

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

Escuela Académico Profesional de Ingeniería Ambiental

Tesis

**Efecto del vermicompost en la biomasa de *Hordeum vulgare L.* (cebada) cultivado en un suelo contaminado con hidrocarburos de un taller mecánico - Chilca, 2019**

Erika Milagros Espinoza Estrella

Para optar el Título Profesional de  
Ingeniera Ambiental

Huancayo, 2021

Repositorio Institucional Continental  
Tesis digital



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

## **ASESOR**

Ing. Jacinto Venancio Arroyo Aliaga

## **AGRADECIMIENTOS**

A las instituciones que lograron hacer posible la elaboración y la culminación de la presente investigación, asimismo a las personas que estuvieron dispuestos para resolver las incógnitas al momento de ejecutar esta tesis.

Quiero agradecer, en primer lugar, al propietario de la mecánica “Unión”, por permitir el ingreso a sus instalaciones y acceder a las muestras. A los directivos del laboratorio J. Ramón del Perú S.A.C., por el servicio prestado en los análisis de muestras. Al laboratorio de Biología y Química de la Universidad Continental, por haberme otorgado los equipos necesarios para realizar las mediciones correspondientes.

A los instructores de la E.A.P. de Ingeniería Ambiental de la Universidad Continental, en especial al Ing. Jacinto Arroyo Aliaga por ser el asesor en el desarrollo de este estudio, así también, a la Ing. Elizabeth Machuca Manrique por su aporte y participación en el desarrollo de esta investigación.

## **DEDICATORIA**

En primer lugar, a Dios por concederme vida, salud y sabiduría en el trayecto de mi carrera profesional.

A mi madre querida Graciela Estrella, por ser mi apoyo incondicional en todo momento, a mi padre Vidal Espinoza, por luchar cada día por su familia y a mis hermanas Estefanny, Yosselin y Natalie quienes son la motivación para seguir adelante.

*Erika.*

# ÍNDICE

ASESOR.....	ii
AGRADECIMIENTOS.....	iii
DEDICATORIA .....	iv
ÍNDICE .....	v
ÍNDICE DE FIGURAS .....	viii
ÍNDICE DE TABLAS .....	ix
RESUMEN.....	xi
ABSTRACT .....	xii
INTRODUCCIÓN.....	xiii
CAPÍTULO I.....	1
1.1. Planteamiento y formulación del problema .....	1
1.1.1. Planteamiento del problema .....	1
1.1.2. Formulación del problema .....	4
1.2. Objetivos .....	5
1.2.1. Objetivo general .....	5
1.2.2. Objetivos específicos.....	5
1.3. Justificación e importancia.....	5
1.3.1. Justificación académica.....	5
1.3.2. Justificación social .....	6
1.3.3. Justificación ambiental.....	6
1.3.4. Justificación metodológica.....	6
1.3.5. Importancia.....	7
1.4. Hipótesis y variables.....	7
1.4.1. Hipótesis general.....	7
1.4.2. Hipótesis específicas.....	7
1.4.3. Descripción y operacionalización de las variables .....	8

CAPÍTULO II.....	11
2.1. Antecedentes de la investigación.....	11
2.1.1. Antecedentes encontrados en artículos científicos .....	11
2.1.2. Antecedentes encontrados en tesis .....	16
2.2. Bases teóricas .....	19
2.2.1. Suelo .....	19
2.2.2. Contaminación del suelo .....	37
2.2.3. Hidrocarburos .....	38
2.2.4. Remediación de suelos contaminados por hidrocarburos .....	44
2.2.5. Enmiendas orgánicas .....	46
2.3. Definición de términos básicos .....	51
CAPÍTULO III.....	53
3.1. Método, tipo y nivel de la investigación.....	53
3.1.1. Métodos de la investigación.....	53
3.1.2. Tipo de la investigación .....	54
3.1.3. Nivel de la investigación .....	54
3.2. Diseño de la investigación .....	54
3.3. Procedimiento experimental .....	55
3.4. Población y muestra .....	59
3.4.1. Población.....	59
3.4.2. Muestra .....	59
3.5. Técnicas e instrumentos de recolección de datos.....	60
3.5.1. Técnicas de recolección de datos.....	60
3.5.2. Instrumentos utilizados en la recolección de datos .....	60
3.6. Técnicas de análisis y procesamiento de datos .....	61
CAPÍTULO IV .....	62
4.1. Resultados del tratamiento y análisis de la información .....	62
4.1.1. Características fisicoquímicas del suelo del taller mecánico “Unión” .....	63

4.1.2.	Resultados del análisis del vermicompost utilizado en el experimento.....	65
4.1.3.	Propiedades físicas y químicas del suelo al final del experimento .....	66
4.1.4.	Biomasa de <i>Hordeum vulgare</i> L.....	82
4.2.	Discusión de resultados.....	85
CONCLUSIONES .....		92
RECOMENDACIONES.....		94
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....		95
ANEXOS.....		105



## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 01. Estructura química de los diversos hidrocarburos.....	39
Figura 02. Destino de los hidrocarburos en el suelo.....	41
Figura 03. Técnicas de remediación de suelos con hidrocarburos.....	44
Figura 04. Representación de la unidad experimental.....	57
Figura 05. Diagrama de flujo del proceso experimental.....	58
Figura 06. Croquis del área delimitada de 90 m <sup>2</sup> para la obtención de muestras de suelo.....	59
Figura 07. Modelo de muestreo sistemático.....	60

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 01. Matriz de operacionalización de las variables.....	10
Tabla 02. Estándares de Calidad de Suelos.....	21
Tabla 03. Condiciones físicas del vermicompost.....	47
Tabla 04. Composición química y biológica del vermicompost de <i>Eisenia foetida</i> .....	48
Tabla 05. Tratamientos de estudio.....	55
Tabla 06. Métodos de análisis de suelos.....	61
Tabla 07. Resultados del análisis fisicoquímico del suelo del taller mecánico “Unión” - Chilca, 2019.....	63
Tabla 08. Resultados del análisis fisicoquímico del suelo del taller mecánico “Unión” - Chilca, 2019 (2).....	64
Tabla 09. Resultados del análisis de caracterización del vermicompost.....	65
Tabla 10. Resultado de análisis del suelo para la densidad aparente.....	66
Tabla 11. Prueba de normalidad de Shapiro-Wilk para la densidad aparente (Mg/m <sup>3</sup> ).....	66
Tabla 12. Análisis de varianza de la densidad aparente (Mg/m <sup>3</sup> ).....	67
Tabla 13. Prueba de comparación múltiple de Duncan para la densidad aparente considerando dosis de vermicompost.....	67
Tabla 14. Resultados de análisis del suelo para la Capacidad de Intercambio Catiónico Efectiva.....	68
Tabla 15. Prueba de normalidad de Shapiro-Wilk para la Capacidad de Intercambio Catiónico Efectiva (suma de Cationes cambiabiles) (cmol/kg).....	69
Tabla 16. Análisis de varianza de la Capacidad de Intercambio Catiónica Efectiva (CICE) (cmol.kg).....	69
Tabla 17. Prueba de comparación múltiple de Duncan para la Capacidad de Intercambio Catiónica Efectiva (CICE) considerando dosis de vermicompost.....	70
Tabla 18. Resultados de análisis del suelo para el carbonato de calcio.....	70
Tabla 19. Prueba de normalidad de Shapiro-Wilk para el contenido de carbonato de calcio (%).....	71
Tabla 20. Análisis de varianza del contenido de carbonato de calcio (%).....	71
Tabla 21. Prueba de comparación múltiple de Duncan para el contenido de carbonato de calcio (%) considerando dosis de vermicompost.....	72
Tabla 22. Resultado de análisis del suelo para el pH.....	72
Tabla 23. Prueba de normalidad de Shapiro-Wilk para el pH del suelo.....	73
Tabla 24. Análisis de varianza del pH del suelo.....	73

Tabla 25. Prueba de comparación múltiple de Duncan para el pH del suelo.....	74
Tabla 26. Resultado de análisis del suelo para la materia orgánica.....	74
Tabla 27. Prueba de normalidad de Shapiro-Wilk para el contenido de materia orgánica del suelo.....	75
Tabla 28. Análisis de varianza del contenido de materia orgánica del suelo.....	75
Tabla 29. Prueba de comparación múltiple de Duncan para el contenido de materia orgánica del suelo.....	76
Tabla 30. Resultado de análisis del suelo para el nitrógeno total.....	76
Tabla 31. Prueba de normalidad de Shapiro-Wilk para el contenido de nitrógeno total del suelo.....	77
Tabla 32. Análisis de varianza del contenido de nitrógeno total del suelo.....	77
Tabla 33. Prueba de comparación múltiple de Duncan para el contenido de nitrógeno total del suelo.....	78
Tabla 34. Resultado de análisis de suelo para el fósforo disponible.....	78
Tabla 35. Prueba de normalidad de Shapiro-Wilk para el contenido de fósforo disponible en el suelo.....	79
Tabla 36. Análisis de varianza del contenido de fósforo disponible en el suelo.....	79
Tabla 37. Prueba de comparación múltiple de Duncan para el contenido de fósforo disponible en el suelo.....	80
Tabla 38. Resultado de análisis de suelo para el potasio disponible.....	80
Tabla 39. Prueba de normalidad de Shapiro-Wilk para el contenido de potasio disponible en el suelo.....	81
Tabla 40. Análisis de varianza del contenido de potasio disponible en el suelo.....	81
Tabla 41. Prueba de comparación múltiple de Duncan para el contenido de potasio disponible en el suelo.....	82
Tabla 42. Resultado del peso seco aéreo para los tres tratamientos.....	82
Tabla 43. Prueba de normalidad de Shapiro-Wilk para el peso seco aéreo de <i>Hordeum vulgare L.</i> .....	83
Tabla 44. Prueba de rangos de Kruskal-Wallis para el peso seco aéreo de <i>Hordeum vulgare L.</i> .....	83
Tabla 45. Resultado del peso seco radicular para los tres tratamientos.....	84
Tabla 46. Prueba de normalidad de Shapiro-Wilk para el peso seco radicular de <i>Hordeum vulgare L.</i> .....	84
Tabla 47. Prueba de rangos de Kruskal-Wallis para el peso seco radicular de <i>Hordeum vulgare L.</i> .....	85

## RESUMEN

El presente estudio tuvo como objetivo determinar los efectos de la aplicación de vermicompost en las propiedades físicas, químicas y en la biomasa seca aérea y radicular de un suelo contaminado con hidrocarburos totales de petróleo (HTP) de un taller mecánico, Chilca. Se consideró metodológicamente al nivel de investigación explicativo y al diseño experimental completamente al azar, compuesto por tres tratamientos con las diferentes dosis de vermicompost: 0 %, 50 % y 70 %, con tres repeticiones por tratamiento, sembrando *Hordeum vulgare L.* (cebada) en cada unidad experimental. Los resultados muestran que hubo efecto del vermicompost en algunas propiedades del suelo, debido principalmente al incremento de la actividad microbiana en el suelo; se observó el incremento de la Capacidad de Intercambio Catiónico Efectiva, el fósforo y potasio disponible, mientras que no afectó la densidad aparente, pH, carbonato de calcio, contenido de materia orgánica y contenido de nitrógeno total. Asimismo, la aplicación de vermicompost incrementó significativamente la materia seca vegetal aérea y radicular de *Hordeum vulgare L.*, con la dosis de 70 %.

Palabras clave: Hidrocarburos, contaminación, vermicompost, *Hordeum vulgare L.*

## ABSTRACT

The present study aimed to determine the effects of the application of vermicompost on the physical and chemical properties and on the aerial and root dry biomass of a soil contaminated with total petroleum hydrocarbons (TPH) from a mechanical workshop, Chilca. The explanatory research level and the completely randomized experimental design were considered methodologically, composed of three treatments with the different doses of vermicompost: 0 %, 50 % and 70 %, with three repetitions per treatment, sowing *Hordeum vulgare L.* (barley) in each experimental unit. The results show that there was an effect of vermicompost on some soil properties, mainly due to the increase in microbial activity in the soil; The increase in the Effective Cation Exchange Capacity, the available phosphorus and potassium was observed, while the apparent density, pH, calcium carbonate, organic matter content and total nitrogen content were not affected. Likewise, the application of vermicompost significantly increased the aerial and root vegetable dry matter of *Hordeum vulgare L.*, with the dose of 70 %.

Keywords: Hydrocarbons, pollution, vermicompost, *Hordeum vulgare L.*

## INTRODUCCIÓN

La contaminación del suelo en el ámbito local, nacional e internacional es parte de nuestra actividad diaria; preocupa como se ha ido degenerando los ecosistemas de nuestro planeta y la capa superficial de la corteza terrestre no es la excepción. Las actividades industriales han originado uno de los problemas muy severos en materia de contaminación de suelos, en la que el derrame de hidrocarburos derivados del petróleo se encuentra en primer lugar en zonas de depósitos, tratamiento y uso de combustibles (1).

Para la remediación de suelos contaminados existen diversas tecnologías. Según los investigadores Volke y Velasco (2) se pueden agrupar en tres tipos: biológicos, fisicoquímicos y térmicos. En el entorno biológico se dan actividades metabólicas de organismos que permiten la remoción, transformación o degradación de los contaminantes a productos metabólicos inocuos como la bioestimulación, biorremediación, fitorremediación, etc. En los procesos fisicoquímicos, se toman ventajas de las propiedades fisicoquímicas de los contaminantes para contener, separar o destruir la contaminación como electrorremediación, solidificación, lavado, etc. En la remediación asociada a procesos térmicos se utiliza calor para suscitar la inmovilización, descomposición, quema o volatilización de los contaminantes en un suelo como incineración, desorción térmica, vitrificación, etc. (2).

La biorremediación puede aplicar organismos procedentes del lugar contaminado o de otros lugares, puede efectuarse *in situ* o *ex situ*, en condiciones anaerobias o aerobias (3). Pese a que no todos los compuestos orgánicos son susceptibles a la biodegradación, la técnica de biorremediación se ha empleado con logro para tratar sedimentos, lodos y suelos contaminados con hidrocarburos del petróleo, solventes, explosivos, clorofenoles, pesticidas, conservadores de madera e hidrocarburos aromáticos policíclicos, en procesos aeróbicos y anaeróbicos (4).

El vermicompost es un producto obtenido a través del compostaje de residuos orgánicos de origen vegetal y animal con la adición de lombrices, por tanto, constituyen una enmienda del suelo que incrementa la carga microbiana en un suelo contaminado con hidrocarburos y puede precipitar la degradación de los compuestos orgánicos contaminantes (5) para así mejorar las propiedades fisicoquímicas del suelo contaminado; evaluado con el desarrollo de plantas cultivadas.

La presente investigación se subdivide en cuatro capítulos. En el primer capítulo se presenta la problemática que fue objeto del estudio, además se presenta la justificación e importancia que tuvo el estudio para así plantear las hipótesis que presiden al estudio y la descripción de variables. En el segundo capítulo se abarca el marco de referencia el que consta de estudios preexistentes (antecedentes como artículos científicos y tesis), bases teóricas y la precisión de términos básicos. En el tercer capítulo se especifica la metodología de la investigación, que consta del método y alcance del estudio, el diseño del estudio, la población, la muestra y las técnicas e instrumentos de recolección de datos, es decir se expone la forma en que se realizó la investigación orientada en el alcance de aportes científicos. En el cuarto capítulo, se describen los hallazgos más significativos del tratamiento y el análisis de la información.

La autora.

# **CAPÍTULO I**

## **PLANTEAMIENTO DEL ESTUDIO**

### 1.1. Planteamiento y formulación del problema

#### 1.1.1. Planteamiento del problema

A nivel mundial, la contaminación de suelo por hidrocarburos es uno de los problemas ambientales más frecuentes, ya sea por una inadecuada disposición o derrames de compuestos de hidrocarburos, sin embargo, se demostró que la fuente inicial de la contaminación de suelos se debe esencialmente a derrames accidentales o deliberadas en la explotación, extracción y distribución de hidrocarburos (6). Por lo tanto, los derrames accidentales de estos compuestos a gran escala presentan un volumen significativo de contaminantes en todo el planeta. Son diversos los casos que se puede mencionar, como sucedió en el Golfo de México el derrame de la plataforma petrolera Deepwater Horizon de la compañía British Petroleum en el 2 010 y en Alaska el derrame del buque petrolero Exxon Valdez en 1 989 que están categorizados como los dos peores desastres ambientales de los Estados Unidos que siguen afectando ciertos ecosistemas (7).

En las últimas décadas la actividad industrial de hidrocarburos han fomentado una amplia liberación de contaminantes en el medio ambiente, afectando la fertilidad del suelo, a través de varios mecanismos como la disminución en la retención de nutrientes tales como sodio, fosfato, nitrato



y potasio, la toxicidad directa a los organismos en el suelo, compactación, así como cambios en salinidad y pH, interfiriendo en el desarrollo de forrajes, cultivos y flora natural (8). La toxicidad de los hidrocarburos de petróleo ya sea aromáticos o alifáticos, son muy variables, sin embargo, aquellos de menor peso molecular son más tóxicos (9).

Por otra parte, en los países de México y Colombia, el sector petrolero se ha constituido en un propulsor importante para el desarrollo de la humanidad, pero a la vez, ha dado lugar a diversos eventos catastróficos a nivel ambiental, por la contaminación de ecosistemas terrestres y acuáticos ocasionada por derrame de estos compuestos de petróleo y sus derivados desde hace más de 40 años. El derrame de hidrocarburos es cada vez mayor, afectando la flora, fauna e incluso es un riesgo alto para la salud humana, por consiguiente, a través de los años se ha desarrollado diversas metodologías para remediar estos impactos, sin embargo, los costos relacionados a estas técnicas las vuelven dificultosas para implementar (10).

En nuestro país, contamos con diversos yacimientos de petróleo en su mayoría por la zona norte de la selva peruana, el traslado de los hidrocarburos se realiza mediante el oleoducto norperuano, por lo tanto, se observaron deficiencias, ocasionando derrames de petróleo que contaminan el medio ambiente, propagando la pérdida de flora y fauna aledañas al derrame. Es así como en el 2016 ocurrieron trece derrames de hidrocarburos. Asimismo, se esparcieron en promedio 6 000 barriles con petróleo en las localidades de Amazonas y Loreto, impactando directamente en la vida de los pobladores, limitando el consumo de agua y alimentos, ya que el crudo derramado afecta los suelos, sus cosechas y especies comestibles y nativas alrededor de la zona de impacto (11).

Además, existen destilerías de petróleo que producen diversos derivados del mismo, que son producidos y transportados para ser usado en diferentes actividades industriales, que contaminan el suelo y pese del cuidado que se puede tener en su manejo y almacenamiento, hay la posibilidad de que estos compuestos se infiltran al suelo en cantidades mayores al cinco por ciento que es el nivel establecido por el Ministerio de Energía y Minas (12).

A pesar de la tarea del Ministerio de Energía y Minas como autoridad sectorial competente para las actividades petroleras, en nuestro país en materia de suelos contaminados, no existe información estadística oficial sobre la ubicación y extensión de las áreas afectadas y su disposición adecuada de los productos y residuos de la industria del petróleo. Se observa un problema significativo que requiere que los suelos contaminados con hidrocarburos sean remediados con tecnologías de bajo costo y de fácil acceso para prevenir la contaminación de las aguas subterráneas (13).

Por otro lado, en el Perú el suelo de la mayoría de los talleres mecánicos es contaminado con residuos peligrosos como los aceites usados, gasolina, anticongelantes y líquidos de freno que son generados en el mantenimiento o reparación automotriz. Los aceites usados son aceites refinados del petróleo o de origen sintético que han sido utilizados en el cárter del motor a gasolina o diésel de automóviles y que durante su uso se mezclaron con tierra, metales y agua (14).

En la provincia de Huancayo específicamente en el distrito de Chilca, según la encuesta realizada, en la actualidad se cuenta con alrededor de 103 talleres mecánicos, la mayoría de las cuales están ubicadas dentro de la zona urbana. Del total de los talleres identificados, el 80 % de estos talleres realizan actividades de mantenimiento y reparación de autopartes usando diversos insumos, específicamente, alrededor del 89 % utiliza aceites de motor y el 68 % gasolina. Los derrames de estos combustibles en el suelo que ocurren durante las actividades de los talleres causan problemas ambientales en el suelo superficial y en el subsuelo, alterando sus propiedades físicas y químicas debido a que contienen hidrocarburos de diferente naturaleza químicas como alifáticos, aromáticos y compuestos poli condensados (10).

Ante esta situación, son diversas las técnicas que se utilizan para recuperar los suelos, sin embargo, la descontaminación por procesos físicos o químicos han logrado efectos positivos, pero su elevado coste económico junto con el hecho de que no se consideran respetuosas con el medio ambiente, constituye hoy en día un obstáculo para su empleo. Por ello se ha planteado la posibilidad de buscar alternativas viables en la

remediación de suelos contaminados con hidrocarburos que sean ambientalmente correctas, simples y económicas; como las técnicas de biorrecuperación con el uso de enmiendas orgánicas (15). Éstas mejoran las propiedades físicas - químicas del suelo ya que estos aportan al suelo substratos carbonados que actúan como fuente de energía para los microorganismos, incitando la actividad microbiana del suelo; por lo que, la incorporación de esta sustancia aumenta la degradación de los hidrocarburos, debido a la mayor estimulación del crecimiento y actividad de las poblaciones microbianas del suelo (15).

