

FACULTAD DE INGENIERÍA

Escuela Académico Profesional de Ingeniería Ambiental

Tesis

**Biorremediación de suelos contaminados por diésel
mediante el aprovechamiento de los biosólidos
compostados por la empresa Ecothani S. A. C.,
Cusco - 2021**

Crhistopher Luigui Delgado Paredes

Para optar el Título Profesional de
Ingeniero Ambiental

Cusco, 2022

Repositorio Institucional Continental
Tesis digital



Esta obra está bajo una Licencia "Creative Commons Atribución 4.0 Internacional" .

AGRADECIMIENTOS

Gracias a Dios por permitirme culminar esta etapa de mi vida, poder tener y disfrutar de una gran familia, que durante este proceso fue mi impulso y motivación. Doy gracias a la vida que a pesar de las duras circunstancias me demuestra que cada día es un maravilloso regalo.

Gracias a la Universidad Continental por abrirme las puertas de su casa de estudios, gracias al Ing. Steve Camargo Hinojosa por asesorarme y transmitirme todos sus conocimientos en el desarrollo de esta tesis.

Gracias a la empresa ECOTHANI S.A.C por haberme proporcionado el biosólido compostado para poder realizar la presente investigación.

DEDICATORIA

A mis padres Edith Paredes Sinchi y Julio Cesar Delgado Mora porque ellos fueron mi fuerza y me brindaron apoyo incondicional en cada paso de mi vida. Mama y Papa quiero que sepan que, aunque muchas veces no expreso lo que siento, les agradezco infinitamente por su apoyo y paciencia que tuvieron conmigo, los amo mucho.

A mis hermanos quienes durante toda mi vida fueron un ejemplo a seguir, aunque estemos distanciados siempre estamos para apoyarnos entre nosotros.

A mi esposa Yessebet y a mi hijo querido Samuel Ignacio porque son la razón y motivo de haber culminado esta meta personal. Ustedes son la mejor decisión que pude tomar en mi vida, gracias por darme todo el apoyo y tenerme paciencia durante esta etapa. A ustedes, mi gratitud y amor eterno.

ÍNDICE

AGRADECIMIENTOS	ii
DEDICATORIA	iii
ÍNDICE DE TABLAS	vi
ÍNDICE DE FIGURAS.....	vii
RESUMEN	viii
ABSTRACT.....	ix
INTRODUCCIÓN	x
CAPÍTULO I: PLANTEAMIENTO DEL ESTUDIO	11
1.1. Planteamiento y formulación del problema.....	11
1.1.1. Problema General.....	12
1.1.2. Problemas Específicos	12
1.2. Objetivos	13
1.2.1. Objetivo general	13
1.2.2. Objetivos específicos	13
1.3. Justificación e importancia.....	13
1.3.1. Justificación.....	13
1.3.2. Importancia social.	13
1.3.3. Importancia ambiental.....	14
1.3.4. Importancia económica.	14
1.4. Hipótesis.....	15
1.4.1 Hipótesis general	15
1.4.2 Hipótesis específicas	15
1.5. Operacionalización de variables.....	16
CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO	17
2.1. Antecedentes de la investigación	17
2.1.1. Antecedentes Internacionales.....	17
2.1.2. Antecedentes Nacionales	21
2.2. Bases teóricas	24
2.2.1. Suelo	24
2.2.2. Calidad de suelo	25
2.2.3. La degradación del suelo.....	26
2.2.4. Hidrocarburos de petróleo.....	27
2.2.5. Diesel	28
2.2.8. Fundamentación bioquímica de la biorremediación	32

2.2.10.	Microorganismos que degradan hidrocarburos el suelo.....	34
2.2.11.	Biosólidos.....	35
2.2.12.	Aprovechamiento y usos de los biosólidos	36
2.2.13.	Beneficio del composteo de biosólidos.....	37
2.2.14.	Composición del bioabono pasteurizado y calcificado a base de biosólidos producidos por la empresa ECOTHANI S.A.C.	37
2.2.15.	Características del bioabono pasteurizado y calcificado a base de biosólidos producidos por la empresa ECOTHANI S.A.C.	38
2.2.16.	Beneficios del bioabono pasteurizado y calcificado a base de biosólidos producidos por la empresa ECOTHANI S.A.C.	38
2.3.	Definición de términos básicos	39
CAPÍTULO III: METODOLOGÍA		41
3.1.	Método y alcance de la investigación.....	41
3.1.1.	Método general	41
3.1.2.	Alcance de la investigación de la investigación.....	41
3.1.3.	Tipo de investigación	41
3.2.	Diseño de la investigación.....	41
3.3.	Población y muestra	42
3.4.	Procedimientos de la investigación	42
3.4.1.	Etapa de Pre-campo	42
3.4.2.	Etapa de Campo	43
3.4.2.1.	Procedimiento de toma de muestra de suelo	43
3.4.2.2.	Ubicación geográfica del área de toma de muestras.	44
3.4.3.	Etapa de Experimentación.....	44
3.4.4.	Etapa de Laboratorio	45
3.4.5.	Etapa de Gabinete	45
CAPÍTULO IV: RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....		46
4.1.	Presentación de resultados	46
4.1.1.	Análisis de las propiedades fisicoquímicas del suelo contaminado	46
4.1.2.	Análisis inicial de las concentraciones de hidrocarburos totales de petróleo del suelo contaminado.....	47
4.1.3.	Análisis post tratamiento de las concentraciones de hidrocarburos totales de petróleo del suelo contaminado.....	49
4.1.4.	Interpretación de la reducción porcentual de la concentración de hidrocarburos totales de petróleo post tratamiento.....	50
4.2.	Procesamiento estadístico de la información.	52
4.2.1.	Prueba de SHAPIRO-WILK.	52

4.2.2. Análisis de varianza ANOVA.....	53
4.2.2.1. Procesamiento de datos.....	53
4.2.2.2. Análisis de datos.	55
4.2.3. Prueba de Tukey.....	55
4.3. Discusión de resultados.....	57
4.3.1. Contraste de resultados con otras investigaciones.	57
CONCLUSIONES	59
RECOMENDACIONES	60
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	61

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Matriz de operacionalización de variables.....	16
Tabla 2. Ingredientes del Biosólido compostado.....	37
Tabla 3. Composición del Biosólido compostado.....	37
Tabla 4. Tratamientos de estudio para la investigación.....	43
Tabla 5. Análisis inicial de las propiedades fisicoquímicas del suelo contaminado....	46
Tabla 6. Análisis inicial de las concentraciones de hidrocarburos totales de petróleo del suelo contaminado.....	47
Tabla 7. Análisis post tratamiento de las concentraciones de hidrocarburos totales de petróleo del suelo contaminado.....	49
Tabla 8. Interpretación de la reducción porcentual de la concentración de TPH post tratamiento.....	50
Tabla 9. Prueba de SHAPIRO-WILK.....	52
Tabla 10. Agrupación de los datos.....	53
Tabla 11. Resumen de los datos.....	54
Tabla 12. Análisis de varianza.....	54
Tabla 13. Hipótesis.....	55
Tabla 14. Análisis de Varianza.....	56
Tabla 15. Medias.....	56
Tabla 16. Comparaciones en parejas de Tukey.....	56

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Tipos de hidrocarburos.....	28
Figura 2. Estructura química del diésel	29
Figura 3. Reacciones de las degradaciones aerobias y anaerobias.....	33
Figura 4. Principales rutas de degradación de hidrocarburos aromáticos.	34
Figura 6. Ubicación de muestreo.....	44

RESUMEN

La presente investigación tuvo como objetivo determinar el proceso de biorremediación de un suelo contaminado con diésel mediante el uso de biosólido compostado. El alcance de la investigación es de tipo explicativo con un enfoque cuantitativo. El diseño usado en la investigación es el modelo completamente aleatorizado. Los tratamientos fueron distribuidos en 5 bloques de 3 unidades experimentales. La dosificación para los 5 bloques fue diseñada de la siguiente manera: Bloque A (10% de biosólido compostado y 90% de suelo contaminado), Bloque B (20% de biosólido compostado y 80% de suelo contaminado), Bloque C (30% de biosólido compostado y 70% de suelo contaminado), Bloque D (40% de biosólido compostado y 60% de suelo contaminado), Bloque E (50% de biosólido compostado y 50% de suelo contaminado). Los resultados fueron favorables en la disminución de la concentración de hidrocarburos totales de petróleo. De lo anterior, se puede afirmar que según el análisis de varianza los bloques de tratamiento B y C son los que tuvieron mayor diferencia estadística significativa y vendrían a ser las mejores dosificaciones para el tratamiento de suelos contaminados con diésel.

Palabras clave: *Contaminación, diésel, biorremediación, biosólido compostado.*

ABSTRACT

The objective of this research was to determine the bioremediation process of a soil contaminated with diesel through the use of composted biosolids. The scope of the research is explanatory with a quantitative approach. The design used in the research is the completely randomized model. The treatments were distributed in 5 blocks of 3 experimental units. The dosage for the 5 blocks was designed as follows: Block A (10% composted biosolid and 90% contaminated soil), Block B (20% composted biosolid and 80% contaminated soil), Block C (30% composted biosolid and 70% contaminated soil), Block D (40% composted biosolid and 60% contaminated soil), Block E (50% composted biosolid and 50% contaminated soil). The results were favorable in the decrease in the concentration of total petroleum hydrocarbons, from the foregoing it can be affirmed that according to the analysis of variance, treatment blocks B and C are the ones that had the greatest statistically significant difference and would be the best dosages. for the treatment of diesel-contaminated soils.

Keywords: *Pollution, diesel, bioremediation, composted biosolid.*

INTRODUCCIÓN

En nuestro país, la problemática de la contaminación de suelos es un tema que no se está tratando con la debida responsabilidad. En los últimos años, se han evidenciado muchos derrames de hidrocarburos produciendo grandes pérdidas de ecosistemas y generando diversos conflictos socioambientales.

Los derrames de hidrocarburos en el suelo producen efectos adversos, generan minerales tóxicos lo cual son absorbidos por las plantas, además, produce deterioro de la estructura del suelo, alteración de la materia orgánica y pérdida de los nutrientes fundamentales del suelo, también, se expone a lixiviación y erosión. Cuando los hidrocarburos están presentes en el suelo se pierde la fertilidad, se presenta un bajo rendimiento en las cosechas y pueden producir efectos perjudiciales a los seres humanos. (1)

La biorremediación es una técnica que se usa para descontaminar suelos de manera más sencilla y eficiente ya que se usan microorganismos para realizar este proceso. La función principal de los microorganismos es degradar compuestos altamente contaminantes en compuestos menos nocivos para el medio. La biorremediación in situ consiste en estimular los microorganismos presentes en el suelo mediante la aplicación de nutrientes y así dar las condiciones necesarias para metabolizar los contaminantes. (2)

Los biosólidos compostados producidos por la empresa ECOTHANI S.A.C son productos elaborados principalmente a base de biosólidos producidos en las plantas de tratamiento de aguas residuales, sustratos minerales y sustratos vegetales. Este producto es usado en el sector agrónomo ya que es mejorador y recuperador del suelo 100% natural. Mejora las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo, incrementa su fertilidad y restaura suelos contaminados. La empresa ECOTHANI S.A.C cumple con la responsabilidad ambiental al minimizar la generación de residuos sólidos y la responsabilidad social al beneficiar a productores agrícolas e impactar positivamente en el costo-beneficio de los productos adquiridos por el consumidor final.

CAPÍTULO I

PLANTEAMIENTO DEL ESTUDIO

1.1. Planteamiento y formulación del problema

El inapropiado manejo de los hidrocarburos ha generado el problema de contaminación de suelos a escala mundial, este problema se produce a causa de la extracción y el manejo del petróleo. “En Colombia el transporte del crudo y sus derivados han afectado considerablemente el ambiente durante los últimos 18 años por una recurrente actividad terrorista contra los oleoductos e instalaciones petroleras”. (3)

“En México, la industria del petróleo en su conjunto ha tenido un impacto negativo en materia ambiental debido a la amplia gama de productos derivados de petróleo por lo que no ha sido posible evaluar cuantitativamente la contaminación involucrada desde la fase de explotación hasta la obtención de los productos químicos básicos”. (4)

En el Perú las actividades de exploración, explotación y comercialización de hidrocarburos provocan impactos potencialmente negativos sobre el medio ambiente, se ha incrementado la contaminación de suelos por el derrame de este compuesto ocasionando un gran desequilibrio en los ecosistemas. “La contaminación del suelo y las aguas subterráneas en el sector de hidrocarburos es diversa y está asociada en su mayoría a los pasivos ambientales en el noreste con casi 150 años y en la selva norte del Perú con casi 50 años de exploración y explotación, donde no se conocía de protección ambiental y las regulaciones ambientales no estaban en la agenda de la actividad petrolera (deficiente gestión de residuos, materias primas y/o productos en los lotes, vertido de residuos sólidos y líquidos en condiciones inadecuadas, accidentes, etc.)”. (5)

La contaminación de suelos por hidrocarburos afecta a la flora, fauna y microorganismos del suelo, su fertilidad y por ende el crecimiento de las plantas. También se puede ver perjudicado el ámbito social creando conflictos en los sistemas de producción, economía, salud y puede impactar directamente en los medios de vida de las poblaciones.

La predisposición de este tipo de desastres ocurre principalmente en zonas rurales, teniendo un mayor impacto en las zonas enfocadas en la agricultura y en consecuencia genera retraso socioeconómico y deficiente calidad alimentaria.

La biorremediación es una técnica biológica que usa el principio de la capacidad de los microorganismos y plantas para degradar, transformar y remover contaminantes y poder transformarlos en compuestos menos tóxicos, dicha técnica se ha desarrollado de manera muy efectiva e innovadora en muchos países del mundo.

“Un gran número de tecnologías de biorremediación y productos microbianos que han sido aplicados y comercializados exitosamente en países desarrollados, han encontrado obstáculos para ser aplicados en el Perú”. (6) Es un reto buscar tecnologías y estrategias para incentivar la actividad degradativa de los microorganismos autóctonos lo que conlleva a una gran oportunidad para desarrollar proyectos de investigación que puedan ser aplicados a gran escala.

1.1.1. Problema General

- ¿Cuál es el efecto del uso de los biosólidos compostados en la biorremediación del suelo contaminado con diésel?

1.1.2. Problemas Específicos

- ¿Cuáles serán las propiedades fisicoquímicas del suelo contaminado con diésel?
- ¿Cuál será la dosificación óptima de biosólidos compostados para una eficiente biorremediación del suelo contaminado por diésel?
- ¿Cuál será la variación de la concentración de hidrocarburos totales de petróleo del suelo contaminado después de realizar el tratamiento de biorremediación?
- ¿Cuáles son las variables estadísticas que se usarán para procesar los resultados del proceso de biorremediación?

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo general

- Medir la significancia estadística de la biorremediación del suelo contaminado con diésel mediante el uso de biosólido compostado.

1.2.2. Objetivos específicos

- Analizar las propiedades fisicoquímicas del suelo contaminado.
- Determinar cuál será la dosificación óptima de biosólido compostado para la biorremediación del suelo contaminado por diésel.
- Analizar la variación de la concentración de los hidrocarburos totales de petróleo del suelo contaminado después de realizar el tratamiento de biorremediación.
- Procesar la información obtenida mediante el uso de estimadores estadísticos.

1.3. Justificación e importancia

1.3.1. Justificación

En los últimos años, se han desarrollado muchos métodos de remediación de suelo, pero es fundamental buscar métodos de bajo costo y fácil acceso. En la presente investigación, se utilizará una técnica de fácil ejecución y los costos serán reducidos ya que se empleará un producto ecológico y muy económico. El empleo de los tratamientos fisicoquímicos no degrada por completo los contaminantes y normalmente tienen un alto costo de inversión. Una situación inversa ocurre en los tratamientos biológicos, los contaminantes son biodegradados y los costos son bajos; por esta razón, hoy en día se están utilizando con más frecuencia los tratamientos biológicos.

El transporte, comercialización y almacenamiento de hidrocarburos producen muchos contaminantes los cuales han sido vertidos al suelo, debido a un inapropiado manejo, falta de sensibilización y poca ética ambiental.

1.3.2. Importancia social.

El problema de la contaminación de suelos por hidrocarburos se ha dado por muchos años, sin embargo, la sociedad que ha sido responsable de ocasionar dichos daños nunca se preocupó por recuperar los espacios de suelo. La biorremediación de suelos contaminados por hidrocarburos se ha convertido en

una alternativa atractiva y prometedora para recuperar los suelos que fueron impactados por dichos contaminantes. La sociedad debe impulsar la búsqueda de nuevas alternativas orientadas a resolver, mitigar y prevenir problemas de carácter ambiental por esta razón se realiza la presente investigación para poder aportar a la recuperación de suelos contaminados con hidrocarburos mediante una alternativa ecológica, de bajos costos y fácil aplicabilidad.

El Perú actualmente afronta grandes problemas de contaminación ambiental por derrame de hidrocarburos en un contexto social, ético y económico que no permite la aplicación de los sistemas de recuperación de suelos impactados por la contaminación.

1.3.3. Importancia ambiental.

Los microorganismos tienen una amplia variedad de procesos bioquímicos que juegan un rol importante en la investigación de la biorremediación de suelos ya que son capaces de poder eliminar o transformar los contaminantes en compuestos menos nocivos. Esta capacidad del microorganismo ha hecho que sean aplicados en las técnicas de recuperación de suelos, haciéndolas atractivas por ser un proceso natural y biológico.

La búsqueda de estrategias de biodegradación de contaminantes mediante microorganismos es un reto para nuestra sociedad, pero también es una oportunidad para el desarrollo de proyectos de investigación que puedan ser aplicados en campo a gran escala.

