversamente proporcional, con un promedio de 25,26 %, en relación a la adición y consumo de los nutrientes registrados inicialmente.

De esta forma fue posible confirmar que las técnicas de biodegradación y la volatilización produjeron la reducción de las concentraciones del agente contaminante (TPH) a partir de los datos colectados de la adición y consumo de nutrientes para todas las áreas de estudio. Esto se debió a que los resultados de las muestras se estabilizaron gradualmente, aumentando la homogeneidad remediante del suelo tratado.

Estos resultados pueden confrontarse analógicamente con diversas técnicas de biorremediación como puede ser el caso del uso de estiércol y aserrín (Alanya de la Cruz & Clemente Huamán, 2022), del estiércol bovino (Malaver Flor & Muñoz Sanchez, 2018), con la aplicación de biomasa animal (Salas Pineda & Ventura Salazar, 2020) y de verificar el efecto remediador en el suelo utilizando el *humus* de lombriz (Rodríguez Berna, 2018). Así mismo, son válidas las investigaciones sobre la aplicación de lodos biorremediadores de suelos (Villena Vergara, 2019) y el efecto del biocarbón en la inmovilización de hidrocarburos en suelos contaminados (Ruiz Torrado, 2019).

De forma similar, estas deducciones se vinculan con los trabajos de Muthukumar et al. (2023), donde se utilizaron mezclas de *Pseudomonas aeruginosa* PP3 y *Pseudomonas aeruginosa* PP4 para evaluar la eliminación del TPH de suelos contaminados por lodos de aceite de motor y petróleo crudo. Las tasas de eliminación de TPH fueron del 52 % y el 67 %, respectivamente. Los consorcios bacterianos descompusieron con éxito hidrocarburos que contenían petróleo, con eficiencias de degradación del 65 % y el 83 % para ambos suelos.

Respecto a la saturación del suelo, al haberse consolidado la información experimental y efectuada la contrastación del análisis de la base datos (data) investigada y con la post utilización de la ANC, se acepta el planteamiento de la hipótesis específica 2, por lo que se puede afirmar que la eficiencia de reducción de las concentraciones iniciales de TPH contaminantes de suelos resultaron óptimas en los sitios de estudio. Las muestras iniciales

mostraron una disminución de los volúmenes de agua y aceite, con una proporción inversa a la absorción de oxígeno. Esto indica una saturación media del suelo del 26,33 %.

De manera analógica se pueden mencionar las investigaciones de Liu et al. (2023) donde se comparó la oxidación química del persulfato combinada con la atenuación natural y la biorremediación de suelos contaminados con hidrocarburos con diferentes dosis de PS y biorremediación sola. Después de 180 días, la oxidación de persulfato al 1 % combinada con biorremediación mostró el mejor rendimiento (80 %), seguida de la biorremediación sola (75 %), el persulfato al 1% combinado con bacterias autóctonas (54 %), y la biorremediación combinada con persulfato al 3 % y 5 % (36 - 44 %). El estudio revela que las menores concentraciones de TPH se correlacionan con una mayor captación de oxígeno debido a la heterogeneidad de los valores de TPH, lo que reduce los elementos de biodegradación. La biorremediación recupera el aire interior, reduce los altos valores de contaminación y regenera la descomposición del suelo. Aunque los resultados iniciales de las técnicas de saturación utilizadas en suelos contaminados de cuatro áreas de estudio parecían contradecirse, la comparación de los datos mostró que todas las muestras disminuían en proporciones similares y opuestas con un aumento de la oxigenación. Esto contrasta con el análisis estadístico presentado en el capítulo de Resultados, confirmando la eficacia de la biorremediación mediante la saturación del suelo. En ese sentido, diversas investigaciones corroboran el importante papel de la adición de nutrientes (N, P) como un acelerador del proceso de biodegradación de suelos (Yagual Barzola, 2020).

Igualmente, a partir de los resultados obtenidos y en base del análisis de la base datos (data) investigada y habiéndose post utilizado la ANC mediante técnicas de volteo de suelos, se afirma que la hipótesis específica 3 planteada en la presente investigación es aceptada, debido a que se ha podido comprobar que la eficiencia de reducción de las concentraciones iniciales de TPH de suelos resultaron aceptables en las pruebas

experimentales registradas. El proceso de biodegradación, que incluye medidas de descontaminación, demostró su eficacia en condiciones aeróbicas controladas al reducir los contaminantes en un 41,37 % en las eliminaciones por volteo del suelo. Esto dio lugar a resultados satisfactorios en la reducción de las concentraciones de TPH, y como luego fue confirmado mediante el análisis estadístico pertinente. La primera remoción del suelo produjo una reducción significativa de los índices de contaminación, pero los valores de TPH disminuyeron lentamente debido a la densidad del suelo. La aireación por remoción facilitó la biodegradación más rápidamente, y un mayor número de remociones condujo a una mayor disminución de los valores de TPH. Esto se debió a las medidas de reducción de TPH que generaron la oxigenación de las bacterias, el metabolismo y la destrucción de la cadena carbonosa, transformándola en otros compuestos químicos.

Estas observaciones pueden ser apoyadas mediante la introducción del diseño factorial, establecido como un método utilizado para este tipo de investigaciones y destinado a optimizar los constituyentes de la biodegradación del petróleo, lo que puede conducir a la degradación microbiana. Así, en los estudios de Okonofua et al. (2021) mediante este diseño se modificaron determinados parámetros de entrada como el pH, el contenido de humedad, la masa del sustrato y la velocidad de giro. La tasa de volteo fue la que más contribuyó a la biodegradación del petróleo, con un 83 % de la contribución. El estudio alcanzó un valor mínimo de TPH de 636 mg/kg con una fiabilidad del 98,6 %, utilizando una concentración inicial de contaminación de 5000 mg/kg, un ritmo de volteo de cinco veces por semana, un pH de 6,01, un contenido de humedad del 10% y una masa de sustrato de 1 kg.

Igualmente, son importantes las investigaciones sobre remediación de suelos efectuada por Jiménez Hernández (2018), donde se concluye afirmando que, “el acoplamiento de las tecnologías de bioaumentación, bioestimulación y bioventeo mostraron ser una

alternativa para la remediación del suelo de Agua Dulce contaminado con hidrocarburos intemperizados debido a su factibilidad y poca perturbación al suelo.” (p. 122), y también los estudios conducidos por Cruz Apunte & Lincango Tuquerres (2021) respecto del sistema de biopilas a escala de laboratorio desarrolladas como un proceso de biorremediación, mencionándose en sus conclusiones que, “se determinó que en suelos contaminados a una concentración de 10000 y 40000 ppm de diésel utilizando tanto *Trichoderma sp.* y *Bacillus pumilus* presentó una biodegradación de TPH” (p. 60).

Los resultados del análisis de los datos experimentales del estudio ponen de relieve la importancia de considerar los factores ambientales, climatológicos, territoriales, hidrológicos y biológicos de los lugares contaminados como condición previa para la biorremediación, por cuanto se consideran como factores determinantes y base antecedente indispensable para los estudios posteriores.