En este contexto se propone evaluar experimentalmente la aplicación de vermicompost en un suelo contaminado con hidrocarburos, del distrito de Chilca, provincia de Huancayo, región Junín, para medir su efecto en las propiedades fisicoquímicas del suelo y en la biomasa seca aérea y radicular de *Hordeum vulgare L.*

#### 1.1.2. Formulación del problema

##### A) Problema general:

¿Cuál es el efecto de la aplicación de diferentes dosis de vermicompost en la biomasa de *Hordeum vulgare L.* cultivado en un suelo contaminado con hidrocarburos de un taller mecánico, Chilca - 2019?

##### B) Problemas específicos:

- ¿Cuáles son las características fisicoquímicas del suelo contaminado con hidrocarburos de un taller mecánico, Chilca - 2019?
- ¿Cuál es el efecto de la aplicación del vermicompost con dosis de 0 %, 50 %, 70 % en las propiedades físicas y químicas de un suelo contaminado con hidrocarburos de un taller mecánico, Chilca - 2019?

- ¿Cuál es el efecto de la aplicación del vermicompost con dosis de 0 %, 50 %, 70 % en la biomasa seca aérea y radicular de *Hordeum vulgare L.* cultivado en un suelo contaminado con hidrocarburos de un taller mecánico, Chilca - 2019?

## 1.2. Objetivos

### 1.2.1. Objetivo general

Determinar el efecto de la aplicación de diferentes dosis de vermicompost en la biomasa de *Hordeum vulgare L.* cultivado en un suelo contaminado con hidrocarburos de un taller mecánico, Chilca - 2019.

### 1.2.2. Objetivos específicos

- Determinar las características fisicoquímicas del suelo contaminado con hidrocarburos de un taller mecánico, Chilca - 2019.
- Determinar el efecto de la aplicación del vermicompost con dosis de 0 %, 50 %, 70 % en las propiedades físicas y químicas de un suelo contaminado con hidrocarburos de un taller mecánico, Chilca - 2019.
- Determinar el efecto de la aplicación del vermicompost con dosis de 0 %, 50 %, 70 % en la biomasa seca aérea y radicular de *Hordeum vulgare L.* cultivado en un suelo contaminado con hidrocarburos de un taller mecánico, Chilca - 2019.

## 1.3. Justificación e importancia

### 1.3.1. Justificación académica

Los resultados de la investigación servirán de punto de partida para las nuevas investigaciones que pueden realizarse a nivel pregrado y posgrado, asimismo de ser punto de interés para profesionales e directos grupos de interés, en sustento de los modelos teóricos que muestran la forma en que

el ácido fúlvico y húmico presentes en el vermicompost actúan sobre los contaminantes con hidrocarburos del suelo y su disponibilidad para las plantas, en especial para el *Hordeum vulgare L.*, que es un cultivo tradicional y predominante de la actividad económica y de los hábitos alimenticios de la población del distrito de Chilca.

#### 1.3.2. Justificación social

Los resultados de la presente investigación beneficiarán a la población del distrito de Chilca y del Valle del Mantaro en general, ya que se pretende recuperar suelos contaminados con hidrocarburos a través de la aplicación de la enmienda orgánica en la biomasa de *Hordeum vulgare L.*, por lo tanto, representa una técnica que beneficiará a la población por ser de bajo costo, asimismo a las empresas petroleras y autoridades de gobierno quienes tendrán información valiosa sobre el tema.

#### 1.3.3. Justificación ambiental

La descontaminación por procesos físicos o químicos han logrado efectos positivos, sin embargo, su elevado coste económico y lo más importante que no se consideran respetuosas con el medio ambiente, es un obstáculo hoy en día para su empleo, por lo que en este estudio se emplea la técnica de biorrecuperación de suelos contaminados con hidrocarburos mediante el uso de enmiendas orgánicas que son ambientalmente correctas, simples y económicas.

#### 1.3.4. Justificación metodológica

Al ejecutar el presente estudio sobre el efecto del vermicompost en un suelo contaminado con hidrocarburos, se ha seguido un método en la selección de suelos, aplicación de sustratos y uso de un bioindicador, los cuales fue validada y comprobada respecto de su confiabilidad, por lo tanto, estos procedimientos y técnicas podrán ser utilizados por otros

investigadores, y al demostrar su eficiencia, se podrán estandarizar siendo de interés en esta área de la investigación.

#### 1.3.5. Importancia

La utilización del vermicompost constituye una alternativa para la mejora de las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo contaminado con hidrocarburos, además contribuye al desarrollo de las plantas que, en el Valle del Mantaro y especialmente en el distrito de Chilca, están afectando la fertilidad del suelo por la actividad de los talleres mecánicos debido a los derrames de los diversos compuestos de hidrocarburos totales pesados. Por lo tanto, un suelo contaminado no solo afecta el funcionamiento de este recurso natural, también puede afectar al agua, de allí la importancia de experimentar y proponer alternativas de descontaminación de suelos por medio de la mejora de sus principales propiedades fisicoquímicas en los suelos del distrito de Chilca.

### 1.4. Hipótesis y variables

#### 1.4.1. Hipótesis general

- $H_1$ : La aplicación de diferentes dosis de vermicompost afecta positivamente en la biomasa de *Hordeum vulgare L.* cultivado en un suelo contaminado con hidrocarburos de un taller mecánico, Chilca - 2019.
- $H_0$ : La aplicación de diferentes dosis de vermicompost no afecta positivamente en la biomasa de *Hordeum vulgare L.* cultivado en un suelo contaminado con hidrocarburos de un taller mecánico, Chilca - 2019.

#### 1.4.2. Hipótesis específicas

- H<sub>1</sub>: La aplicación del vermicompost con dosis de 0 %, 50 %, 70 % mejora las propiedades físicas y químicas de un suelo contaminado con hidrocarburos de un taller mecánico.
- H<sub>0</sub>: La aplicación del vermicompost con dosis de 0 %, 50 %, 70 % no mejora las propiedades físicas y químicas de un suelo contaminado con hidrocarburos de un taller mecánico.
- H<sub>2</sub>: La aplicación del vermicompost con dosis de 0 %, 50 %, 70 % incrementa la biomasa seca aérea y radicular de *Hordeum vulgare L.* cultivado en un suelo contaminado con hidrocarburos de un taller mecánico.
- H<sub>0</sub>: La aplicación del vermicompost con dosis de 0 %, 50 %, 70 % no incrementa la biomasa seca aérea y radicular de *Hordeum vulgare L.* cultivado en un suelo contaminado con hidrocarburos de un taller mecánico.

#### 1.4.3. Descripción y operacionalización de las variables

- Variable independiente:
  - Dimensión: dosis de vermicompost.
  - Definición: el vermicompost es un producto final estable, homogéneo y de granulometría fina, resultado de un proceso que involucra la adición de lombrices que precipita la conversión de los residuos orgánicos; estimulando los procesos de humificación y mineralización (16).
  - Indicador: porcentaje por kilogramo de tierra (0 %, 50 %, 70 %).
- Variables dependientes:
  - ➔ Suelo contaminado con hidrocarburos.
    - Dimensión: propiedades fisicoquímicas del suelo contaminado.
    - Definición: componentes de la fase sólida y líquida del suelo en permanente interacción de pH, contenido de materia orgánica y nutrientes (17).

- Indicadores:
  - Densidad aparente (Mg/m<sup>3</sup>).
  - Materia orgánica (%).
  - Carbonatos (%).
  - P disponible (mg/kg).
  - K disponible (mg/kg).
  - N total (g/kg).
  - pH.
  - CICE (cmol/kg).

➔ Cebada (*Hordeum vulgare L.*).

- Dimensión: Biomasa de *Hordeum vulgare L.*
- Definición: la biomasa de *Hordeum vulgare L.* es la materia orgánica de procedencia vegetal que se puede transformar en energía; se mide mediante parte radicular, el área foliar, parte aérea, o altura de planta (18).
- Indicadores:
  - Materia seca de la parte aérea (g).
  - Materia seca de la parte radicular (g).



Tabla 01. Matriz de operacionalización de las variables.

VARIABLES		DIMENSIONES	DEFINICION	INDICADOR	UNIDAD DE MEDIDA	TIPO DE VARIABLE
Variable Independiente	Vermicompost	Dosis de vermicompost	El vermicompost es un proceso que involucra la adición de lombrices que precipita la conversión de los residuos orgánicos; estimulando los procesos de humificación y mineralización obteniendo un producto final estable, homogéneo y de granulometría fina (16).	Porcentaje por kilogramo de tierra (0 %, 50 % y 70 %).	kg	Cuantitativa continua
Variables Dependientes	Suelo contaminado con Hidrocarburos	Propiedades fisicoquímicas del suelo contaminado	Componentes de la fase sólida y líquida del suelo en permanente interacción de pH, contenido de materia orgánica y nutrientes (17).	pH	Unidad	Cuantitativa continua
				Nitrógeno total	g/kg	
				Densidad aparente	Mg/m	
				Materia orgánica	%	
				Carbonatos	%	
				P disponible	ppm	
				K disponible	ppm	
				Capacidad de Intercambio Catiónico Efectiva (CICE)	cmol/kg	
<i>Hordeum vulgare L.</i> (cebada)	Biomasa de <i>Hordeum vulgare L.</i> (cebada)	La biomasa de <i>Hordeum vulgare L.</i> es la materia orgánica de procedencia vegetal que se puede transformar en energía; se mide mediante parte radicular, el área foliar, parte aérea, o altura de planta (18).	Masa seca de la parte aérea	g	Cuantitativa continua	
			Masa seca de la parte radicular	g		

Fuente: elaboración propia.

## **CAPÍTULO II**

### **MARCO TEÓRICO**

#### 2.1. Antecedentes de la investigación

##### 2.1.1. Antecedentes encontrados en artículos científicos

En el artículo científico titulado “Uso de cachaza y bagazo de caña de azúcar en la remoción de hidrocarburos en suelo contaminado” cuyo objetivo fue determinar la eficiencia de remoción de hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP) y de hidrocarburos totales del petróleo (HTP) de un suelo contaminado con petróleo crudo, utilizando la cachaza y el bagazo de caña de azúcar como enmiendas y texturizante. En la parte metodológica se realizaron pruebas en microcosmos de cultivos sólidos para la biorremediación de un suelo contaminado con 14 300 mg/kg de hidrocarburos totales del petróleo y 23.14 mg/kg de hidrocarburos aromáticos policíclicos. En los resultados, la remoción de HTP fue de 60.1 % para bagazo y de 51.4 % para cachaza, asimismo, con cachaza en una relación 96:4 se logró una remoción de 43 % de HAP, en cambio el bagazo en una relación 98:2 removió 41 %. La investigación concluye que la cachaza resulta ser una alternativa para ser utilizada en los procesos de remoción de HTP y HAP de suelos contaminados con hidrocarburos de petróleo. Además de funcionar como enmienda, presenta la excelencia de aportar microorganismos al suelo con la capacidad de biotransformar los tóxicos, asimismo, aporta nutrimentos en especial el fósforo en mayor concentración que los encontrados en bagazo de caña de azúcar (19).

En el artículo científico titulado “Estudio comparativo del agregado de enmiendas orgánicas e inorgánicas en procesos de biorremediación de suelos norpatagónicos contaminados con petróleo” cuyo objetivo fue analizar la eficacia de la incorporación de biosólidos (B) y compost de biosólidos (CB) frente a los métodos convencionales de biorremediación: aporte de fertilizantes sintéticos (F) y laboreo, aireación y humectación (LH) a un suelo típico de la región norpatagónica contaminado con 10% de petróleo. La investigación se realizó a escala de laboratorio, en microcosmos que fueron armados en recipientes de vidrio, con 4 tratamientos de remediación y 3 repeticiones para cada uno, que fueron identificadas como: SLH (el suelo sólo recibió aireación, laboreo y humectación), SB (suelo + B), SCB (suelo + CB), SF (suelo + fertilizantes sintéticos). Los resultados obtenidos indicaron que los hidrocarburos aromáticos de menos peso molecular, fueron eliminados rápidamente debido a la volatilización durante los procesos de aireación del suelo. A los 90 días iniciada la biorremediación, los hidrocarburos de fracción pesada (HFP) mostraron las mayores reducciones con el 83 % y 65 % para los tratamientos con B y CB respectivamente, 35 % para el tratamiento F y 25 % para LH, siendo el tratamiento con B el más efectivo. La investigación concluye que la aplicación de enmiendas orgánicas al suelo contaminado estimula la actividad microbiana produciendo mayor tasa de remoción del petróleo respecto a los tratamientos convencionales de biorremediación en este tipo de suelos (20).

En el artículo científico titulado “Bioestimulación del suelo impactado con aceite residual automotriz y fitorremediación con *Zea mays*” cuyo objetivo fue la bioestimulación del suelo impactado por 45.000 ppm de aceite residual automotriz con lombricomposta y composta bovina al 3 %. La investigación se realizó en condiciones de invernadero, el diseño experimental fue de 3 tratamientos con 6 repeticiones, el suelo se colocó en jarras de Leonard con aproximadamente 1 kg en cada una; la bioestimulación del suelo con 45.000 ppm fue con lombricomposta, composta bovina y mezcla de ambas durante siete semanas y se mantuvo una humedad en el suelo ajustada al 80 % de la capacidad de campo. Los resultados indicaron que la bioestimulación del suelo contaminado con

45.000 ppm de aceite residual automotriz por la mezcla de lombricomposta y composta bovina, lo redujo a 21.000 ppm en siete semanas; mientras cuando se bioestimuló solo con composta bovina decreció al 31.000 ppm; o exclusivamente con lombricomposta lo disminuyó a 33.700 ppm. La investigación concluye que la bioestimulación del suelo contaminados con lombricomposta y composta bovina provocó la oxidación de la fracción alifática del aceite residual automotriz, lo que disminuyó su concentración (21).

En el artículo científico titulado “Emergencia y crecimiento de maíz en un suelo contaminado con petróleo crudo” cuyo objetivo fue conocer la capacidad del maíz para emerger y crecer en un suelo contaminado artificialmente con petróleo crudo. En un diseño experimental completamente al azar se utilizó un arreglo factorial de 4 x 11, los factores y niveles de concentración de petróleo en el suelo fueron 0, 15 000, 25 000 y 35 000 mg/kg y las 11 variedades de maíz (MV01 a MV10 y JOR) haciendo un total de 44 tratamientos con 3 repeticiones. Al quinto día después de la siembra se verificó el porcentaje de emergencia de las plántulas y a los 22 días después de la siembra se verificó la altura de planta, longitud de raíz, volumen radical, peso seco total, índice de crecimiento en longitud de tallo y raíz e índice de acumulación de biomasa seca. Se obtuvo como resultado que la recolección MV08 presentó mayor porcentaje de emergencia en todas las concentraciones de petróleo crudo en el suelo, asimismo, la concentración de petróleo 25 000 mg/kg suelo permitió el crecimiento de las plántulas de maíz, por lo tanto, se concluye el potencial que tiene el maíz para crecer en suelos contaminados con petróleo, así como la posibilidad utilizarse en la técnica de fitorremediación para la recuperación de suelos agrícolas contaminados con petróleo (22).

En el artículo científico titulado “Uso de *Panicum maximum* y *Brachiaria brizantha* para fitorremediar suelos contaminados con un crudo de petróleo liviano” cuyo objetivo fue evaluar la capacidad de remediar suelos contaminados con hidrocarburos de petróleo (HCP) con las gramíneas *Panicum maximum* y *Brachiaria brizantha*. Se realizaron 2 ensayos en un

invernadero utilizando semillas certificadas de las dos especies de gramíneas. El primer ensayo fue para determinar el efecto de la contaminación, sobre la germinación de semilla y la sobrevivencia y producción de materia seca por las plántulas, por lo cual, las semillas de ambas especies fueron sembradas a 1 cm de profundidad en envases de 10.5 cm de alto por 10.5 cm de diámetro con capacidad de 600 g de suelo con una concentración del crudo petróleo del 3 %, el experimento desarrolló un diseño factorial completamente aleatorizado, donde los factores fueron las especies de gramíneas y la presencia o ausencia de contaminación con HCP. A los 45 días se determinó la emergencia de las plántulas y al finalizar el ensayo se contaron aquellas que sobrevivieron para ser cosechadas en forma íntegra y se midió la longitud radical máxima, luego las plántulas fueron secadas en una estufa por dos días a 70°C para la estimación del peso total y de cada fracción. El segundo experimento consistió en determinar el tiempo y magnitud de la reducción de la carga del contaminante, por lo cual, se realizaron tres ensayos para cada especie en microcosmos, donde se colocaron 20 kg de suelo contaminado con HCP (3 %) en contenedores de 44 cm x 32 cm x 28 cm (largo, ancho y alto) y 26 semillas por envase. Los resultados indicaron que luego de 45 días no se observaron diferencias significativas entre la cantidad de semillas germinadas y el tiempo promedio de emergencia de las plántulas en los suelos contaminados con HCP, es decir, la sobrevivencia de las plántulas en suelos contaminados para *B. brizantha* tendió a ser más tolerante, lo cual fue del 82 % respecto al 64 % que presentó *P. maximum*. La presencia de HCP produjo una fuerte reducción en la producción total de materia seca (aérea y subterránea), sin embargo, pese a la fuerte reducción de la producción, *P. maximum* disminuyó el contenido de aceites y grasas en un 63 % y *B. brizantha* en un 55 %. La investigación demuestra el potencial que tiene las gramíneas *Panicum maximum* y *Brachiaria brizantha* para descontaminar suelos con concentraciones de crudo liviano menor o igual al 3% (23).

En el artículo científico titulado “Biorremediación de un suelo contaminado con diésel: efecto de la adición compost” cuyo objetivo fue investigar la influencia de la adición de compost sobre la degradación de un suelo

contaminado con diésel, en esta investigación usaron un compost municipal derivado de desechos sólidos de 5 años y un compost derivado de la pulpa de aceituna. Se realizaron 18 tratamientos en total en respirómetros manométricos de 1 L, donde cada uno de los dos compost se mezclaron con el suelo contaminado con diésel en tres proporciones que fueron de 2:1, 5:1 y 10:1 (suelo: compost) y la degradación del diésel se estudió a través de mediciones de las actividades de respiración neta (consumo de O<sub>2</sub> y generación de CO<sub>2</sub>) durante un periodo de 170 días. Los resultados indicaron que, en el caso del compost de residuos sólidos municipales, en la relación de 2:1 (suelo:compost) condujo a la mayor actividad microbiana neta y la mayor eliminación de diésel del 94 %, mientras que, en el caso del compost de pulpa de aceituna, en la proporción 5:1 resulto la actividad microbiana neta más alta, sin embargo, con una eliminación de diésel aproximadamente del 73 %. La investigación concluye que la adición de ambos compost al suelo contaminado con diésel aumento la actividad de respiración neta debido a la degradación del diésel, es decir, la adición de enmiendas orgánicas mejora la degradación cometabólica del diésel debido a la población microbiana presente en el compost ya que aportan fuente de nutrientes para apoyar el crecimiento microbiano, asimismo, la presencia de materia húmica en el compost pueden ayudar en el desorción de contaminantes orgánicos hidrófobos del suelo (24).

En el artículo científico titulado “Crecimiento de plantas de maíz (*Zea mays*) en un suelo contaminado con petróleo y remediado con extracto de cascara de naranja (*Citrus sinensis*)” cuyo objetivo fue el uso del extracto de la cascara de naranja como bioestimulador para la remediación de suelos contaminados con petróleo crudo y luego se utilizó la planta de maíz (*Zea mays*) como indicador del nivel de contaminación de un suelo de sabana luego de su tratamiento. Se realizaron tres muestras de suelo de 1 kg cada una contaminado con petróleo con disoluciones al 1 %, 3 % y 5 % de extracto de cáscara de naranja a una dosis de 150 ml/kg de suelo. Se monitoreo los porcentajes de aceites y grasas cada 7 días hasta un total de 42 días continuos, después del proceso de remediación de las muestras contaminadas, se plantaron 15 semillas de maíz, se midió su crecimiento

cada 5 días por un periodo de 35 días continuos. Para poseer un patrón de comparación en su crecimiento, se realizó una muestra de suelo sin contaminación y en él también se plantaron 15 semillas de maíz. Los resultados del monitoreo de la remediación con 150 ml (por kg de suelo) de extracto de cascara de naranja con un suelo contaminado con 100 ml de petróleo por kilogramo, durante 42 días indicaron la disminución de aceites y grasas del 84 % para la disolución al 1 %, 86.9 % para la disolución al 3 % y 90.5 % para la disolución al 5 %. Asimismo, según un análisis de contraste de rangos, el crecimiento de las plantas fue estadísticamente igual en todas las muestras hasta los 20 días, luego se evidenciaron diferencias respecto al patrón. La investigación concluye que los suelos contaminados con el petróleo fueron remediados de manera efectiva al aplicar las disoluciones de extracto de cascara de naranja, basándose en el crecimiento de las plantas de maíz, es decir las diferencias observadas son producto de los cambios en el suelo producto del proceso de biorremediación (25).