Es muy necesaria la recuperación de los ecosistemas afectados por la contaminación para poder hablar de sustentabilidad. Desde este punto de vista, la biorremediación es una buena alternativa por ser una tecnología limpia y tener la capacidad de poder adaptarse a las necesidades de cada sitio.

1.3.4. Importancia económica.

Actualmente, los tratamientos físico-químicos están más establecidos pero su empleo no permite una degradación completa de los contaminantes y además se utilizan elevados costos de inversión. Cuando se aplica una técnica biológica, se presenta una situación opuesta a lo antes mencionado. Los contaminantes son biodegradados y los costos de implementación son bajos. Por lo antes expuesto, es que existe una tendencia creciente en el empleo de los tratamientos biológicos.

1.4. Hipótesis.

1.4.1 Hipótesis general

Ha: El uso de los biosólidos compostados afectará positivamente en el tratamiento de los suelos contaminados por diésel.

Ho: El uso de los biosólidos compostados no afectará positivamente en el tratamiento de los suelos contaminados por diésel.

1.4.2 Hipótesis específicas

H1: La dosificación óptima de biosólido compostado permitirá una eficiente biorremediación del suelo contaminado por diesel.

Ho: La dosificación óptima de biosólido compostado no permitirá una eficiente biorremediación del suelo contaminado por diesel.

H2: Se evidenciará reducción de la concentración de hidrocarburos totales de petróleo del suelo contaminado.

Ho: No se evidenciará reducción de la concentración de hidrocarburos totales de petróleo del suelo contaminado.

1.5. Operacionalización de variables

Tabla 1. *Matriz de operacionalización de variables.*

Tipo de Variable	Variable	Definición conceptual	Indicador	Unidad de medida	Tipo de variable
Variable independiente:	Biosólido compostado	Producto mejorador y recuperador del suelo hecho a base de los biosólidos provenientes de las Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales.	Porcentaje de biosólido en dosis de 10%, 20%, 30%, 40% y 50%	Kg	Cuantitativa
Variable dependiente:	Concentración de contaminante (Diesel)	Combustible hidrocarburo formado por compuestos parafínicos, naftalénicos y aromáticos, su contenido de carbono se encuentra entre C10 Y C22	Concentración de hidrocarburos totales de petróleo por kilogramo de suelo.	TPH/Kg de suelo	Cuantitativa

Fuente: *elaboración propia.*

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes de la investigación

2.1.1. Antecedentes Internacionales

En el proyecto de investigación realizado por Ponce Contreras, afirma que “en general, la contaminación de suelos por productos, compuestos o desechos orgánicos de la industria petrolera pueden ser tratados y recuperados ecológicamente con la biorremediación, basada en la estimulación de los microorganismos para la adecuación de factores abióticos. Así mismo podrían indicarse que en suelos de textura contrastantes como los arcillosos y arenosos, deben emplearse condicionantes orgánicos que permitan mejorar la estructura de la mezcla para favorecer así la biorremediación. En cualquier tratamiento de biorremediación la velocidad de descomposición por los organismos va a depender de su concentración, de determinadas características del suelo (disponibilidades de oxígeno y de nutrientes, pH, humedad y temperatura) y de la estabilidad del contaminante. Para definir el tratamiento más apropiado es necesario un estudio previo de las características edáficas del suelo y el nivel de contaminación que presenta, con el fin de recuperar sus características biológicas y morfológicas” (7)

En el estudio elaborado por Araujo y otros afirman que, “las cepas bacterianas MI10, MI33 y MI38 fueron las más eficientes en la degradación del gasoil con una remoción máxima de 79% en 35 días. Esto sugiere que las bacterias utilizan el carbono como fuente de energía. Los tratamientos donde se utilizó el lodo, ofrecieron una mayor eficiencia en la degradación de los hidrocarburos que aquellos sin lodo. Debido a que, su presencia favoreció la actividad bacteriana, lográndose remociones de 90% de hidrocarburos presentes en el tratamiento LCM15% en 150 días. Esta tecnología de biorremediación puede ser una alternativa de elección para el saneamiento de suelos impactados con petróleo y otros contaminantes”. (8)

En el trabajo de investigación realizado por Riojas Gonzales y otros concluyen que “la biorremediación es una tecnología que tiene un gran potencial en la recuperación de sitios contaminados por hidrocarburos de petróleo y generalmente es más barata que otras alternativas de restauración. Los factores

externos de la biorremediación tales como los nutrientes, humedad, temperatura, oxígeno, pH, entre otros son importantes para lograr condiciones favorables. La biorremediación se ve muy favorecida con la aplicación de surfactantes, le ayuda en la biodisponibilidad del contaminante y con esto en su biodegradación, si bien pueden existir efectos negativos, esto hace suponer realizar pruebas previas, para definir el tipo de surfactante a utilizar y su dosis. Los surfactantes son compuestos que tienen la particularidad de mantenerse en dos interfases cuyo potencial y caracterización es su capacidad de emulsión, desorción, solubilidad y como agentes de superficie, son necesarios en procesos biológicos, en algunos tratamientos de biorremediación no se podrían llevar a cabo sin ayuda de estos compuestos”. (9)

En el proyecto de investigación realizado por Cando Rodríguez afirma que “de acuerdo a los resultados del análisis estadístico, para el caso de los hidrocarburos totales de petróleo (THP), los valores obtenidos, no son significativos estadísticamente, aunque se obtuvo porcentajes de degradación en los tres tratamientos siendo el mejor tratamiento el T3 con un 29.7% de degradación, seguido de T2 con un 22.5 % de degradación, y el T1 con un 20.9% de degradación. Según los resultados del análisis estadístico para los HAPs, de los catorce compuestos evaluados, cinco son significativos estadísticamente y nueve no presentan significancia estadística. Los compuestos de los HAPs que presentan significancia estadística son: Naftaleno con un 99.02% de degradación resultando mejor que el T3; fenantreno obteniendo un 99.07% de degradación, siendo el T3 el mejor, b (b) fluoranteno 97, 74 % de degradación siendo el T2 el mejor, b (g, h, i) perileno con un 97.77% de degradación siendo el mejor el T3. Los compuestos de los HAPs que estadísticamente no presenta significancia estadística son: acenafteno con un 98.31% de degradación; fluoreno con un 98.32% de degradación; antraceno 98.34% de degradación; fluoranteno 97.06% de degradación; pireno 98.50% de degradación; b (a) antraceno con un 98.31% de degradación; el criseno presenta un 97,40% de degradación; para el b (a) pireno este presenta un 98.41% de degradación; db (a,h) antraceno presenta un 98.61% de degradación, el indeno presenta un 99.31% de degradación”. (10)

En la investigación realizada por Mazzarino y otros afirman que “la aplicación de diferentes dosis de composts de biosólidos sin tamizar determinó

inmovilización parcial del nitrógeno agregado con los mismos durante un máximo de 8 semanas en condiciones óptimas de humedad y temperatura. Sin embargo, el nitrógeno disponible aportado, proveniente mayoritariamente de la fracción inorgánica, fue mayor que en el suelo control y sería suficiente para cubrir los requerimientos de muchos cultivos. Sería esperable que el C remanente en el suelo continúe descomponiendo lentamente induciendo inmovilización de N; sin embargo, los compost sin tamizar con agregado de una baja dosis de urea (0,5 g N kg⁻¹ compost) no mostraron inmovilización en incubaciones realizadas después de 7 meses de cultivo de ryegrass. En el caso del rechazo de zaranda (fracción de compost > 0,5 cm), una dosis similar de nitrógeno soluble fue también suficiente para evitar inmovilización de nitrógeno. Dado que este material presenta una relación C/N relativamente alta, mayor al límite establecido por el SENASA para enmiendas orgánicas, también sería posible utilizarlo como mulch o cobertura, sin incorporación al suelo. Los resultados obtenidos indican que es posible utilizar composts de diferente granulometría en función de diferentes usos. Esto requeriría establecer no una sino varias normativas para calidad de composts”. (11)

En la investigación elaborada por Duran y Ladera obtienen como resultados que “el análisis cromatográfico realizado a las muestras de suelo, permitió constatar que la misma solo contenía el organoclorado denominado (toxafeno) en concentraciones de 343 ppm (343 mg/l o mg/kg), lo que supera el límite permisible de lixiviados en suelos según lo establecido en la normativa ambiental de diversos países, para efectos del estudio, se consideró el decreto 2.635 de la República Bolivariana de Venezuela, en el cual se contempla las normas para el control de la recuperación de materiales peligrosos y manejo de los desechos peligrosos, en el que establece como concentración máxima permitida de este contaminante valores igual o menor a 0.5mg/l. La incorporación del biosólido permitió disminuir significativamente la concentración del toxafeno en las unidades experimentales, mostrando porcentajes de eficiencias por encima del 70%. Los valores de coliformes en el biosólido obtenidos inicialmente fueron de 10x7NMP, por consiguiente, este fue sometido a tratamiento térmico en una autoclave logrando obtener colonias de 10x6 NMP, ajustándose a la clasificación de clase B, que según lo establecido

en la norma 503 de la EPA, pueden ser empleados como fertilizantes o mejoradores de suelos. Al finalizar el ensayo se evaluó el material resultante, obteniendo lodos de clase A, el cual, de acuerdo con lo estipulado por la EPA, puede aplicarse sin restricciones alguna en los suelos. Según el triángulo textural las características del suelo objeto de estudio es de tipo franco, esto permitió incrementar significativamente la viabilidad del proceso de biorremediación y garantizar el alcance de los objetivos planteados, en ese sentido, se evidenció la capacidad que poseen los microorganismos para alcanzar la degradación del toxafeno, contaminante organoclorado identificado en los suelos. El ensayo permitió además de disminuir la concentración del plaguicida, comprobar que el uso de los residuos (biosólidos) provenientes de las plantas de tratamientos de aguas residuales domésticas, una vez determinada sus características biofísicoquímicas, resultan de utilidad para la recuperación de espacios contaminados con este tipo de plaguicidas, permitiendo así dar una disposición final al biosólidos ambientalmente segura”. (12)

En la tesis realizada por Sapuppo afirma que “en las unidades del Tratamiento con lodos residuales estabilizados en el conteo bacteriano en la etapa final del experimento se detectó un mayor crecimiento UFC g-1 de las bacterias autóctonas presentes en el suelo contaminado con hidrocarburos. Además, en las muestras de suelos analizadas del Tratamiento con lodos residuales se registraron valores superiores de nutrientes como nitrato, amonio, fósforo, potasio, calcio y magnesio; también factores como pH, conductividad eléctrica, materia orgánica y humedad resultaron con valores dentro de los rangos recomendables para favorecer el proceso de biorremediación y estimular la actividad microbiana presente en el suelo contaminado en estudio. Se logró aislar bacterias que sobrevivieron a condiciones altas de contaminación de hidrocarburos, a partir de un suelo afectado por un derrame de estos contaminantes de hacía un año y medio. Estas mismas bacterias nativas empleadas en el proceso de biorremediación se tuvieron que aclimatar inicialmente al contaminante presente, resultando en una mejor respuesta a la sobrevivencia del contaminante, el consorcio conformado por dos cepas bacterianas. Logramos por nuestro último objetivo a someter todos los tratamientos del experimento de biorremediación en su etapa final y también el

suelo recolectado el 19 de abril de 2016 desde la zona afectada por el derrame de hidrocarburos y otra muestra de suelo desde un área colindante no contaminada a una prueba biológica y, hemos observado que todas las muestras de suelo contaminado en estudio que fueron tratados o no, obtuvieron un desarrollo de la siembra de las semillas de maíz. Esto nos indica que, no obstante, las muestras de suelo contaminado tenían concentraciones considerables de hidrocarburos, la prueba de germinación de las semillas de maíz fue efectiva, aunque no de forma similar para todos los casos propuestos, pero con respuesta positiva”. (13)

2.1.2. Antecedentes Nacionales

En el proyecto de investigación realizado por Buendía, obtiene como resultados que “el tratamiento de mayor reducción en la concentración de los hidrocarburos totales de petróleo ha sido: suelo dosificado con vacaza más aserrín de bolaina (T3). Puesto que de 21.81 gr de TPH/Kg de suelo se redujo a una concentración de 16.28 gr de TPH/Kg de suelo, que representa una reducción del 25 %. Los suelos contaminados con hidrocarburos, tratados con aserrín y estercoles orgánicos en promedio disminuyeron 22.5 % del contenido de hidrocarburos en el suelo. Empleando solo estiércol disminuyó solo 16.6 % y usando solamente aserrines disminuyó 9.6%. Los suelos contaminados tratados con estiércol orgánico más aserrines, utilizados como sustratos para la planta de maíz tuvieron en promedio 36.80 cm de altura de planta, en comparación a los tratamientos de suelos contaminados usando solamente estiércol un promedio de 24.48 cm y utilizando solamente aserrín un promedio de 22.14 cm. La planta de maíz es un buen indicador para evaluar la reducción de la concentración de hidrocarburos en los suelos contaminados a través de sus variables la altura de la planta, peso seco foliar y peso seco radicular. Se recomienda el uso de estercoles y aserrines porque es una tecnología de bajo costo y de fácil manejo, para mejorar la resiliencia del suelo”. (14) En el proyecto de investigación realizado por Buendía, obtiene como resultados que “el tratamiento de mayor reducción en la concentración de los hidrocarburos totales de petróleo ha sido: suelo dosificado con vacaza más aserrín de bolaina (T3). Puesto que de 21.81 gr de TPH/Kg de suelo se redujo a una concentración de 16.28 gr de TPH/Kg de suelo, que representa una reducción del 25 %. Los suelos contaminados con hidrocarburos,

tratados con aserrín y estercoles orgánicos en promedio disminuyó 22.5 % del contenido de hidrocarburos en el suelo. Empleando solo estiércol disminuyó solo 16.6 % y usando solamente aserrines disminuyó 9.6%. Los suelos contaminados tratados con estiércol orgánico más aserrines, utilizados como sustratos para la planta de maíz tuvieron en promedio 36.80 cm de altura de planta, en comparación a los tratamientos de suelos contaminados usando solamente estiércol un promedio de 24.48 cm y utilizando solamente aserrín un promedio de 22.14 cm. La planta de maíz es un buen indicador para evaluar la reducción de la concentración de hidrocarburos en los suelos contaminados a través de sus variables la altura de la planta, peso seco foliar y peso seco radicular. Se recomienda el uso de estercoles y aserrines porque es una tecnología de bajo costo y de fácil manejo, para mejorar la resiliencia del suelo”. (14).

En el trabajo de investigación realizado por Muñoz Vitor y otros “se determinó que las pseudomonas son las bacterias responsables de la biodegradación de hidrocarburos de petróleo. Los suelos contaminados tratados con estiércol de gallina blanca de cepa leghorn, semilla de *Triticum aestivum* y aserrín tuvieron un promedio 41.5g de peso, en comparación a los tratamientos de suelos contaminados usando solamente estiércol y semillas de *Triticum aestivum* un promedio de 20.8g y utilizando solo semilla de *Triticum aestivum* no hubo crecimiento. Al demostrar el proceso de biodegradación de hidrocarburos de petróleo, se alcanzó tasas de remoción de 91.1% de hidrocarburos totales donde el mejor tratamiento fue el B3 de contenía la semilla de *Triticum aestivum* (trigo), aserrín de roble y estiércol de la gallina blanca de la cepa leghorn”. (15)

En el trabajo de investigación realizado por Gerónimo Urrutia y otros, llegan a la conclusión que “la biorremediación de suelos contaminados con petróleo crudo, a través de la aplicación de lodos activados, llega a ser un proceso altamente eficiente y sostenible. Los autores concluyen de lo anterior, ya que el tratamiento logra remover, en solo 90 días, hasta un 50% de la concentración neta de hidrocarburos totales de petróleo (TPH F2 y F3), además de restituir y/o mejorar ciertas propiedades organolépticas del suelo. Resaltando, que para este tratamiento se utilizó un residuo como insumo principal, lo que demuestra una práctica de reaprovechamiento de residuos potencialmente peligroso, como los lodos activados, además de minimizar costes para la disposición de los mismos,

también sostienen que las propiedades obtenidas luego del proceso de biorremediación con lodos activados no permitirá el uso agrícola del suelo; principalmente a causa de los valores TPH F2 y F3 superiores a lo normado en el ECA para suelos y mencionan que las propiedades como el olor, color, textura, temperatura, pH y población microbiana del suelo han mejorado notablemente respecto a las condiciones iniciales de contaminación”. (16)