En efecto, el uso de diseños experimentales estáticos y matemáticos para optimizar el estudio de parámetros ambientales en la eliminación de contaminantes es sugerido por Sanusi et al. (2016). En su investigación, se logró estimar las condiciones óptimas predichas por la metodología de superficie de respuesta y las redes neuronales artificiales. Esto condujo a los siguientes resultados: para el primer caso, una eliminación máxima de TPH del 76,8 % para una concentración de gasóleo del 3 %, un día de muestreo de 72 días y una tasa de aireación de 1,77 L/min; y para el segundo caso, una eliminación máxima de TPH del 85,8 % requería una concentración de gasóleo del 3%, un día de muestreo de 72 días y una tasa de aireación de 1,02 L/min.

Por otra parte, se logró con éxito el objetivo de examinar las variaciones de concentración de TPH en suelos contaminados utilizando la atenuación natural y aplicando estrategias relacionadas con la adición de nutrientes, la saturación del suelo y el volteo del mismo. Y en ese sentido, también es pertinente mencionar la prospección de especies arbóreas

para la fitorremediación de suelos (Yoplac Vigo & Tuesta Chavez, 2018) considerando la exuberancia y frondosidad de los bosques tropicales amazónicos que proveen ingentes posibilidades de biorremediación pendientes de estudio.

Los resultados de la presente investigación demostraron que se puede inducir de manera efectiva la biorremediación, estimulando la biodegradación para conseguir una reducción significativa de las concentraciones de TPH de suelos amazónicos contaminados con hidrocarburos, concordado con las investigaciones desarrolladas en zonas amazónicas del nororiente y que dan cuenta de la eficacia del método de atenuación natural controlada y biorremediación de suelos (Fernández Valqui, 2020).

IX. CONCLUSIONES

El método de atenuación natural controlada fue implementado en las cuatro zonas de estudio de del Lote 8 (Loreto), contaminadas con una alta concentración de hidrocarburos totales de petróleo (TPH) el año 2015, pudiéndose demostrar con la presente investigación una significativa reducción del porcentaje de TPH (%) contaminante, permitiendo alcanzar los valores permisibles en un rango < 3 % TPH según el análisis de los sitios contaminados, logrando la biorremediación satisfactoria del suelo.

Según la base de datos (data) recopilada para la presente investigación, se ha realizado la comparación analítica y estadística pertinente experimentalmente para determinar la variación de la concentración de TPH (%) aplicando nutrientes (N, P) de manera controlada y adicionados en base a los valores del porcentaje de TPH del promedio de todas las muestras analizadas en las zonas de estudio de la investigación, apreciándose en los resultados un mejor desempeño en el sitio Pavayacu (37,71 % de variación), lográndose obtener en general valores por debajo del 3 % TPH según la norma legal, con

porcentajes del fósforo y potasio propiciando un suelo organolépticamente limpio y sin trazas de hidrocarburos contaminantes.

Producto de la base de datos (data) acopiada para la presente investigación, se ha realizado la comparación analítica y estadística correspondiente para determinar experimental de la variación de TPH (%) mediante la implementación de técnicas de saturación del suelo en las zonas de estudio de la investigación, observándose en los resultados que el mejor comportamiento se presentó en el sitio Corrientes (46,47 % de variación), proceso que consistió en la medición de los volúmenes de agua y aceite en relación a la captación de oxígeno del sitio contaminado para reducir el porcentaje TPH a niveles permisibles de < 3 % TPH según la norma legal, logrando finalmente una estabilización y remediación de los suelos contaminados.

Utilizando la base de datos (data) compilada para la presente investigación, se ha efectuado la interpretación analítica y estadística respectiva, para determinar similitudes entre la variación de TPH (%) empleando volteos del suelo (aireación), en las zonas de estudio de la investigación, con un mejor desempeño en el área de Capirona (49,0 % de variación), observándose que el compuesto edáfico caracterizado captó oxígeno debido a la biodegradación de los hidrocarburos en la transformación de CO₂ y H₂O reflejados en un entorno de parámetros físicos y químicos, tales como la temperatura, la humedad y la densidad, que fueron determinantes para la consecución de la remediación ambiental.

X. RECOMENDACIONES

Una técnica de recuperación ambiental que utiliza la capacidad de los microorganismos para degradar materiales y reducir las concentraciones de contaminantes en el suelo se denomina atenuación natural controlada. Como tal, puede utilizarse como proceso *in situ* para regular los nutrientes, la ventilación y la humedad en diversos tipos de suelos

contaminados por hidrocarburos. Por consiguiente, al emplear este método para la remediación del suelo, los resultados de la presente investigación experimental permitirán una investigación adicional de las bacterias autóctonas del lugar contaminado. Esta recomendación se apoya en Ambaye et al. (2022), sosteniendo que para lograr la aplicación completa de los conceptos de remediación sostenible, debe abordarse como una nueva forma de pensar sobre la rehabilitación de áreas contaminadas, donde la integración de variables económicas, ambientales y sociales se considera como un elemento básico en la toma de decisiones. Podría aconsejarse ampliar su aplicación a lugares con un porcentaje promedio de TPH superior a la alta adaptabilidad de degradación de las pruebas experimentales. Xuezhi et al. (2020) señalan que la atenuación natural podría no ser suficiente por sí sola para remediar a tiempo los lugares contaminados. En esta situación, la atenuación natural puede vincularse con el landfarming, por ejemplo, para reducir el riesgo y aumentar las tasas de limpieza, junto con operaciones de ingeniería.

Promover una visión integradora en la metodología científica que se desarrolla en la investigación sería acertado, sobre todo en relación con el trabajo experimental *in situ*, ya que una dependencia excesiva de los experimentos *ex situ* no consigue recrear adecuadamente el complejo ecosistema biótico que se encuentra en el entorno natural del suelo, lo que puede dar lugar a resultados limitados obtenidos en condiciones primarias que, en última instancia, pueden disminuir su utilidad científica. La investigación futura debe adoptar nuevas técnicas que proporcionen una descripción más precisa de las fuentes de emisión y controlar con precisión la atenuación y el destino de los compuestos de HTP resultantes de los procesos de sorción, dilución y biodegradación (Nwaichi et al., 2022).

Al utilizar este enfoque de rehabilitación, se recomienda tener en cuenta los aspectos medioambientales, topográficos, demográficos, hidrológicos y biológicos del

emplazamiento. Se debe determinar el tipo de contaminación (orgánica o inorgánica), su concentración y las propiedades fisicoquímicas del suelo. Grifoni et al. (2022) apoyan esta posición destacando la importancia de apreciar los cambios ambientales que influyen en los mecanismos de adsorción-desorción o en el cambio de la masa microbiana y la disponibilidad de oxígeno y nutrientes; y también afirma que factores como el cambio climático, la tasa de recarga de las aguas subterráneas, los compuestos inorgánicos, el uso del suelo y otros elementos que alteran el suelo y pueden influir en la adsorción y biodegradación.