#### 2.1.2. Antecedentes encontrados en tesis

En la tesis titulada “Efecto del compost de cáscara de *Citrus limon* sobre la degradación de hidrocarburos totales de petróleo en suelos contaminados provenientes de Refinería Talara”, realizado en la Universidad Cesar Vallejo tuvo como objetivo desarrollar una técnica de tratamiento para la degradación de hidrocarburos totales de petróleo (HTP) en suelos contaminados provenientes de Refinería Talara mediante la cáscara de *citrus limon* como materia prima para la elaboración de compost. En la investigación se aplicó un diseño experimental unifactorial, se realizaron 3 tratamientos en recipientes descartables donde se colocó 1 kg de suelo contaminado (131 899.60 mg/kg de HTP) para el grupo control, además, se realizó 6 tratamientos con 1 kg de suelo contaminado cada uno, donde tres de ellos fueron adicionado 100 g de compost de cáscara de limón y en los otros tres tratamientos se añadió 200 g de compost. El tratamiento duró un periodo de 50 días, se estudió el suelo desde el inicio (0 días) para obtener una concentración inicial, punto medio (a los 25 días) y al final (a los 50 días) para determinar la tasa de degradación de HTP. Los resultados

de la investigación indicaron que la concentración más baja obtenida es de 71 543.88 mg/kg que representa un 45.74 % de la degradación aplicando 200 g de compost como tratamiento, mientras, que se obtuvo una concentración de 101 37.41 mg/kg que representa un 22.78 % de degradación aplicando 100 g de compost. La investigación concluye que el compost de cáscara de *citrus limon* tiene un efecto positivo en la degradación de hidrocarburos totales de petróleo en suelos contaminados provenientes de la refinería de Talara, logrando un promedio de 45.74 % de reducción de concentración de HTP aplicando 200 g durante 50 días (26).

En la tesis titulada “Biorremediación de suelos contaminados por hidrocarburos mediante compost de aserrín y estiércoles”, realizado en la Universidad Nacional Mayor de San Marcos tuvo como objetivo determinar la recuperación de un suelo contaminado con hidrocarburos, usando aserrín y estiércol, empleando como planta indicadora al *Zea mays L.* de la variedad marginal T-28. Se realizó el experimento a nivel de bioensayo, aplicando el modelo estadístico de diseño experimental completamente al azar (DCA), con 3 repeticiones y 12 tratamientos haciendo un total de 36 macetas experimentales con capacidad de 1 kg. La dosificación por maceta fue de 150 g de estiércol orgánico, 150 g de aserrín y 700 g de suelo contaminado (SC), por lo tanto, se utilizó estiércol de cerdaza (C), estiércol de vacaza (V), aserrín de pino (P), aserrín de bolaina (B) y aserrín de capirona (Cap), los cuales se distribuyen en 36 unidades, es decir, las combinaciones de los doce tratamientos fueron: T1:SC, T2:SC+V+Cap, T3:SC+V+B, T4:SC+V+P, T5:SC+C+B, T6:SC+C+Cap, T7:SC+C+P, T8:SC+V, T9:SC+C, T10:SC+B, T11:SC+Cap, T12: SC+P . Seguidamente se procedió a la siembra del maíz *Zea mays L.* en las macetas. A los 60 días los resultados indicaron que el mejor tratamiento que ha remediado los suelos fue el T3: suelo contaminado más vacaza más aserrín de bolaina, ya que la concentración inicial de hidrocarburos totales de petróleo fue de 21.81 g de HTP/kg de suelo, se redujo en 16.28 g de HTP/kg de suelo, que representa una reducción del 25 %. La investigación concluye que los suelos contaminados con hidrocarburos, tratados con aserrín y estiércoles en promedio disminuyó 22.5 % el contenido de hidrocarburos



en el suelo, empleando solo estiércol disminuyó 16.5 % y usando solamente aserrines disminuyó 9.6 %. Asimismo, 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, por lo que el cultivo de maíz tuvo mayor desarrollo en la altura de la planta (promedio 36.80 cm), peso seco foliar (promedio 6.42 g) y peso seco radicular (promedio 4.50 g), cuando los suelos contaminados con hidrocarburos han sido tratados de manera conjunta mediante estiércoles más aserrines y menos desarrollo cuando solamente han sido tratados con estiércol o aserrines (27).

En la tesis titulada “Efecto del humus de lombriz en la remediación de suelos contaminados con crudo de petróleo. Ucayali, Perú”, realizado en la Universidad Nacional de Ucayali tuvo como objetivo comprobar la remediación de un suelo contaminado con crudo de petróleo aplicando humus de lombriz. La metodología que se desarrolló fue experimental y un diseño completamente al azar (DCA), compuesto por 4 tratamientos y 3 repeticiones; T1: suelo (200 kg) + crudo de petróleo (4 l), T2: suelo (200 kg) + crudo de petróleo (4 l) + humus (10 kg), T3: suelo contaminado (200 kg) + crudo de petróleo (4 l) + humus (20 kg), T4: suelo contaminado + humus (30 kg). La investigación consistió en la instalación de un total de 12 celdas experimentales para el tratamiento de suelos contaminado con hidrocarburo. Los resultados de la investigación realizado después de cuatro meses indicaron que el T1 se contaba con un total de 1 534.47 mg/kg de TPH presente en el suelo, mientras que el T2 un total de 1 116.77 mg/kg de TPH y por el contrario en el T3 y T4 un total de 681.07 mg/kg y 704.30 mg/kg de TPH presentes en el suelo respectivamente, alcanzando remediar el suelo en más de un 80 %. La investigación concluye que el efecto de humus de lombriz en el tratamiento de suelos contaminados con crudo de petróleo a los cuatro meses logró disminuir la presencia de TPH en el suelo, por lo tanto, la dosis que mostró mayor índice de disminución de TPH presente en el suelo fue T3 evidenciando resultados favorables en comparación a los demás tratamientos, es decir, la aplicación de 20 kg de humus de lombriz logró disminuir un 86.74 % de mg de TPH presente en el suelo, comparado al T1 sin aplicación de humus que disminuyó un

69.59 %, T2 que disminuyó un 84.33 % aplicando 10 kg de humus y T4 que disminuyó un 75.52 % aplicando 30 kg de humus, lo que demuestra que el uso de Vermicompost para la remediación del suelo es de gran eficacia (28).

En la tesis titulado “Efecto de la materia orgánica en la biorremediación del suelo contaminado con hidrocarburos de petróleo en establecimientos de servicios”, realizado en la Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo tuvo como objetivo determinar el efecto de la materia orgánica en la biorremediación del suelo contaminado con hidrocarburos de petróleo en establecimientos de reparación de vehículos terrestres. El ensayo fue conducido bajo un diseño experimental completamente aleatorio (DCA) con 5 tratamientos, 3 repeticiones por tratamientos haciendo un total de 15 unidades experimentales: T1: Testigo absoluto, T2: testigo abiótico, T3: cachaza de “caña de azúcar”, T4: compost y T5: cascarilla de “arroz”. Los resultados de la investigación indicaron que a los 90 días el nivel de toxicidad fue bajo en el T4 (compost), mientras que en los testigos absoluto y abiótico el nivel de toxicidad fue severo. El suelo biorremediado con cachaza disminuyó la concentración de aceites y grasas de 30 743 mg/kg a 9 076 mg/kg. La investigación concluye que la cachaza de caña de azúcar y compost fueron los residuos orgánicos que aceleraron la biorremediación del suelo contaminado con hidrocarburos de petróleo alcanzando un nivel bajo de toxicidad a los 60 días y 90 días respectivamente. Por lo tanto, la eficiencia de biorremediación con cachaza fue de 70.48 % (29).

## 2.2. Bases teóricas

### 2.2.1. Suelo

El suelo es un sistema estructurado, heterogéneo, biológicamente activo, fundamental e irremplazable, que tiende a desarrollarse en la superficie de las tierras emergidas por la influencia de la intemperie y de los seres vivos. Asimismo, está constituido por material inorgánico, materia orgánica,

gases, agua y organismos vivos donde se establece un intercambio constante mediante procesos físicos, químicos y biológicos. Por lo cual, no es un ente estático, sino que mantiene un equilibrio dinámico con el medio que le rodea, con procesos constantes de síntesis y degradación, provenientes de la actividad de su biota y de su acción de los compuestos orgánicos (30).

Por otro lado, el suelo tiene componentes químicos y biológicos, es decir, proporciona soporte físico y nutrientes para el crecimiento de las plantas y los microorganismos, por lo que la alteración de estos perjudica su calidad y propiedades, por lo cual es necesario protegerlos y mantenerlos.

- Calidad del suelo: es dificultosa de definir y cuantificar ya que, los criterios de calidad de un suelo pueden variar según el uso a que se destine, a las prácticas de manejo que se utilicen e incluso a las prioridades socioeconómicas. Se comenzó a usar el término “calidad del suelo” al reconocer las funciones de este, las cuales son las siguientes: (I) fomentar la productividad del sistema sin perder sus propiedades físicas, químicas y biológicas; (II) mitigar los contaminantes ambientales y los patógenos (calidad ambiental) y (III) favorecer la salud de las plantas, los animales y del hombre (31). De esta manera, se afirma que la calidad del suelo está relacionada con el buen funcionamiento que tiene el suelo dentro de los límites del ecosistema del que forma parte y con el cual interactúa (32).
- Medición de las propiedades del suelo: es necesario disponer una serie de mediciones que sean capaces de reflejar tanto su estado productivo, así como las posibles alteraciones producidas en sus ciclos biogeoquímicos por el manejo del suelo, es decir, para evaluar la calidad del suelo. Las mediciones de las propiedades del suelo son como indicadores de la productividad y funcionalidad del suelo que se pueden englobar en diferentes tipos:
  - a) Físicos: densidad, porosidad, textura y estructura del suelo, capacidad de infiltración y capacidad de retención hídrica.

- b) Químicos: conductividad eléctrica, contenido mineral, pH y materia orgánica.
- c) Biológicos y Bioquímicos: actividades enzimáticas totales y específicas, C y N de biomasa microbiana, respiración, medida de ATP e indicadores de biodiversidad.

Entre estos parámetros, los de tipo físico y químico del suelo necesitan un tiempo mayor para aportar una información respecto a cualquier perturbación sufrida por el suelo, sin embargo, es la componente biológica del suelo la que podrá servir como primer indicio de cualquier alteración en la calidad del suelo, debido a la gran sensibilidad y rápida respuesta de las comunidades microbianas (33). En esa misma línea se hace referencia a los estándares de calidad ambiental para el suelo planteado por el Ministerio del Ambiente (MINAM), así establecer la existencia de parámetros orgánicos e inorgánicos que afecten a los suelos, por diversas actividades sobre todo por actividades petroleras. Estos parámetros se observan en la tabla 02 (34).

Tabla 02. *Estándares de Calidad de Suelos.*

Parámetros en mg/kg PS	Uso del Suelo			Métodos de Ensayo
	Suelo Agrícola	Suelo Residencial/ Parques	Suelo Comercial/ Industrial/ Extractivo	
ORGANICOS				
Hidrocarburos aromáticos volátiles				
Benceno	0.03	0.03	0.03	EPA 8260 EPA 8021
Tolueno	0.37	0.37	0.37	EPA 8260 EPA 8021
Eilbenceno	0.082	0.082	0.082	EPA 8260 EPA 8021
Xilenos	11	11	11	EPA 8260 EPA 8021
Hidrocarburos poliaromáticos				
Naftaleno	0.1	0.6	22	EP8260 EPA 8021 EPA 8270
Benzo(a) pireno	0.1	0.7	0.7	EPA 8270

Hidrocarburos de Petróleo				
Fracción de hidrocarburos F1 (C6-C10)	200	200	500	EPA 8015
Fracción de hidrocarburos F2 (>C10-C28)	1 200	1 200	5 000	EPA 8015
Fracción de hidrocarburos F3 (>C28-C40)	3 000	3 000	6 000	EPA 8015
Compuestos Organoclorados				
Bifenilos policlorados - PCB	0.5	1.3	33	EPA 8082 EPA 8270
Tetracloroetileno	0.2	0.2	0.5	EPA 8260
Tricloroetileno	0.01	0.01	0.01	EPA 8260

Fuente: Ministerio del Ambiente (34).

o Densidad aparente:

La densidad aparente es un dato del que, con frecuencia, se dispone para los distintos horizontes de un suelo, por la relativa facilidad con que se puede determinar, incluso si solo se cuenta con el apoyo de un laboratorio muy básico. No obstante, cabe destacar que el valor de la densidad aparente presenta limitaciones importantes, ya que no proporciona información acerca del tamaño de los poros, ni sobre la conexión entre ellos, ni sobre las fuerzas que han dado lugar a una estructura específica. Estos aspectos son de importancia para poder predecir el movimiento del agua en los poros de un suelo y los riesgos de degradación de los agregados. Suelos con los mismos valores de densidades aparentes pueden tener distinta respuesta a fuerzas externas. Para obtener información de este carácter habrá que recurrir a estudios específicos sobre la porosidad (35).

Los suelos con una alta proporción de espacio poroso a sólidos, tienen más bajas densidad de volumen que aquellos que son más compactos y tiene menos espacio poroso. Consecuentemente, cualquier factor que influencia el espacio poroso del suelo afectará la densidad de volumen (17).

Los suelos de textura fina tales como franco limoso, arcillosos, francos arcillosos, generalmente tienen bajas densidades de volumen que los suelos arenosos. Esto es verdad, debido a que las partículas sólidas de los suelos de textura fina tienden a estar organizados en gránulos porosos, especialmente si está presente adecuada cantidad de materia orgánica. En estos suelos agregados, los poros existen entre y dentro de los gránulos. Sin embargo, en suelos arenosos, el contenido de materia orgánica generalmente es baja, las partículas sólidas son menos probable a estar agregadas, y las densidades de volumen son comúnmente altas que en los suelos de textura fina (17).

La densidad de volumen o densidad aparente es una entidad siempre cambiante debido a la evaporación del suelo en todo momento bajo condiciones naturales. Por lo tanto, la densidad de volumen del suelo es preferible reportarlo como una densidad de volumen de suelo seco. Un suelo denso tiene más sólidos por unidad de volumen que un suelo poroso (36).

Cuanto mayor sea la proporción de partículas minerales a espacios porosos, mayor será la densidad de volumen. La densidad de volumen del suelo varía dependiendo del material parental del cual está formado, el contenido de materia orgánica, la profundidad debajo de la superficie del suelo, y el manejo del suelo. Ciertos procesos y actividades pueden disminuir la densidad de volumen y por lo tanto crear más espacios vacíos en el suelo, mientras otros procesos y actividades pueden incrementar la densidad de volumen y causar pérdida de espacio poroso. El crecimiento de los cristales de hielo en el suelo durante el congelamiento puede resultar en un levantamiento del suelo y una disminución en la densidad de volumen. El aflojamiento o soltura del suelo por el cultivo, resulta en más espacios y una densidad de volumen más baja. El tráfico de maquinaria pesada compacta el suelo, resultando en menos espacios y una densidad de volumen más alta (37).

- Capacidad de Intercambio Catiónico Efectiva (CICE):

Los componentes del suelo que contribuyen a la CIC son la arcilla y la materia orgánica, y en una menor extensión, el limo (38). En cualquier suelo, el número de sitios de intercambio es dependiente del pH del suelo; tipo, tamaño y cantidad de arcilla; y cantidad, estado de descomposición, y fuente del material orgánico (39).

La CIC de los principales coloides del suelo evidencia grandes diferencias de unos a otros debido al distinto origen de la carga y, para un mismo cambiador, la amplitud del intervalo de valores se debe a los múltiples factores que influyen en la aparición de la carga: tamaño de las partículas, cristalinidad y tiempo de tratamiento. Para el caso de la materia orgánica la gran disparidad de valores se debe al distinto grado de descomposición-humificación que puede presentar (35).

Dependiendo del tipo de cargas, permanentes o variables, tres tipos de CIC pueden ser diferenciadas (40), mientras que el Soil Survey Staff (41) agrega otro tipo, la CICE, para incluir contenido de  $Al^{+3}$  extractable en los suelos:

- CICp: Esta es la CIC atribuida a las cargas permanentes y es de importancia en, especialmente, minerales de arcilla tipo 2:1.
- CICt: Esta es la CIC total, o la CIC producida por cargas negativas permanentes y variables.
- CIClv: Esta es la llamada carga variable de la CIC, o la CIC causada por las cargas negativas variables. Esta es en efecto  $CICt - CICp$ . La CICv es común en suelos con alto contenido de materia orgánica, incluyendo tipos de arcilla 1:1, sesquióxidos y amorfos.

- CICE: CIC Efectiva, que es igual a las bases cambiables determinadas por acetato de amonio + Al extractable con KCl 1N.

La capacidad de intercambio de cationes (CIC) de los suelos está definida como la capacidad de los suelos para adsorber e intercambiar cationes. Científicamente, está relacionado al área y la carga superficiales de las arcillas. Esta relación es expresada por la siguiente ecuación:

$$CIC = S \times \sigma$$

Dónde: S es la superficie específica, y  $\sigma$  es la densidad de carga superficial (42). La CIC es determinada por extracción de los cationes del suelo con una solución conteniendo un catión conocido para intercambio. Los resultados expresados en mili equivalentes por 100 g de suelo (cmol(+)/kg), son aceptados como la CIC del suelo. Los valores de CIC pueden variar considerablemente dependiendo del concepto de CIC que es usado, método de análisis, tipo de coloide, y cantidad de coloides. Es práctica común determinar la CIC para analizar todos los cationes cambiables. La CIC es entonces (42):

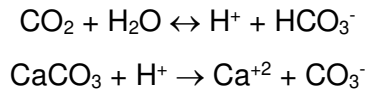
$$CIC = \sum m \text{ Eq de cationes intercambiables por 100 g de suelo.}$$

- Carbonato de calcio:

En los carbonatos el anión  $\text{CO}_3^{-2}$  y los cationes se hallan unidos por enlaces predominantemente iónicos. Las especies presentes en los suelos son la calcita ( $\text{CaCO}_3$ ), dolomita [ $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ ] y a veces calcitas magnésicas por sustitución de  $\text{Mg}^{+2}$  por  $\text{Ca}^{+2}$  ( $\text{Ca}_{1-x}\text{Mg}_x\text{CO}_3$ ). Junto a los carbonatos pueden coprecipitar otros minerales adsorbidos en la calcita a base de P, V, Mn, Fe, Co y Cd o como inclusiones, este es el caso de los minerales de Zn y Cu (43).



Los carbonatos de Cd y Mg se disuelven fácilmente en agua que contenga anhídrido carbónico, pero no en agua pura (35):



Dado que la actividad biológica hace del suelo un medio con  $\text{CO}_2$ , será posible una movilización de estos carbonatos, lo que tendrá implicaciones genéticas y agronómicas. Esto permite explicar el lavado de carbonatos en climas húmedos en suelos con régimen de humedad percolante, también explica la ausencia de carbonatos en suelos ácidos, así como su translocación en suelos con régimen de humedad no percolante en zonas semiáridas y áridas (35). La presencia de carbonatos de Ca y Mg tiene implicaciones agronómicas al aumentar la concentración del anión  $\text{HCO}_3^-$  en la solución suelo, que bloquea la absorción de hierro por las plantas, provocando problemas de clorosis férrica. La unión de  $\text{Ca}^{+2}$  con los fosfatos puede ser el origen de retrogradaciones apatíticas al incorporar abonos fosfatados (35).

De todos los carbonatos, el de calcio y magnesio son muy frecuentes en los suelos, especialmente el primero. Pueden encontrarse aislados o en combinación con diversas sales solubles. Su solubilidad relativa en agua con dióxido de carbono disuelto, los hace distribuirse rápidamente en el suelo. En los climas áridos y semiáridos hay tendencia a que se acumulen carbonatos, especialmente carbonato cálcico, hasta constituir horizontes cálcicos. La calcita es una fuente de calcio en el suelo y la aprovechan las plantas cuando se disuelve al estado de  $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$  de acuerdo a la presión de  $\text{CO}_2$  y pH existentes (44).

- pH:

El grado de acidez del suelo o alcalinidad, expresado como pH, es una variable principal que afecta un amplio rango de

propiedades físicas o químicas del suelo. Esta variable química mayormente influencia la probabilidad que las raíces de las plantas pueden absorber nutrientes y elementos tóxicos. El pH del suelo tiene también impacto pronunciado sobre las comunidades de organismos del suelo y sus actividades. La mezcla de especies de plantas que domina un paisaje en condiciones naturales frecuentemente refleja el pH del suelo (17). La acidez del suelo está cercanamente relacionada a las propiedades de intercambio iónico del suelo, y a otras propiedades, como el contenido de materia orgánica y mineralogía de arcillas del suelo. También tiene una relación directa a la disponibilidad de metales en la medida que afecta su solubilidad y su capacidad para formar quelatos en el suelo. En este sentido, los iones  $Al^{+3}$  juegan un rol muy importante en controlar la concentración de iones hidrógeno en el agua del suelo, y por lo tanto el nivel de acidez (pH) (45).

El pH del suelo afecta la movilidad de muchos contaminantes en el suelo influyendo la tasa de su descomposición bioquímica, su solubilidad, y su adsorción a los coloides. Así, el pH del suelo es un factor crítico en predecir la probabilidad que un contaminante contamine la capa freática, aguas superficiales, y canales alimenticios. Además, hay ciertas situaciones en que se genera tanta acidez que el ácido mismo se convierte en un contaminante ambiental significativo. Por ejemplo, los suelos en ciertos tipos de tierras alteradas generan agua de drenaje extremadamente ácida que puede causar muerte masiva de peces cuando alcanza un lago o una corriente (17).