En el estudio realizado por Ramírez y otros, determinaron que “la capacidad de las cepas bacterianas IGF2 (*Vibrio fluvialis*), IPF1 (*Acinetobacter venetianus*), FMIIt (*Exiguobacterium profundum*) y TcPF (*Arthrobacter mysorens*) aisladas del manglar, para crecer en un medio microbiológico mineral teniendo al petróleo como única fuente carbono. Estas cepas redujeron significativamente la concentración de HTP mediante bioaumentación en un suelo contaminado con petróleo. El género *Arthrobacter* ha sido relacionado con la degradación de los hidrocarburos aromáticos policíclicos como el flureno, así como de hidrocarburos aromáticos más complejos como el 4-nitrofenol. En el caso del género *Vibrio*, se han aislado cepas marinas de *Vibrio parahaemolyticus* y *Vibrio fluvialis*, con capacidad para degradar fenantreno, *Vibrio splendidus* con capacidad para degradar naftaleno y fenantreno y *Vibrio cyclotrophicus* con capacidad para degradar a los PAH. Generalmente estas bacterias han sido aisladas de ambientes diferentes al manglar por lo que los resultados encontrados en este estudio además de contrastar la capacidad de estas bacterias para biodegradar los HTP también amplían la distribución ecológica de este tipo de bacterias. En el ensayo de bioaumentación desarrollado en la presente investigación se observó, que la cepa que produjo la mayor disminución en la concentración promedio de HTP fue IGF2 (*Vibrio fluvialis*) que disminuyó los HTP desde 9,6 % hasta $1,7 \pm 0,1$ %, representando un 82 % de remoción total de los HTP. La disminución de HTP observado en el control negativo, se podría deber a la acción del microbiota del suelo, así como también a factores físicos como la luz solar y la temperatura ambiental, los que pueden contribuir con la evaporación, fotoxidación, emulsión, dispersión y biodegradación de los hidrocarburos. Además, el uso de estas cepas mediante métodos dependientes del cultivo permitiría examinar en detalle las rutas degradativas y evaluar sus estrategias de subsistencia bajo condiciones altamente desfavorables que ocurren

en un derrame. La presencia de bacterias con capacidad para degradar los hidrocarburos del petróleo, permitiría inferir que el área de suelo estudiado tendría cierta capacidad natural para enfrentarse a perturbaciones externas relacionadas con la contaminación por petróleo. La que se vería incrementado con la aplicación de la técnica de bioaumentación mediante la inoculación de las cepas aisladas que presentaron mayor actividad durante este trabajo de investigación. Dado que se ha demostrado que el uso de bacterias nativas hace que la bioaumentación sea mucho más eficiente para acelerar la recuperación de estos ambientes contaminados”. (17)

En el trabajo de investigación realizada por Espinoza obtiene como resultados que “la aplicación de tres dosis de vermicompost tuvo los siguientes efectos en las propiedades físico-químicas de los suelos: (a) Las dosis de vermicompost tuvieron efecto significativo en el incremento de la Capacidad de Intercambio Catiónico Efectiva (CICE) del suelo contaminado con Hidrocarburos Totales de Petróleo (HTP), siendo el tratamiento con 70 % de vermicompost el que tuvo 63.960 cmol/kg en comparación con el testigo que solo alcanzó 27.410 cmol/kg, (b) El fósforo disponible del suelo contaminado con HTP se incrementó significativamente con la dosis de 70 % de vermicompost, alcanzando un valor de 298.247 mg/kg, superior significativamente al tratamiento testigo que alcanzó 12.100 mg/kg, (c) La aplicación de 50 % y 70 % de compost al suelo contaminado con HTP incrementó significativamente el contenido de potasio disponible, obteniéndose valores de 103.750 y 83.903 mg/kg, superiores estadísticamente al testigo que alcanzó solo 10.750 mg/kg, (d) La aplicación de vermicompost en dosis de 50 y 70 % al suelo contaminado con HTP no afectó significativamente la densidad aparente, contenido de carbonato de calcio, pH, contenido de materia orgánica y contenido de nitrógeno total”. (18)

2.2. Bases teóricas

2.2.1. Suelo

Los suelos se consideran como formaciones geológicas desarrolladas bajo condiciones muy diversas de clima y materiales de básicos, lo cual justifica su continua evolución y por ende su gran variedad. El suelo puede ser conceptualizado de diferentes formas, esto va a depender del criterio que se adopte en cuanto a su utilización. El suelo imparcialmente desde su origen tiene una

función principal que es aguantar la vegetación y en el deben presentarse las condiciones óptimas para el desarrollo de las plantas. (19)

Según MINAM “el suelo es considerado como material no consolidado compuesto por partículas inorgánicas, materia orgánica, agua, aire y organismos, que comprende desde la capa superior de la superficie terrestre hasta diferentes niveles de profundidad”. (20)

MINAM sustenta que el suelo agrícola es aquel que está destinado a la producción de cultivos, forrajes y pastos cultivados. Considera también, aquel suelo con la facultad para el desarrollo de actividades de cultivo y ganadería. Son todas aquellas tierras clasificadas como agrícolas, que sostienen un hábitat para especies permanentes y transitorias, además es base fundamental para el desarrollo de la flora y fauna nativa, como es el caso de las áreas naturales protegidas por el estado. (20)

La FAO afirma que “como cualquier otra palabra suelo tiene varios significados. Su significado tradicional se define como el medio natural para el crecimiento de las plantas. También se ha definido como un cuerpo natural que consiste en capas de suelo (horizontes del suelo) compuestas de materiales de minerales meteorizados, materia orgánica, aire y agua. El suelo es un producto resultante de la relación del tiempo con el clima, topografía, organismos (flora, fauna y ser humano), rocas y minerales originarios”. El suelo se diferencia por su textura, estructura, color, propiedades físicas, químicas y biológicas. (21)

2.2.2. Calidad de suelo

Según Bautista y otros la calidad y salud del suelo son conceptos equivalentes, la calidad se debe considerar como el uso del suelo para un fin específico en un determinado tiempo. “El estado de las propiedades dinámicas del suelo como contenido de materia orgánica, diversidad de organismos o productos microbianos en un tiempo particular constituyen la salud del suelo”. (22)

La calidad del suelo se enfatiza en la investigación de la dinámica que presentan las propiedades edáficas presentes en él. El conocimiento adquirido en dicha investigación es eficaz para evaluar la sustentabilidad del uso y manejo del suelo. La conservación de la calidad del suelo es importante para un ambiente sostenible, por lo que es necesario una adecuada elección de indicadores de calidad que

brinden una rápida respuesta al cambio, un buen planteamiento para su manejo, una mayor resiliencia al estrés y procesos claramente establecidos para la restauración ambiental. Para realizar una buena evaluación del suelo es importante reconocer las características que controlen o sean influenciados directamente por algunas de las funciones del suelo. Sin embargo, se ha afirmado que los indicadores de calidad deben reflejar las principales restricciones del suelo, en coherencia con la función o las funciones principales que se evalúan. Debido a lo anterior, los indicadores que se utilizan para evaluar la calidad de suelo de un sitio no podrían ser tan determinantes para ser evaluadas en otros sitios. (23)

“La selección de los indicadores deberá estar relacionada con los atributos de sustentabilidad (productividad, estabilidad y resiliencia) y dependerá de los recursos humanos, técnicos, económicos, infraestructura, del tiempo disponible, del rigor requerido y del tipo de usuarios a la que se destina el estudio”. (23)

2.2.3. La degradación del suelo

La degradación representa el proceso de desertificación, lo que se refleja en la reducción significativa o pérdida de la capacidad de la tierra para producir lo que de ella se espera. Esta pérdida de capacidad productiva está relacionada directamente a la aridez, a las sequías y a otros factores climáticos, geomorfológicos y bióticos, sobre todo, a la defectuosa gestión humana del recurso natural. En la mayoría de las ocasiones, el ser humano es el responsable de los procesos de degradación del suelo, agua y vegetación. Mediante una gestión sostenible de los recursos naturales renovables, será posible sostener su capacidad productiva y su equilibrio ecológico. (24)

Según la FAO “la degradación del suelo se define como un cambio en la salud del suelo resultando en una disminución de la capacidad del ecosistema para producir bienes o prestar servicios para sus beneficiarios. Los suelos degradados contienen un estado de salud que no pueden proporcionar los bienes y servicios normales del suelo en cuestión en su ecosistema” (21)

Se entiende como degradación del suelo a la pérdida total o parcial de equilibrio de sus propiedades, lo que influye directamente en su productividad; esta se ve reflejado en condiciones físicas (erosión), químicos (deficiencia de nutrientes, acidez, salinidad y otros) y biológicos (ausencia de materia orgánica y microorganismos). Se puede afirmar que, la degradación del suelo es aquella reducción de la facultad del suelo para mantener una productividad sostenida. La

sostenibilidad del suelo no es necesariamente una estabilidad continua de la capacidad de producción, sino la resiliencia que esta pueda tener para recuperar rápidamente los niveles anteriores después de un periodo adversos causados por sequias, inundaciones, inadecuado manejo humano, entre otros factores. (25)

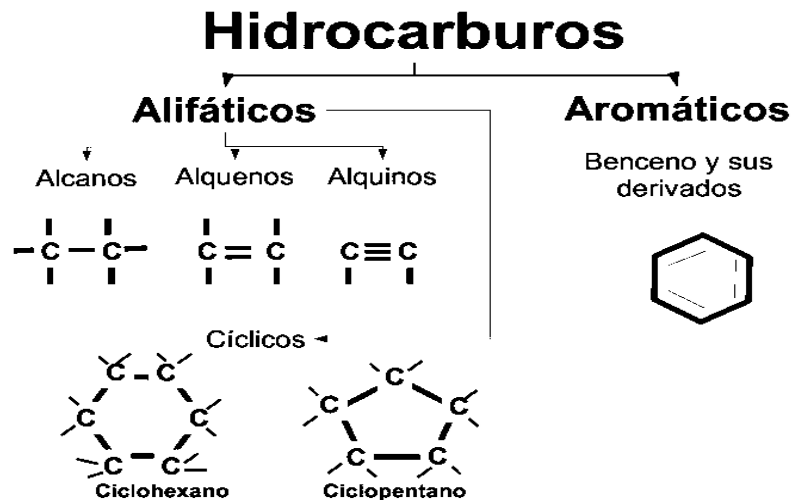
2.2.4. Hidrocarburos de petróleo

Según la Asociación Argentina de Geólogos y Geofísicos del Petróleo, “los hidrocarburos son compuestos orgánicos formados por cadenas de carbono e hidrógeno originados en el sub suelo terrestre por transformación química de la materia orgánica depositada con rocas sedimentarias de grano fino en el pasado geológicos” (26).

Zárate menciona que “los hidrocarburos son compuestos conformados por átomos de carbono e hidrogeno de gran disposición en la naturaleza. Su clasificación varía de acuerdo al número de carbonos y su estructura química. Los hidrocarburos alifáticos son de cadena lineal o ramificada y pueden ser saturados (alcanos) o insaturados (alquenos y alquinos); los de cadena cíclica pueden ser saturados (ciclo alcanos) o con uno o más anillos bencénicos (aromáticos). El petróleo crudo está conformado por hidrocarburos, compuestos heterocíclicos, asfáltenos y resinas. En las refinerías, se procesa el petróleo crudo para transformarlo en productos terminados derivados de él, como el gas licuado de petróleo, gasolina, combustible pesado, combustible diésel, materias primas de petroquímicos, aceite combustible y asfalto”. (27)

Según el Organismo Supervisor de la Inversión en Energía y Minería (Osinergmin), “los hidrocarburos son compuestos orgánicos, gaseosos, líquidos o sólidos, que consiste principalmente de carbono e hidrogeno. En lo que se refiere al almacenamiento y comercialización de hidrocarburos, se considera como hidrocarburos líquidos a aquellos que tiene como punto de inflamación superior a los 37.8° C (100° F) y se subdividen en: Clase II, cuando tienen puntos de inflamación igual o mayor a 37,8° C (100° F), pero menor de 60° C (140° F); Clase IIIA, cuando tienen punto de inflamación igual o mayor a 60° C (140° F), pero menor de 93° C (200°F) y Clase IIIB, se incluyen a aquellos líquidos que tienen punto de inflamación igual o mayor a 93° C (200° F)”. (28)

Figura 1. Tipos de hidrocarburos



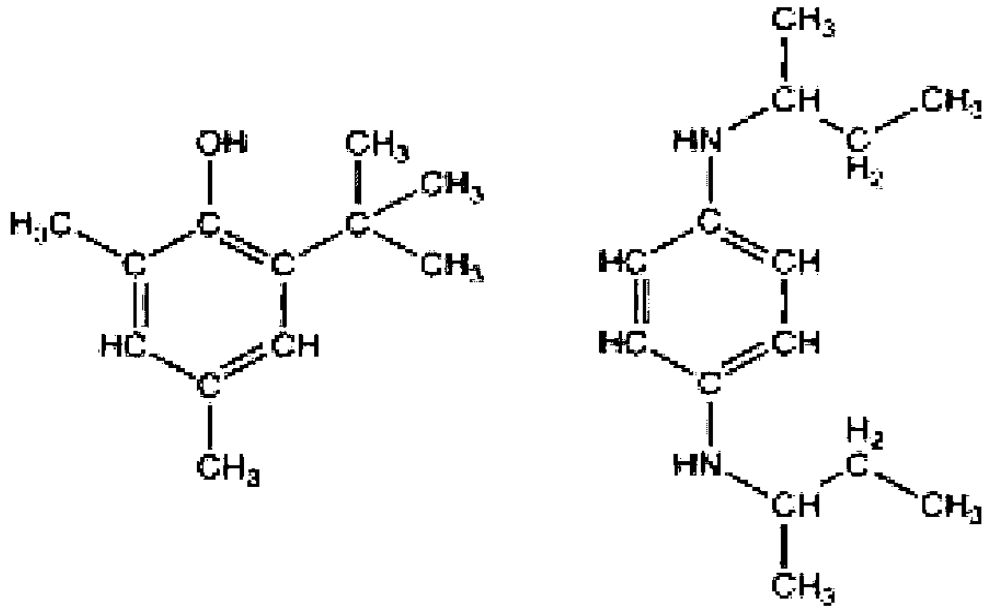
Fuente: (27)

2.2.5. Diesel

Según Zárate, “el diesel es un combustible hidrocarburado y está formado por componentes parafínicos, naftalénicos y aromáticos, su contenido de carbono se encuentra entre C10 y C22, se considera como un hidrocarburo de fracción media. El contaminante más importante contenido en el diesel es el azufre, mediante la combustión se convierte en óxido de azufre que al entrar al contacto con la humedad del aire se transforma en ácido sulfúrico, también contiene nitrógeno que se libera como óxido nitroso, ambos, el óxido de azufre y el óxido nitroso son causantes de la lluvia ácida. Las propiedades que representa a este combustible son el índice de cetano, que mide la calidad de la ignición; el contenido de azufre, a menor contenido de azufre, el diesel es más limpio y menos contaminante y finalmente, su densidad y viscosidad”. (27)

Ron afirma “que el diesel es un combustible, que al igual que la gasolina, es ampliamente utilizado como combustible para motores. Los motores que utilizan diesel como combustible son más eficientes que los motores que utilizan gasolina como carburante ya que aprovechan alrededor de 35% de energía liberada por combustión mientras que los motores a gasolina no superan el aprovechamiento de 25%”. (29)

Figura 2. Estructura química del diésel



Fuente: (27)

2.2.6. Impactos de los hidrocarburos en el suelo

Cuando los hidrocarburos están presentes en el suelo, dificultan el intercambio gaseoso con la atmósfera iniciando una serie de procesos fisicoquímicos como la evaporación y penetración que, dependiendo al tipo de hidrocarburos, temperatura, humedad, textura del suelo y cantidad vertida puede ser más o menos lentos lo que provoca una mayor toxicidad. La contaminación del suelo por hidrocarburos hace que se presente una moderada, alta o extrema salinidad, lo que dificulta su tratamiento, debido a que altos gradientes de salinidad pueden afectar negativamente la estructura de las proteínas, desnaturalizar enzimas y deshidratar células, lo cual es mortal para muchos microorganismos utilizados para el tratamiento de suelos. (3)

Según Zárate, las propiedades físicas del suelo más impactadas por los hidrocarburos, especialmente por el Diésel, son su estructura, debido a la separación de la textura del suelo y el aumento de la retención del agua; mientras que, en las propiedades químicas más afectadas, son el aumento de carbono orgánico, la disminución de su pH, el incremento de manganeso y hierro intercambiable y el aumento del fósforo disponible. (27)

La gasolina, querosene, aceites, combustibles, parafinas y el asfalto entre muchos otros derivados de los hidrocarburos no solo afectan la capa superficial del suelo, también pueden filtrarse hasta las aguas subterráneas produciendo así

contaminación, además pueden ser transportados por escorrentía incrementando aún más el impacto ambiental. Este tipo de contaminación afecta las propiedades físicas y químicas del agua disminuyendo el oxígeno disuelto. Uno de los efectos más resaltantes, tanto en el agua como en el suelo, es que el petróleo consume oxígeno, incrementa la demanda bioquímica del agua y puede generar condiciones anóxicas. (30)

La cantidad de arena, limo, arcilla y la cantidad de materia orgánica presente en el suelo determinan la disposición de los hidrocarburos y la magnitud del daño a las plantas. Los hidrocarburos impactan indirectamente a las plantas, generando compuestos tóxicos en el suelo que son absorbidos por estas, además también produce una pérdida de la estructura del suelo, pérdida de la concentración de materia orgánica y pérdida de los nutrientes mineralizados del suelo como el nitrógeno, fósforo, potasio y sodio de igual forma el suelo está expuesto a procesos de erosión y lixiviación. La presencia de los hidrocarburos en el suelo origina la pérdida de fertilidad, disminución de los rendimientos en las cosechas y muy probablemente consecuencias para la salud de los seres humanos. (30)

2.2.7. Biorremediación

“La biorremediación es una técnica que emplea el potencial metabólico de los microorganismos (su capacidad de biodegradación) para purificar medios contaminados. Se puede definir también como un grupo de tratamientos, contra la contaminación de un medio, que emplea sistemas biológicos para acelerar la destrucción o transformación de compuestos químicos en otros menos tóxicos. Estos microorganismos utilizan su capacidad enzimática para mineralizar los compuestos contaminantes o degradarlos hasta productos intermedios, en un ambiente aerobio o anaerobio. Existen factores determinantes como son: nutrientes esenciales (nitrógeno y/o fósforo), aceptores adecuados de electrones, condiciones medioambientales apropiadas (pH, potencial redox, humedad), ausencia de poblaciones microbianas con potencial enzimático”. (31)