XI. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aguilar-Romero, I., van Dillewijn, P., Nesme, J., Sørensen, S. J., Nogales, R., Delgado-Moreno, L., & Romero, E. (2022). A novel and affordable bioaugmentation strategy with microbial extracts to accelerate the biodegradation of emerging contaminants in different media. *Science of the Total Environment*, 834(April 2022). <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.155234>
- Alanya de la Cruz, V., & Clemente Huamán, O. (2022). *Uso de estiércol bos taurus y aserrín polylepis para la biorremediación de suelos contaminados por hidrocarburos de petróleo en la ciudad de Huancavelica, 2021* [Universidad Nacional de Huancavelica]. <http://repositorio.unh.edu.pe/handle/UNH/2755>
- Ambaye, T. G., Chebbi, A., Formicola, F., Prasad, S., Gomez, F. H., Franzetti, A., & Vaccari, M. (2022). Remediation of soil polluted with petroleum hydrocarbons and its reuse for agriculture: Recent progress, challenges, and perspectives. *Chemosphere*, 293, 133572. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.133572>
- Ambust, S., Das, A. J., & Kumar, R. (2021). Bioremediation of petroleum contaminated soil through biosurfactant and *Pseudomonas* sp. SA3 amended design treatments.

Current Research in Microbial Sciences, 2(March), 100031.

<https://doi.org/10.1016/j.crmicr.2021.100031>

Apul, O. G., Arrowsmith, S., Hall, C. A., Miranda, E. M., Alam, F., Dahlen, P., Sra, K., Kamath, R., McMillen, S. J., Sihota, N., Westerhoff, P., Krajmalnik-Brown, R., & Delgado, A. G. (2022). Biodegradation of petroleum hydrocarbons in a weathered, unsaturated soil is inhibited by peroxide oxidants. *Journal of Hazardous Materials*, 433(November 2021), 128770. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2022.128770>

Asemoloye, M. D., & Marchisio, M. A. (2022). Synthetic *Saccharomyces cerevisiae* tolerate and degrade highly pollutant complex hydrocarbon mixture. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 241(January), 113768.

<https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2022.113768>

Atuchin, V. V., Asyakina, L. K., Serazetdinova, Y. R., Frolova, A. S., Velichkovich, N. S., & Prosekov, A. Y. (2023). Microorganisms for Bioremediation of Soils Contaminated with Heavy Metals. *Microorganisms*, 11(4), 1–19.

<https://doi.org/10.3390/microorganisms11040864>

Baiyin, B., Tagawa, K., Yamada, M., Wang, X., Yamada, S., Yamamoto, S., & Ibaraki, Y. (2021). Study on plant growth and nutrient uptake under different aeration intensity in hydroponics with the application of particle image velocimetry. *Agricult*

Bernal, C. (2010). *Metodología de la investigación*. (3ra ed.). Pearson. ISBN 978-958-699-128-5

Bilal, M., & Chen, S. (2021). Version of Record:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301479721007477>. 0–38.

- Bremer, J. R. A. (2022). Journal of Ecosystem & Ecography Aerobic and Anaerobic Biodegradation. 12(4), 1000325. <https://doi.org/10.4172/2157-7625.1000325>
- Brown, R. W., Chadwick, D. R., Bending, G. D., Collins, C. D., Whelton, H. L., Daulton, E., Covington, J. A., Bull, I. D., & Jones, D. L. (2022). Nutrient (C, N and P) enrichment induces significant changes in the soil metabolite profile and microbial carbon partitioning. *Soil Biology and Biochemistry*, 172(February), 108779. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2022.108779>
- Calcina, L. e Hidalgo B. (2011). *Programa de Investigación en la Información de la Biodiversidad Amazónica*. Instituto de Investigación de la Amazonía Peruana (IIAP).
- Castro, A. R., Martins, G., Salvador, A. F., & Cavaleiro, A. J. (2022). Iron Compounds in Anaerobic Degradation of Petroleum Hydrocarbons: A Review. *Microorganisms*, 10(11), 1–30. <https://doi.org/10.3390/microorganisms10112142>
- CHEN, W. et al. (1999) ‘Engineering of improved microbes and enzymes for bioremediation’, *Current Opinion in Biotechnology*, 10(2), pp. 137–141. doi:10.1016/s0958-1669(99)80023-8.
- Corona Ramírez, L., & Iturbe Argüelles, R. (2005). Atenuación natural en suelos contaminados con hidrocarburos. *Ingeniería Investigación y Tecnología*, 6(2), 119–126. <https://doi.org/10.22201/ifi.25940732e.2005.06n2.008>
- Cruz Apunte, J. D., & Lincango Tuquerres, J. R. (2021). *Evaluación del proceso de biorremediación de suelos contaminados por hidrocarburos totales de petróleo utilizando Trichoderma sp. y Bacillus pumilus, mediante el sistema de biopilas a escala de laboratorio* [Universidad Politécnica Salesiana - Sede Quito].

<http://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/5081/1/UPS-CYT00109.pdf>

- Cruz Viggi, C., Tucci, M., Resitano, M., Palushi, V., Crognale, S., Maturro, B., Petrangeli Papini, M., Rossetti, S., & Aulenta, F. (2023). Enhancing the Anaerobic Biodegradation of Petroleum Hydrocarbons in Soils with Electrically Conductive Materials. *Bioengineering*, 10(4). <https://doi.org/10.3390/bioengineering10040441>
- Cuadros-Pedraza, A. D., Blanco-Zuñiga, C. R., & Rojas-Arias, N. (2021, October 31). Efficiency of biostimulation and bioaugmentation processes in the treatment of soils contaminated with hydrocarbons. *Journal of applied research and technology*. <https://www.redalyc.org/journal/474/47471704008/html/>
- El Rasafi, T., Haouas, A., Tallou, A., Chakouri, M., Aallam, Y., El Moukhtari, A., Hamamouch, N., Hamdali, H., Oukarroum, A., Farissi, M., & Haddioui, A. (2023). Recent progress on emerging technologies for trace elements-contaminated soil remediation. *Chemosphere*, 341(September), 140121. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.140121>
- Fragkou, E., Antoniou, E., Daliakopoulos, I., Manios, T., Theodorakopoulou, M., & Kalogerakis, N. (2021). In situ aerobic bioremediation of sediments polluted with petroleum hydrocarbons: A critical review. *Journal of Marine Science and Engineering*, 9(9). <https://doi.org/10.3390/jmse9091003>
- Fernández Moreno, R. C., & Tomas Robles, J. P. (2022). Dosis de materia orgánica en la reducción de hidrocarburos fracción F2 en suelo residencial utilizando girasol como indicador.
- Fernández Valqui, R. L. (2020). *Atenuación natural y biorremediación de suelos contaminados por hidrocarburos, Amazonas, Perú* [Universidad Nacional Toribio Rodríguez de Mendoza de Amazonas].