Muchos factores complejos afectan el pH del suelo, pero ninguno más que dos balances simples: el balance entre cationes ácidos y no ácidos sobre las superficies coloidales y el balance entre iones  $H^+$  y  $OH^-$  en la solución suelo. Estos balances, a su vez, son mayormente controlados por la naturaleza de los coloides del suelo. Por lo tanto, para comprender y manejar la acidez del suelo, es esencial tener una buena comprensión de los conceptos de

superficies coloidales cargadas e intercambio de cationes. También, inextricablemente unido a la acidez del suelo es la toxicidad del elemento no nutriente, el aluminio (17).

Contrariamente, la lixiviación es mucho menor en regiones secas, permitiendo a los suelos retener  $\text{Ca}^{+2}$ ,  $\text{Mg}^{+2}$ ,  $\text{K}^+$ , y  $\text{Na}^+$  para prevenir la acumulación de cationes ácidos. Por lo tanto, los suelos en regiones áridas y semiáridas, tienden a tener niveles de pH alcalinos (es decir:  $\text{pH} > 7.0$ ), algunas veces acompañado por altos niveles de sales solubles y sodio intercambiable (17). La acidez y la basicidad del suelo afectan a sus diversas propiedades, a su comportamiento y al crecimiento de las plantas (35):

- Propiedades físicas afectadas: Dispersión o floculación de los coloides (iluvación), estructura, porosidad y aireación, conductividad hidráulica y régimen de humedad y temperatura.
  - Propiedades químicas afectadas: Meteorización química, movilidad de elementos tóxicos (Al, Mn y metales pesados), biodisponibilidad, disponibilidad de nutrientes, descomposición de la materia orgánica, adsorción de aniones (fosfatos, sulfatos, cloruros), procesos de hidromorfismo y neoformación de minerales de arcilla.
  - Propiedades biológicas afectadas: Relaciones bacterias - hongos, población bacteriana, nodulación de leguminosas, humificación, fijación de nitrógeno y movilidad y absorción de nutrientes.
- Materia orgánica:

La fracción orgánica de los suelos se origina de la biomasa que es característica de un suelo activo. Aunque estrictamente hablando, los organismos vivos y los organismos muertos están incluidos en el término materia orgánica del suelo (MOS). El

material muerto puede ser dividido en (i) materiales degradados en los cuales la anatomía de las sustancias de las plantas es aún visible y (ii) material completamente descompuesto. Toda la vida macro y microbial dentro del suelo (bacterias, hongos, hormigas, entre otros) son comúnmente ignorados, aunque ellos controlan muchas reacciones bioquímicas importantes. El primer grupo, los materiales degradados es de significancia en física del suelo (disminución de la densidad de volumen y afectando la estructura del suelo). Sin embargo, desde el punto de vista que química del suelo, esta fracción orgánica no descompuesta es químicamente de menor importancia, debido a que su estructura intacta exhibe un área superficial pequeña, haciéndola inactiva como adsorbente. El segundo grupo, la fracción descompuesta, llamado humus, está compuesta de sustancias humificadas y no humificadas. Esta es de importancia en química del suelo, aunque su naturaleza y acumulación en los suelos depende de los tipos y cantidad de material vegetal original (42).

En la mayoría de los suelos, el porcentaje de materia orgánica es pequeña, pero sus efectos sobre las funciones del suelo son profundos. Este componente del suelo en constante cambio ejerce una influencia dominante sobre muchas propiedades físicas, químicas y biológicas y funciones ecosistémicas de suelos. La materia orgánica proporciona gran parte de la capacidad de intercambio catiónico del suelo y capacidad de retención de agua. Ciertos componentes de la materia orgánica del suelo son mayormente responsables para la formación y estabilización de los agregados del suelo, especialmente nitrógeno. Además, la materia orgánica suministra la energía y crecimiento de la mayoría de organismos. Además de mejorar el crecimiento de las plantas a través de los efectos mencionados, ciertos compuestos orgánicos hallados en los suelos tienen efectos directos estimulando el crecimiento de las plantas. Por estas razones, la cantidad y calidad de materia orgánica son centrales en determinar la calidad del suelo (17).

La materia orgánica es una mezcla variada y compleja de sustancias orgánicas. Todas las sustancias orgánicas, por definición, contienen el elemento carbono, y, en promedio, el carbono comprende casi la mitad de la masa de la materia orgánica del suelo. La materia orgánica de los perfiles del suelo del mundo contiene, de cuatro a seis veces más carbono respecto a los encontrados en toda la vegetación mundial. Por lo tanto, la materia orgánica del suelo juega un rol crítico en el balance global del carbono que mayormente controla el cambio climático global (17).

Los factores que influyen en el contenido de materia orgánica son los siguientes (35):

- Vegetación: determina la cantidad de necromasa aportada anualmente y su calidad (composición y presencia de compuestos inhibidores). Los residuos de planta aportados al suelo varían según el ecosistema de que se trate. Así, en los bosques tropicales húmedos es del orden de unos 12-15 Mg de materia seca/ha/año; en bosques de zona templada unos 4-6 Mg/ha/año con resinosas y de 3 Mg/ha/año con frondosas, en praderas de zona templada unos 3 Mg/ha/año, y en zonas desérticas menos de 0.5 Mg ha año (46).
- Clima: condiciona el tipo de especies vegetales, la producción de biomasa y el grado de actividad microbiana. En zonas áridas y semiáridas: poca vegetación, por consiguiente, poca materia orgánica. En zonas frías la materia orgánica tiende a acumularse. En zonas tropicales húmedas: muchos aportes, pero también mineralización rápida (47).
- Organismos del suelo: intervienen en la alteración de la materia orgánica y en su mezcla con la materia mineral (bioturbación). Cabe destacar la acción de artrópodos, oligoquetos, bacterias, hongos y otros.
- Drenaje: la materia orgánica se descompone mal y tiende a acumularse en suelos mal aireados en los que falta oxígeno;

en aquellos que están permanentemente saturados de agua se puede formar un suelo orgánico (turbera, Histosol):

- Textura: los suelos de textura arcillosa suelen tener más materia orgánica al retener más agua y nutrientes, lo que favorece la producción de biomasa.
- Composición mineralógica de las arcillas: es importante por la distinta afinidad de adsorción de las moléculas orgánicas, lo que puede suponer un efecto protector frente a la acción de los microorganismos.
- Laboreo: la puesta en cultivo con roza, tumba y quema (en agricultura itinerante) o el paso de pradera a cultivo implican una pérdida de materia orgánica, ya sea por menores aportes al suelo, por pérdida por erosión o por una mayor entrada de oxígeno al labrar. La disminución del laboreo, por lo general, incrementa el almacenamiento (secuestro) de carbono y el consiguiente contenido de materia orgánica del suelo (35).

Los componentes orgánicos de los suelos proceden de aportes y de síntesis biótica o abiótica (35):

- Biomasa que vive en el suelo y su necromasa.
- Acumulación de restos de plantas y animales. (i) Biomasa senescente incorporada de forma natural a los suelos en cualquier ecosistema. (ii) Materiales orgánicos de origen biológico aportados por el hombre en los agro ecosistemas: estiércoles, restos de cosecha, compost, etc.
- Productos xenobióticos: son aquellos de naturaleza orgánica, resultantes de síntesis industrial. Los más frecuentes incorporados a los suelos son los fitosanitarios y, en menor medida, plásticos y papel. También se pueden incluir aquí el carbón procedente de incendios.
- Macromoléculas resultantes de los procesos de alteración y de humificación.
- Síntesis abiótica.

- Nitrógeno total:

El contenido de nitrógeno total en el suelo varía de 0.02 a 0.5 % en suelos minerales, incrementándose con el contenido de materia orgánica del suelo. En los suelos orgánicos, el contenido de N total puede ser mayor de 2.5 %. El contenido de nitrógeno total disminuye con la profundidad del suelo. El nitrógeno total del suelo se presenta en forma orgánica o inorgánica, donde casi el 95 % del nitrógeno total en suelos superficial es nitrógeno orgánico (48).

El nitrógeno orgánico del suelo forma parte de la materia orgánica procedente de los restos vegetales y animales. Este nitrógeno, que representa una gran parte del nitrógeno contenido en el suelo, no puede ser aprovechado por las plantas mientras no se transforme en nitrógeno inorgánico, acción que llevan a cabo los microorganismos del suelo. Las formas más importantes del nitrógeno inorgánico son: el ion amonio y el ion nitrato. El ion amonio puede ser adsorbido por el complejo de cambio, mientras que el ion nitrato permanece en la solución suelo. Las plantas toman la mayor parte del nitrógeno bajo la forma de ion nitrato y en menor cantidad bajo la forma de ion amonio. El balance del nitrógeno en el suelo bajo formas asimilables es el resultado de un continuo movimiento, en donde se producen entradas y salidas del nitrógeno en el suelo. Las entradas o ganancias se producen por los procesos de fijación de nitrógeno atmosférico y la mineralización de la materia orgánica (49).

Muy poco nitrógeno está disponible para la planta está presente en el suelo en su estado natural. La mayor parte del nitrógeno está contenida en la materia orgánica del suelo, de tal manera que la cantidad de nitrógeno en el suelo depende de la concentración de materia orgánica en el suelo. Las rocas y minerales de los cuales los suelos se han formado no contienen nitrógeno. Casi todo el nitrógeno presente en el suelo se origina de la atmosfera terrestre.

Casi el 80 % del aire que nosotros respiramos es nitrógeno gaseoso ( $N_2$ ), este es el nitrógeno en la atmósfera, pero este es solo de valor nutritivo para las leguminosas y algunos árboles, que son capaces de usarlo a través de bacterias en los nódulos radiculares, así como los organismos de vida libre en el suelo, que son capaces de fijar nitrógeno atmosférico y lo hacen disponible para la planta (50).

El balance de las formas asimilables de nitrógeno para la planta en la solución del suelo es el resultado dinámico de una serie de reacciones que se producen en la solución del suelo; es el resultado dinámico de una serie de reacciones que se producen continuamente y de las cuales resulta un constante movimiento de entradas y salidas de nitrógeno asimilable (51).

Las entradas, salidas y ciclaje del nitrógeno en el sistema suelo-planta-atmósfera son los siguientes (48):

- Entradas: fijación biológica, fijación industrial, fijación eléctrica, estiércoles animales y residuos de cultivo.
  - Salidas: absorción por la planta, desnitrificación, volatilización, lixiviación y fijación de amonio.
  - Ciclaje: mineralización, inmovilización, nitrificación y fósforo.
- Fósforo:

Entre los elementos nutrientes, el fósforo es solo superado por el nitrógeno en su impacto a la productividad y salud de ecosistemas terrestres y acuáticos. La cantidad total de fósforo en la mayoría de suelos nativos es bajo, con la mayor parte presente en formas no disponibles para las plantas. Los ecosistemas naturales han desarrollado formas de maximizar la eficiencia con la que las plantas usan y reciclan los suministros limitados de fósforo. Históricamente, los usos de la tierra agrícola han acelerado la pérdida y remoción de fósforo sin mejorar su reciclaje o



reemplazo. La baja disponibilidad de fósforo en suelos agrícolas frecuentemente conduce a mayores problemas sociales y ambientales. Los suelos improductivos no producen la cantidad adecuada de cosecha, forzando a las personas a deforestar más tierra para producir suficientes alimentos para sobrevivir. La tierra deforestada soporta poca cubierta vegetativa y de esta manera está sujeta a la erosión que posteriormente degrada los suelos y contamina los ríos y lagos con sedimentos de la escorrentía (17).

El P total en la superficie de los suelos varía de 0.005 a 0.15 % y disminuye con el incremento de la intensidad de la meteorización. En consecuencia, el P es mucho más bajo en suelos de regiones tropicales húmedas comparado a suelos de regiones áridas y semiáridas. Desafortunadamente la cantidad total de P total en el suelo tiene poca o ninguna relación con la disponibilidad de P para las plantas. Contrariamente, tener suelos con un contenido de P en exceso para las necesidades de las plantas, puede incrementar el potencial de transporte de P hacia aguas superficiales y subterráneas. Por lo tanto, la comprensión de las relaciones e interacciones de P en los suelos y los factores que influyen la disponibilidad de P para las plantas es esencial para un manejo eficiente de P y protección de la calidad del agua (48).

Desde el punto de vista de la nutrición vegetal, son importantes tres fracciones del fosfato del suelo: (i) fosfato en la solución suelo, (ii) fosfato fácilmente disponible, y (iii) fosfato no disponible. La primera fracción se define claramente y es el fosfato disuelto en la solución suelo. La segunda fracción es el fosfato sólido que se mantiene en las superficies de las partículas, de modo que está en equilibrio rápido con el fosfato de la solución. La cantidad perteneciente a esta fracción puede determinarse por medio de intercambio isotópico y se denomina fosfato fácilmente disponible. La tercera fracción es el fosfato no disponible o insoluble. El fosfato en esta fracción puede liberarse solo muy lentamente a la fracción lábil (52).

Se han realizado muchos intentos para relacionar el fosfato no disponible con minerales específicos del suelo. Estas investigaciones, sin embargo, se complican por el hecho que muchos fosfatos contienen impurezas que influyen en su solubilidad y, por lo tanto, en su capacidad de intercambiar iones fosfato con la solución suelo. En muchos suelos, con  $\text{pH} > 7$ , particularmente en suelos calcáreos, la apatita se considera la forma más importante de fosfato inorgánico, mientras que, en suelos de  $\text{pH}$  más bajo, las formas adsorbidas y ocluidas de fosfato son las principales fracciones de P inorgánico (52).

Los países industrializados, por muchos años, practican la compensación de la baja disponibilidad inicial de fósforo al agregar mucho más fósforo a suelos agrícolas que el removido en las cosechas de los cultivos. La excesiva aplicación de fertilizantes conteniendo fósforo y la concentración de ganado y sus residuos orgánicos han conducido a la acumulación de fósforo en la superficie de los suelos de muchas cuencas agrícolas. El agua de escorrentía de estas cuencas agrícolas junto con la escorrentía y las aguas residuales de cuencas urbanas, constituye uno de los tipos más serios de contaminación del agua. Esta contaminación es especialmente dañina para el agua los ecosistemas de agua dulce en estuarios, lagos, y ríos en las cuales puede poner en peligro el suministro de agua para consumo y restringir el uso de recursos acuáticos para pesca, industria, y recreación. Por lo tanto, el control de este nutriente contaminante, es una prioridad en programas de calidad de agua nacional y regional (17).

La disminución de P en solución con la absorción por las raíces de las plantas es tamponada por las fracciones orgánicas e inorgánicas del suelo. Primariamente los minerales primarios y secundarios de P se disuelven para reabastecer  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$  y  $\text{HPO}_4^{2-}$  en solución. El P inorgánico adsorbido ( $\text{H}_2\text{PO}_4^-$  y  $\text{HPO}_4^{2-}$ ) sobre la superficie de minerales y arcillas pueden también desorberse para

tamponar de P a la solución. Los microorganismos del suelo digieren residuos de plantas y animales y otras enmiendas orgánicas (abonos, biosólidos, etc.) produciendo compuestos orgánicos de P que son mineralizados a través de la actividad microbial para suministrar P a la solución (48).

- Potasio:

La fuente original de potasio son los minerales primarios, tales como micas (biotita y muscovita) y feldespatos potásicos (ortoclasa y microclina), Conforme estos minerales se meteorizan, sus estructuras laminares rígidas se hacen más flexibles. Por ejemplo, el potasio retenido entre las láminas de cristal de mica tipo 2:1 con el tiempo se hace más disponible, primero como formas lentamente disponibles, pero no intercambiables cerca a los bordes desgastados de los minerales y, eventualmente, como iones fácilmente intercambiables y iones disueltos en la solución suelo a partir del cual es absorbido por las raíces de las plantas (17).

El potasio es el séptimo elemento más abundante (~ 2.5 %) en la corteza terrestre y es generalmente absorbido por las plantas en cantidades mayores que cualquier otro nutriente excepto el nitrógeno. El contenido de K total en el suelo varía entre 0.05 y 3 % y es bajo en suelos de textura gruesa formados de arenisca o cuarzo y alto en suelos de textura fina formados de materiales parentales altos en potasio. Aunque el contenido de potasio total en el suelo excede la absorción por el cultivo durante una estación de crecimiento, solo una pequeña fracción está disponible para la planta (48).

Los suelos altamente intemperizados están altamente lixiviados y generalmente tienen un bajo contenido de potasio. En suelos tropicales, el contenido total de K es generalmente bajo debido a la mayor meteorización por la alta lluvia y temperatura; en

consecuencia, la deficiencia de K frecuentemente ocurre después de unos pocos años de cultivo en un suelo no cultivado tropical. Contrariamente, los suelos moderadamente meteorizados generalmente tienen un alto contenido de K debido a condiciones de baja lluvia (48).

El potasio en el suelo puede dividirse en tres fracciones: el potasio como elemento estructural de los minerales del suelo, el K adsorbido de forma cambiante a los coloides del suelo (arcillas y materia orgánica), y el K presente en la solución del suelo. Por mucho, la fracción más importante en cantidad es el K incorporado a las estructuras cristalinas de los minerales. El potasio intercambiable y no intercambiable comprende solo un pequeño porcentaje del K del suelo. La fracción no intercambiable no puede ser reemplazada por amonio, pero puede liberarse durante los cultivos. Consiste principalmente en K interlaminar y puede determinarse por extracción con ácido nítrico (52).

El potasio en residuos orgánicos (abonos y lodos de depuradora) se presentan predominantemente como  $K^+$  inorgánico soluble. En residuos animales, el contenido de potasio está alrededor de 0.22 % de la materia seca. El contenido de K en biosólidos es aproximadamente 4.5 kg K/t. Por lo tanto, los materiales de residuo pueden suministrar suficientes cantidades de K disponible, dependiendo de la dosis aplicada (48).

### 2.2.2. Contaminación del suelo

Un suelo se considera contaminado cuando las características físicas, químicas o biológicas originales han sido alteradas de manera negativa, por la presencia de uno o varios contaminantes en concentraciones altas de carácter peligroso para el ecosistema; por lo tanto, la productividad que el suelo tiene se pierde total o parcialmente. Asimismo, la contaminación del suelo puede producir cambios en su estructura, en su contenido de humus y en su pH (53).

- Contaminación del suelo por hidrocarburos:

Nuestra civilización tiene una dependencia por el petróleo, por lo que ha sido causa de la contaminación del suelo, en países productores y consumidores del petróleo, ocasionado por los derrames de petróleo y sus derivados. Los hidrocarburos del petróleo son tóxicos para el hombre y para los animales por lo que son carcinogénicos y mutagénicos. La contaminación por estos compuestos se califica en el mayor de los casos, por la persistencia en los ecosistemas aun así existan procesos degradativos donde participan los microorganismos, presentes de forma natural en el ecosistema, que podrían ser activados o utilizados en procesos de biorremediación.

Después de un evento de contaminación por hidrocarburos los principales efectos ambientales en el suelo son: los cambios en la dinámica poblacional de la flora y fauna, la inhibición del crecimiento de la cobertura vegetal en el lugar del derrame y la contaminación de aguas subterráneas, asimismo, los derrames de hidrocarburos generan impactos de tipo social, económico y de salud pública en las zonas colindantes al lugar afectado (54).

### 2.2.3. Hidrocarburos

Los hidrocarburos son compuestos orgánicos formados únicamente por moléculas de carbono e hidrogeno de gran abundancia en la naturaleza, su estructura molecular se basa en un armazón de átomos de carbono a los que se unen los átomos de hidrogeno. La hulla, el gas natural y el petróleo son las fuentes principales de los hidrocarburos, por lo que los derivados de esta última fuente son más interesantes por sus consecuencias perjudiciales en el medio ambiente. Químicamente, el petróleo crudo está formado por una mezcla heterogénea de hidrocarburos también presenta otros tipos de elementos en pequeñas cantidades como nitrógeno, azufre y oxígeno, así como trazas de metales por lo que tiene características inflamables o combustibles (55). La variedad y complejidad de los hidrocarburos que conocemos varían de acuerdo a la capacidad que

tiene el átomo de carbono de formar enlaces, dando lugar a moléculas cíclicas o lineales más o menos complejas. Es así que en función a su estructura química los hidrocarburos se pueden clasificar en cuatro grupos: (i) alifáticos, (ii) aromáticos, (iii) resinas y (iv) asfaltenos (56).