La eficiencia de la biorremediación depende factores importantes como la magnitud, toxicidad, degradabilidad, así como también la capacidad con la que se dispone para controlar y monitorear el proceso de biorremediación. (32)

Cuando la biorremediación es llevada a cabo en el mismo lugar se considera como biorremediación in situ y cuando la biorremediación se desarrolla en un lugar especialmente preparado es conocida como biorremediación ex situ. (32)

a) Biorremediación In situ

La biorremediación in situ está compuesta de cuatro métodos básicos: atenuación natural, bioventeo, bioestimulación y bioaumentación. El proceso de atenuación natural se refiere al proceso esencial de biorremediación, depende de factores físicos, químicos y biológicos que bajo condiciones especiales se desarrollan sin la intervención del humano para reducir los contaminantes. Por otro lado, el bioventeo es el proceso donde se suministra aire e incluso nutrientes al área contaminada mediante ductos y tuberías, se basa en proveer concentraciones moderadas de aire para estimular el metabolismo aerobio de los microorganismos y promover la oxidación de los contaminantes. La bioestimulación es un proceso similar al bioventeo, está basado en aumentar la actividad microbiana endógena del suelo contaminado agregando nutrientes, oxígeno, surfactantes o agua, sin embargo, el proceso de bioestimulación tiene limitaciones debido a que los suelos contaminados muchas veces no cuentan con los microorganismos adecuados para degradar los contaminantes. Finalmente, la bioaumentación es un proceso donde se inoculan microorganismos concretos, microorganismos genéticamente modificados al medio contaminado con el objetivo de acelerar el proceso de biorremediación. (32)

b) Biorremediación Ex situ

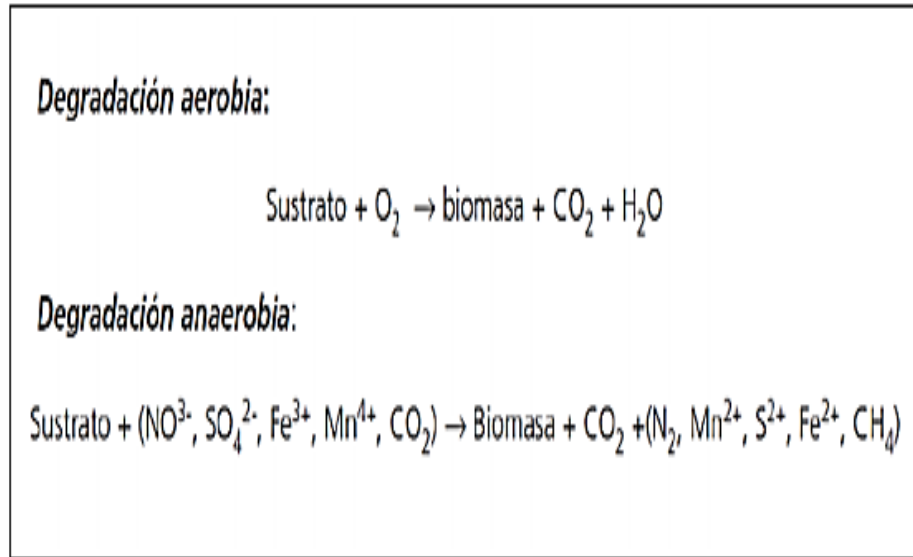
Entre los métodos de biorremediación ex situ se encuentran las técnicas comúnmente denominadas landfarming, el composteo, las biopilas y los biorreactores. El landfarming consiste en extraer el suelo contaminado de unos 10 a 35 cm de profundidad y depositarlo sobre una cama previamente preparada donde en el fondo se encuentre una geomembrana que sirve como aislante para evitar filtraciones. Una vez que el suelo haya sido depositado en las camas se estimulan las colonias bacterianas para que inicien la degradación de los contaminantes. Por otra parte, el composteo es un proceso de degradación de residuos orgánicos basada en la capacidad metabólica de los microorganismos anaerobios y en algunas ocasiones aerobias. Las biopilas consisten en juntar suelos contaminados con suelos previamente preparados para depositarlos en un área determinada, este proceso se lleva a cabo usando parámetros como la aireación, humedad, nutrientes, calor, oxígeno, y pH que son controlados. El método de las biopilas ha resultado ser una práctica muy

efectiva para remediar suelos contaminados con petróleo. Finalmente, la tecnología de los biorreactores puede ser usado para tratar suelos, sedimentos, lodos o aguas contaminadas. En resumen, los medios son depositados en recipientes con inocuos, nutrientes y parámetros controlados para su biorremediación (32). “Los biorreactores de sólidos en suspensión, son uno de los métodos más usados para biorremediar suelos contaminados debido a su capacidad para controlar las condiciones de operación y para aumentar la actividad microbiana”. (32)

2.2.8. Fundamentación bioquímica de la biorremediación

La fundamentación bioquímica de la biorremediación está basada en diversas reacciones de óxido-reducción cuyo fin principal es la obtención de energía que se genera en la cadena respiratoria o transportadora de electrones de la célula. El ciclo inicia con un sustrato orgánico (compuesto hidrocarburado) externo a la célula y que actúa como donador de electrones, de modo que la célula realiza la actividad metabólica degradando y consumiendo dicho compuesto. Los aceptores usados frecuentemente por los microorganismos son el oxígeno, los nitratos, el hierro III, los sulfatos y el óxido de carbono. Cuando los microorganismos usan el oxígeno como aceptor de electrones la respiración microbiana se produce en condiciones aerobias y los procesos de biodegradación serán de tipo aerobio, por otro lado, cuando usan los sulfatos o el dióxido de carbono se produce en condiciones reductoras o anaerobias y los procesos de biodegradación serán de tipo anaerobio. (33)

Figura 3. Reacciones de las degradaciones aerobias y anaerobias.

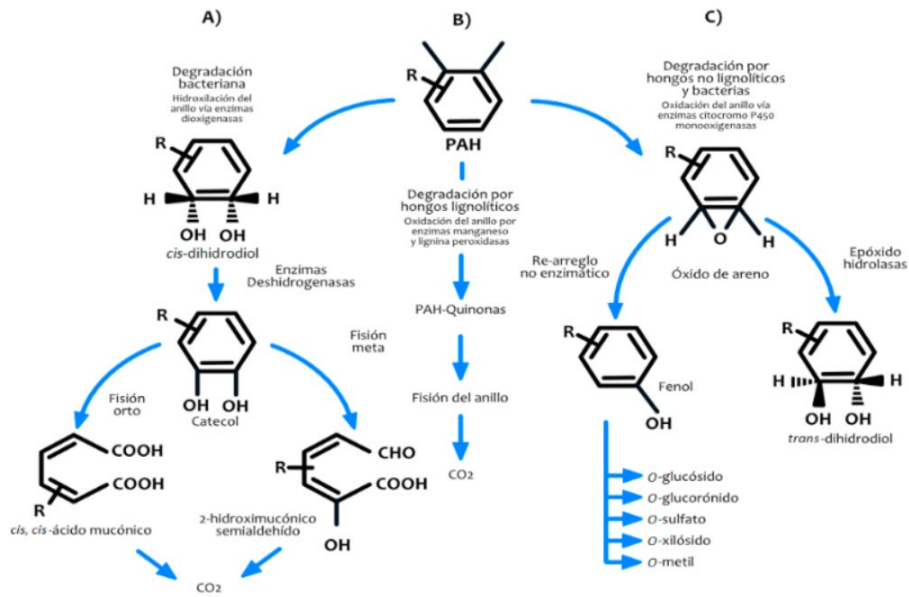


Fuente: (33)

2.2.9. Degradación de hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP'S)

Los HAP'S están presentes en varios sitios del ambiente como en el aire, suelo, sedimento, agua, aceite e incluso en productos alimenticios. Las bacterias y los hongos tienen la capacidad de degradar estos compuestos tóxicos mediante procesos aerobios y anaerobios. Básicamente se presentan tres mecanismos aerobios de degradación, los cuales están basados en la oxidación del anillo aromático, seguido de la descomposición en metabolitos y CO₂. En el proceso donde solo intervienen las bacterias el primer paso es la oxidación de anillo aromático que es realizado por las enzimas dioxigenasas que catalizan la producción de dihidrodiol. Al mismo tiempo, es oxidado por las enzimas deshidrogenasas y el intermediario dihidroxilado el catecol es fisionado produciendo CO₂ Y H₂O. En el caso del metabolismo fúngico, existen dos procesos. El primero que es mediado por hongos lignolíticos donde la degradación de HAPs ocurre por acción de las enzimas tipo lacasas y peroxidasas que generan quinonas de HAPs y ciertos ácidos que son posteriormente convertidos en CO₂. En el segundo proceso que es mediado por hongos no lignolíticos y bacterias, el primer paso es catalizado por la enzima citocromo P₄₅₀ monooxigenasa que convierte el HAP en oxido de areno que pueden ser convertidos en energía para los microorganismos. (32)

Figura 4. Principales rutas de degradación de hidrocarburos aromáticos.



Fuente: (32)

2.2.10. Microorganismos que degradan hidrocarburos el suelo

Existen muchas clases de microorganismos capaces de biodegradar los contaminantes (mohos, levaduras, bacterias, actinomicetos, protozoos, algas y virus). En el caso de los hidrocarburos, las bacterias Gran negativas parecen encontrarse más familiarizadas a estas fuentes de carbono. Hoy en día, gracias a muchos estudios realizados podemos enumerar una lista de géneros de microorganismos que degradan los hidrocarburos, los más conocidos son las especies *Flavobacterium*, *Achromobacter*, *Rhodococcus*, *Micrococcus*, *Bacillus*, *Corynebacterium*, *Pseudomonas*, *Aeromonas*, *Acinetobacter* y en menos ocasiones *Mycobacterium*, *Aspergillus*, *Fusarium*, *Penicillium*, *Rhodotorula* y *candida*. (33).

Los *Rhodococcus* son aerobios, gran positivos, actinomicetos que algunas veces presentan proyecciones filamentosas. Algunas cepas producen poli-3-hidroxiacanoatos, bioacumulación de metales pesados y tiene algunas enzimas útiles como la finilalanina, deshidrogenasa y endoglucosidasas, el *Rhodococcus* presenta una gran variedad de vías metabólicas para biodegradar y transformar compuestos aromáticos, a esto se suma su capacidad de desarrollo y reproducción en medios con bajos nutrientes. El *Rhodococcus sp* utiliza el dibenzotiofeno (DBT) como fuente principal de azufre, hay especies de *Rhodococcus* que tienen la capacidad de biodegradar compuestos alifáticos. (3)

Las *Pseudomonas* son bacterias gram negativas, oblicuas que pertenecen a la subclase gamma de las proteobacterias. Las *Pseudomonas* tiene la capacidad de ser productor de biosurfactantes lo que ayuda a solubilizar y facilitar la penetración de los hidrocarburos a través de la pared celular hidrofílica, además contienen enzimas degradadoras de hidrocarburos en la membrana citoplasmática. Las *Pseudomonas aeruginosa* tiene la capacidad de degradar sustratos como el n-hexadecano, mineralizar compuestos alifáticos en condiciones aerobias y degradar hidrocarburos aromáticos y poli aromáticos. Las *Pseudomonas Fluorescens* pueden degradar naftaleno y fenantreno. (3)

El *Acinetobacter sp* es un bacilo Gram negativo, es productor de ácido a partir de la glucosa. Dentro de las especies más destacadas *A. baumannii*, *Acinetobacter calcoaceticus*, *Acinetobacter baumannii* tienen la capacidad de degradar fracciones de alcanos. (3)

Se identificaron cepas de *Mycobacterium austroafricanum* y *Mycobacterium sp* que utilizan como fuente de carbono y sustrato n.alcanos y multimetil, donde degradan el metil t-butil y eter. (3) La biodegradación de gasolina por microflora de suelo y agua en sitios contaminados es muy eficaz alcanzando niveles de hasta 90% de biodegradación.

2.2.11. Biosólidos

Los biosólidos son un tipo de material orgánico producto del tratamiento de aguas residuales. Hay diferentes clases de biosólidos. “La clase A se refiere a biosólidos con niveles de patógenos no detectables; cumplen con estrictos requerimientos de atracción de vectores, así como bajos niveles de metales pesados” (34). “Los de la clase B son biosólidos tratados que contienen niveles detectables de patógenos, sin embargo, se pueden aplicar a terrenos agrícolas con restricciones en cultivos”. (34).

Los biosólidos son productos derivados resultante de la estabilización de la fracción orgánica de los lodos residuales generados en el tratamiento de las aguas residuales, con características físicas químicas y microbiológicas que permiten su aplicación como mejorador del suelo, no son biosólidos las cenizas producto de la incineración de lodos residuales. (34)

2.2.12. Aprovechamiento y usos de los biosólidos

Según DS. N° 01-2017-VIVIENDA “los biosólidos de clase A destinado para su reaprovechamiento como acondicionador de suelos en agricultura y/o mejoramiento de suelos. De manera enunciativa y no limitativa, podrá ser reaprovechado en las siguientes actividades: (a) Producción de almácigo y utilización en viveros, (b) Acondicionamiento de suelos para agricultura, pastos y forrajes, excepto aplicación directa a los cultivos de vegetales y frutas rastreras de consumo crudo, (c) Mejoramiento de suelos y áreas verdes urbanas, con acceso restringido a la población en un periodo no menor a siete días, (d) Aplicación en las áreas destinadas para la clase B, (e) Comercialización a empresas productoras de insumos de usos agrícolas debidamente registradas ante SENASA, que se encarguen de producir compost, humus u otros productos con fin de acondicionamiento del suelo, (f) Comercialización a empresas del sector privado que tengan como objetivo social la producción, comercialización y disposición final de biosólidos, (g) Comercialización a empresas operadoras de residuos sólidos, para los fines que considere pertinente”. (34)

Según DS. N° 01-2017-VIVIENDA “los biosólidos de clase B están destinado para su reaprovechamiento en suelos que excluyen el riesgo de contacto con la población y actividades ganaderas. De manera que, este biosólido podrá ser reaprovechado únicamente en las siguientes actividades: (a) Fines agrícolas y/o forestales para plantas de tallo alto y que son procesados para su comercialización, como cultivo de café, así como cultivos para la producción de fibra y madera, (b) Recuperación de áreas degradadas ubicadas: a 100 metros de distancia de pueblos y viviendas, (c) Reforestación de suelos con acceso restringido a la población y/o animales por un periodo mínimo de treinta días a partir de la aplicación del biosólido, (d) Material de cobertura final par rellenos sanitarios, rellenos de seguridad o canchas de relaves con fines de reforestación o siembra de otros cultivos, (e) Comercialización a empresas que se encarguen de transformar biosólidos clase B en clase A, para su venta como compost, humus u otros acondicionadores de suelos, (f) Comercialización a empresas operadoras de residuos sólidos, para los fines que considere pertinente”. (34)

2.2.13. Beneficio del composteo de biosólidos

Los biosólidos son productos de las plantas de tratamiento de aguas residuales – PTAR que pueden ser utilizados en beneficio del suelo después de pasar por procesos de estabilización. Los biosólidos generados en PTAR presentan tienen la característica de tener baja porosidad que causa dificultades durante el proceso de compostaje por una inadecuada aireación, lo que se puede enmendar adicionando materiales de soporte. (35)

Es viable el compostaje de biosólidos, siendo imprescindible incorporar materiales de soporte y de enmienda que puedan mejorar la estructura, manejabilidad y mejorar la relación de carbono y nitrógeno. (35)

“El proceso de compostaje, además de ser una alternativa de estabilización de la materia orgánica, favorece la gestión de los biosólidos generados en las PTAR, disminuyendo los requerimientos de transporte y área para su disposición final”. (35)

2.2.14. Composición del bioabono pasteurizado y calcificado a base de biosólidos producidos por la empresa ECOTHANI S.A.C.

La empresa ECOTHANI PERU S.A.C mediante un proceso mecanizado de alta calidad realiza el compostaje de los biosólidos provenientes de la PTAR San Jerónimo de Cusco obteniendo así un Abono Orgánico Calcificado y Pasteurizado la cual tiene las siguientes características:

Tabla 2. *Ingredientes del Biosólido compostado.*

Ingredientes	%
Biosólido Orgánico	75%
Sustrato de Calcio	10%
Humus	5%

Fuente: *elaboración propia.*

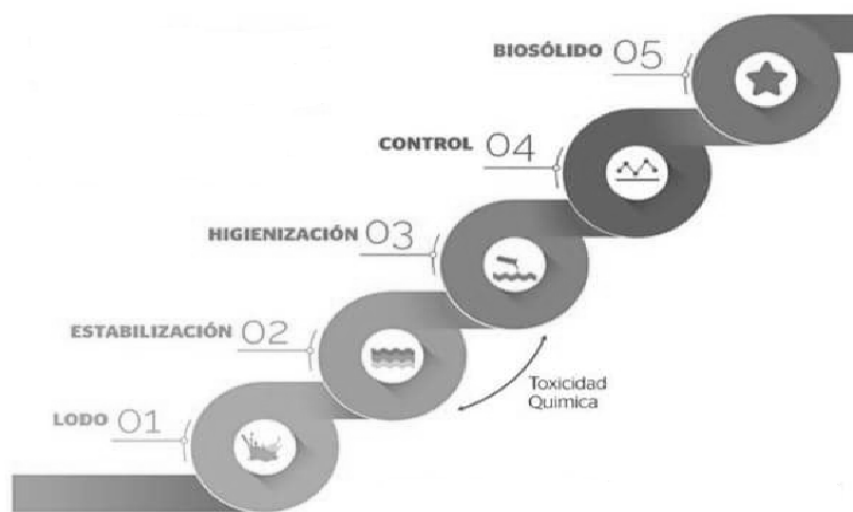
Tabla 3. *Composición del Biosólido compostado.*

COMPOSICIÓN	%
PH	7
NITRÓGENO (NT)	3-5%
FÓSFORO (P205)	3-5%

CALCIO (CAO)	10-20%
POTACIO (K ₂ O)	3-5%
MAGNECIO (MGO)	2-4%
HUMEDAD %	25%
MATERIA ORGÁNICA	25-30%

Fuente: elaboración propia.