[http://repositorio.untrm.edu.pe/bitstream/handle/UNTRM/141/NIVEL DE CONOCIMIENTO SOBRE MEDIDAS PREVENTIVAS DE CÁNCER PROSTÁTICO, USUARIOS DEL CONSULTORIO EXTERNO DE MEDICINA, HOSPITAL REGIONAL VIRGEN DE FÁTIMA, CHACHAPOYAS 2015.pdf?sequence=1](http://repositorio.untrm.edu.pe/bitstream/handle/UNTRM/141/NIVEL_DE_CONOCIMIENTO SOBRE MEDIDAS PREVENTIVAS DE CÁNCER PROSTÁTICO, USUARIOS DEL CONSULTORIO EXTERNO DE MEDICINA, HOSPITAL REGIONAL VIRGEN DE FÁTIMA, CHACHAPOYAS 2015.pdf?sequence=1)

Gómez, R. (1995). *Diagnóstico sobre la contaminación ambiental en la amazonia peruana*. IIAP. <http://mddconsortium.org/wp-content/uploads/2014/11/Gomez-Garcia-IIAP-1995-Diagnostico-sobre-la-contaminaci%C3%B3n-ambiental-en-la-Amazonia-Peruana.pdf>

González Henao, S., & Ghneim-Herrera, T. (2021). Heavy Metals in Soils and the Remediation Potential of Bacteria Associated With the Plant Microbiome. *Frontiers in Environmental Science*, 9(April), 1–17. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2021.604216>

Grifoni, M., Franchi, E., Fusini, D., Vocciant, M., Barbaferi, M., Pedron, F., Rosellini, I., & Petruzzelli, G. (2022). Soil Remediation: Towards a Resilient and Adaptive Approach to Deal with the Ever-Changing Environmental Challenges. *Environments - MDPI*, 9(2), 1–15. <https://doi.org/10.3390/environments9020018>

Guo, J., & Wen, X. (2021). Performance and kinetics of benzo(a)pyrene biodegradation in contaminated water and soil and improvement of soil properties by biosurfactant amendment. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 207(July 2020), 111292. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2020.111292>

Gutiérrez, E. J., Abraham, M. D. R., Baltazar, J. C., Vázquez, G., Delgadillo, E., & Tirado, D. (2020). *Pseudomonas fluorescens*: A bioaugmentation strategy for oil-contaminated and nutrient-poor soil. *International Journal of Environmental*

Research and Public Health, 17(19), 1–14. <https://doi.org/10.3390/ijerph17196959>

Hernández, S. (2016). *Metodología de la investigación*. (6ta ed.). McGraw Hill Education. ISBN: 978-1-4562-2396-0

Hu, D., Wu, J., Fan, L., Li, S., & Jia, R. (2022). Aerobic Degradation Characteristics and Mechanism of Decabromodiphenyl Ether (BDE-209) Using Complex Bacteria Communities. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(24). <https://doi.org/10.3390/ijerph192417012>

Hu, X., Zhang, Y., Wang, D., Ma, J., Xue, K., An, Z., Luo, W., & Sheng, Y. (2023). Effects of Temperature and Humidity on Soil Gross Nitrogen Transformation in a Typical Shrub Ecosystem in Yanshan Mountain and Hilly Region. *Life*, 13(3), 1–15. <https://doi.org/10.3390/life13030643>

Ji, M., Smith, A. F., Rattray, J. E., England, W. E., & Hubert, C. R. J. (2023). Potential for natural attenuation of crude oil hydrocarbons in benthic microbiomes near coastal communities in Kivalliq, Nunavut, Canada. *Marine Pollution Bulletin*, 196(April), 115557. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2023.115557>

Jiménez Hernández, V. (2018). *Desarrollo de una metodología mediante acoplamiento de bioaugmentación, bioestimulación y bioventeo para la remediación de un suelo costero contaminado con hidrocarburos intemperizados*. Centro de Innovación Aplicada en Tecnologías Competitivas.

Khan, N., Muge, E., Mulaa, F. J., Wamalwa, B., von Bergen, M., Jehmlich, N., & Wick, L. Y. (2023). Mycelial nutrient transfer promotes bacterial co-metabolic organochlorine pesticide degradation in nutrient-deprived environments. *ISME Journal*, 17(4), 570–578. <https://doi.org/10.1038/s41396-023-01371-7>

- Kharey, G., Scheffer, G., & Gieg, L. M. (2020). Combined use of diagnostic fumarate addition metabolites and genes provides evidence for anaerobic hydrocarbon biodegradation in contaminated groundwater. *Microorganisms*, 8(10), 1–22. <https://doi.org/10.3390/microorganisms8101532>
- Ławniczak, Ł., Woźniak-Karczewska, M., Loibner, A. P., Heipieper, H. J., & Chrzanowski, Ł. (2020). Microbial degradation of hydrocarbons—basic principles for bioremediation: A review. *Molecules*, 25(4), 1–19. <https://doi.org/10.3390/molecules25040856>
- Lewis T, Stone WL. Biochemistry, Proteins Enzymes. [Updated 2023 Apr 24]. In: StatPearls [Internet]. Treasure Island (FL): StatPearls Publishing; 2023 Jan-. Available from: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK554481/>
- Lee, W. C., Lee, J. H., Lee, S. H., Lee, S. W., Jeon, J. H., Lee, S. H., & Kim, S. O. (2022). Revitalization of Total Petroleum Hydrocarbon Contaminated Soil Remediated by Landfarming. *Toxics*, 10(3), 1–22. <https://doi.org/10.3390/toxics10030147>
- Li, F., Jin, H., Wu, X., Liu, Y., Chen, X., & Wang, J. (2022). Remediation for trace metals in polluted soils by turfgrass assisted with chemical reagents. *Chemosphere*, 295(January), 133790. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.133790>
- Li, N., Jiang, J., Xu, Y., Pan, H., Luo, X., Hu, Y., & Cao, J. (2022). Insoluble carbonaceous materials as electron shuttles enhance the anaerobic/anoxic bioremediation of redox pollutants: Recent advances. *Chinese Chemical Letters*, 33(1), 71–79. <https://doi.org/10.1016/j.cclet.2021.06.064>
- Li, Y. J., Li, M. H., & Shih, Y. H. (2020). Aerobic degradation and the effect of hexabromocyclododecane by soil microbial communities in Taiwan. *Environment*

International, 145(1), 106128. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2020.106128>

Lifshits, S., Glyaznetsova, Y., Erofeevskaya, L., Chalaya, O., & Zueva, I. (2021). Effect of oil pollution on the ecological condition of soils and bottom sediments of the arctic region (Yakutia). *Environmental Pollution*, 288(June), 117680.

<https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.117680>

Liu, N., Wang, L., Cao, D., Li, D., Zhu, Y., Huang, S., & Shi, J. (2023). Remediation of petroleum contaminated soil by persulfate oxidation coupled with microbial degradation. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 11(3), 109910.

<https://doi.org/10.1016/j.jece.2023.109910>

Longo, A. C. (2015). Aplicación de la tecnología ANM como alternativa de manejo de los Recursos Naturales Renovables, Suelo y Agua, contaminados con Hidrocarburos provenientes de la Industria Petrolera.