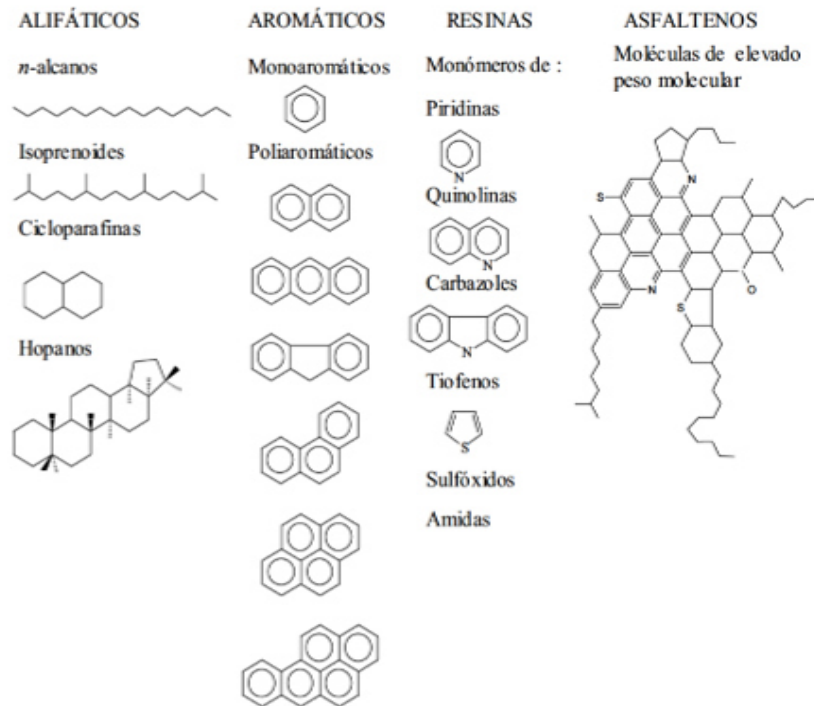


Figura 01. Estructura química de los diversos hidrocarburos.

Fuente: Speight (56).

Los hidrocarburos alifáticos o de cadena abierta se dividen en saturados (alcanos) e insaturados (alquenos y alquinos). En los saturados incluyen a los alcanos que son cadenas lineales de carbono unidas mediante enlaces simples, asimismo es la familia más numerosa que se encuentra en el petróleo y se denomina como parafinas. Estos pueden ser moléculas ramificadas o lineales y su longitud varía de 1 hasta 40 o más átomos de carbono, es así cuando estas cadenas forman estructuras cíclicas dan lugar a los cicloparafinas o cicloalcanos por lo tanto son elementos minoritarios del petróleo. En los insaturados incluye a los alquenos que tienen uno o más carbonos con enlaces dobles y a los alquinos que cuentan con enlaces triples entre sus átomos de carbono (57).

Por otro lado, los hidrocarburos aromáticos tienen estructuras en base a la molécula del benceno, donde los átomos de carbono se unen por medio de enlaces simples y dobles alternados. Se incluyen compuestos monoaromáticos como el tolueno y el benceno, y compuestos poliaromáticos como el pireno. En este grupo se encuentran los hidrocarburos aromáticos policíclicos que son moléculas formadas por diversos anillos aromáticos que constituyen entre el 10 y 25 % del petróleo crudo y son las fracciones más pesadas. Además, se absorben fuertemente al suelo, poseen una limitada solubilidad en agua y se degradan a velocidades mínimas que los hidrocarburos monoaromáticos. A causa de estas propiedades son altamente tóxicos y considerados como compuestos cancerígenos y mutagénicos (58).

Las resinas y asfaltenos son mezclas complejas integradas por núcleos naftenoaromáticos o policíclicos. Contienen cadenas hidrocarbonadas con heteroátomos de nitrógeno, oxígeno y azufre y en ocasiones están asociadas con mínimas concentraciones de metales como el níquel y el vanadio. Componen 10 % en crudos ligeros o poco degradados y hasta un 60 % en crudos muy degradados. Las resinas son agregados de piridinas, sulfóxido, tiofenos, quinolinas, amida y carbazones, también son estructuralmente similares a los asfaltenos, sin embargo, tienen menor peso molecular, menor contenido heteroátomos y mayor tasa de hidrógeno/carbono (59). Los asfaltenos están formados por agregados de ácidos naftalénicos, poliaromáticos, ácidos grasos, sulfuros, compuestos polifenólicos y metaloporfirinas que están constituido por moléculas grandes que se dispersan en el petróleo (60).

- Impactos ambientales de los hidrocarburos:

El trabajo de las petroleras, las disposiciones y el manejo habitual de los hidrocarburos y combustibles, en algunas circunstancias conlleva a la contaminación del ambiente debido a que los oleoductos, tanques y diversas instalaciones sufren daños. La industria petrolera ha ocasionado un gran impacto negativo en el ecosistema, por la gran cantidad de productos derivados del petróleo que se manejan y que

no han logrado ser evaluados cuantitativamente la contaminación desde la fase de explotación hasta la obtención de los petroquímicos básicos, ni del seguimiento a la infraestructura petrolera, está es integrada por : pozos de explotación, baterías de separación, complejos procesadores de gas, centrales de almacenamiento y bombeo, transporte y distribución en general y estaciones de servicio de combustible. Estas instalaciones tienen riesgos de fugas de petróleo, gasolina y diésel por ruptura de los ductos, por infiltración de aguas aceitosas, por malas prácticas, entre otras, por lo cual ocasiona un alto riesgo de contaminación ambiental e impacto negativo a los ecosistemas (61).

- Impacto de los hidrocarburos en el suelo:

En un derrame accidental del petróleo en el suelo afecta su impacto y remoción en el medio contaminado, la transferencia del hidrocarburo a lo largo de la superficie incrementa el área contaminada, sin embargo, al mismo tiempo favorece la remoción de hidrocarburos de menor peso molecular a través de la evaporación. La inclusión por la fuerza de gravedad y capilaridad reduce la evaporación, disminuye la disponibilidad del oxígeno ( $O_2$ ) y accede a la contaminación de mantos freáticos (62). En la figura 02 se observan los diversos procesos que influyen en el destino de los hidrocarburos en el suelo.

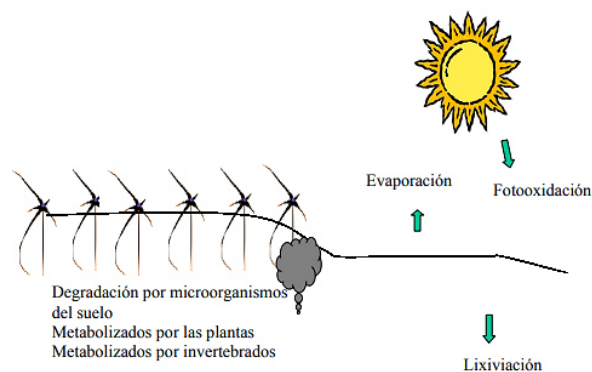


Figura 02. Destino de los hidrocarburos en el suelo.

Fuente: Atlas (62).



Los factores que influyen en la distribución de los hidrocarburos en los suelos son el volumen del derrame, la viscosidad del petróleo a temperatura del ambiente, nivel de la tierra y la composición del suelo. El crudo pesado debido a su alta viscosidad, tienden a moverse horizontalmente, entre tanto los compuestos de baja viscosidad como la gasolina y aceites penetran fácilmente en el suelo (63). Los hidrocarburos que se encuentran expuestos a la luz solar pueden ser oxidados a compuestos polares (fotooxidación) y así convertirse en un compuesto más toxico que a sus inicios (64).

El paso de los hidrocarburos por la matriz del suelo (lixiviación) depende de la solubilidad de los hidrocarburos en agua y de la textura del suelo. Menos del cinco por ciento de los compuestos del crudo (principalmente aromáticos de menor peso molecular e hidrocarburos polares) son solubles en agua. Se evidenció que la actividad microbiana promueve la solubilización y lixiviación de hidrocarburos en el suelo. En los suelos arcillosos la migración de partículas es más rápido que lo suelos francos, debido a que los primeros tienen una mayor porosidad. Asimismo, los suelos muy arcillosos las moléculas polares pueden ser absorbidas (62). Por otro lado, los hidrocarburos tienden a producir un efecto hidrofóbico al suelo, ocasionando la disminución de la tasa de infiltración, es decir, dichos compuestos se acumulan en los poros que se originan entre las partículas del suelo produciéndose una disminución en la disponibilidad de  $O_2$  y la permeabilidad (8).

- Impacto de los hidrocarburos en las plantas:

Los efectos de estos compuestos sobre las plantas son en mayor de los casos subletales, dicho de otra manera, no se manifiesta a través de la mortalidad, sino de manera indirecta modificando el crecimiento, la reproducción y la fotosíntesis. Por otra parte, los efectos adversos en cuanto al desarrollo de las plantas varían de acuerdo a la estructura química del hidrocarburo, su

concentración en el suelo y la especie de planta. Las altas concentraciones de hidrocarburos limitan o alteran la germinación de las semillas y el crecimiento de las plantas. La toxicidad de estos compuestos se da en el siguiente orden: aromáticos, naftalenos, olefinas y cadenas no ramificadas parafínicas (65). Se ha evaluado el efecto de la contaminación con hidrocarburos en la germinación y crecimiento vegetativo de diferentes especies de pastos, sometidos a diferentes concentraciones de hidrocarburos concluyendo un retraso en el crecimiento de todas las plantas evaluadas (66). Además, otras investigaciones determinaron el efecto de los hidrocarburos poliaromáticos en ecosistemas forestales y plantas madereras evidenciando un efecto de necrosis foliar, por lo que esta contaminación está produciendo un deterioro de los ecosistemas, así como la extinción de especies vegetales (67). Asimismo, un estudio reporta una disminución más del 80 % en la biomasa seca de las partes aéreas para dos especies: frejol y cebada, observando también síntomas de clorosis en las hojas y alteración del desarrollo vegetativo. La abstención del crecimiento fue mayor al incrementarse la concentración del contaminante (65).

- Impacto de los hidrocarburos en las semillas:

En el caso de las semillas, los hidrocarburos alteran las reacciones metabólicas y/o matar al embrión por toxicidad directa aguda. La abstención de la germinación está correlacionada con las propiedades hidrofóbicas de los hidrocarburos, por lo cual reducen o evitan el intercambio gaseoso y agua necesario en esta etapa. Además, evaluaciones sobre la fitotoxicidad de hidrocarburos indican que la respuesta a la presencia de estos compuestos durante la germinación varía de una especie a otra. Por lo que la resistencia de semillas de algunas especies vegetales a la toxicidad de los hidrocarburos muestra el siguiente orden decreciente: girasol, frejol, trigo, trébol, maíz, cebada, lechuga (65).

#### 2.2.4. Remediación de suelos contaminados por hidrocarburos

Se han desarrollado diversas estrategias que se utilizan para recuperar los suelos contaminados con hidrocarburos, sin embargo, no todas pueden ser eficientes debido a la naturaleza de este contaminante. Las técnicas más empleadas hasta el momento para la eliminación de los hidrocarburos del suelo son el lavado de suelos con agua, la recuperación electrocinética, extracción de hidrocarburos por vacío, la incineración, etc. (68). Algunas de estas técnicas han logrado un efecto positivo, sin embargo, su alto coste económico y perjudicial para el medio ambiente constituye hoy en día una dificultad para su empleo. Por lo tanto, se buscó nuevas alternativas viables para la eliminación de estos compuestos del suelo siendo ambientalmente correctas, simples y económicas, así como las técnicas de biorrecuperación. De acuerdo al tipo de tratamiento que se le da al suelo, las técnicas de degradación de los hidrocarburos se pueden agrupar en físicas-químicas-biológicas (69).

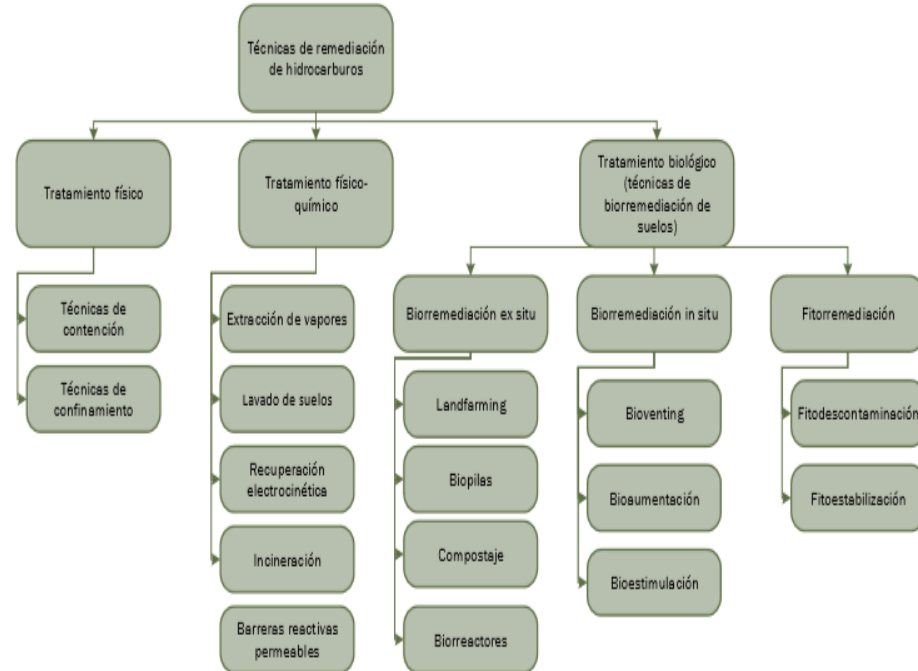


Figura 03. Técnicas de remediación de suelos con hidrocarburos.

Fuente: Gan *et. al.* (69).

Las técnicas de remediación más relevantes son la degradación natural y la biorremediación *ex situ* e *in situ* por lo que son más sencillas, económicas y respetuosas con el medio ambiente. En la biorremediación *ex situ* incluye el landfarming, biopilas, compostaje y biorreactores. En la biorremediación *in situ* se consideran bioventing, bioaumentación y bioestimulación (70). En la atenuación o degradación natural, las fracciones volátiles se evaporan con rapidez, quedando los compuestos alifáticos y aromáticos de cadena más larga, los cuales son oxidados por microorganismos autóctonos del suelo hasta dióxido de carbono (71).

El landfarming consiste en tratar el suelo contaminado preliminarmente excavado y trasladado a grandes áreas abiertas, protegido en una base impermeable, en donde se voltea y airea para facilitar la actividad de las bacterias nativas. En la técnica con biopilas consiste en la formación de pilas de material biodegradable con dimensiones variables con una mezcla de suelo contaminado y materia orgánica (compost) y se airean de forma activa y pasiva. Por otro lado, en el compostaje implica la mezcla del suelo contaminado con enmiendas orgánicas como estiércol o residuos agrícolas que le proporcione porosidad, de modo que permita un mejor flujo de aire y la transformación de compuestos orgánicos contaminantes bajo condiciones controladas de temperatura y humedad (72).

La técnica *in situ* de bioventing, bioventeo o bioaireación estimula la biodegradación natural de cualquier compuesto biodegradable en condiciones aerobias, es decir, se suministra aire al terreno, para promover la actividad de los microorganismos presentes y degradar los hidrocarburos (10). La bioaumentación implica la adición de microorganismos aclimatados o incluso modificados genéticamente en el medio para promover la biodegradación de los contaminantes. Por su parte, la bioestimulación es la activación de microorganismos nativos degradadores de hidrocarburos, a través de la adición de nutrientes y aceptores de electrones al entorno contaminado, de acuerdo a las deficiencias (71). La fitorremediación, otra alternativa de biorremediación, que consiste en el uso de plantas verdes, las que actúan solas o en simbiosis, para extraer del suelo y acumular en sus tejidos contaminantes peligrosos que afectan al medio ambiente (73).

En la actualidad, diversos estudios en fitorremediación no solo se basan al tratamiento de contaminantes inorgánicos (haluros, radio nucleídos, metaloides, metales, etc.), sino también al tratamiento de contaminantes orgánicos. Por lo que se comprobó algunas especies de plantas en la fitorremediación de suelos contaminados con hidrocarburos del petróleo como: *Zea mays L.*, *Panicum maximum Jacq.*, *Echinochloa polystachya H.B.K.*, *Phaseolus vulgaris L.*, *Paspalum virgatum L.*, *Sorghum vulgare L.*, *Chamaecrista nictitans (L.) Moench*, *Phaseolus vulgaris L.*, *Phaseolus coccineus L.*, *Brachiaria brizantha (Hochst. ex A. Rich) Stapf*, *Triticum aestivum L.*, *Hordeum vulgare L.*, entre otras (74). La fitorremediación comprende procesos dirigidos a liberar el contaminante de la matriz del suelo (descontaminación), también como los encargados de secuestrarlos en dicha matriz (estabilización) (75).

#### 2.2.5. Enmiendas orgánicas

Las enmiendas orgánicas son sustancias procedentes de materiales carbonados de origen animal o vegetal, tratadas por medio de algún proceso de estabilización que se aplican a los suelos con la finalidad de mejorar las propiedades físicas, químicas y biológicas. Sus efectos beneficiosos más relevantes de las enmiendas orgánicas, aplicadas al suelo, son atribuidos a las sustancias húmicas y a sus dos fracciones principales que son los ácidos fúlvicos y los ácidos húmicos, estas fracciones de suelo, experimentan cambios a efectos de la aplicación de enmiendas orgánicas, ya sea en el contenido de carbono o en sus características estructurales (76). Asimismo, la incorporación de estas sustancias mejora las características físicas del suelo como la densidad y la formación de agregados con lo que hay una mayor circulación de oxígeno en el suelo (52). Siendo una alternativa de desarrollo sostenible, las enmiendas orgánicas en forma de vermicompost y compost y los productos derivados de los mismos han logrado gran apogeo por su capacidad de restaurar al suelo. El vermicompost y el compost muestran potencial como acondicionador del suelo ya que mejora directamente las características físicas químicas del suelo como densidad aparente, capacidad de intercambio catiónico (CIC) y materia orgánica (77).

- Vermicompost:

El predominio de las lombrices es reconocido desde el Antiguo Egipto, los faraones la consideraban como un “animal sagrado”, Aristóteles las domino como “los intestinos de la tierra”, los romanos las apreciaban y en el siglo XIX, Charles Darwin publicó su libro “la formación de la tierra vegetal por la acción de las lombrices” en 1881, donde explica la verdadera función de estos invertebrados, siendo el inicio de nuevas investigaciones que han convertido al vermicompost en un producto importante para mejorar la productividad del suelo (78).

El Vermicompost es el resultado de una serie de procesos de biooxidación, degradación y estabilización que sufre la materia orgánica por la acción de lombrices de tierra (intestino) en condiciones aerobias y mesófilas, produciéndose uno de los abonos orgánicos de mejor calidad debido a su efecto en las propiedades biológicas del suelo (79). En el proceso de elaboración del vermicompost se deben tener en cuenta factores que son determinantes como: humedad, aireación, densidad poblacional, temperatura y características de la materia orgánica y enemigos de las lombrices. Asimismo, al final del proceso el humus de lombriz debe cumplir ciertas condiciones físicas (tabla 03), como fitorreguladores de crecimiento, contenido de materia orgánica humificada y contenido variado de nutrientes, logrando ser almacenados sin posteriores tratamientos (78).

Tabla 03. *Condiciones físicas del vermicompost.*

INDICADOR	VALOR	VALOR
Materia orgánica (%)	40	30
Humedad (%)	30 - 40	40
Relación Carbono/Nitrógeno	< 20	< 20
Tamaño de partículas	90 % pasan malla 25 mm	90 % pasan malla 25 mm

Fuente: Saavedra (78).

Generalmente la sustancia tiene un color oscuro, pero puede variar su coloración de acuerdo al origen del material que sirvió de alimento como estiércoles maduros de ganado ovino, vacuno, equino, porcino, conejo, etc. Por lo tanto, el mejor estiércol para la reproducción de la lombriz roja es de ganado vacuno y equino, pero no se debe de utilizar el estiércol de ave por lo que es muy ácido y dificultaría su ingesta por las lombrices. Es así que, debido a su color oscuro, el Vermicompost, interviene en la absorción de calor por el suelo y neutraliza los contaminantes, por lo cual favorece al reducir problemas de contaminación (28).

- Composición del vermicompost:

El vermicompost o humus de lombriz, está constituido principalmente de carbono, nitrógeno, fósforo y potasio, al igual de una gran cantidad de microorganismos y es soluble e inodoro en agua siendo directamente perceptible por la planta. Asimismo, el vermicompost contiene grandes cantidades de hormonas y auxinas vegetales que intervienen en el crecimiento de las plantas. Por sus propiedades químicas, así como la presencia de enzimas y su alta carga bacteriana, logran de este un producto valioso para participar directamente en la regeneración de suelos (80).

Tabla 04. Composición química y biológica del vermicompost de *Eisenia foetida*.

Componente	Contenido
Nitrógeno total	1.95 - 2.2 %
Fósforo	0.23 - 1.8 %
Potasio	1.07 - 1.5 %
Calcio	2.70 - 4.8 %
Magnesio	0.3 - 0.81 %
Hierro disponible	75 mg/l

Cobre	89 mg/kg
Zinc	125 mg/kg
Manganeso	455 mg/kg
Boro	57.8 mg/kg
Carbono orgánico	22.53 %
Ácidos húmicos	2.57 g Eq7 100 g
Hongos	1 500 c/g
Levaduras	10 c/g
Actinomicetos total	170 000 000 c/g
Act. Quitinasa	100 c/g
Bacterias aeróbicas	460 000 000 c/g
Bacterias anaeróbicas	450 000 c/g
Relación Aer/Anaer	1:1 000

Fuente: Cai *et. al.* (80).

o Características del vermicompost:

El vermicompost contiene una alta carga microbiana, que beneficia a las plantas siendo un abono orgánico de alta calidad, asimismo mejora la composición y estructura del suelo. Logrando una tierra menos pesada y menos sensible a la sequía, pero si más aireada. Por otro lado, el pH del vermicompost es siempre neutro y compone un neutralizador de los suelos, ya que los invertebrados segregan una sustancia denominada carbonato de calcio que neutraliza los ácidos de sus alimentos. Debido al pH neutro de dicho material, se crea un medio perjudicial para la proliferación de ciertos parásitos (81).