Figura 5. *Proceso de producción de un biosólido.*



Fuente: (36)

2.2.15. Características del bioabono pasteurizado y calcificado a base de biosólidos producidos por la empresa ECOTHANI S.A.C.

- a) Es un abono mejorado y recuperador del suelo 100% natural.
- b) Es producto libre de impurezas que reduce el consumo de agua y aporta microorganismos benéficos del suelo.
- c) Es un producto que incorpora los principales parámetros del suelo de fertilización para las plantas, con un pH y un alto contenido nutricional.

2.2.16. Beneficios del bioabono pasteurizado y calcificado a base de biosólidos producidos por la empresa ECOTHANI S.A.C.

- a) Mejoran las propiedades físicas, químicas y biológicas de los suelos recuperando y mejorando su fertilidad. Restaura suelos contaminados por

metales pesados neutralizándolos para que no formen sales tóxicas ni ácidas. Mejora el pH del suelo, fortifica y nutre.

- b) Permite su aplicación directa sin generar impactos o contaminación del suelo, aire o agua. Devuelve a la tierra sus nutrientes naturales esenciales y revierte el equilibrio ecológico.
- c) Permite mejorar la producción de las tierras agrícolas del poblado, promueve el entorno organizado de producción, genera desarrollo de nuevos cultivos en beneficio de la comunidad.
- d) Es un producto a precio justo, que reúne y mejora las características y fertilizantes orgánicos de mayor costo (guano de isla, sustrato, compost).

2.3. Definición de términos básicos

- **Ambiente:** es el conjunto de elementos bióticos y abióticos que están condicionados por la existencia de los seres humanos y demás organismos vivos que interactúan constantemente con diversos factores en un determinado tiempo y espacio. (37)
- **Atmósfera:** es la mezcla de gases homogénea sobre un rango de altura en relación al clima es decir la troposfera y estratosfera. Ser cree que el balance los componentes dominantes del aire ha evolucionado considerablemente durante el proceso de desarrollo constante de la humanidad resaltando el aumento de los gases de efecto invernadero durante las últimas décadas. (38)
- **Biodegradable:** descomposición ocasionada por la intervención de los organismos vivos bajo condiciones naturales. (37)
- **Calidad ambiental:** equilibrio natural de los procesos geoquímicos, biológicos y físicos en sus diversas interacciones. La calidad ambiental puede ser afectada positiva y negativamente por la acción humana y podría ponerse en riesgo la integridad del medio ambiente y la salud de las personas. (37)
- **Contaminación:** resultado de la introducción de contaminantes en el ambiente en concentraciones más elevadas a los límites máximos permisibles tomando en cuenta su capacidad acumulativa o sinérgico de los contaminantes en el medio ambiente. (37)
- **Contaminante:** sustancia o elemento que en determinadas concentraciones pueden afectar la calidad del agua, suelo, aire o al ser humano. (37)

- **Desertificación:** son todos aquellos factores geológicos, climáticos, biológicos y humanos que ocasionan la degradación de las propiedades físicas, químicas y biológicas de los suelos de las zonas áridas y semiáridas poniendo en peligro el desarrollo normal de la biodiversidad y por ende la supervivencia de las comunidades humanas. También se puede definir como el proceso provoca una disminución de la productividad biológica lo cual conlleva a una reducción de la biomasa vegetal lo cual es vital para el ser humano. (37)
- **Ecosistema:** son los sistemas naturales formado por la biocenosis (organismos vivos) y el biotipo (medio físico donde se relacionan) la cual está compuesta por componentes abióticos (clima, sustancias orgánicas y sustancias inorgánicas) y factores bióticos (productores, consumidores y descomponedores). (39)
- **Residuo sólido:** sustancias, productos o subproductos en estado sólido o semisólido que su generador está en la obligación de proveer una disposición final en base a los establecido en la normatividad nacional para salvaguardar el bienestar del ambiente y la salud pública. (37)
- **Resiliencia:** ecológicamente es la capacidad de un individuo, comunidad o sociedad de adaptación a los cambios manteniendo su nivel de funcionamiento y estructura. (37)
- **Sustentabilidad:** son aquellos procesos de crecimiento productivo cuyo objetivo principal es la mantención indiscutible de los recursos naturales renovables y no renovables. Para el caso de los recursos naturales renovables, la cantidad de utilización debe ser equivalente a la cantidad de reposición del recurso empleado. Por otro lado, para los recursos naturales no renovables la cantidad de utilización debe ser equivalente a la cantidad de sustitución del recurso empleado. (38)
- **Toxicidad:** virtud de la capacidad de ocasionar daño a un organismo vivo. (37)

CAPÍTULO III

METODOLOGÍA

3.1. Método y alcance de la investigación

3.1.1. Método general

La investigación se desarrolló utilizando el método Hipotético-Deductivo. Según Ferial y otros el método Hipotético-Deductivo tiene tres pasos fundamentales: observación del fenómeno o problemática a estudiar, formulación de una hipótesis, verificación y discusiones propias de la hipótesis antes planteada. Mediante el uso de reglas lógicas de la deducción, se llega a nuevas conclusiones y predicciones empíricas. Este método permite comprobar de forma mediata de la veracidad de la hipótesis planteada. (40)

3.1.2. Alcance de la investigación de la investigación

La presente investigación es de alcance explicativo y de enfoque cuantitativo. Según Sampieri, la investigación explicativa se centra en interpretar la razón por que sucede un fenómeno y en qué condiciones se manifiestan o porque se relacionan dos o más variables. (41). Por lo antes expuesto, en la presente investigación se explica e interpreta cómo es que la variable independiente (biosólido compostado) influye en la variable dependiente (concentración del contaminante).

3.1.3. Tipo de investigación

La presente investigación es de tipo aplicada. Según Muntané la investigación aplicada se basa en la aplicación o uso de los conocimientos que se adquieren durante su desarrollo. La investigación aplicada va a depender de los resultados obtenidos en la investigación básica, es decir que este tipo de investigación requiere un marco teórico, aunque lo fundamental son las consecuencias prácticas. (42)

3.2. Diseño de la investigación

El diseño de la investigación es de tipo experimento puro. Según Sampieri, los experimentos puros implican la manipulación intencional de variables independientes, la medición de variables dependientes, el control o validez y la disposición de los grupos asignados al azar o emparejados. (41)

Según López “el diseño experimental al azar está basado en los principios de aleatorización y repetición, este diseño experimental se utiliza cuando no existe la

necesidad del realizar control local, debido a que las condiciones son homogéneas, la asignación de las unidades experimentales se distribuye en forma aleatoria completa sin ninguna restricción de las unidades experimentales”. (43)

El diseño experimental usado en la presente investigación es el modelo completamente aleatorizado, en la cual los tratamientos serán asignados al azar entre las unidades experimentales. Distribuido en 5 bloques de 3 unidades experimentales haciendo un total 15 unidades experimentales, adicionalmente se tiene un testigo. Para cada unidad experimental se ha utilizando macetas con una capacidad de 4 kilogramos.

3.3. Población y muestra

La población en la presente investigación está representada por el total de muestras de suelo tomadas de un terreno de cultivo del Distrito de Lamay, Provincia de Calca, Departamento del Cusco.

La muestra está constituida en un total de 65 kg de suelo recolectado, siguiendo un método aleatorio simple de muestreo según la Guía para Muestreo de Suelos en el marco del Decreto Supremo N° 002-2013-MINAM, Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para Suelo. Respecto al muestreo aleatorio simple, se tomaron las muestras de una forma directa usando una rejilla rectangular imaginaria donde se determinaron 20 puntos de muestreo distribuidos de forma ordenada en un plano cartesiano (X, Y). Para el proceso de muestreo, se usó el método de la calicata en una superficie de 50 cm x 50 cm, donde se recolectaron muestras de los primeros 60 cm de profundidad de suelo con un peso aproximado de 4kg por cada punto de muestreo.

3.4. Procedimientos de la investigación

3.4.1. Etapa de Pre-campo

- a) Se inició con la elaboración del método para la toma de muestras de suelo.
- b) Se elaboró la dosificación de los tratamientos para el ensayo experimental la cual está distribuida de la siguiente forma:

Tabla 4. *Tratamientos de estudio para la investigación.*

Bloque de tratamiento	Repeticiones	Descripción
Testigo	T0	100% de suelo contaminado
A	TA1	10% de biosólido compostado y 90% de suelo contaminado
	TA2	10% de biosólido compostado y 90% de suelo contaminado
	TA3	10% de biosólido compostado y 90% de suelo contaminado
B	TB1	20% de biosólido compostado y 80% de suelo contaminado
	TB2	20% de biosólido compostado y 80% de suelo contaminado
	TB3	20% de biosólido compostado y 80% de suelo contaminado
C	TC1	30% de biosólido compostado y 70% de suelo contaminado
	TC2	30% de biosólido compostado y 70% de suelo contaminado
	TC3	30% de biosólido compostado y 70% de suelo contaminado
D	TD1	40% de biosólido compostado y 60% de suelo contaminado
	TD2	40% de biosólido compostado y 60% de suelo contaminado
	TD3	40% de biosólido compostado y 60% de suelo contaminado
E	TE1	50% de biosólido compostado y 50% de suelo contaminado
	TE2	50% de biosólido compostado y 50% de suelo contaminado
	TE3	50% de biosólido compostado y 50% de suelo contaminado

Fuente: elaboración propia.

- c) Posteriormente, se eligió el laboratorio para los análisis de las propiedades fisonómicas y de hidrocarburos totales de petróleo del suelo.

3.4.2. Etapa de Campo

3.4.2.1. Procedimiento de toma de muestra de suelo

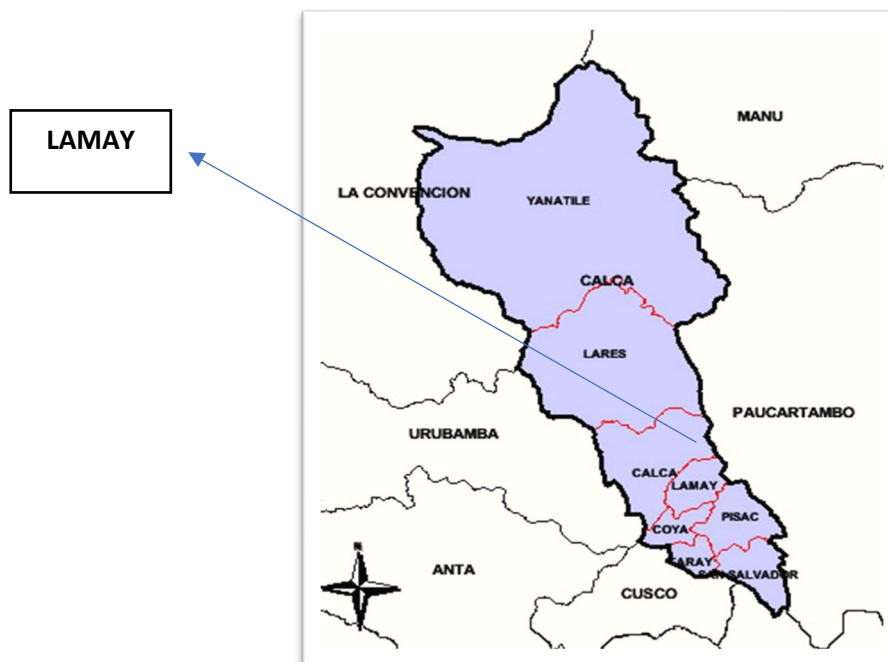
Se realizó el muestreo del suelo agrícola utilizando el método Aleatorio Simple, siguiendo la Guía para Muestreo de Suelos En el marco del Decreto

Supremo N° 002-2013-MINAM, Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para Suelo. En total, se tomaron muestras de 20 puntos las cuales fueron depositadas en sacos de polipropileno para su posterior homogenización y simulación de contaminación.

3.4.2.2. Ubicación geográfica del área de toma de muestras.

El área de toma de muestras para la experimentación se encuentra ubicada en el Distrito de Lamay de la Provincia de Calca del Departamento del Cusco.

Figura 6. *Ubicación de muestreo*



Fuente: Propia

3.4.3. Etapa de Experimentación

- a) Se realizó una simulación de la muestra contaminada para la cual se utilizó diésel adquirido de un grifo. Se agregaron aproximadamente 2 litros del petróleo en la muestra total de suelo agrícola extraído de terreno de cultivo del Distrito de Lamay, posteriormente se procedió a homogenizar y tamizar la muestra para poder separar material rocoso y residuos de materia orgánica.
- b) Luego de tener listo el suelo contaminado, se procedió a realizar las dosificaciones de biosólidos para los tratamientos según lo planificado en el diseño experimental.

- c) Los tratamientos fueron controlados durante 3 meses, se realizó un riego diario con medio litro de agua y estando expuesto a condiciones naturales ambientales.
- d) Culminada la etapa de tratamiento se extrajeron muestras de cada uno de los tratamientos para su respectivo análisis de laboratorio y su posterior análisis en gabinete.

3.4.4. Etapa de Laboratorio

Las muestras de suelo fueron enviadas a la Unidad de Prestaciones de Servicios de Análisis Químico de la Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco para ser analizadas en los parámetros fisicoquímicos e hidrocarburos totales de petróleo.

3.4.5. Etapa de Gabinete

Una vez finalizado los tratamientos y teniendo los resultados de los análisis de suelos, (TPH) se hizo la prueba de Shapiro-Wilk para verificar la normalidad del conjunto de datos manejados en la investigación, al comprobar dicha distribución se procedió a realizar el Análisis de Varianza (ANOVA) utilizando el software Minitab y por último se aplicó la prueba Tukey para probar y comparar todas las diferencias entre las medias de los tratamientos de la investigación.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Presentación de resultados

En el desarrollo de este capítulo se darán a conocer los resultados del análisis físico químico del suelo contaminado, el análisis de la variación de la concentración de los hidrocarburos totales de petróleo antes y después de realizar el tratamiento de biorremediación.

De igual manera, se realizará un análisis de cuál fue la dosificación óptima de biosólido compostado para la biorremediación la cual fue determinado mediante el cálculo de la significancia estadística haciendo uso de los estimadores estadísticos. Los resultados de los análisis del suelo se procesaron primeramente realizando la prueba de Shapiro-Wilk para verificar la normalidad del conjunto de datos manejados en la investigación, al comprobar dicha distribución se procedió a realizar el Análisis de Varianza (ANOVA) utilizando el software Minitab y por último, se aplicó la prueba Tukey para probar y comparar todas las diferencias entre las medias de los tratamientos de la investigación.

4.1.1. Análisis de las propiedades fisicoquímicas del suelo contaminado

Tabla 5. *Análisis inicial de las propiedades fisicoquímicas del suelo contaminado.*

Parámetro	Unidad de medición	Valor
pH		7.65
C.E	mmhos/cm	0.49
Materia Orgánica	%	6.40
Nitrógeno	%	0.29
Fosforo	ppm P ₂ O ₅	9.90
Potasio	Ppm K ₂ O	177.90
C.I.C	meq/100	12.50
C.C	%	27.21
H.E	%	29.45
P.M.P	%	14.69
d.a	g/cc	1.396
Arena	%	62

Limo	%	34
Arcilla	%	4

Fuente: *Laboratorio de análisis químico de la Universidad Nacional San Antonio Abad del Cusco.U*

De acuerdo a la tabla, la textura del suelo es franco arenoso. También, se aprecia que el suelo tiene una buena fertilidad con una alta concentración de N, P, K. Así mismo, presenta una elevada concentración de materia orgánica debido a la presencia de hidrocarburos. Tiene un pH alcalino lo cual es normal en terrenos de cultivo. Debido a lo antes expuesto, podemos afirmar que el suelo contaminado tiene características favorables para el desarrollo óptimo de los microorganismos que degradaran los hidrocarburos presentes en el suelo.

4.1.2. Análisis inicial de las concentraciones de hidrocarburos totales de petróleo del suelo contaminado.

Tabla 6. *Análisis inicial de las concentraciones de hidrocarburos totales de petróleo del suelo contaminado.*

Bloque de tratamiento	Repeticiones	Concentración gr de TPH/kg de suelo contaminado
Testigo	T0	30.53gr/kg
A	TA1	26.04gr/kg
	TA2	27.89gr/kg
	TA3	24.02gr/kg
B	TB1	26.06gr/kg
	TB2	22.82gr/kg
	TB3	28.34gr/kg
C	TC1	22.10gr/kg
	TC2	30.10gr/kg

	TC3	20.08gr/kg
D	TD1	24.21gr/kg
	TD2	25.85gr/kg
	TD3	27.75gr/kg
E	TE1	32.45gr/kg
	TE2	22.31gr/kg
	TE3	20.68gr/kg

Fuente: Laboratorio de análisis cromatografía de la Universidad Nacional San Antonio Abad del Cusco.

En los resultados de análisis de laboratorio realizados en el Laboratorio de Análisis de Cromatografía de la Universidad Nacional De San Antonio Abad Del Cusco, se aprecia que el tratamiento 0 (T0) tuvo una concentración inicial de 30.53 gramos de TPH/ Kg de suelo, este fue enviado a laboratorio inmediatamente después de la simulación de la muestra contaminada. Los bloques de tratamientos A, B, C, D, E fueron sometidos a un proceso de exposición a condiciones ambientales y ligero riego durante 48 horas para producir la aireación y la evaporación de los hidrocarburos de petróleo, lo cual contribuyen de alguna forma a la disminución de los contaminantes.