Lv, Y., Bao, J., Dang, Y., Liu, D., Li, T., Li, S., Yu, Y., & Zhu, L. (2023). Biochar aerogel enhanced remediation performances for heavy oil-contaminated soil through biostimulation strategy. *Journal of Hazardous Materials*, 443(PB),

130209. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2022.130209>

Malaver Flor, Y. M., & Muñoz Sanchez, J. A. (2018). *Degradación de hidrocarburos totales del petróleo a partir de la población microbiana contenida en estiércol bovino* [Corporación Universitaria Autónoma del Cauca].

<https://repositorio.uniautonoma.edu.co/bitstream/handle/123456789/307/T IA-M 066 2018.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Mawang, C. I., Azman, A. S., Fuad, A. S. M., & Ahamad, M. (2021). Actinobacteria: An eco-friendly and promising technology for the bioaugmentation of contaminants.

Biotechnology Reports, 32(November 2020), e00679.

<https://doi.org/10.1016/j.btre.2021.e00679>

Morris AL, Mohiuddin SS. Biochemistry, Nutrients. 2023 May 1. In: StatPearls [Internet]. Treasure Island (FL): StatPearls Publishing; 2023 Jan–. PMID: 32119432.

Müller, C., Knöller, K., Lucas, R., Kleinstüber, S., Trabitsh, R., Weiß, H., Stollberg, R., Richnow, H. H., & Vogt, C. (2021). Benzene degradation in contaminated aquifers: Enhancing natural attenuation by injecting nitrate. *Journal of Contaminant Hydrology*, 238(August 2020).

<https://doi.org/10.1016/j.jconhyd.2020.103759>

Muthukumar, B., Surya, S., Sivakumar, K., AlSalhi, M. S., Rao, T. N., Devanesan, S., Arunkumar, P., & Rajasekar, A. (2023). Influence of bioaugmentation in crude oil contaminated soil by *Pseudomonas* species on the removal of total petroleum hydrocarbon. *Chemosphere*, 310(August 2022), 136826.

<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.136826>

Neina, D. (2019). The Role of Soil pH in Plant Nutrition and Soil Remediation. *Applied and Environmental Soil Science*, 2019(3). <https://doi.org/10.1155/2019/5794869>

Newell, C. J., Adamson, D. T., Kulkarni, P. R., Nzeribe, B. N., Connor, J. A., Popovic, J., & Stroo, H. F. (2021). Monitored Natural Attenuation to Manage PFAS Impacts to Groundwater: Scientific Basis. *Groundwater Monitoring and Remediation*, 41(4), 76–89. <https://doi.org/10.1111/gwmmr.12486>

Nwaichi, E. O., Ahmed, I. B., Ugwoha, E., Ugbebor, J. N., & Arokoyu, S. B. (2022). Cost reduction strategies in the remediation of petroleum hydrocarbon contaminated soil. *Open Research Africa*, 5, 1–18.

<https://doi.org/10.12688/openresafrika.13383.1>

Omokhagbor Adams, G., Tawari Fufeyin, P., Eruke Okoro, S., & Ehinomen, I. (2020).

Bioremediation, Biostimulation and Bioaugmentation: A Review. *International Journal of Environmental Bioremediation & Biodegradation*, 3(1), 28–39.

<https://doi.org/10.12691/ijebb-3-1-5>

Omokpariola, D. O., Nduka, J. K., Kelle, H. I., Mgbemena, N. M. A., & Iduseri, E. O.

(2022). Chemometrics, health risk assessment and probable sources of soluble total petroleum hydrocarbons in atmospheric rainwater, Rivers State, Nigeria. *Scientific Reports*, 12(1), 1–19.

<https://doi.org/10.1038/s41598-022-15677-7>

Okonofua, E. S., Lasisi, K. H., & Atikpo, E. (2021). Factorial design study of total

petroleum contaminated soil treatment using land farming technique. *Sustainable Environment Research*, 31(1).

<https://doi.org/10.1186/s42834-021-00079-7>

Ouédraogo, W. P., Otoïdobiga, C. H., Ouattara, C. A. T., Ouattara, A. S., & Traoré, A. S.

(2020). Pilot bioremediation of contaminated soils by hydrocarbons, from an electricity production and distribution site in Ouagadougou, Burkina Faso.

Scientific Research and Essays, 15(4), 69–77.

<https://doi.org/10.5897/SRE2020.6688>

Ouriache, H., Moumed, I., Arrar, J., Namane, A., Lounici, H., & History, A. (2020).

Influence of C/N/P ratio evolution on biodegradation of petroleum hydrocarbons-contaminated soil. *Algerian Journal of Environmental Science and Technology*

December Edition, 6(4), 1604–1611. www.aljest.org

Patel, A. B., Shaikh, S., Jain, K. R., Desai, C., & Madamwar, D. (2020). Polycyclic

Aromatic Hydrocarbons: Sources, Toxicity, and Remediation Approaches.

Frontiers in Microbiology, 11(November).

<https://doi.org/10.3389/fmicb.2020.562813>

Phang-Lyn S, Llerena VA. Biochemistry, Biotransformation. [Updated 2023 Aug 14]. In: StatPearls [Internet]. Treasure Island (FL): StatPearls Publishing; 2023 Jan-. Available from: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK544353/>

Pigeonneau, F., Pereira, L., & Laplace, A. (2021). Mass transfer around a rising bubble in a glass-forming liquid involving oxidation-reduction reaction: Numerical computation of the Sherwood number. *Chemical Engineering Science*, 232, 116382. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2020.116382>

Qian, Z., Zhuang, S., Gao, J., Tang, L., Harindintwali, J. D., & Wang, F. (2022). Aeration increases soil bacterial diversity and nutrient transformation under mulching-induced hypoxic conditions. *Science of the Total Environment*, 817, 153017. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.153017>

Ramakrishnan, M., Papolu, P. K., Satish, L., Vinod, K. K., Wei, Q., Sharma, A., Emamverdian, A., Zou, L. H., & Zhou, M. (2022). Redox status of the plant cell determines epigenetic modifications under abiotic stress conditions and during developmental processes. *Journal of Advanced Research*, 42, 99–116. <https://doi.org/10.1016/j.jare.2022.04.007>

Rodriguez Berna, P. G. (2018). *Efecto del humus de lombriz en la remediación de suelos contaminado con crudo de petróleo* [Universidad Nacional de Ucayali]. <http://repositorio.unu.edu.pe/bitstream/handle/UNU/3296/000001326T.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Ruiz Torrado, A. C. (2019). *Efecto del biocarbón en la inmovilización de hidrocarburos en suelos contaminados* [Universidad Científica del Sur].

<https://hdl.handle.net/20.500.12805/806>

Salas Pineda, D. S., & Ventura Salazar, G. G. (2020). *Remoción de Hidrocarburos Totales de Petróleo (HTP) en aguas dulces mediante biomasa animal de cascós y cuernos de caprinos 2020* [Universidad César Vallejo].

http://repositorio.ucv.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12692/47102/Gutierrez_RS-SD.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Sandoval Del Aguila, J. R. (2008). Valoración económica de espacios contaminados por hidrocarburos en la cuenca del Corrientes Loreto-Perú, 2007, 2008. Universidad Nacional de Trujillo.