La calidad del vermicompost está en función del valor nutritivo de los desechos que consume la lombriz, también depende de su granulometría por lo que, el más fino se aplica a las plantas con necesidades urgentes, mientras que el de granulometría media se utiliza en horticultura y floricultura y el grano más grueso se utiliza en frutales (82).



- Características químicas:

Incrementa la capacidad inmunológica y da firmeza contra las plagas y enfermedades de los cultivos, por lo que cohibe el crecimiento de bacterias y hongos que afectan a las plantas. Además, gracias a su capacidad de absorción inactiva los residuos plaguicidas. Mejora la capacidad de intercambio catiónico. Regula el incremento y la actividad de los nitratos del suelo. Aumenta la disponibilidad de elementos como fósforo, azufre y nitrógeno. El vermicompost favorece la acción de los abonos minerales, facilitando la absorción de los elementos fertilizantes a través de la membrana celular de las raicillas. Es decir, en presencia del vermicompost la planta logra absorber gran cantidad de elementos fertilizantes que en su ausencia (83).

- Características físicas:

Presenta rizógenos, humatos y fitohormonas que propician y aceleran la germinación de las semillas, acorta los tiempos de producción, elimina el impacto del trasplante y estimula el crecimiento de la planta. Le produce un color oscuro al suelo, que ayuda la absorción de los rayos solares y por lo cual, un incremento de la temperatura. Es el responsable de la granulometría del suelo, dando una mayor porosidad, favoreciendo la aireación y el drenaje. Presenta ácidos fúlvicos y húmicos que por su estructura coloidal granular mantiene al suelo húmedo reduciendo la evapotranspiración. El vermicompost se considera un agente preventivo a la erosión (84).

- Características biológicas:

Para una multitud de microorganismos sirve de soporte, logrando hacer del suelo un medio vivo. Estos

microorganismos, que viven a costa de él y colaboran a su transformación, son tanto más numerosos y activos cuanto mayor existan en el suelo. En cuanto a las plantas se manifiesta favoreciendo su nutrición mineral, mediante su descomposición gradual y lenta, por la intervención de los microorganismos del suelo se puede suministrar a las plantas en elementos nutritivos (85).

### 2.3. Definición de términos básicos

- Ambiente: comprende todos los seres vivos (bióticos) y no vivos (abióticos) y fenómenos físicos, químicos y biológicos que subordinan la vida, el crecimiento y la actividad de los organismos vivos (86).
- Absorción: es el proceso donde una sustancia altamente tóxica atraviesa las membranas de las células de un organismo y luego es transportada hacia otros órganos (87).
- Biodegradación: es un proceso natural llevado a cabo por bacterias, hongos u otros tipos de microorganismos que alteran y convierten compuestos orgánicos en otras sustancias (88).
- Biodegradable: es la propiedad de toda materia de tipo orgánico de poder ser metabolizada por medios biológicos (89).
- Biomasa: es la cantidad total de materia biótica, usualmente expresado por unidad de extensión (superficie o volumen) (90).
- Biogeoquímico: es el ciclo que se refiere al movimiento de cantidades masivas de carbono, hidrógeno, oxígeno, nitrógeno, calcio, sulfuro, sodio y otros elementos entre los componentes bióticos y abióticos del ambiente mediante una serie de procesos de producción y descomposición (91).
- Contaminación: es la alteración de un hábitat por incorporación de sustancias extrañas capaces de hacerlo menos favorable para los seres vivos que lo pueblan (89).
- Contaminante: es cualquier elemento, sustancia, energía u organismo que, en cantidad suficiente, en el lugar inadecuado, y en el momento inoportuno, es capaz de provocar, en forma directa o indirecta, efectos no benéficos al hombre o a sus recursos. Mayormente, muchos contaminantes son introducidos al

ambiente como aguas residuales, residuos, descargas accidentales o son subproductos o residuos de la producción de algo útil. Asimismo, son introducidos al ambiente como compuestos usados para proteger plantas y animales (89).

- Conductividad eléctrica: es la capacidad de una sustancia para conducir o transmitir corriente eléctrica, en suelos o aguas, se mide en dS/m (92).
- Desarrollo Sostenible: se refiere a satisfacer las necesidades de la generación presente sin comprometer la capacidad de las generaciones futuras para satisfacer sus propias necesidades (93).
- Gramíneas: son las plantas monocotiledónea, con tallos cilíndricos, con nudos llenos, hojas alternas y largas, con flores en espiga y granos secos (94).
- Hidrofóbica: son las sustancias repelidas por el agua que no pueden tener contacto o mezclarse con ella (89).
- Mesófilas: son las bacterias que descomponen la materia orgánica a temperaturas que oscilan entre 30 y 400°C (92).
- Rizósfera: es la parte del suelo inmediata a las raíces donde tiene lugar una interacción dinámica con los microorganismos. Las características químicas y biológicas de la rizósfera se manifiestan en una porción de apenas de 1 mm de espesor a partir de las raíces (95).
- Toxicidad: es la propiedad de una sustancia o mezcla de sustancias de provocar efectos adversos en la salud o en los ecosistemas (89).
- Xenobióticos: son los compuestos químicos elaborados por el hombre no producidos por la naturaleza y no considerados de manera normal como un componente de un sistema biológico (89).

## **CAPÍTULO III**

### **METODOLOGÍA**

#### 3.1. Método, tipo y nivel de la investigación

##### 3.1.1. Métodos de la investigación

###### a) Método general o teórico de la investigación:

En el desarrollo de esta presente investigación se planteó el método hipotético - deductivo, método en el cual la teoría precede a los hechos, considerando que los constructos teóricos existentes determinan lo que debemos observar. En este método se establece hipótesis como idea para dar respuesta a un fenómeno, seguido la deducción de consecuencias o proposiciones más elementales que la propia hipótesis y finalizando con la ratificación de los enunciados deducidos comparándolos con la experiencia (96).

###### b) Método específico de la investigación:

El método específico de investigación fue de análisis. Las muestras de suelo obtenidas, del taller mecánico "Unión", fueron enviadas al laboratorio acreditado J. Ramón del Perú S.A.C. de la ciudad de Lima para el análisis de caracterización, al inicio del experimento, que comprendió: capacidad de intercambio catiónico, carbonatos, densidad aparente, fósforo disponible, materia orgánica, nitrógeno

total, pH, potasio disponible. Al final del experimento se analizó cada unidad experimental, que hicieron un total de nueve muestras (97).

### 3.1.2. Tipo de la investigación

El tipo de investigación es aplicada, ya que es de naturaleza eminentemente práctica para aplicar las bases teóricas del comportamiento del vermicompost en un suelo contaminado con hidrocarburos, mediante la aplicación de diferentes dosis de vermicompost y evaluar las propiedades fisicoquímicas del suelo, así como la biomasa de *Hordeum Vulgare L.* Es por tal razón, la investigación aplicada busca conocer para hacer, actuar, construir y modificar una realidad problemática (98).

### 3.1.3. Nivel de la investigación

El nivel de la investigación es explicativo, pues tiene la finalidad de descubrir la razón por la que ocurre un fenómeno determinado y en qué condiciones se manifiesta o por qué se relacionan dos o más variables. por tal razón, se explica de qué manera la variable independiente (el vermicompost) influye en las variables dependientes (biomasa de *Hordeum vulgare L.* y las propiedades fisicoquímicas del suelo) (99).

## 3.2. Diseño de la investigación

El diseño es experimental donde los tratamientos fueron dispuestos en un diseño completamente aleatorio, es un diseño útil cuando las unidades experimentales son homogéneas y la administración del experimento es uniforme en todas ellas. Los tratamientos se asignan a las unidades experimentales de forma completamente aleatoria, sin ninguna restricción. Es flexible en cuanto a que el número de tratamientos y de repeticiones sólo está limitado por el número de unidades experimentales disponibles. El número de repeticiones puede variar de un tratamiento a otro, aunque lo ideal sería tener un número igual por tratamiento

(100). Este tipo de experimento es muy utilizado bajo condiciones de laboratorio, donde se puede garantizar que las unidades experimentales sean homogéneas, aunque también puede utilizarse bajo condiciones de invernadero, siempre y cuando se cumpla la condición de homogeneidad (101).

Se aplicó el diseño experimental Completamente Aleatorio (DCA) con tres (03) tratamientos, y tres (03) repeticiones, haciendo un total de nueve (09) unidades experimentales.

Tabla 05. *Tratamientos de estudio.*

N°	Descripción	Suelo (g/maceta)	Vermicompost (g/maceta)
1	T1 = Suelo contaminado (HTP) sin vermicompost	2 000 (100 %)	0 (0 %)
2	T2 = Suelo contaminado (HTP) con 50 % de vermicompost (masa/masa)	1 000 (50 %)	1 000 (50 %)
3	T3 = Suelo contaminado (HTP) con 70 % de vermicompost (masa/masa)	600 (30 %)	1 400 (70 %)

Fuente: elaboración propia.

El modelo aditivo lineal para un diseño completamente al azar, viene dado por la siguiente ecuación (102):

$$Y_{ij} = \mu + \tau_i + \varepsilon_{ij}$$

Donde:

- $Y_{ij}$  = cualquier observación del experimento.
- $\mu$  = media poblacional.
- $\tau_i$  = efecto fijo del i-ésimo cultivar.
- $\varepsilon_{ij}$  = error experimental.

### 3.3. Procedimiento experimental

- Se realizó el muestreo del suelo contaminado; se utilizó el muestreo de identificación haciendo uso del método sistemático, obteniendo 20 muestras de suelo de 1 kg, haciendo un total de 20 kg; siguiendo la Guía para Muestreo de Suelos (en el marco del Decreto Supremo N° 002-2013-MINAM, Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para suelo).
- Preparación y envió de muestra de suelo (1 kg) para el análisis de las propiedades fisicoquímicas al laboratorio acreditado J. Ramón del Perú S.A.C. y un kg de muestra de suelo para el análisis de hidrocarburos totales de petróleo (HTP) al laboratorio químico de la Universidad Nacional de Ingeniería, con los 18 kg restantes se hizo el experimento.
- Se preparó el suelo, haciendo el secado al aire libre, para posteriormente hacer la trituración con combo de madera, eliminando las piedras y gravas; se tamizó el suelo con tamiz N° 10 ASTM de 2 mm de malla.
- Se prepararon los tratamientos, colocando en cada maceta suelo y enmienda orgánica, haciendo un total de 2 kg; según cada tratamiento. La maceta tuvo un peso promedio de 100 g. La cantidad neta total de suelo utilizada en el presente experimento fue de 10.8 kg. Los datos se detallan en la tabla 05.
- Entre el 28 de agosto y el 10 de setiembre se agregó agua hasta el nivel de capacidad y campo removiéndolo periódicamente para favorecer la aireación.
- La capacidad de campo (CC) del suelo se determinó mediante el método de la probeta, utilizando 80 ml de suelo (Tierra Fina Seca al Aire: TFSA), se colocó en una probeta de 100 ml, agregando posteriormente 10 ml de agua destilada, y después de dos horas, de haber cesado el drenaje gravitacional, se toma una muestra de la parte superior de la probeta, que está con humedad a capacidad de campo y se determinó la humedad por el método gravimétrico. El resultado fue 23 % de CC.
- El 11 de setiembre de 2019 se sembró *Hordeum vulgare* L. INIA 416-La Milagrosa, colocando en cada maceta 18 semillas, manteniendo la humedad al 80% de capacidad de campo, regando de 2 a tres veces por semana, según el nivel de humedad del suelo, utilizando el método de las pesadas.
- El porcentaje de germinación vario entre 83 y 60 %; uniformizando el número de plantas después de la aparición de la segunda hoja verdadera; se dejó 10 plantas por cada maceta.

- El método de las pesadas, para el riego, consistió en el siguiente: la maceta con agua al 80 % de CC pesó 2 468 [(2 000 g de sustrato) + (18.4 % CC = 368 g) + (100 maceta)]; y antes de cada riego se pesó la maceta completando con agua el peso faltante; para de esa manera mantener la humedad del sustrato con 80 % de capacidad de campo.
- La selección de *Hordeum vulgare* L. para este experimento, tuvo los siguientes criterios: (i) ser una especie local, representativa de nuestra zona; (ii) tener una rápida tasa de crecimiento, y (iii) ser tolerante a suelos contaminados, como lo son los suelos del valle del Mantaro; estos criterios se basaron en la propuesta de Núñez *et al.* (103).
- Después de 77 días de crecimiento de *Hordeum vulgare* L., el 28 de noviembre, las macetas fueron llevadas al laboratorio de Calidad Ambiental de la Universidad Continental, para cortar la biomasa aérea y radicular de cada unidad experimental, siendo lavadas con agua destilada para eliminar el polvo depositado, se dejó orear y se colocó en bolsas de papel Kraft y secar en la estufa a 64°C por 24 h, para obtener masa seca; esto se realizó el 29 de noviembre.
- El período de crecimiento (77 días) fue determinado al observarse que las plantas en cada maceta empezaron a reducir su crecimiento, observándose amarillamiento en los ápices de las hojas, debido al poco volumen de suelo que tenían en exploración las raíces en ese momento.
- Las muestras de suelo se colocaron en bolsas de polietileno con cierre hermético, de cada unidad experimental y fueron enviadas al laboratorio acreditado J. Ramón del Perú S.A.C. para su análisis.



Figura 04. Representación de la unidad experimental.

Fuente: elaboración propia.



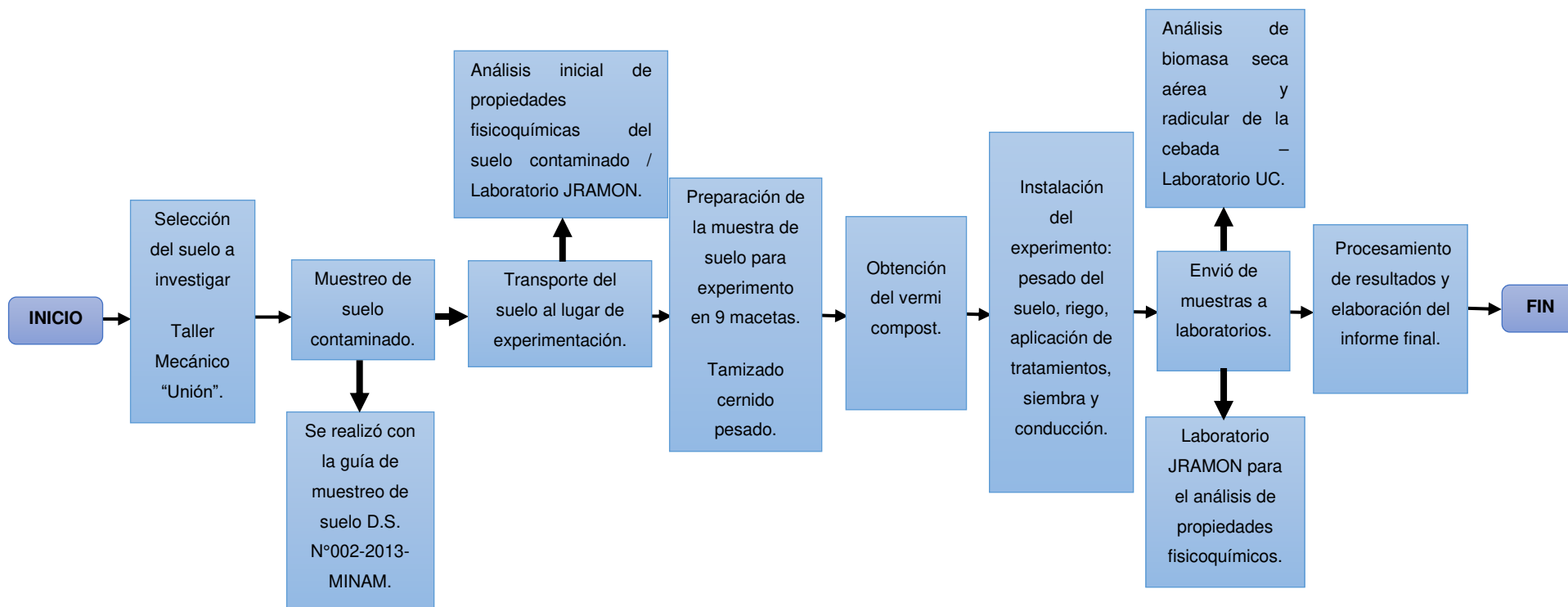


Figura 05. Diagrama de flujo del proceso experimental.

Fuente: elaboración propia.

### 3.4. Población y muestra

#### 3.4.1. Población

La población está constituida por el suelo contaminado del taller mecánico “Unión”, que tiene más de 25 años de funcionamiento, asimismo, el área de trabajo fue un suelo sin pavimento lo que facilito el estudio en el distrito de Chilca.

#### 3.4.2. Muestra

La muestra está constituida por la masa de un suelo representativo del taller mecánico “Unión”, contaminado con derrames derivados del petróleo, en una cantidad aproximada de 20 kg, obtenidas a partir de 20 muestras simples para construir una muestra compuesta, en un área aproximada de 90 m<sup>2</sup>. El número de muestras se basó en la norma peruana de muestreo de suelos contaminados.

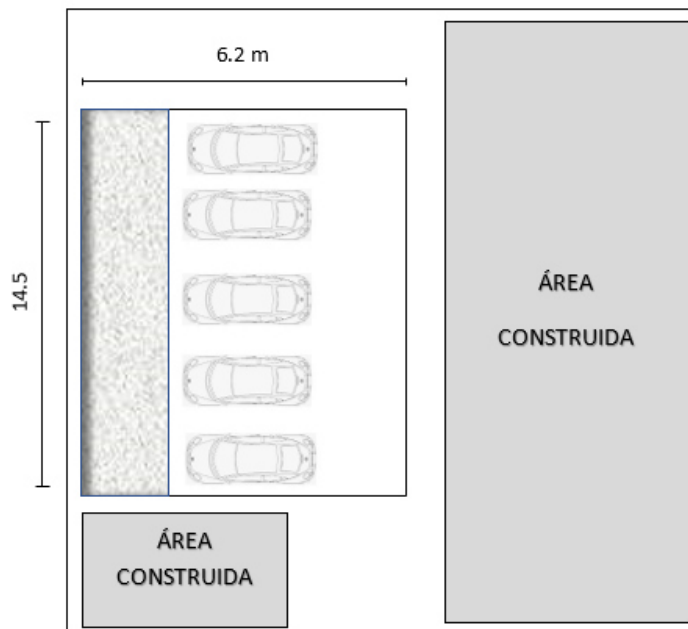


Figura 06. Croquis del área delimitada de 90 m<sup>2</sup> para la obtención de muestras de suelo.

Fuente: elaboración propia.

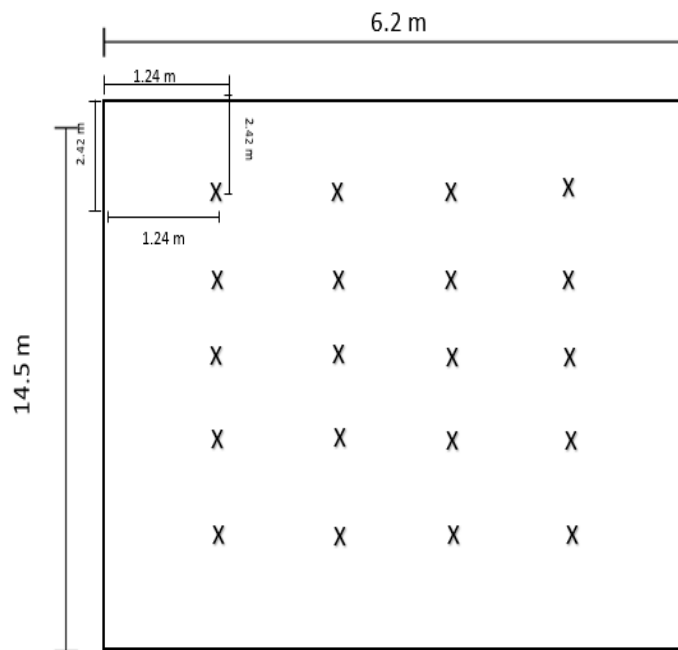


Figura 07. Modelo de muestreo sistemático.

Fuente: Guía de muestreo de suelos del Ministerio del Ambiente.

### 3.5. Técnicas e instrumentos de recolección de datos

#### 3.5.1. Técnicas de recolección de datos

Las muestras de suelo, después del periodo de experimentación, donde creció *Hordeum vulgare L.*, fueron muestreadas en cada unidad experimental y analizadas en sus propiedades fisicoquímicas, en el laboratorio acreditado J. Ramón del Perú S.A.C. de la ciudad de Lima.

Una vez finalizado el experimento, la planta de *Hordeum vulgare L.* fue cortada en su parte aérea y colocada en una bolsa de papel para ser secada en una estufa a 64°C, para obtener peso seco aéreo. De la misma manera se procedió para la parte radicular y obtener peso seco radicular.