Considerando que los análisis de cada una de las repeticiones de los bloques de tratamiento A, B, C, D, E fueron realizados antes de la dosificación, se observa que en algunos tratamientos tuvo una ligera disminución en la concentración de TPH a comparación del tratamiento 0 (TO), la cual demuestra que el proceso al que fueron sometidos dichos tratamientos tuvo un impacto positivo en la degradación de los TPH.

4.1.3. Análisis post tratamiento de las concentraciones de hidrocarburos totales de petróleo del suelo contaminado

Tabla 7. *Análisis post tratamiento de las concentraciones de hidrocarburos totales de petróleo del suelo contaminado.*

Bloque de tratamiento	Repeticiones	Concentración gr de TPH/kg de suelo contaminado
Testigo	T0	29.28gr/kg
A	TA1	21.12gr/kg
	TA2	22.22gr/kg
	TA3	18.08gr/kg
B	TB1	18.13gr/kg
	TB2	16.09gr/kg
	TB3	21.11gr/kg
C	TC1	14.99gr/kg
	TC2	22.80gr/kg
	TC3	12.79gr/kg
D	TD1	19.01gr/kg
	TD2	21.16gr/kg
	TD3	21.86gr/kg
E	TE1	27.63gr/kg
	TE2	17.71gr/kg
	TE3	15.23gr/kg

Fuente: *Laboratorio de análisis cromatografía de la Universidad Nacional San Antonio Abad del Cusco.*

Pasado los 3 meses de tratamiento, se recolectó las muestras de todos los tratamientos para ser analizadas en el Laboratorio de Análisis de Cromatografía de la Universidad Nacional De San Antonio Abad Del Cusco. En los resultados de laboratorio, se evidencia que el tratamiento TE1 tuvo una concentración de 27.63 gr de TPH/Kg de suelo siendo la mayor concentración entre todas las repeticiones, el tratamiento TC3 tuvo una concentración de 12.79 gr de TPH/Kg de suelo siendo la menor concentración entre las repeticiones. A continuación, se realizará una interpretación de la reducción porcentual por cada repetición para tener una mayor claridad de la disminución de las concentraciones de hidrocarburos totales de petróleo.

4.1.4. Interpretación de la reducción porcentual de la concentración de hidrocarburos totales de petróleo post tratamiento

Tabla 8. Interpretación de la reducción porcentual de la concentración de TPH post tratamiento.

Tratamiento	gr de TPH/ Kg de suelo (inicial)	gr de TPH/ Kg de suelo (final)	Variación en gr de TPH/ Kg de suelo	Variación porcentual %
T0: 100% SC	30.53	29.28	1.25	4.09
TA1: 10%BP+90%SC	26.04	21.12	4.92	18.89
TA2: 10%BP+90%SC	27.89	22.22	5.67	20.33
TA3: 10%BP+90%SC	24.02	18.8	5.22	21.73
TB1: 20%BP+80%SC	26.06	18.13	7.93	30.43
TB2: 20%BP+80%SC	22.82	16.09	6.73	29.49
TB3: 20%BP+80%SC	28.34	21.11	7.23	25.51

TC1: 30%BP+70%SC	22.1	14.99	7.11	32.17
TC2: 30%BP+70%SC	30.1	22.8	7.3	24
TC3: 30%BP+70%SC	20.08	12.79	7.29	36.3
TD1: 40%BP+60%SC	24.21	19.01	5.2	21.48
TD2: 40%BP+60%SC	25.65	21.16	4.49	17.5
TD3: 40%BP+60%SC	27.75	21.86	5.89	21.23
TE1: 50%BP+50%SC	32.45	27.63	4.82	13.66
TE2: 50%BP+50%SC	22.31	17.71	4.6	20.62
TE3: 50%BP+50%SC	20.68	15.23	5.45	26.35

Fuente: *Elaboración propia.*

Según el cuadro. El tratamiento TC3 (30%BP+70SC) tuvo el primer lugar por tener la mayor varianza porcentual con un valor de reducción del 36.30% lo que equivale a 7.29 gramos de THP / Kg de suelo, mientras que el tratamiento TE1(50%BP+50SC) tiene la menor varianza porcentual con un valor de reducción de 13.66% que equivalen a 4.37 gramos de THP / Kg de suelo. El tratamiento T0 que no fue dosificado tuvo una varianza porcentual del 4.09%.

4.2. Procesamiento estadístico de la información.

Las pruebas estadísticas se realizaron con el Método de Análisis de Varianza (ANOVA) para un nivel de significancia (α) del 95%. Las pruebas estadísticas se hicieron en el software MINITAB.

Antes de poder realizar el análisis de varianza (ANOVA) se tuvo que verificar la normalidad del conjunto de datos manejados en la experimentación para lo cual se usó la prueba de SHAPIRO –WILK.

4.2.1. Prueba de SHAPIRO-WILK.

La prueba de SHAPIRO-WILK se utiliza para contrastar la normalidad de un conjunto de datos, para efectuarla se calcula la media y el p-valor de los tratamientos(estadístico), estos datos se calcularon en el software MINITAB.

Se rechazará la hipótesis nula de normalidad si el estadístico (p-valor) es menor que el nivel de significancia α (95%). Para un nivel de significancia del 95% el valor de alfa es 0.05.

Hipótesis Nula: Los datos obtenidos provienen de una población normalmente distribuida.

Hipótesis Alternativa: Los datos obtenidos no provienen de una población normalmente distribuida.

Tabla 9. Prueba de SHAPIRO-WILK.

Tratamientos	Media	p-valor
Tratamiento A	5.27	0.78
Tratamiento B	7.30	0.81
Tratamiento C	7.23	0.09
Tratamiento D	5.19	0.98
Tratamiento E	4.96	0.48

Fuente: Software MINITAB.

Como se observa en la tabla, los valores de p-valor son mayores que 0.05 (α), por lo que aceptamos la hipótesis nula. Por lo tanto, se confirma que los datos obtenidos provienen de una población normalmente distribuida y se puede proceder a realizar el análisis de varianza ANOVA.

4.2.2. Análisis de varianza ANOVA.

El análisis de varianza ANOVA permite determinar si diferentes tratamientos muestran diferencias estadísticas significativas. La hipótesis nula establece que todas las medias de la población (medias de los niveles de los factores) son iguales mientras que la hipótesis alternativa establece que al menos una es diferente.

Hipótesis nula: Existe diferencia estadística significativa entre los tratamientos y repeticiones.

Hipótesis alterna: No existe diferencia estadística significativa entre los tratamientos y repeticiones.

Para rechazar la hipótesis nula se siguen unas reglas de decisión que son las siguientes

- Si el p-valor es mayor que el nivel de significancia (α), se rechaza la hipótesis nula.
- Si el valor de la F calculada es menor que la F tabulada, se rechaza la hipótesis nula.

4.2.2.1. Procesamiento de datos

Tabla 10. *Agrupación de los datos.*

	Tratamiento "A"	Tratamiento "B"	Tratamiento "C"	Tratamiento "D"	Tratamiento "E"
Repetición 1	4.92	7.93	7.11	5.2	4.82
Repetición 2	5.67	6.73	7.3	4.49	4.6
Repetición 3	5.22	7.23	7.29	5.89	5.45

Fuente: Software MINITAB.

Tabla 11. *Resumen de los datos.*

<i>RESUMEN</i>	<i>Cuenta</i>	<i>Suma</i>	<i>Promedio</i>	<i>Varianza</i>
Repetición 1	5	29.98	5.996	2.03893
Repetición 2	5	28.79	5.758	1.56977
Repetición 3	5	31.08	6.216	0.96668
Tratamiento "A"	3	15.81	5.27	0.1425
Tratamiento "B"	3	21.89	7.296666667	0.363333333
Tratamiento "C"	3	21.7	7.233333333	0.011433333
Tratamiento "D"	3	15.58	5.193333333	0.490033333
Tratamiento "E"	3	14.87	4.956666667	0.194633333

Fuente: Software MINITAB.**Tabla 12.** *Análisis de varianza.*

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F (Calculada)	Probabilidad (p-valor)	Valor crítico para F(Tabulada)
Repeticiones	0.52468	2	0.26234	1.11682359	0.373454922	4.458970108
Tratamientos	16.42233333	4	4.105583333	17.47812884	0.000510124	3.837853355
Error	1.879186667	8	0.234898333			
Total	18.8262	14				

Fuente: Software MINITAB.

4.2.2.2. Análisis de datos.

El análisis de los estimadores estadísticos se realizará para las repeticiones y los tratamientos:

- **Repeticiones.**

Según el cuadro de análisis de varianza se observa que el valor de “p-valor” es mayor a 0.05 (α) por lo que rechazamos la hipótesis nula, de igual modo el valor de la F calculada es menor que el valor de la F tabulada, por lo que rechazamos la hipótesis nula. Por lo tanto, no existe diferencia estadística significativa en las repeticiones, ya que todas las repeticiones se comportan de igual forma.

- **Tratamientos.**

Según el cuadro de análisis de varianza, se observa que el valor de “p-valor” es menor que 0.05 por lo que NO rechazamos la hipótesis nula, de igual modo el valor de la F calculada es mayor que el valor de la F tabulada, por lo que NO rechazamos la hipótesis nula. Por lo tanto, existe diferencia estadística significativa por efecto de los tratamientos.

Para poder reconocer cuál de los tratamientos tuvo mayor diferencia estadística significativa, se utilizó la prueba de Tukey.

4.2.3. Prueba de Tukey.

La prueba de Tukey nos ayuda a probar y comparar todas las diferencias entre las medias de los tratamientos de la investigación, al comparar las medias evaluamos las siguientes hipótesis:

El nivel de significación para la prueba es de 95%.

Tabla 13. *Hipótesis.*

Hipótesis nula	Todas las medias son iguales
Hipótesis alterna	No todas las medias son iguales
Nivel de significancia	$\alpha = 0.05$

Fuente: software MINITAB.

Tabla 14. *Análisis de Varianza.*

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Factor	4	16.422	4.1056	17.08	0.000
Error	10	2.404	0.2404		
Total	14	18.826			

Fuente: software MINITAB.

Como se observa en el cuadro, el valor de P es menor a 0.05; por lo que decimos, que no todas las medias son iguales.

Tabla 15. *Medias.*

Factor	N	Media	Desv.Est.	IC de 95%
TRATAMIENTO "A"	3	5.270	0.377	(4.639, 5.901)
TRATAMIENTO "B"	3	7.297	0.603	(6.666, 7.927)
TRATAMIENTO "C"	3	7.2333	0.1069	(6.6026, 7.8641)
TRATAMIENTO "D"	3	5.193	0.700	(4.563, 5.824)
TRATAMIENTO "E"	3	4.957	0.441	(4.326, 5.587)

Fuente: software MINITAB.

Tabla 16. *Comparaciones en parejas de Tukey.*

Factor	N	Media	Agrupación
TRATAMIENTO "B"	3	7.297	A
TRATAMIENTO "C"	3	7.2333	A
TRATAMIENTO "A"	3	5.270	B
TRATAMIENTO "D"	3	5.193	B
TRATAMIENTO "E"	3	4.957	B

Fuente: software MINITAB.

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes. Por lo tanto, podemos llegar a la conclusión que los tratamientos B, C son los que mayor diferencia estadística significativa tuvieron, entonces se afirma que son los mejores tratamientos para la biorremediación de suelos contaminados con diésel mediante el uso de los biosólidos.

4.3. Discusión de resultados.

En el análisis de las propiedades fisicoquímicas del suelo contaminado se evidencio que tiene una textura franco arenoso, también presenta una buena fertilidad con una alta concentración de micronutrientes, así mismo el suelo contaminado presenta una elevada concentración de materia orgánica debido a los hidrocarburos presentes, el pH fue alcalino. Frente a lo antes expuesto, se rectifica que el suelo tenía buenas condiciones para el desarrollo de los microorganismos.

El tratamiento TC3 (30%BP+70%SC) fue el que presento mayor variación porcentual de la concentración de hidrocarburos totales de petróleo, reduciendo de 20.08 gr de TPH/Kg de suelo a 12.79 gr TPH/Kg de suelo, lo que significa una reducción de 36.3%.

El tratamiento TE1 (50%BP+50%SC) fue el que presento menor variación porcentual de la concentración de hidrocarburos totales de petróleo, reduciendo de 32.45 gr de TPH/Kg de suelo a 27.63 gr TPH/Kg de suelo lo que significa una reducción de 13.66%.

El tratamiento T0 (100% SC) que no fue dosificado tuvo una variación de 30.53 gr de TPH/Kg de suelo a 29.28 gr TPH/Kg de suelo lo que significa una reducción de 4.09%.

Según el análisis de varianza, se puede afirmar que no existe diferencia estadística significativa en las repeticiones de los tratamientos, por lo que estas se comportan de forma igual.

Según el análisis de varianza, se puede afirmar que si existe diferencia estadística significativa por efecto de los tratamientos.

Los bloques de tratamiento B y C son los que tuvieron mayor diferencia estadística significativa, por lo que podemos afirmar que son las mejores dosificaciones para el tratamiento de suelos contaminados con diésel.

4.3.1. Contraste de resultados con otras investigaciones.

Para el contraste de resultados con otras investigaciones, se tomaron en cuenta las siguientes consideraciones:

- Se utilizaron estudios donde se usan únicamente enmiendas naturales como insumo principal para llevar a cabo el proceso de biorremediación.
- La discusión se enfocó principalmente en torno a la reducción porcentual de las concentraciones de TPH.

Frente a lo antes expuesto, podemos mencionar que en la investigación realizada por (14) donde utilizó vacaza más aserrín como material para la biorremediación obtuvo un 25 % de reducción en la concentración de los TPH/Kg de suelo, también utilizó aserrín y estiércoles orgánicos produciendo una reducción del 22.5% de la concentración de TPG/Kg de suelo, haciendo uso de solo estiércol disminuyó 16.5% y usando solamente aserrines disminuyó 9.6%.

En el estudio realizado por (16) el autor utilizó lodos activados para el tratamiento de biorremediación, obteniendo reducciones de las concentraciones de TPH/kg de suelo de hasta un 50% culminado el tratamiento.

En la presente investigación donde se utilizó únicamente biosólidos compostados, se obtuvieron reducciones de las concentraciones de TPH/Kg de suelo que van desde 13.66% hasta 36.3%.

En contraste a los resultados obtenidos por (14), se puede afirmar que el tratamiento presentado en la investigación fue eficiente y que esta mayor disminución de la concentración de TPH puede verse reflejada ya que los biosólidos compostados tiene mejores cualidades como enmienda para recuperar y descontaminar los suelos.

En contraste a los resultados obtenidos por (16), se evidencia que en la investigación del autor antes mencionado obtiene mejores resultados en la disminución de las concentraciones de TPH, esto puede deberse a que el autor usa lodos activos y estos tienen la característica de contener una alta carga de microorganismos de especies muy variadas que degradan la materia orgánica a través de procesos aerobios. Cabe mencionar que el uso de los lodos activos tiene una desventaja, según (34) los lodos activados son residuos peligrosos ya que contiene patógenos y metales pesados, el tratamiento mediante el uso de este producto no permite que los suelos tratados puedan ser usados posteriormente para fines agrícolas o forestales, acondicionamiento del suelo para uso agrícola. En contraste con la presente investigación, el uso de biosólidos compostados permite que los suelos tratados con este producto puedan ser usados en la agricultura.

CONCLUSIONES

- El uso de los biosólidos compostados tuvo un efecto positivo en la biorremediación de suelos contaminado con diésel, ya que se evidenciaron reducciones significativas en la concentración de los hidrocarburos totales de petróleo luego del tratamiento.
- Las propiedades fisicoquímicas del suelo contaminado fueron óptimas para el desarrollo de los microorganismos, ya que presentaba una concentración considerable de micronutrientes y un pH adecuado.
- Considerando los resultados obtenidos, se puede afirmar que las dosificaciones de los tratamientos “B” (20%BP+80%SC) y “C” (30%BP+70%SC) fueron las más óptimas, ya que se evidenciaron reducciones de hasta un 36.3% de la concentración de hidrocarburos totales de petróleo culminado el tratamiento.
- Los tratamientos con más éxito en la reducción de la concentración de hidrocarburos totales de petróleo fueron el “B” y “C” teniendo unas medias de reducción porcentual de 7.297 y 7.233 respectivamente. Los tratamientos con menos éxito fueron “A”, “D” y “E” teniendo medias de reducción porcentual de 5.270, 5.193 y 4.957 respectivamente. Por lo que se puede afirmar, que las mejores dosificaciones de biosólido compostado para la biorremediación de suelos contaminados con diésel con equivalentes a los tratamientos “B” y “C”.
- Los datos obtenidos se procesaron de manera correcta usando el método estadístico de análisis de varianza ANOVA. Del análisis estadístico se llegó a la conclusión, que no existe diferencia estadística significativa en las repeticiones; por lo tanto, todas las repeticiones se comportan de igual forma. Por otro lado, se confirmó que existe diferencia estadística significativa por efecto de los tratamientos (dosificaciones).