Sanusi, S. N. A., Halmi, M. I. E., Abdullah, S. R. S., Hassan, H. A., Hamzah, F. M., & Idris, M. (2016). Comparative process optimization of pilot-scale total petroleum hydrocarbon (TPH) degradation by *Paspalum scrobiculatum* L. Hack using response surface methodology (RSM) and artificial neural networks (ANNs). *Ecological Engineering*, 97, 524–534.

<https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2016.10.044>

Sayed, K., Baloo, L., & Sharma, N. K. (2021). Bioremediation of total petroleum hydrocarbons (Tph) by bioaugmentation and biostimulation in water with floating oil spill containment booms as bioreactor basin. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 18(5), 1–27.

<https://doi.org/10.3390/ijerph18052226>

Shahane, A. A., & Shivay, Y. S. (2021). Soil Health and Its Improvement Through Novel Agronomic and Innovative Approaches. *Frontiers in Agronomy*, 3(September), 1–31. <https://doi.org/10.3389/fagro.2021.680456>

- Sharma, I. (2021). Bioremediation Techniques for Polluted Environment: Concept, Advantages, Limitations, and Prospects. IntechOpen. doi: 10.5772/intechopen.90453
- Song, Q., Xue, Z., Wu, H., Zhai, Y., Lu, T., Du, X., Zheng, J., Chen, H., & Zuo, R. (2023). The collaborative monitored natural attenuation (CMNA) of soil and groundwater pollution in large petrochemical enterprises: A case study. *Environmental Research*, 216(P4), 114816. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2022.114816>
- Sriram, S., Nambi, I. M., & Chetty, R. (2023). Three chambered fuel cell for desalination coupled urea oxidation and hexavalent chromium remediation. *Desalination*, 549(July 2022), 116316. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2022.116316>
- Telesiński, A., & Kiepas-Kokot, A. (2021). Five-year enhanced natural attenuation of historically coal-tar-contaminated soil: Analysis of polycyclic aromatic hydrocarbon and phenol contents. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 18(5), 1–15. <https://doi.org/10.3390/ijerph18052265>
- Tessema, T. D., & Yemata, T. A. (2021). Experimental dataset on the effect of electron acceptors in energy generation from brewery wastewater via a microbial fuel cell. *Data in Brief*, 37, 107272. <https://doi.org/10.1016/j.dib.2021.107272>
- Tristá, J. G., Cobelo, W., & Quevedo, G. (2020). Application of the characterization of partially saturated soils in the modeling of the resistant behavior of isolated footings subjected to axial load. *Revista Ingenieria de Construccion*, 35(2), 100–110. <https://doi.org/10.4067/S0718-50732020000200100>
- Tumolo, M., Volpe, A., Leone, N., Cotugno, P., De Paola, D., Losacco, D., Locaputo, V., de Pinto, M. C., Uricchio, V. F., & Ancona, V. (2022). Enhanced Natural

Attenuation of Groundwater Cr(VI) Pollution Using Electron Donors: Yeast Extract vs. Polyhydroxybutyrate. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(15). <https://doi.org/10.3390/ijerph19159622>

Uddin, M. M., & Wright, M. M. (2022). Anaerobic digestion fundamentals, challenges, and technological advances. *Physical Sciences Reviews*, 2819–2837. <https://doi.org/10.1515/psr-2021-0068>

Van Leeuwen, J. A., Gerritse, J., Hartog, N., Ertl, S., Parsons, J. R., & Hassanizadeh, S. M. (2022). Anaerobic degradation of benzene and other aromatic hydrocarbons in a tar-derived plume: Nitrate versus iron reducing conditions. *Journal of Contaminant Hydrology*, 248(January 2021), 104006. <https://doi.org/10.1016/j.jconhyd.2022.104006>

Villena Vergara, J. D. (2019). *Efecto de la aplicación de lodos de una planta de tratamiento de aguas residuales en el proceso de biorremediación de un suelo contaminado por combustible diésel*. Universidad Científica del Sur.

Wang, B., Kuang, S., Shao, H., Wang, L., & Wang, H. (2021). Anaerobic-petroleum degrading bacteria: Diversity and biotechnological applications for improving coastal soil. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 224, 112646. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2021.112646>

Wang, H., Cui, Y., Lu, L., Jin, S., Zuo, Y., Ge, Z., & Ren, Z. J. (2020). Moisture retention extended enhanced bioelectrochemical remediation of unsaturated soil. *Science of the Total Environment*, 724. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138169>

Wang, Y., Liu, X., Zhang, X., Dai, G., Wang, Z., & Feng, X. (2022). Evaluating wetland soil carbon stability related to iron transformation during redox

oscillations. *Geoderma*, 428(April), 116222.

<https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2022.116222>

Wartell, B., Boufadel, M., & Rodriguez-Freire, L. (2021). An effort to understand and improve the anaerobic biodegradation of petroleum hydrocarbons: A literature review. *International Biodeterioration and Biodegradation*, 157(December 2020), 105156. <https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2020.105156>

Xiao, D., Chen, Y., Xu, W., & Zhan, L. (2021). An aerobic degradation model for landfilled municipal solid waste. *Applied Sciences (Switzerland)*, 11(16).

<https://doi.org/10.3390/app11167557>

Xuezhi, D., Ahmad, A. A., Muhammad, I., Shah, T., & Kalwar, Q. (2020). Remediation Methods of Crude Oil Contaminated Soil. *World Journal of Agriculture and Soil Science*, 4(4), 1–8. <https://doi.org/10.33552/wjass.2020.04.000595>

Yadav, M., Singh, G. and Jadeja, R.N. (2021) ‘Bioremediation of Organic Pollutants: A sustainable green approach’, *Sustainable Environmental Clean-up*, pp. 131–147. doi:10.1016/b978-0-12-823828-8.00006-2.

Yagual Barzola, K. R. (2020). *Técnicas de recuperación de suelos contaminados por hidrocarburos aplicables en el cantón Salinas*. Universidad Estatal Península de Santa Elena.

Yang, S., Xing, K., & Yang, Y. (2021). Offshore Oil Pollution and Prevention Measures. *E3S Web of Conferences*, 271, 02010. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202127102010>

Yoplac Vigo, K. E., & Tuesta Chavez, O. (2018). *Prospección de especies arbóreas para la fitorremediación de suelos contaminados por hidrocarburos en el distrito*

de Imaza, Bagua, Amazonas. Universidad Nacional “Toribio Rodríguez de Mendoza” de Amazonas.