#### 3.5.2. Instrumentos utilizados en la recolección de datos

Las muestras de suelo se enviaron al laboratorio acreditado J. Ramón del Perú S.A.C. de la ciudad de Lima, en una cantidad promedio de 1 kg por muestra donde se analizaron utilizando metodologías referenciadas.

Tabla 06. *Métodos de análisis de suelos.*

Parámetros	Normas
Capacidad de Intercambio Catiónico	NOM-021-RECNAT-2000 AS-12
Carbonato de calcio	NOM-021-RECNAT-2000
Clase textural	NOM-021-RECNAT-2000 AS-09
Densidad	NOM-021-RECNAT-2000 AS-05
Fósforo disponible	NOM-021-RECNAT-2000 AS-10
Materia orgánica	NOM-021-RECNAT-2000 AS-07
Nitrógeno total (suelos)	NOM-021-RECNAT-2000
pH - suelos	EPA 9045-D, Rev4, 2004
Porosidad	NOM-021-RECNAT-2000 AS-05
Potasio disponible	NOM-021-RECNAT-2000 AS-19
Salinidad	NOM-021-RECNAT-2000

Fuente: J. Ramón del Perú S.A.C.

### 3.6. Técnicas de análisis y procesamiento de datos

Al finalizar el experimento, los datos de los análisis de suelos y de biomasa aérea y radicular, fueron procesados para verificar su distribución normal mediante la prueba de Shapiro-Wilk; al comprobar la distribución normal se procedió al análisis de varianza y la prueba de comparación múltiple de Duncan, mientras que para los datos que no tenían distribución normal, se procedió a ejecutar la prueba no paramétrica de Kruskal-Wallis.

## **CAPÍTULO IV**

### **RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

#### 4.1. Resultados del tratamiento y análisis de la información

En el presente capítulo se da a conocer los resultados del análisis del suelo del taller mecánico “Unión” del distrito de Chilca, tanto en sus propiedades físico-químicas, así como del contenido de hidrocarburos totales de petróleo (HTP) antes del experimento. Asimismo, se realizó el análisis del vermicompost.

De igual manera, se presentan los resultados de la evaluación de las propiedades físicas y químicas, necesarias para evaluar el efecto de la aplicación de vermicompost en el suelo contaminado con hidrocarburos del taller mecánico, que corresponde al primer objetivo; así como la evaluación de la biomasa de *Hordeum vulgare L.* (materia seca aérea y materia seca radicular), que corresponde al segundo objetivo del trabajo de investigación.

Los resultados del análisis de suelos por cada tratamiento y repetición, fueron procesados primero por la prueba de Shapiro-Wilk, para determinar la distribución normal de los datos; si la prueba no presenta significancia estadística, se aplicó el análisis de varianza (ANOVA) y la prueba de rango múltiple (Duncan); en cambio, si la prueba salía significativa se aplicó la prueba no paramétrica de Kruskal-Wallis, para establecer la significancia estadística entre tratamientos, a un nivel de significancia del 0.05, es decir, 95 % de nivel de confianza ( $\alpha = 0.05$ ).

#### 4.1.1. Características fisicoquímicas del suelo del taller mecánico “Unión”

Las características físicas y químicas se obtuvieron del análisis realizado por el laboratorio J. Ramón, Lurín, Perú, se presentan en la tabla 07.

Tabla 07. *Resultados del análisis fisicoquímico del suelo del taller mecánico “Unión” - Chilca, 2019.*

Parámetros	Resultados
Textura:	
Arena	86.56 %
Limo	8.00 %
Arcilla	5.44 %
Clase textural	Arena Franca
Carbonatos	<0.10 %
Densidad aparente	1.20 Mg/m <sup>3</sup>
pH	7.67
Porosidad	1 %
Materia orgánica	12.48 %
Nitrógeno total	0.2424 g/kg
Fósforo disponible	21,74 mg/kg
Potasio disponible	75.21 mg/kg
Cationes cambiabiles:	
Calcio	21.01 cmol/kg
Magnesio	4.61 cmol/kg
Sodio	0.55 cmol/kg
Potasio	0.62 cmol/kg
Capacidad de Intercambio Catiónico Efectiva	26.79 cmol/kg

Fuente: elaboración propia en función de lo reportado por el laboratorio J. Ramón.

El suelo del taller mecánico “Unión” antes del experimento, presenta una textura areno franca, calificada como gruesa, debido a la predominancia de arena. Esta propiedad le da al suelo una alta permeabilidad y drenaje, y baja retención de agua. Los carbonatos fueron menores a 0.10 %, debido

posiblemente a la textura gruesa, que no se asocia con compuestos presentes en el suelo, como si lo hace la arcilla. La densidad aparente fue de 1.20 Mg/m<sup>3</sup>, lo cual se considera baja si tomamos en cuenta la textura del suelo. El pH es calificado como neutro (pH = 6,6-7,3; ver anexo 02), que posibilita buena solubilidad y disponibilidad de los principales elementos químicos presentes en el suelo.

El contenido de la materia orgánica presentó un valor alto (MO > 4 %), que probablemente sea de origen petrogénico y no biogénico (104), siendo un riesgo para la salud humana; el nitrógeno es bajo (N total < 2 g/kg) debido a la lenta liberación a partir de la materia orgánica; el fósforo disponible es alto (P > 14 mg/kg) debido a la lenta descomposición de la materia orgánica, principal fuente de fósforo del suelo; el potasio disponible es bajo (K < 100 mg/kg); entre los cationes cambiabiles predomina el calcio, representando el 78.42 % del complejo de cambio, el cual es un valor relativamente de distribución de cationes; el magnesio es el catión que ocupa el segundo lugar en el complejo de cambio, representando el 17.21 % del complejo de cambio, la cual es una proporción normal de distribución de cationes; se observa que la relación Ca/Mg en el complejo de cambio es 4.56; que se encuentra debajo del rango normal (Ca/Mg = 5-9).

Se consideró el dato de Capacidad de Intercambio Catiónico Efectiva (CICE), que representa la suma de cationes cambiabiles, debido a que el dato de análisis se reportó muy bajo. La evaluación de la fertilidad del suelo, en base al contenido de nitrógeno total, fósforo disponible y potasio disponible el suelo se califica como de fertilidad baja. Los datos han sido evaluados según las normas de evaluación de suelos del Perú (105). Los datos se presentan en la tabla 07.

Tabla 08. *Resultados del análisis fisicoquímico del suelo del taller mecánico "Unión" - Chilca, 2019 (2).*

Análisis	Resultado
Hidrocarburos totales de petróleo (HTP)	43386.7 ppm (µg de HTP/g de muestra) <> 4.34%

Fuente: Laboratorio Químico de la Universidad Nacional de Ingeniería.

El contenido de Hidrocarburos Totales de Petróleo supera el ECA en más de cuatro (04) veces, que establece un límite de 10 000 mg/kg de suelo (106). Esto representa un suelo contaminado con Hidrocarburos. Los datos se presentan en la tabla 08.

#### 4.1.2. Resultados del análisis del vermicompost utilizado en el experimento

Se utilizó, el vermicompost o lombricompost que es un producto, resultado de un proceso que involucra la adición de lombrices de tierra (*Eisenia foetida*) para la conversión de los residuos orgánicos.

Tabla 09. *Resultados del análisis de caracterización del vermicompost.*

Parámetros	Resultados
pH	7.76
Humedad	48.81 %
Conductividad eléctrica	19.40 dS/m
Materia orgánica	23.40 %
Relación C/N	8.70
Nitrógeno	1.56 %
Fosforo	2.77 %
Potasio	0.29 %
Calcio	7.23 %
Magnesio	1.37 %
Sodio	0.77 %

Fuente: elaboración propia (Análisis procesado por el laboratorio de Análisis de Suelos, Plantas, Aguas y Fertilizantes de la Universidad Nacional Agraria La Molina).

El vermicompost utilizado en el experimento como enmienda presentó un pH ligeramente alcalino (pH = 7.1-7.8) con un contenido de humedad de 48.81 % el cual se observa como relativamente alto (humedad = 30-40 %); presenta también una alta conductividad eléctrica (CE > 4 dS/m) que incrementará las sales del suelo al cual será aplicado. El contenido de materia orgánica es mayor de 20 %, lo cual se considera adecuado. La relación C/N de 8.70, lo cual es bajo (C/N = 13.6/1). El contenido de



nitrógeno es bajo (N = 1.56 %), el contenido de fósforo es alto (P = 2.77 %) y el contenido de potasio es bajo (K = 0.29 %). Los datos han sido comparados con tablas referenciales, que se presenta en anexos del autor Shahi (107). Los datos se presentan en la tabla 09.

#### 4.1.3. Propiedades físicas y químicas del suelo al final del experimento

- Densidad aparente:

Tabla 10. *Resultado de análisis del suelo para la densidad aparente.*

Tratamiento	Repetición	Densidad (Mg/m <sup>3</sup> )
T1: (Suelo + 0 % de vermicompost)	Muestra 1	0.22
	Muestra 2	0.25
	Muestra 3	0.32
T2: (Suelo + 50 % de vermicompost)	Muestra 4	0.30
	Muestra 5	0.19
	Muestra 6	0.35
T3: (Suelo + 70 % de vermicompost)	Muestra 7	0.16
	Muestra 8	0.19
	Muestra 9	0.16

Fuente: elaboración propia en función de lo reportado por el laboratorio J. Ramón.

Prueba de normalidad de Shapiro-Wilk:

\*H<sub>0</sub>: La distribución de los datos es normal.

\*H<sub>a</sub>: La distribución de los datos no es normal.

Nivel de significancia  $\alpha = 0.05$

Tabla 11. *Prueba de normalidad de Shapiro-Wilk para la densidad aparente (Mg/m<sup>3</sup>).*

Variable	n	Media	D.E.	W	p
Densidad Aparente en suelo (Mg/m <sup>3</sup> )	9	0.234	0.071	0.874	0.2098

Fuente: elaboración propia.

Decisión: según la tabla 11 se acepta la  $H_0$  porque el valor de  $p$  es mayor que el nivel de significancia ( $\alpha = 0.05$ ), es decir, los datos analizados presentan una distribución normal. Por aquella razón para esta variable se realizó el análisis de varianza (ANOVA).

Análisis de varianza (ANOVA):

\* $H_0$ :  $\mu_1 = \mu_2 = \mu_3$

\* $H_a$ :  $\mu_1 \neq \mu_2 \neq \mu_3$  (al menos una  $\mu_i$  es diferente a los demás).

Nivel de significancia  $\alpha = 0.05$

Tabla 12. *Análisis de varianza de la densidad aparente ( $Mg/m^3$ ).*

F.V.	gl	SC	CM	Fc	p-valor
Tratamientos	2	0.021	0.011	3.284	0.1088
Error	6	0.019	0.003		
Total	8	0.040			

Fuente: elaboración propia.

Decisión: la prueba de análisis de varianza tiene un  $p$ -valor mayor de 0.05, lo cual indica que los tratamientos son iguales estadísticamente.

Tabla 13. *Prueba de comparación múltiple de Duncan para la densidad aparente considerando dosis de vermicompost.*

O.M.	Tratamiento (Dosis de vermicompost %)	Densidad aparente ( $Mg/m^3$ )	Significancia
1	70	0.170	a
2	0	0.263	a
3	50	0.280	a

Fuente: elaboración propia.

La densidad aparente del suelo contaminado con HTP, según los tratamientos aplicados de vermicompost, presentó un promedio de  $0.234 Mg/m^3$ , un valor bajo, propio de suelos de textura fina. El suelo que no se aplicó vermicompost tuvo un promedio de  $0.263 Mg/m^3$ , el

suelo con 50 % de vermicompost alcanzó un promedio de 0.28 Mg/m<sup>3</sup> y el suelo con 70 % de vermicompost tuvo un promedio de 0.17 Mg/m<sup>3</sup>, inferior al tratamiento con 50 % de vermicompost. Estos datos no presentan diferencias estadísticas significativas entre sí.

Los valores bajos de densidad aparente, pueden deberse a varios factores, como se reporta en diferentes fuentes (37), por ejemplo, la densidad aparente varía dependiendo del material parental que formó el suelo, el contenido de materia orgánica, la profundidad debajo de la superficie del suelo, y el manejo del suelo. En el presente experimento la baja densidad aparente se debería al contenido de materia orgánica agregado al suelo contaminado con hidrocarburos.

Entre los tratamientos, no hubo significancia estadística; es decir, las dosis de vermicompost no tuvieron efecto en la densidad aparente, debido posiblemente al corto periodo de experimentación que se tuvo. Los resultados se presentan en las tablas 10, 11, 12, 13 y el anexo 03.

- Capacidad de Intercambio Catiónico Efectiva (CICE):

Tabla 14. *Resultados de análisis del suelo para la Capacidad de Intercambio Catiónico Efectiva.*

Tratamiento	Repetición	CICE (cmol/kg)
T1: (Suelo + 0% de vermicompost)	Muestra 1	26.37
	Muestra 2	26.42
	Muestra 3	29.44
T2 : (Suelo + 50% de vermicompost)	Muestra 4	47.67
	Muestra 5	53.44
	Muestra 6	50.76
T3 : (Suelo + 70% de vermicompost)	Muestra 7	69.63
	Muestra 8	62.43
	Muestra 9	59.82

Fuente: elaboración propia en función de lo reportado por el laboratorio J. Ramón.

Prueba de normalidad de Shapiro-Wilk:

\*H<sub>0</sub>: La distribución de los datos es normal.

\*H<sub>a</sub>: La distribución de los datos no es normal.

Nivel de significancia  $\alpha = 0.05$

Tabla 15. *Prueba de normalidad de Shapiro-Wilk para la Capacidad de Intercambio Catiónico Efectiva (suma de Cationes cambiabiles) (cmol/kg).*

Variable	n	Media	D.E.	W	p
CICE del suelo (cmol/kg)	9	47.331	16.306	0.866	0.1736

Fuente: elaboración propia.

Decisión: según la tabla 15 se acepta la H<sub>0</sub> porque el valor de p es mayor que el nivel de significancia ( $\alpha = 0.05$ ), es decir, los datos analizados presentan una distribución normal, por lo cual para esta variable se realizó el análisis de varianza (ANOVA).

Análisis de varianza (ANOVA):

\*H<sub>0</sub>:  $\mu_1 = \mu_2 = \mu_3$

\*H<sub>a</sub>:  $\mu_1 \neq \mu_2 \neq \mu_3$  (al menos una  $\mu_i$  es diferente a los demás).

Nivel de significancia  $\alpha = 0.05$

Tabla 16. *Análisis de varianza de la Capacidad de Intercambio Catiónica Efectiva (CICE) (cmol.kg).*

F.V.	gl	SC	CM	Fc	p-valor
Tratamientos	2	2 052.628	1 026.314	82.671	<0.0001
Error	6	74.486	12.414		
Total	8	2 127.114			

Fuente: elaboración propia.

Decisión: la prueba de análisis de varianza tiene un p-valor menor de 0.05, lo cual indica que los tratamientos son diferentes estadísticamente.

Tabla 17. Prueba de comparación múltiple de Duncan para la Capacidad de Intercambio Catiónica Efectiva (CICE) considerando dosis de vermicompost.

O.M.	Tratamiento (Dosis de Vermicompost %)	CICE (cmol/kg)	Significancia
1	70	63.960	a
2	50	50.623	b
3	0	27.410	c

Fuente: elaboración propia.

La Capacidad de Intercambio Catiónica Efectiva (CICE), calculada en base a la suma de cationes cambiabiles que se refiere a la suma de bases cambiabiles determinadas por acetato de amonio más aluminio extractable con KCl 1N (41), presentó un promedio de 47.331 cmol/kg, considerada alta (CICE > 10 cmol/kg, ver anexo 02) y mucho mayor que el análisis inicial del suelo, que solo tuvo 26.79 cmol/kg. La variación entre el tratamiento testigo alcanzó un promedio de 27.41 cmol/kg en los tratamientos con 50 % y 70 % de vermicompost, que fueron superiores en CICE, se debe al incremento de materia orgánica (vermicompost) (35), que es un componente del suelo y que incrementa la Capacidad de Intercambio Catiónico del suelo (38). Estos datos se presentan en las tablas 14, 15, 16, 17 y el anexo 03.

- Carbonato de calcio (CaCO<sub>3</sub>):

Tabla 18. Resultados de análisis del suelo para el carbonato de calcio.

Tratamiento	Repetición	Carbonatos (%)
T1: (Suelo + 0% de vermicompost)	Muestra 1	2.92
	Muestra 2	1.34
	Muestra 3	1.83
T2: (Suelo + 50% de vermicompost)	Muestra 4	2.28
	Muestra 5	1.93
	Muestra 6	2.28

	Muestra 7	1.83
T3: (Suelo + 70% de vermicompost)	Muestra 8	2.38
	Muestra 9	0.09

Fuente: elaboración propia en función de lo reportado por el laboratorio J. Ramón.

Prueba de normalidad de Shapiro-Wilk:

\*H<sub>0</sub>: La distribución de los datos es normal.

\*H<sub>a</sub>: La distribución de los datos no es normal.

Nivel de significancia  $\alpha = 0.05$

Tabla 19. *Prueba de normalidad de Shapiro-Wilk para el contenido de carbonato de calcio (%).*

Variable	n	Media	D.E.	W	p
CaCO <sub>3</sub> del suelo (%)	9	1.876	0.803	0.903	0.3850

Fuente: elaboración propia.

Decisión: según la tabla 19 se acepta la H<sub>0</sub> porque el valor de p es mayor que el nivel de significancia ( $\alpha = 0.05$ ), es decir, los datos analizados presentan una distribución normal, por lo cual para esta variable se realizó el análisis de varianza (ANOVA).

Análisis de varianza (ANOVA):

\*H<sub>0</sub>:  $\mu_1 = \mu_2 = \mu_3$

\*H<sub>a</sub>:  $\mu_1 \neq \mu_2 \neq \mu_3$  (al menos una  $\mu_i$  es diferente a los demás).

Nivel de significancia  $\alpha = 0.05$

Tabla 20. *Análisis de varianza del contenido de carbonato de calcio (%).*

F.V.	gl	SC	CM	Fc	p-valor
Tratamientos	2	0.907	0.453	0.640	0.5597
Error	6	4.248	0.708		
Total	8	5.155			

Fuente: elaboración propia.

Decisión: la prueba de análisis de varianza tiene un p-valor mayor de 0.05, lo cual indica que los tratamientos son iguales estadísticamente.

Tabla 21. *Prueba de comparación múltiple de Duncan para el contenido de carbonato de calcio (%) considerando dosis de vermicompost.*

O.M.	Tratamiento (Dosis de vermicompost %)	CaCO <sub>3</sub> (%)	Significancia
1	50	2.163	a
2	0	2.030	a
3	70	1.433	a

Fuente: elaboración propia.

El contenido de carbonato de calcio en los tratamientos de vermicompost aplicado tuvo un promedio de 1.876 %, superior al valor inicial del suelo (CaCO<sub>3</sub> < 10 %), lo cual es un dato contradictorio, pues un suelo que ha recibido materia orgánica, como el presente experimento, libera mayor CO<sub>2</sub> y puede solubilizar carbonatos, redistribuyéndolos en el suelo y disminuyendo su concentración (35). Las dosis de vermicompost de 50 y 70 %, en este experimento son altas pero el suelo no tenía carbonatos inicialmente, entonces sus valores encontrados se deben a una fuente externa de carbonatos, la cual no ha sido identificada. Los datos se presentan en las tablas 18, 19, 20, 21 y el anexo 03.

- pH:

Tabla 22. *Resultado de análisis del suelo para el pH.*

Tratamiento	Repetición	pH
T1: (Suelo + 0 % de vermicompost)	Muestra 1	7.61
	Muestra 2	7.59
	Muestra 3	7.55

T2: (Suelo + 50 % de vermicompost)	Muestra 4	7.5
	Muestra 5	7.71
	Muestra 6	7.51
T3: (Suelo + 70 % de vermicompost)	Muestra 7	7.58
	Muestra 8	7.65
	Muestra 9	7.57

Fuente: elaboración propia en función de lo reportado por el laboratorio J. Ramón.

Prueba de normalidad de Shapiro-Wilk:

\*H<sub>0</sub>: La distribución de los datos es normal.

\*H<sub>a</sub>: La distribución de los datos no es normal.

Nivel de significancia  $\alpha = 0.05$

Tabla 23. Prueba de normalidad de Shapiro-Wilk para el pH del suelo.

Variable	n	Media	D.E.	W	p
pH	9	7.586	0.066	0.951	0.7899

Fuente: elaboración propia.

Decisión: según la tabla 23 se acepta la H<sub>0</sub> porque el valor de p es mayor que el nivel de significancia ( $\alpha = 0.05$ ), es decir, los datos analizados presentan una distribución normal, por lo cual para esta variable se realizó el análisis de varianza (ANOVA).

Análisis de varianza (ANOVA):

\*H<sub>0</sub>:  $\mu_1 = \mu_2 = \mu_3$

\*H<sub>a</sub>:  $\mu_1 \neq \mu_2 \neq \mu_3$  (al menos una  $\mu_i$  es diferente a los demás).

Nivel de significancia  $\alpha = 0.05$

Tabla 24. Análisis de varianza del pH del suelo.