RECOMENDACIONES

- Se recomienda el uso de los biosólidos preparados para la biorremediación de suelos contaminados con diésel, ya que es un producto de bajo costo y fácil acceso y mejora las propiedades fisicoquímicas del suelo.
- Se recomienda aplicar la técnica desarrollada en la presente investigación para suelos de condiciones similares usadas en el ensayo experimental.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. **Velásquez Arias, Johana Andrea.** *Contaminación de suelos y cuerpos de agua por hidrocarburos en Colombia Fitorremediación como estrategia biotecnológica de recuperación.* Yopal : s.n., 2016.
2. *¿Que es la biorremediación?* **Ituber Arguelles , Rosario.** Mexico : Dirección General de Divulgación de la Ciencia, 2010, Vol. 1. 978-607-02-1267-3.
3. **Benavides Lopez de Mesa, Joaquin, y otros.** *Biorremediacion de suelos contaminados con hidrocarburos derivados del petroleo.* Cundinamarca : s.n., 2006.
4. *La restauración de suelos contaminados con hidrocarburos en Mexico .* **Ortínez Brito, Oscar, Ize Lema , Irina y Gavilán García , Arturo.** 69, Mexico : Gaceta ecológica , 2003. 1405-2849.
5. **Rangel Vega, Antía.** *Aprovechamiento y gestión sostenible del ambiente y los recursos naturales.* Piura : s.n., 2018.
6. **Flores Paucarima , Abad y Vitteri Zumarán , Julio.** La biotecnología en el impacto ambiental y su aplicación en el Perú. [En línea] Repositorio Institucional de la Universidad de Lima, 1999. <https://repositorio.ulima.edu.pe/handle/20.500.12724/2431>.
7. **Ponce Contreras, Daniela Soledad .** Biorremediacion de Suelos Contaminados con Hidrocarburos. *Proyecto de Titulo Presentado en Conformidad a los Requisitos para Obtener el Titulo de Ingeniero Civil.* Concepcion : s.n., 2014.
8. **Araujo, Ismenia, y otros.** *Lodos estabilizados y cepas bacterianas en la biorremediacion de suelos contaminados con hidrocarburos.* Caracas : s.n., 2006.
9. **Riojas González, Hector H, y otros.** *Efectos de los surfactantes en la biorremediación de suelos.* Mexico : Quimica Viva, 2010.
10. **Cando Rodriguez, Miguel Angel.** *Determinación y analisis de un proceso de biorremediación de suelos contaminados por hidrocarburos .* Cuenca : s.n., 2011.
11. *Composts de biosolidos: efecto del tamizado sobre la inmovilizacion de nitrogeno del suelo.* **Mazzarino, MJ, y otros.** Buenos Aires : s.n., 2003.

12. *Biorremediación de suelos contaminados por organoclorados mediante la estimulación de microorganismos autóctonos, utilizando biosólidos.* **Durán Acosta, L.F y Ladera Hernández, M.J.** 1, Manahua : Nexo-Revista Científica , 2016, Vol. 29. 1995-9516.
13. **Sapuppo, Romina.** *Biorremediación de suelos contaminados con hidrocarburos, mediante la bioestimulación con lodos residuales.* Guadalajara : s.n., 2017.
14. **Buendía Ríos, Hildebrando.** Biorremediación de suelos contaminados por hidrocarburos mediante compost de aserrín y estiércoles. *Tesis para optar el grado de Magister en geografía mención: Ordenamiento y Gestión Ambiental.* Lima : s.n., 2012.
15. **Muñoz Vitor, Jim Maycol y Pacheco Miranda, Mabel.** Tesis para optar el Título Profesional de Químico Farmacéutico. *Colonias Bacterianas Presentes en el Estiércol de Gallinas Blancas de la Cepa Leghorn Responsables de la Biodegradación de Petróleo en Suelos Contaminados.* Lima : s.n., 2017.
16. **Geronimo Urrutia , Angelo Steven y Vazques Silva , Carmen Edelmira.** Determinación de la Eficiencia de Biorremediación con Lodos Activados en Suelo Contaminado con Hidrocarburos. *Tesis para optar el Título Profesional de Ingeniero Ambiental y de Recursos Naturales.* Callao : s.n., 2017.
17. *Eficiencia de cepas bacterianas aisladas del manglar para biorremediar suelos contaminados con petróleo.* **Ramírez Segura, Beder E, y otros.** Tumbes : Revista QuímicaViva, 2016, Vol. 1.
18. **Espinoza Estrella, Erika Milagros .** *EFEECTO DEL VERMICOMPOST EN LA BIOMASA DE *Hordeum vulgare* L. (CEBADA) CULTIVADO EN UN SUELO CONTAMINADO CON HIDROCARBUROS DE UN TALLER MECÁNICO - CHILCA, 2019.* Huancayo : s.n., 2019.
19. **Navarro Garcia, Gines y Navarro Garcia , Simon.** *Química agrícola "Química del suelo y los nutrientes esenciales para la planta" 3ª Edición.* Madrid(España) : Ediciones Mundi-Prensa, 2013. 9788484766568.
20. **Ministerio de Ambiente Peru, Direccion General de Calidad Ambiental .** *Glosario de terminos. Sitios contaminados .* Lima : s.n.

21. **Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO).** Portal de Suelos de la FAO. [En línea] [Citado el: 5 de Diciembre de 2021.] <https://www.fao.org/soils-portal/about/definiciones/es/>.
22. *La calidad del suelo y sus indicadores.* **Bautista Cruz, A, y otros.** Oaxaca : Asociación Española de Ecología Terrestre, 2004. 1697-2473.
23. **Navarrete Segueda, Armando, y otros.** *Naturaleza y utilidad de los indicadores de calidad del suelo.* 2011.
24. **López Bermúdez, Francisco.** DEGRADACIÓN DEL SUELO ¿FATALIDAD CLIMÁTICA O MALA GESTIÓN HUMANA? HACIA UNA GESTIÓN SOSTENIBLE DEL RECURSO EN EL CONTEXTO MEDITERRÁNEO. [En línea] [Citado el: 05 de Septiembre de 2021.] <https://revistas.um.es/geografia/article/view/44371>.
25. *degradación de suelos agrícolas y el SIRSD-S.* **Cartes Sánchez, Gabriel . s.l. :** Oficina de Estudios y Políticas Agrarias, Ministerio de Agricultura , 2013.
26. *Hidrocarburos convencionales y no convencionales .* **Asociación Argentina de Geólogos y Geofísicos del Petróleo.** 134, 2013, Vol. 23.
27. **Antonio Zarate, Yanet.** *Evaluacion del impacto de la contaminacion con diesel en las propiedades mecanicas de un suelo arcilloso.* Mexico : s.n., 2014.
28. **Ministerio de Energía y Minas del Perú.** *DECRETO SUPREMO N° 032-2002-EM (“GLOSARIO, SIGLAS Y ABREVIATURAS DEL SUBSECTOR HIDROCARBUROS).* Lima : s.n., 2002.
29. **Ron Llori, Karen Janina.** *Determinación de residuos de hidrocarburos totales de petróleo (fracción diesel) en aguas de la Reserva de Producción Faunística Cuyabeno, mediante la técnica de cromatografía de gases con detector de ionización de llama.* Quito : s.n., 2012.
30. *Contaminación de suelos y aguas por hidrocarburos en Colombia. Análisis de la fitorremediación como estrategia biotecnológica de recuperación.* **Velásquez Arias, Johana Andrea.** 1, Casanare : Revista de Investigación Agraria y Ambiental , 2017, Vol. 8.

31. **Gonzales Rojas , Edwin Humberto.** Concepto y estrategias de biorremediación. *INGE@UAN - TENDENCIAS EN LA INGENIERÍA*. [En línea] 2014. <http://revistas.uan.edu.co/index.php/ingeuan/article/view/208>.
32. **BIORREMEDIACIÓN: ACTUALIDAD DE CONCEPTOS Y APLICACIONES . Cota Ruiz, Keni, y otros.** Juarez : Revista de Ciencias Biológicas y de la Sa, 2019.
33. **Nisperuza Vidal, Ana Karina y Montiel Aroca, Melissa.** *Caracterizacion y evaluacion de cepas bacterianas con capacidad hidrocarburoolitica del pozo petrolero de San Sebastian, Lorica, Departamento de Cordoba*. Cordoba : s.n., 2010.
34. **Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento.** *DS. N° 01-2017-VIVIENDA*. Perú : La Republica , 2017.
35. **Torres, Patricia , y otros.** Compostaje de Biosólidos de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales. Javoticabal : s.n., 2007. Vol. 27, 1.
36. **Ecothani PERU SAC.** @EcothaniPeru · Producto/servicio. [En línea] https://www.facebook.com/EcothaniPeru/?ref=page_internal.
37. **Dirección General de Políticas, Normas e Instrumentos de Gestión Ambiental, Ministerio del Ambiente .** *GLOSARIO DE TÉRMINOS PARA LA GESTIÓN AMBIENTAL PERUANA*. Lima : s.n., 2012.
38. **Aguilera, Rosa y Parra, Oscar.** Conceptos básicos sobre medio ambiente y desarrollo sustentable. *INET Y GTZ ARGENTINA* . [En línea] 2014. [Citado el: 09 de Noviembre de 2021.] http://siar.minam.gob.pe/puno/sites/default/files/archivos/public/docs/conceptos_ambientales.pdf.
39. **Sánchez Ramos, David.** Ingeniería Ambiental Conceptos Generales. [En línea] [Citado el: 09 de Noviembre de 2021.] https://blog.uclm.es/davidsanchezramos/files/2016/05/3_Microbiolog%C3%ADa_v2_015_resumen.pdf.
40. **Feria Avila, Hernán, Blanco Gómez, Mildred Rebeca y Valledor Estevill, Roberto Fernando.** *La dimensión metodológica del diseño de la investigación científica*. Las Tunas : Editorial Académica Universitaria (Edacun), 2019. 978-959-7225-39-3.

41. **Hernández Sampieri , Roberto .** *Metodología de la Investigación.* Mexico : Mc-GrawHill, 2014. 978-1-4562-2396-0.
42. *Introducción a la investigación básica.* **Muntané Relat, J.** 3, 2010, Vol. 33.
43. **Lopez , E y Gonzales , B.** *Diseño y análisis de experimentos fundamentos y aplicaciones en agronomía .* Guatemala : s.n., 2014.

ANEXOS

Anexo 01.

Matriz de consistencia

Problema	Objetivos	Hipótesis	Variables	Metodología
<p><u>Problema general:</u></p> <p>¿Cuál es el efecto del uso de los biosólidos compostados en la biorremediación del suelo contaminado con diésel?</p> <p><u>Problemas específicos:</u></p> <p>- ¿Cuáles serán las propiedades fisicoquímicas del suelo contaminado con diésel?</p> <p>- ¿Cuál será la dosificación optima de biosólidos compostados para una eficiente biorremediación del suelo contaminado por diésel?</p> <p>- ¿Cuál será la variación de la concentración de hidrocarburos totales de petróleo del suelo contaminado después de realizar el tratamiento de biorremediación?</p>	<p><u>Objetivo general:</u></p> <p>Medir la significancia estadística de la biorremediación del suelo contaminado con diésel mediante el uso de biosólido compostado.</p> <p><u>Objetivos específicos:</u></p> <p>- Analizar las propiedades fisicoquímicas del suelo contaminado.</p> <p>- Determinar cuál será la dosificación optima de biosólido compostado para la biorremediación del suelo contaminado por diésel.</p> <p>- Analizar la variación de la concentración de los hidrocarburos totales de petróleo del suelo contaminado después de realizar el tratamiento de biorremediación.</p>	<p><u>Hipótesis general:</u></p> <p>Ha: El uso de los biosólidos compostados afectará positivamente en el tratamiento de los suelos contaminados por diésel.</p> <p>Ho: El uso de los biosólidos compostados no afectará positivamente en el tratamiento de los suelos contaminados por diésel.</p> <p><u>Hipótesis específicas:</u></p> <p>H1: La dosificación optima de biosólido compostado permitirá una eficiente biorremediación del suelo contaminado por diésel.</p> <p>Ho: La dosificación optima de biosólido compostado no permitirá una eficiente biorremediación del suelo contaminado por diésel.</p>	<p><u>Variable independiente:</u></p> <p>- Biosólido compostado.</p> <p><u>Variable dependiente:</u></p> <p>- Concentración de contaminante (Diesel)</p>	<p><u>Método general:</u></p> <p>-Hipotético-deductivo.</p> <p><u>Alcance de la investigación:</u></p> <p>-Explicativo-Cuantitativo.</p> <p><u>Tipo de investigación:</u></p> <p>-Aplicado.</p> <p><u>Nivel de la investigación:</u></p> <p>-Aplicada</p> <p><u>Diseño de la investigación:</u></p> <p>-Experimento puro (Modelo completamente aleatorizado)</p> <p><u>Población y muestra:</u></p> <p>La población en la presente investigación está representada por el total de muestras de suelo tomadas de un terreno de cultivo del Distrito de Lamay, Provincia de Calca, Departamento del Cusco.</p> <p>La muestra está constituida en un total de 65 kg de suelo recolectado</p>

<p>- ¿Cuáles son las variables estadísticas que se usarán para procesar los resultados del proceso de biorremediación?</p>	<p>- Procesar la información obtenida mediante el uso de estimadores estadísticos.</p>	<p>H₂: Se evidenciará reducción de la concentración de hidrocarburos totales de petróleo del suelo contaminado.</p> <p>H₀: No se evidenciará reducción de la concentración de hidrocarburos totales de petróleo del suelo contaminado.</p>		<p>siguiendo un método aleatorio simple de muestreo</p>
--	--	--	--	---

Anexo 02.

Análisis de laboratorio



UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS, FÍSICAS Y MATEMÁTICAS

Av. de la Cultura 733 - Pabellón "C" Of. 106 1er. piso - Telefax: 224831 - Apartado Postal 921 - Cusco Perú



UNIDAD DE PRESTACIONES DE SERVICIO DE ANÁLISIS QUÍMICO DEPARTAMENTO ACADÉMICO DE QUÍMICA INFORME DE ANÁLISIS

N0475-21-LAQ

SOLICITANTE : CRHISTOPHER LUIGUI DELGADO PAREDES
DIRECCION : Urb. LOS NOGALES U-3
DISTRITO SAN SEBASTIAN
PROVINCIA : CUSCO
MUESTRA : SUELO
FECHA : C/07/06/2021

RESULTADO ANALISIS FISICOQUIMICO HIDRODINAMICO:

=====
pH 7.65
C.E. mmhos/cm 0.49
Materia Orgánica % 6.40
Nitrógeno % 0.29
Fosforo ppm P₂O₅ 9.90
Potasio ppm K₂O 177.90
C.I.C meq/100 12.50
C.C. % 27.21
H.E. % 29.45
P.M.P. % 14.69
d.a. g/cc 1.396
Textura:
Arena % 62
Limo % 34
Arcilla % 4
=====

Cusco, 14 de Junio 2021

Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco
Unidad de Prestación de Servicios Análisis

LABORATORIO DE ANÁLISIS QUÍMICO
RESPONSABLE DEL LABORATORIO DE ANÁLISIS QUÍMICO



UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO
FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS, FÍSICAS Y MATEMÁTICAS

Av. de la Cultura 733 - Pabellón "C" Of. 106 1er piso - Telefax: 224831 - Apartado Postal 921- Cusco Perú



UNIDAD DE PRESTACIONES DE SERVICIO DE ANÁLISIS QUÍMICO
DEPARTAMENTO ACADÉMICO DE QUÍMICA
INFORME DE ANÁLISIS

357-21-LC

SOLICITANTE: CRHISTOPHER LUIGUI DELGADO PAREDES
DIRECCION: URB. LOS NOGALES U-3
DISTRITO: SAN SEBASTIAN
PROVINCIA: CUSCO
MUESTRA: SUELO
FECHA: 07/06/2021

RESULTADO DE ANALISIS DE HIDROCARBUROS

TO: 30.53 gr/ kg

UNSAAC

CUSCO, 11 DE JUNIO DE 2021



Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco
Unidad del Prestación de Servicios de Análisis

Jorge Choquehaina Torres
RESPONSABLE DEL LABORATORIO DE ANÁLISIS DE CROMATOGRFIA



UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO
FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS, FÍSICAS Y MATEMÁTICAS

Av. de la Cultura 733 - Pabellón "C" Of. 106 1er piso - Telefax: 224831 - Apartado Postal 921- Cusco Perú



UNIDAD DE PRESTACIONES DE SERVICIO DE ANÁLISIS QUÍMICO
 DEPARTAMENTO ACADÉMICO DE QUÍMICA

INFORME DE ANÁLISIS

358-21-LC

SOLICITANTE: CRHISTOPHER LUTGUT DELGADO PAREDES
 DIRECCION: URB. LOS NOGALES U-3
 DISTRITO: SAN SEBASTIAN
 PROVINCIA: CUSCO
 MUESTRA: SUELO (15 MUESTRAS)
 FECHA: 10/06/2021

RESULTADO DE ANALISIS DE HIDROCARBUROS

TA1:	26.04 gr/ kg
TA2:	27.89 gr/ kg
TA3:	24.02 gr/ kg
TB1:	26.06 gr/ kg
TB2:	22.82 gr/ kg
TB3:	28.34 gr/ kg
TC1:	22.1 gr/ kg
TC2:	30.1 gr/ kg
TC3:	20.08 gr/ kg
TD1:	24.21 gr/ kg
TD2:	25.85 gr/ kg
TD3:	27.75 gr/ kg
TE1:	32.45 gr/ kg
TE2:	22.31 gr/ kg
TE3:	20.68 gr/ kg

CUSCO, 17 DE JUNIO DE 2021



Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco
 Unidad de Prestación de Servicios de Análisis
 Jorga Choguena Torres
 RESPONSABLE DEL LABORATORIO DE ANÁLISIS DE CROMATOGRAFÍA



UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO
FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS, FÍSICAS Y MATEMÁTICAS

Av. de la Cultura 733 - Pabellón "C" Of. 106 1er piso - Telefax: 224831 - Apartado Postal 921- Cusco Perú



UNIDAD DE PRESTACIONES DE SERVICIO DE ANÁLISIS QUÍMICO
DEPARTAMENTO ACADÉMICO DE QUÍMICA
INFORME DE ANÁLISIS

361-21-LC

SOLICITANTE: CRHISTOPHER LUIGUI DELGADO PAREDES
DIRECCION: URB. LOS NOGALES U-3
DISTRITO: SAN SEBASTIAN
PROVINCIA: CUSCO
MUESTRA: SUELO (16 MUESTRAS)
FECHA: 12/09/2021

RESULTADO DE ANALISIS DE HIDROCARBUROS

TO:	29.28 gr/ kg
TA1:	21.12 gr/ kg
TA2:	22.22 gr/ kg
TA3:	18.08 gr/ kg
TB1:	18.13 gr/ kg
TB2:	16.09 gr/ kg
TB3:	21.11 gr/ kg
TC1:	14.99 gr/ kg
TC2:	22.8 gr/ kg
TC3:	12.79 gr/ kg
TD1:	19.01 gr/ kg
TD2:	21.16 gr/ kg
TD3:	21.86 gr/ kg
TE1:	27.63 gr/ kg
TE2:	17.71 gr/ kg
TE3:	15.23.gr/ kg

UNSAAC

CUSCO, 19 DE SEPTIEMBRE DE 2021



Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco
 Unidad de Prestación de Servicios de Análisis

Jorge Choguenaira Torres
 RESPONSABLE DEL LABORATORIO DE ANÁLISIS DE CROMATOGRFIA

Anexo 03.