Zanini, A., Ghirardi, M., & Emiliani, R. (2021). A multidisciplinary approach to evaluate the effectiveness of natural attenuation at a contaminated site. *Hydrology*, 8(3). <https://doi.org/10.3390/hydrology8030101>

Zappi, M., White, K., Hwang, H. M., Bajpai, R., & Qasim, M. (2000). The fate of hydrogen peroxide as an oxygen source for bioremediation activities within saturated aquifer systems. *Journal of the Air and Waste Management Association*, 50(10), 1818–1830. <https://doi.org/10.1080/10473289.2000.10464207>

Zhang, Z., Chen, X., Qin, X., Xu, C., & Yan, X. (2023). Effects of Soil pH on the Growth and Cadmium Accumulation in *Polygonum hydropiper* (L.) in Low and Moderately Cadmium-Contaminated Paddy Soil. *Land*, 12(3). <https://doi.org/10.3390/land12030652>

XII. ABREVIATURAS

TPH: Hidrocarburos Totales de Petróleo (siglas en inglés).

ANC: Atenuación Natural Controlada.

Lote 8: Área geográfica amazónica de Loreto – Perú, concesionada por el Estado para la explotación de petróleo por parte de la empresa privada Pluspetrol.

ZE: Zonas de Estudio: Capirona, Valencia, Pavayacu, Corrientes.

Data: Base de datos.

BSC: Biorremediación de suelos contaminados.

N: Nitrógeno.

P: Fósforo.

ECA: Estándares de Calidad Ambiental.

SPSS: Programa IBM PPSS “Statistics Version 26”.

UTM: Sistema de Coordenadas “Universal Transverse Mercator 18S”.

AED: Análisis Exploratorio de Datos.

SIG: Sistema de Información Geográfica.

Ho: Hipótesis nula.

Ha: Hipótesis alterna.

HC: Hidrocarburos.

XIII. ANEXOS

Anexo 1. Resolución de aprobación del proyecto de tesis



RESOLUCIÓN DIRECTORAL ACADÉMICA DE CARRERA N° 055-2022-DACIA-DAFCA-U. CIENTIFICA

FACULTAD DE CIENCIAS AMBIENTALES
CARRERA DE INGENIERÍA AMBIENTAL

Lima, 08 de abril del 2022

VISTO:

El informe de revisión independiente académica del proyecto de tesis titulado: **"ANÁLISIS DE LOS HIDROCARBUROS TOTALES DE PETRÓLEO (TPH) POR EL MÉTODO DE ATENUACIÓN NATURAL CONTROLADA APLICADO EN EL LOTE 8 (LORETO) EN EL AÑO 2015"** presentado por:

- Douglas Reyes Alván

CONSIDERANDO:

Que, de acuerdo al Reglamento General de la Universidad Científica del Sur y los reglamentos de pregrado para obtener el título profesional de **Ingeniero(a) Ambiental** en la **Facultad de Ciencias Ambientales**, se debe desarrollar un trabajo de investigación.

Que, de acuerdo a la normativa vigente de la Universidad Científica del Sur, en uso de las atribuciones conferidas al Director Académico de Carrera.

SE RESUELVE:

Aprobar e inscribir el proyecto de tesis titulado: **"ANÁLISIS DE LOS HIDROCARBUROS TOTALES DE PETRÓLEO (TPH) POR EL MÉTODO DE ATENUACIÓN NATURAL CONTROLADA APLICADO EN EL LOTE 8 (LORETO) EN EL AÑO 2015"** y establecer el inicio del periodo de ejecución del mencionado proyecto.

Nombrar al docente/colaborador **Jesús Gerardo López Sangama** como asesor(a) para el desarrollo de la tesis en cuestión.

Regístrese, comuníquese y archívese,



Mg. Gonzalo Francisco Flores Roca
Director Académico
Carrera de Ingeniería Ambiental

T// (51) 610 6738
informes@cientifica.edu.pe
cientifica.edu.pe

Anexo 2. Declaración jurada

Yo, **Douglas REYES ALVÁN**, de nacionalidad peruana, identificado con DNI N° 71216050, estudiante de la carrera de Ingeniería Ambiental de la Universidad Científica del Sur (UCSUR), Lima; y con domicilio en Av. Recavarren N° 1300, Residencial Vista Verde, Dpto. A2-1101, Surquillo, Lima, Perú;

DECLARO BAJO JURAMENTO:

- Hacer uso de la base de datos proporcionada por el asesor responsable del presente proyecto para fines de investigación científica.

En caso de resultar falsa la información que proporciono, me sujeto a los alcances de lo establecido en el artículo 411° del Código Penal, concordante con en concordancia con el artículo IV 1.7 del Título Preliminar y el artículo 32° del TUO de la Ley de Procedimiento Administrativo General – Ley N° 27444.

En fe de lo cual firmo la presente Declaración Jurada.

En la ciudad de Lima, el 11 de junio del 2021.

DOUGLAS REYES ALVÁN

DNI N° 71216050

Anexo 3. Constancia de uso de tesis doctoral

El Dr. Ing. Jesús Gerardo López Sangama, profesional, asesor, Especialista Ambiental, con colegiatura N°27660 del Colegio de Ingenieros del Perú, por medio de la presente:

HACE CONSTAR:

Que, el suscrito es autor intelectual de la Tesis Doctoral de contaminación de suelos formulada en base al trabajo de investigación experimental realizado durante el año 2012 en el distrito de Trompeteros, Lote 8, de la empresa PlusPetrol, región Loreto, Perú.

Que, en mi condición de titular de citado repositorio, cedo voluntariamente los derechos de autor de la base de datos (big data) para ser utilizados por el estudiante Douglas Reyes Alván de la Universidad Científica del Sur, Lima, Perú, a quien asesoro en el Proyecto de Investigación ***“ANÁLISIS DE LOS HIDROCARBUROS TOTALES DE PETRÓLEO (TPH) POR EL MÉTODO DE ATENUACIÓN NATURAL CONTROLADA APLICADO EN EL LOTE 8 (LORETO) EN EL AÑO 2015”***, de manera que el acceso a este documento queda plenamente autorizado por mi persona y se encuentra disponible para su uso irrestricto, sin impedimentos ni autorizaciones adicionales y de esta forma permita cumplir con todos los objetivos trazados en la investigación científica en mención.

Que, de manera general y como signatario de los datos experimentales obtenidos y sistematizados en la Tesis Doctoral referida, se debe mencionar que para este efecto se utilizó una metodología aleatoria en la toma de muestras para la investigación de remediación ambiental, se hizo empleo del método de la retorta en el análisis de laboratorio de campo a fin de determinar las concentraciones del TPH (%) y se diseñó un método sistemático de cuadros para el registro de los datos de las respectivas muestras contaminadas.

Que, en atención a lo expuesto doy fe y garantía del consentimiento a la Tesis Doctoral en referencia y a la que certifico como mi autoría intelectual.

Se expide la presente constancia a petición de la parte interesada, para los fines correspondientes.

Lima, 31 de marzo de 2022.

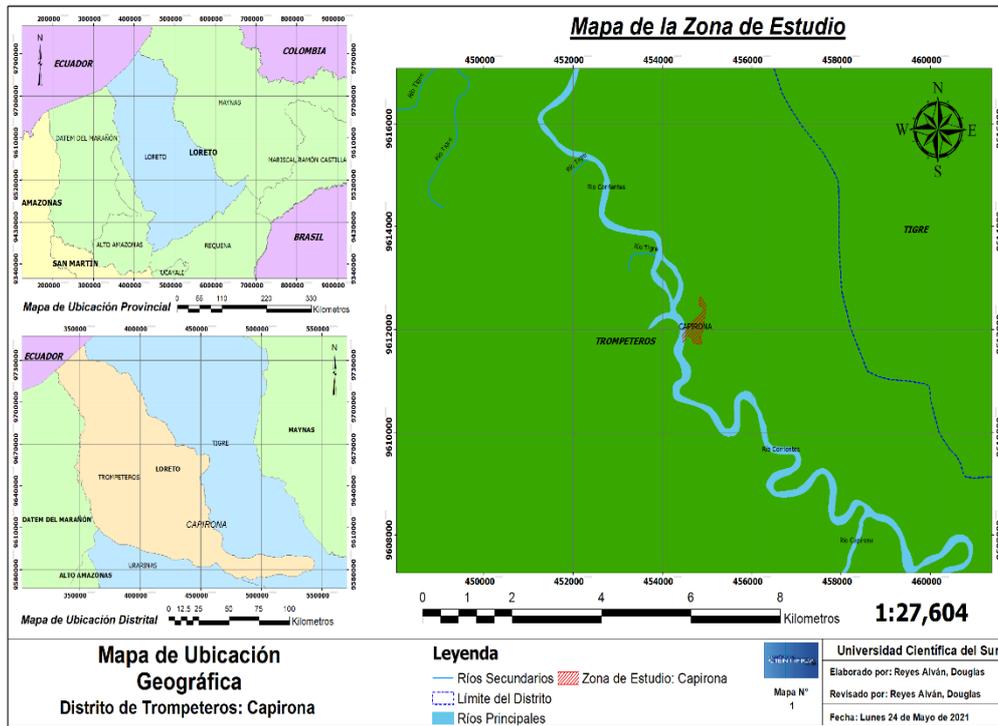
Ing. Jesús Gerardo López Sangama

MSc Física y Ecología

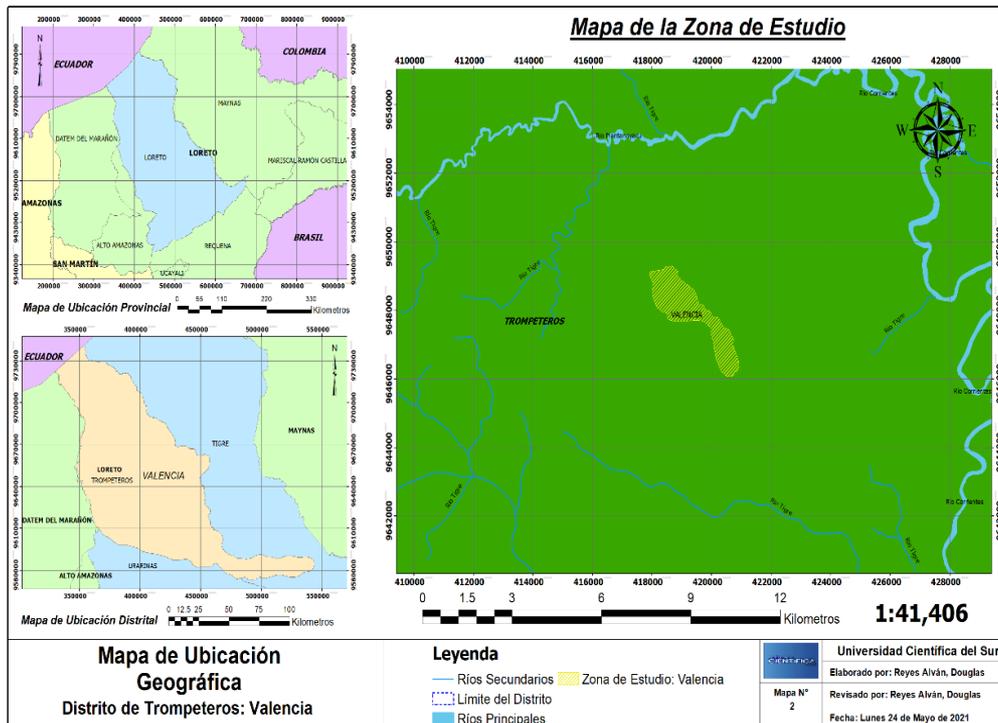
Dr. en Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible

CIP 27660 / DNI 05248204

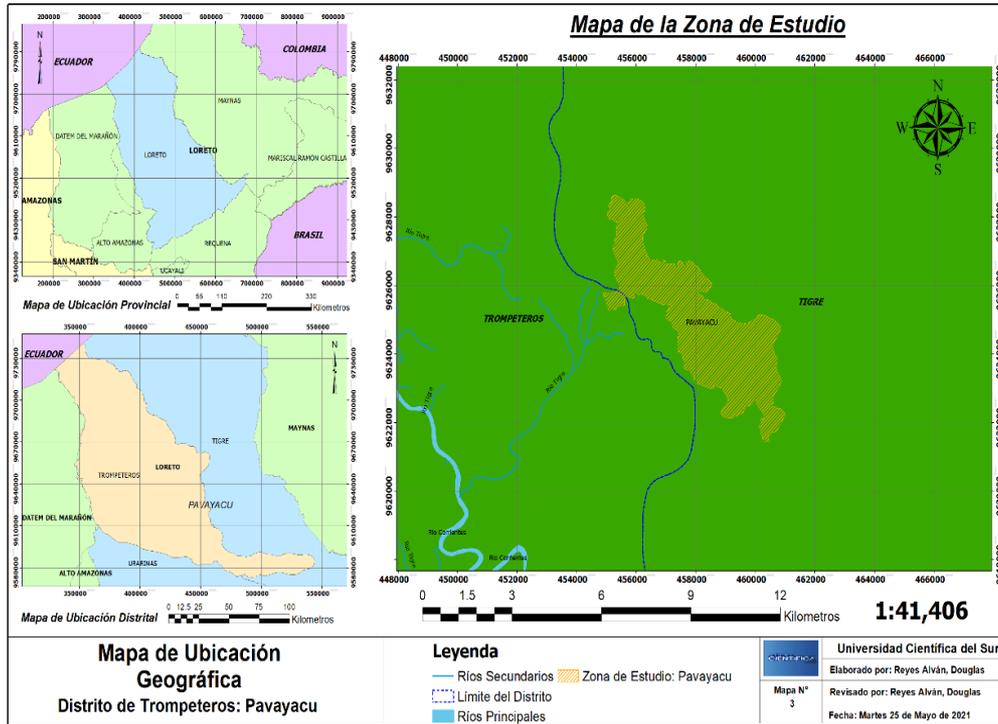
Anexo 4. Mapa de ubicación geográfica: zona de Capirona (estación de bombas)



Anexo 5. Mapa de ubicación geográfica: zona de Valencia (planta 74)



Anexo 6. Mapa de ubicación geográfica: zona de Pavayacu (planta 130)



Anexo 7. Mapa de ubicación geográfica: zona de Corrientes (batería 2)