Gráficos estadísticos complementarios

Gráfico. *Análisis inicial de la concentración de hidrocarburos totales de petróleo.*

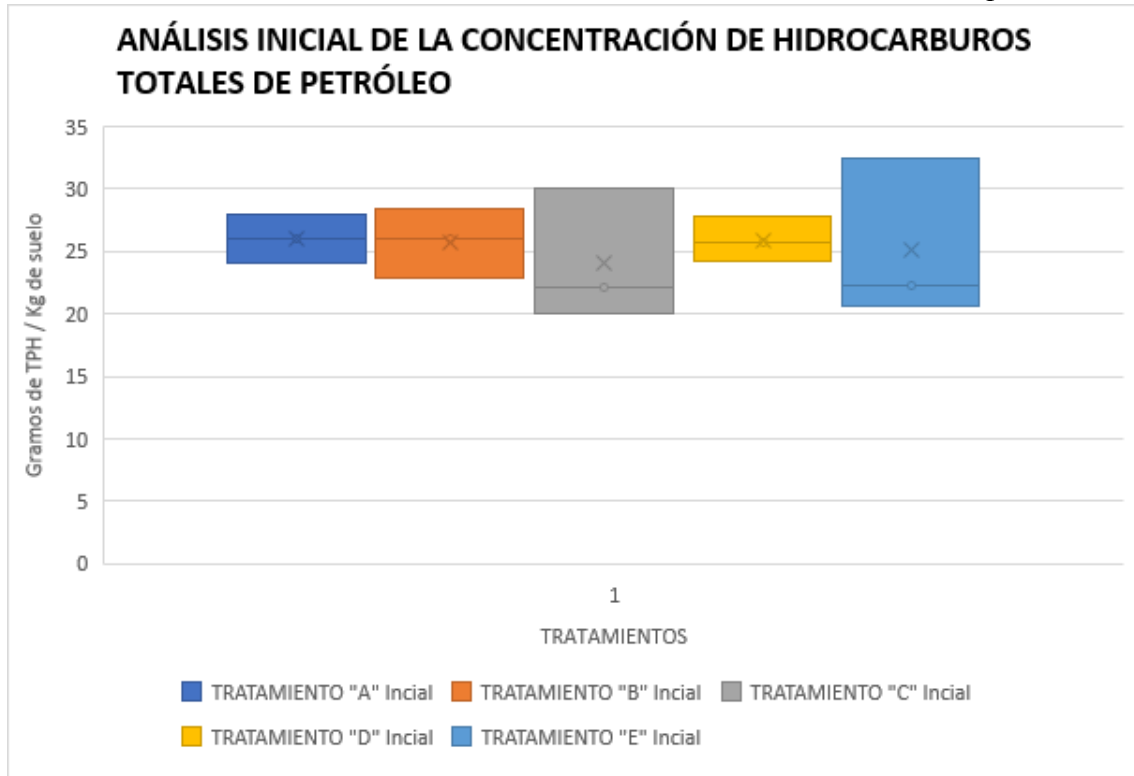


Gráfico. *Análisis final de la concentración de hidrocarburos totales de petróleo.*

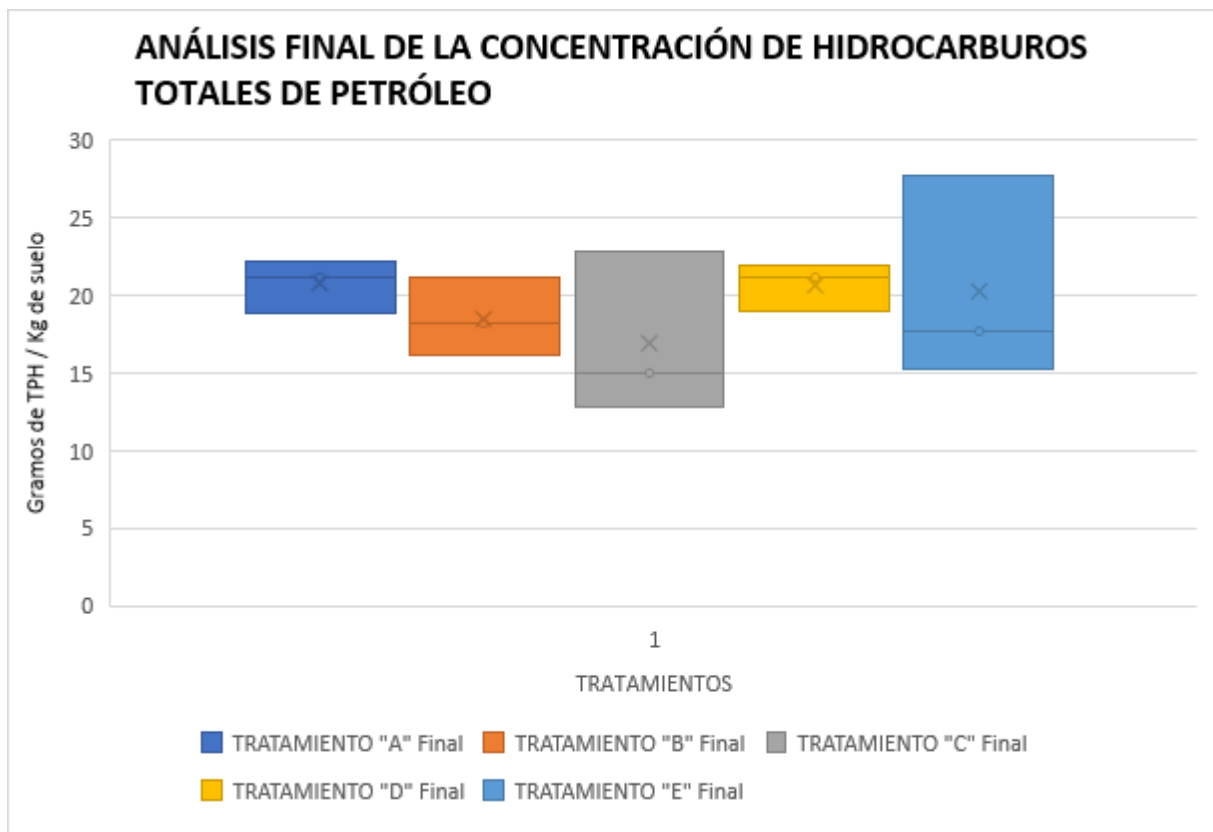


Gráfico. *Tratamiento "A"*

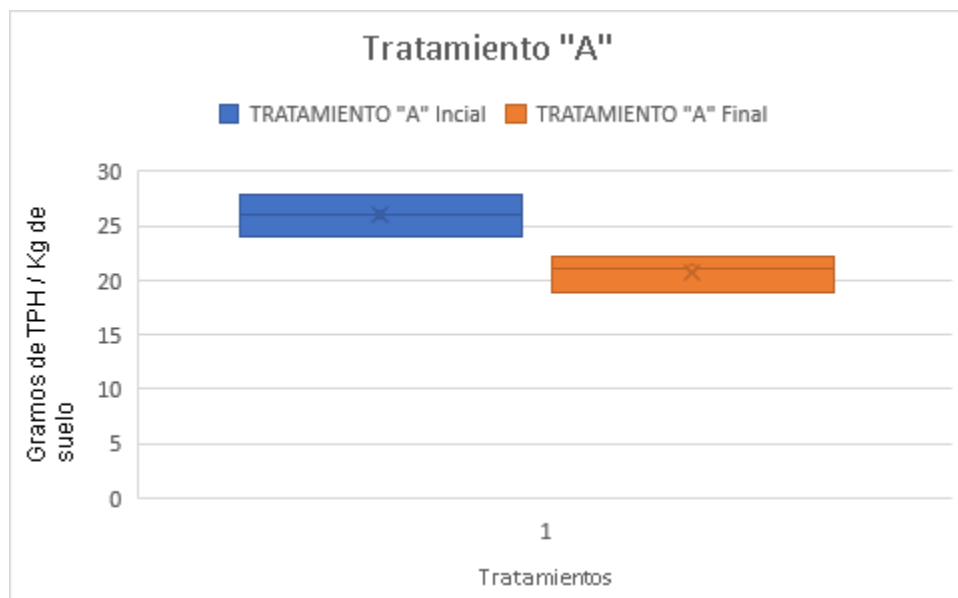
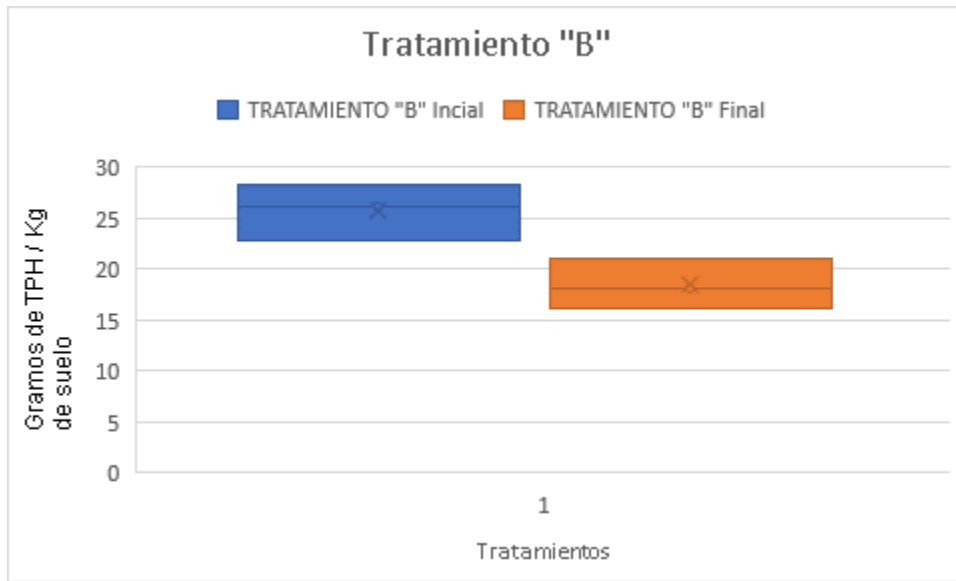


Gráfico. Tratamiento "B"



Fuente: *Elaboración propia*

Gráfico. Tratamiento "C"

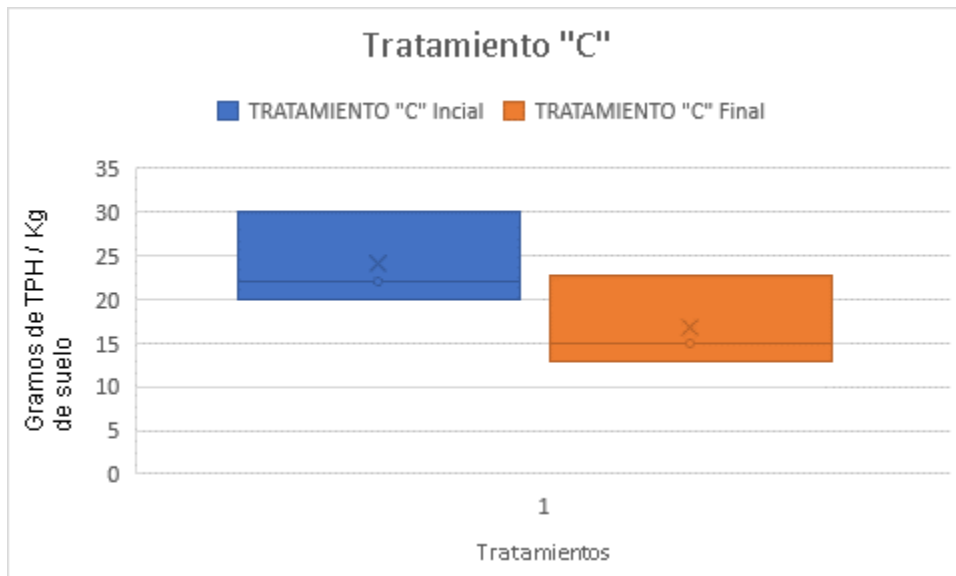


Gráfico. Tratamiento "D"

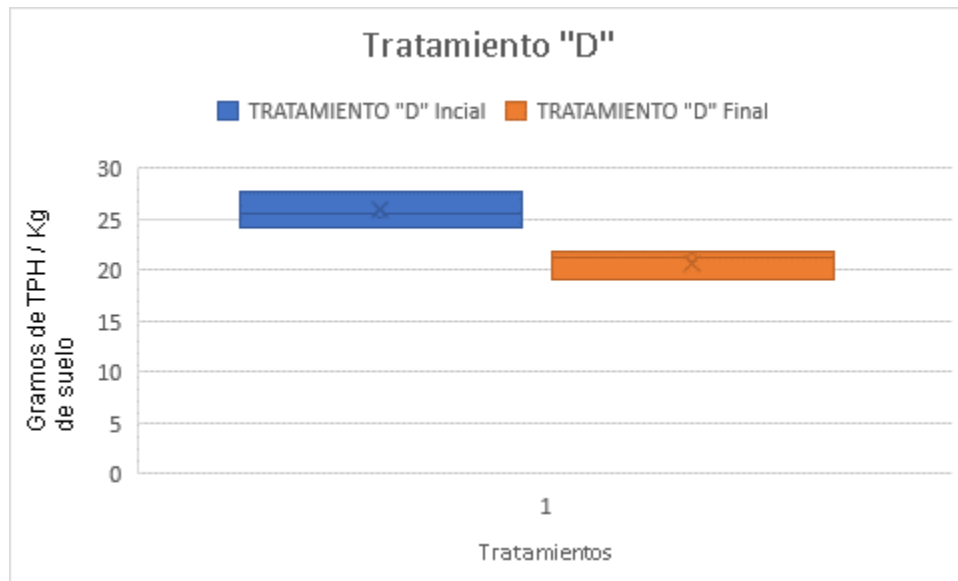
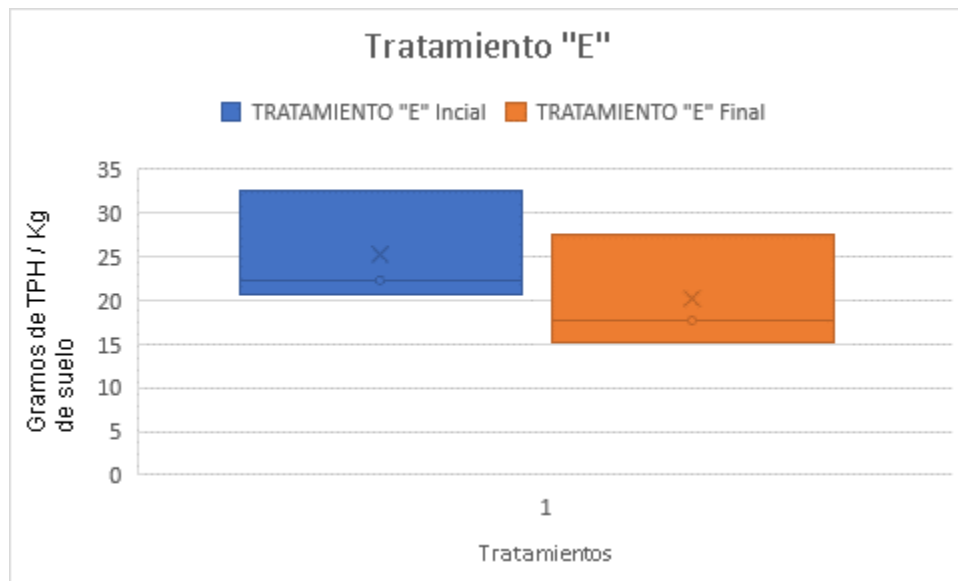


Gráfico. Tratamiento "E"



Anexo 04.
Panel fotográfico

Fotografía 01. *Terreno de cultivo de toma de muestras*



Fotografía 02. *Toma de muestras*



Fotografía 03. *Hogenización de las muestras*



Fotografía 04. *Simulación de la muestra contaminada*



Fotografía 05. Almacén de la empresa ECOTHANI S.A.C



Fotografía 06. Procesamiento del biosólido



Fotografía 07. Biosólido compostado



Fotografía 08. Proceso de dosificación de los tratamientos



Fotografía 09. *Dosificación de los tratamientos*