F.V.	gl	SC	CM	Fc	p-valor
Tratamientos	2	0.001	0.001	0.097	0.9091
Error	6	0.034	0.006		
Total	8	0.035			

Fuente: elaboración propia.



Decisión: la prueba de análisis de varianza tiene un p-valor mayor de 0.05, lo cual indica que los tratamientos son iguales estadísticamente.

Tabla 25. Prueba de comparación múltiple de Duncan para el pH del suelo.

O.M.	Tratamiento (Dosis de vermicompost %)	pH	Significancia
1	70	7.600	a
2	0	7.583	a
3	50	7.573	a

Fuente: elaboración propia.

El pH del suelo contaminado con Hidrocarburos Totales de Petróleo, al final del experimento, presentó un valor promedio ligeramente menor (pH = 7.59) respecto al pH inicial del suelo del experimento (pH = 7.67) que se atribuye al efecto del vermicompost en incrementar los iones hidrógeno en solución y bajar el pH. Esto se sustenta en la relación directa del pH del suelo, entre otras propiedades, al contenido de materia orgánica (45). En este experimento se aplicó altas dosis de vermicompost (materia orgánica), lo que disminuyó el pH del suelo. Los datos se presentan en las tablas 22, 23 y el anexo 03.

- Materia orgánica:

Tabla 26. Resultado de análisis del suelo para la materia orgánica.

Tratamiento	Repetición	Materia Orgánica (%)
T1: (Suelo + 0 % de vermicompost)	Muestra 1	23.2
	Muestra 2	39.12
	Muestra 3	29.6
T2: (Suelo + 50 % de vermicompost)	Muestra 4	24.08
	Muestra 5	45.2
	Muestra 6	38.16
T3: (Suelo + 70 % de vermicompost)	Muestra 7	20.32
	Muestra 8	25.28
	Muestra 9	49.28

Fuente: elaboración propia en función de lo reportado por el laboratorio J. Ramón.

Prueba de normalidad de Shapiro-Wilk:

\*H<sub>0</sub>: La distribución de los datos es normal.

\*H<sub>a</sub>: La distribución de los datos no es normal.

Nivel de significancia  $\alpha = 0.05$

Tabla 27. *Prueba de normalidad de Shapiro-Wilk para el contenido de materia orgánica del suelo.*

Variable	n	Media	D.E.	W	p
Materia Orgánica del suelo (%)	9	32.693	10.516	0.882	0.2509

Fuente: elaboración propia.

Decisión: según la tabla 27 se acepta la H<sub>0</sub> porque el valor de p es mayor que el nivel de significancia ( $\alpha = 0.05$ ), es decir, los datos analizados presentan una distribución normal, por lo cual para esta variable se realizó el análisis de varianza (ANOVA).

Análisis de varianza (ANOVA):

\*H<sub>0</sub>:  $\mu_1 = \mu_2 = \mu_3$

\*H<sub>a</sub>:  $\mu_1 \neq \mu_2 \neq \mu_3$  (al menos una  $\mu_i$  es diferente a los demás).

Nivel de significancia  $\alpha = 0.05$

Tabla 28. *Análisis de varianza del contenido de materia orgánica del suelo.*

F.V.	gl	SC	CM	Fc	p-valor
Tratamientos	2	45.265	22.633	0.162	0.8542
Error	6	839.394	139.899		
Total	8	884.659			

Fuente: elaboración propia.

Decisión: la prueba de análisis de varianza tiene un p-valor mayor de 0.05, lo cual indica que los tratamientos son iguales estadísticamente.

Tabla 29. Prueba de comparación múltiple de Duncan para el contenido de materia orgánica del suelo.

O.M.	Tratamiento (Dosis de vermicompost %)	MO (%)	Significancia
1	50	35.813	a
2	70	31.627	a
3	0	30.640	a

Fuente: elaboración propia.

El contenido promedio de materia orgánica (MO) del suelo contaminado con HTP tras el experimento fue en promedio 32.693 %, valor superior al contenido inicial de materia orgánica en el suelo de 12.48 %, esto se atribuye a la aplicación de vermicompost, que tuvo 23.40% de MO y que fue aplicado en dosis altas (50 y 70 %) al suelo; lo cual se sustenta en que el aporte externo (enmienda adicional) de componentes orgánicos, y de síntesis biótica y abiótica, incrementa la materia orgánica del suelo (35). Los datos se presentan en las tablas 26, 27, 28, 29 y el anexo 03.

- Nitrógeno total:

Tabla 30. Resultado de análisis del suelo para el nitrógeno total.

Tratamiento	Repetición	Nitrógeno total (g/kg)
T1: (Suelo + 0 % de vermicompost)	Muestra 1	0.4972
	Muestra 2	0.9922
	Muestra 3	0.7329
T2: (Suelo + 50 % de vermicompost)	Muestra 4	0.6258
	Muestra 5	1.1330
	Muestra 6	0.9753
T3: (Suelo + 70 % de vermicompost)	Muestra 7	0.5017
	Muestra 8	0.6201
	Muestra 9	0.1314

Fuente: elaboración propia en función de lo reportado por el laboratorio J. Ramón.

Prueba de normalidad de Shapiro-Wilk:

\*H<sub>0</sub>: La distribución de los datos es normal.

\*H<sub>a</sub>: La distribución de los datos no es normal.

Nivel de significancia  $\alpha = 0.05$

Tabla 31. *Prueba de normalidad de Shapiro-Wilk para el contenido de nitrógeno total del suelo.*

Variable	n	Media	D.E.	W	p
Nitrógeno total del suelo (g/kg)	9	0.690	0.309	0.950	0.7800

Fuente: elaboración propia.

Decisión: según la tabla 31 se acepta la H<sub>0</sub> porque el valor de p es mayor que el nivel de significancia ( $\alpha = 0.05$ ), es decir, los datos analizados presentan una distribución normal, por esta razón, para esta variable se realizó el análisis de varianza (ANOVA).

Análisis de varianza (ANOVA):

\*H<sub>0</sub>:  $\mu_1 = \mu_2 = \mu_3$

\*H<sub>a</sub>:  $\mu_1 \neq \mu_2 \neq \mu_3$  (al menos una  $\mu_i$  es diferente a los demás).

Nivel de significancia  $\alpha = 0.05$

Tabla 32. *Análisis de varianza del contenido de nitrógeno total del suelo.*

F.V.	gl	SC	CM	Fc	p-valor
Tratamientos	2	0.377	0.189	2.921	0.1301
Error	6	0.387	0.065		
Total	8	0.764			

Fuente: elaboración propia.

Decisión: la prueba de análisis de varianza tiene un p-valor mayor de 0.05, lo cual indica que los tratamientos son iguales estadísticamente.

Tabla 33. *Prueba de comparación múltiple de Duncan para el contenido de nitrógeno total del suelo.*

O.M.	Tratamiento (Dosis de vermicompost %)	Nt (g/kg)	Significancia
1	50	0.911	a
2	0	0.741	a
3	70	0.418	a

Fuente: elaboración propia.

El contenido promedio de nitrógeno total en el suelo contaminado por HTP tras el experimento tuvo un promedio de 0.690 gNt/kg, superior al 0.2424 gNt/kg presente antes del experimento. Esto se atribuye al incremento de materia orgánica preparada (vermicompost) en dosis altas (50 y 70 %) en el experimento realizado (48). Del nitrógeno total del suelo, casi el 95 % es orgánico en la capa superficial de los suelos (48). Los datos se presentan en las tablas 30, 31,32,33 y el anexo 03.

- Fósforo disponible:

Tabla 34. *Resultado de análisis de suelo para el fósforo disponible.*

Tratamiento	Repetición	Fósforo (g/kg)
T1: (Suelo + 0 % de vermicompost)	Muestra 1	12.42
	Muestra 2	11.46
	Muestra 3	12.42
T2: (Suelo + 50 % de vermicompost)	Muestra 4	54.94
	Muestra 5	146.5
	Muestra 6	159.2
T3: (Suelo + 70 % de vermicompost)	Muestra 7	345.5
	Muestra 8	283.4
	Muestra 9	265.9

Fuente: elaboración propia en función de lo reportado por el laboratorio J. Ramón.

Prueba de normalidad de Shapiro-Wilk:

\*H<sub>0</sub>: La distribución de los datos es normal.

\*H<sub>a</sub>: La distribución de los datos no es normal.

Nivel de significancia  $\alpha = 0.05$

Tabla 35. *Prueba de normalidad de Shapiro-Wilk para el contenido de fósforo disponible en el suelo.*

Variable	n	Media	D.E.	W	p
Fósforo (mg/kg)	9	143.520	130.018	0.843	0.0956

Fuente: elaboración propia.

Decisión: según la tabla 35 se acepta la H<sub>0</sub> porque el valor de p es mayor que el nivel de significancia ( $\alpha = 0.05$ ), es decir, los datos analizados presentan una distribución normal, por lo cual para esta variable se realizó el análisis de varianza (ANOVA).

Análisis de varianza (ANOVA):

\*H<sub>0</sub>:  $\mu_1 = \mu_2 = \mu_3$

\*H<sub>a</sub>:  $\mu_1 \neq \mu_2 \neq \mu_3$  (al menos una  $\mu_i$  es diferente a los demás).

Nivel de significancia  $\alpha = 0.05$

Tabla 36. *Análisis de varianza del contenido de fósforo disponible en el suelo.*

F.V.	gl	SC	CM	Fc	p-valor
Tratamientos	2	125 264.275	62 632.138	37.679	0.0004
Error	6	9 973.565	1 662.261		
Total	8	135 237.840			

Fuente: elaboración propia.

Decisión: la prueba de análisis de varianza tiene un p-valor menor de 0.05, lo cual indica que los tratamientos son diferentes estadísticamente.

Tabla 37. Prueba de comparación múltiple de Duncan para el contenido de fósforo disponible en el suelo.

O.M.	Tratamiento (Dosis de vermicompost %)	P disponible (mg/kg)	Significancia
1	70	298.247	a
2	50	120.213	b
3	0	12.100	c

Fuente: elaboración propia.

El contenido promedio de fósforo disponible en el suelo contaminado por HPT tras al final del experimento fue de 143.520 mg/kg, muy superior al encontrado antes del experimento en el mismo suelo, que fue de 21.74 mg/kg; entre los tratamientos se observó diferencias significativas, siendo los tratamientos con 50 y 70 % de vermicompost los que superaron al testigo. Los datos se presentan en las tablas 34, 35 y el anexo 03.

- Potasio disponible:

Tabla 38. Resultado de análisis de suelo para el potasio disponible.

Tratamiento	Repetición	Potasio (mg/kg)
T1: (Suelo + 0 % de vermicompost)	Muestra 1	8.36
	Muestra 2	13.53
	Muestra 3	10.36
T2: (Suelo + 50 % de vermicompost)	Muestra 4	78.12
	Muestra 5	82.35
	Muestra 6	91.24
T3: (Suelo + 70 % de vermicompost)	Muestra 7	124.5
	Muestra 8	105.5
	Muestra 9	81.25

Fuente: elaboración propia en función de lo reportado por el laboratorio J. Ramón.

Prueba de normalidad de Shapiro-Wilk:

\*H<sub>0</sub>: La distribución de los datos es normal.

\*H<sub>a</sub>: La distribución de los datos no es normal.

Nivel de significancia  $\alpha = 0.05$

Tabla 39. *Prueba de normalidad de Shapiro-Wilk para el contenido de potasio disponible en el suelo.*

Variable	n	Media	D.E.	W	p
Potasio disponible (mg/kg)	9	66.13	43.928	0.829	0.0670

Fuente: elaboración propia.

Decisión: según la tabla 39 se acepta la H<sub>0</sub> porque el valor de p es mayor que el nivel de significancia ( $\alpha = 0.05$ ), es decir, los datos analizados presenta una distribución normal, por esta razón, para esta variable se realizó el análisis de varianza (ANOVA).

Análisis de varianza (ANOVA):

\*H<sub>0</sub>:  $\mu_1 = \mu_2 = \mu_3$

\*H<sub>a</sub>:  $\mu_1 \neq \mu_2 \neq \mu_3$  (al menos una  $\mu_i$  es diferente a los demás).

Nivel de significancia  $\alpha = 0.05$

Tabla 40. *Análisis de varianza del contenido de potasio disponible en el suelo.*

F.V.	gl	SC	CM	Fc	p-valor
Tratamientos	2	14394,300	7197,150	41,396	0,0003
Error	6	1043,154	173,859		
Total	8	15437,454			

Fuente: elaboración propia.

Decisión: la prueba de análisis de varianza tiene un p-valor menor de 0.05, lo cual indica que los tratamientos son diferentes estadísticamente.



Tabla 41. Prueba de comparación múltiple de Duncan para el contenido de potasio disponible en el suelo.

O.M.	Tratamiento (Dosis de vermicompost %)	K disponible (mg/kg)	Significancia
1	70	103.750	a
2	50	83.903	a
3	0	10.750	b

Fuente: elaboración propia.

El contenido promedio de potasio disponible en el suelo contaminado de HTP tras el final del experimento en el tratamiento testigo fue el más bajo con 10.750 mg/kg, inferior inclusive al contenido de K antes del experimento que tuvo un promedio de 75.21 mg/kg, esto se atribuye a que, durante el experimento, el agua favoreció la lixiviación de potasio debido a su textura gruesa (48). En cambio, en los tratamientos con vermicompost (50 y 70 %), se incrementó el contenido de potasio disponible, alcanzando promedios de 103.750 y 83.903 mg/kg, respectivamente. Los datos se presentan en las tablas 38, 39, 41 y el anexo 03.

#### 4.1.4. Biomasa de *Hordeum vulgare* L

- Materia seca de la parte aérea:

Tabla 42. Resultado del peso seco aéreo para los tres tratamientos.

Tratamiento	Repetición	Parte aérea (g)
T1: (Suelo + 0 % de vermicompost)	Muestra 1	0.13
	Muestra 2	0.05
	Muestra 3	0.07
T2: (Suelo + 50 % de vermicompost)	Muestra 4	0.33
	Muestra 5	0.42
	Muestra 6	0.7

	Muestra 7	1.72
T3: (Suelo + 70 % de vermicompost)	Muestra 8	2.31
	Muestra 9	1.71

Fuente: elaboración propia.

Prueba de normalidad de Shapiro-Wilk:

\*H<sub>0</sub>: La distribución de los datos es normal.

\*H<sub>a</sub>: La distribución de los datos no es normal.

Nivel de significancia  $\alpha = 0.05$

Tabla 43. Prueba de normalidad de Shapiro-Wilk para el peso seco aéreo de *Hordeum vulgare* L.

Variable	n	Media	D.E.	W	p
Peso seco aéreo (g)	9	0.375	0.151	0.842	0.0182

Fuente: elaboración propia.

Decisión: según la tabla 41 se rechaza la H<sub>0</sub> porque el valor de p es menor que el nivel de significancia ( $\alpha = 0.05$ ), quiere decir que los datos analizados no presentan una distribución normal, por ello para esta variable se realizó la prueba no paramétrica de Kruskal-Wallis.

Tabla 44. Prueba de rangos de Kruskal-Wallis para el peso seco aéreo de *Hordeum vulgare* L.

Tratamiento (% vermicompost)	Medias	D.E.	H	P	Significancia
0	0.083	0.042	7.200	0.0036	a
50	0.483	0.193			a b
70	1.913	0.344			b

Fuente: elaboración propia.

El contenido de materia seca de la parte aérea de *Hordeum vulgare* L. presenta un promedio de 0.375 g tras el experimento, con diferencias significativas entre los tratamientos de vermicompost aplicado al suelo. El tratamiento sin vermicompost presenta un promedio de 0.083 g,

superado estadísticamente por el tratamiento con 70 % de vermicompost, que obtuvo un promedio de 1.913 g. El efecto de la aplicación del vermicompost en la formación de materia seca de *Hordeum vulgare L.* se debe a la mejora de las condiciones del suelo por el incremento de la actividad microbiana y demuestra el efecto negativo de la presencia de Hidrocarburos Totales de Petróleo en el crecimiento de la planta. Los datos se presentan en las tablas 42, 43, 44 y el anexo 03.

- Materia seca de la parte radicular:

Tabla 45. *Resultado del peso seco radicular para los tres tratamientos.*

Tratamiento	Repetición	Parte radicular (g)
T1: (Suelo + 0% de vermicompost)	Muestra 1	0.33
	Muestra 2	0.22
	Muestra 3	0.26
T2: (Suelo + 50 % de vermicompost)	Muestra 4	0.41
	Muestra 5	0.37
	Muestra 6	0.54
T3: (Suelo + 70 % de vermicompost)	Muestra 7	0.85
	Muestra 8	1.68
	Muestra 9	1.25

Fuente: elaboración propia.

Prueba de normalidad de Shapiro-Wilk:

\*H<sub>0</sub>: La distribución de los datos es normal.

\*H<sub>a</sub>: La distribución de los datos no es normal.

Nivel de significancia  $\alpha = 0.05$

Tabla 46. *Prueba de normalidad de Shapiro-Wilk para el peso seco radicular de Hordeum vulgare L.*

Variable	n	Media	D.E.	W	p
Peso seco radicular (g)	9	0.657	0.506	0.814	0.0431

Fuente: elaboración propia.

Decisión: según la tabla 46 se rechaza la  $H_0$  porque el valor de  $p$  es menor que el nivel de significancia ( $\alpha = 0.05$ ), es decir que los datos analizados no presentan una distribución normal, por ello para esta variable se realizó la prueba no paramétrica de Kruskal-Wallis.

Tabla 47. Prueba de rangos de Kruskal-Wallis para el peso seco radicular de *Hordeum vulgare L.*

Tratamiento (% vermicompost)	Medias	D.E.	H	P	Significancia
0	0.270	0.056	7.200	0.0036	a
50	0.440	0.089			a b
70	1.260	0.415			b

Fuente: elaboración propia.

El peso promedio de la materia seca radicular de *Hordeum vulgare L.* en el suelo contaminado con HTP, tras los tratamientos de vermicompost, fue de 0.657 g, superior al peso promedio de la parte aérea (0.375 g) lo cual se explica en una planta cuando tiene factores limitantes de crecimiento en desarrollar su sistema radicular en busca de los factores de crecimiento, principalmente agua y nutrientes.

La prueba de Kruskal-Wallis muestra que el tratamiento con 70 % de vermicompost, que alcanzó un promedio de 1.260 g, fue superior estadísticamente que el tratamiento sin vermicompost que solo obtuvo un promedio de 0.270 g. Estos resultados muestran el efecto del vermicompost en la mejora del crecimiento de *Hordeum vulgare L.* en suelos contaminados con HTP. Los datos se presentan en las tablas 45, 46, 47 y el anexo 03.

#### 4.2. Discusión de resultados

- Caracterización fisicoquímica del suelo:

El suelo del taller mecánico “Unión” tuvo pH neutro (6.96 - 7.3), un alto contenido de materia orgánica (MO > 4 %) y textura arena franca, en forma similar al suelo contaminado con hidrocarburos de petróleo utilizado en el experimento de Martínez *et. al.* (1) que utilizó un suelo proveniente de los talleres del grupo Goldcorp México, Unidad Minera San Antonio, que tuvo un pH de 6.96, 9.43 % de materia orgánica y textura arena limoso, donde se aplicó lodos residuales como fuente alterna de nutrientes. La contaminación del suelo de México fue resultado de derrames accidentales de diésel, aceite y grasas.

- Contenido de Hidrocarburos Totales de Petróleo (HTP):

El suelo del presente experimento tuvo un contenido de 43 386.7 ppm, mucho mayor que un suelo contaminado con petróleo crudo (HTP) (19) que tuvo un valor de 14 300 mg/kg de hidrocarburos totales de petróleo pero menor que un suelo contaminado con 45 000 ppm de HCT proveniente de aceite residual automotriz (21) y menor que un suelo contaminado con derrames accidentales de aceite, diésel y grasas proveniente de los talleres del grupo Goldcorp en México, que tuvo una concentración de 51 191 mg HTP/kg de suelo; observándose que los suelos contaminados con derrames de aceite o compuestos en talleres automotrices tienen mayor concentración de HTP respecto a un suelo que recibió solo petróleo.

- Propiedades físicas y químicas del suelo al final del experimento:

- Densidad aparente:

Durante el experimento no se observó una significancia estadística entre los tratamientos para la densidad aparente, pero los valores fueron bajos debido a la presencia de carbono orgánico, indicando que esta propiedad del suelo puede actuar como acondicionador para facilitar la recuperación de suelos contaminados con HTP como reportaron Martínez *et. al.* (1), quienes utilizaron lodos residuales para la biorremediación de suelos contaminados con hidrocarburos de petróleo (HP) en México, quienes plantearon tratamientos de suelo contaminado con medio mineral, suelo a capacidad de campo, suelo con lodo estéril y suelo con lodo sin esterilizar,

concluyendo que el mejor tratamiento fue el que contenía lodos residuales sin esterilizar que alcanzó 66 a 93 % de remoción de HP, favorecidos por la presencia de nutrientes, baja densidad aparente y cantidad de agua disponible, pues se atribuye la disminución de HP al proceso de degradación ocasionado por los microorganismos nativos del suelo.

- Capacidad de Intercambio Catiónico Efectiva (CICE):

La Capacidad de Intercambio Catiónico Efectiva (CICE en adelante) del suelo fue incrementada significativamente en los tratamientos con 50 y 70 % de vermicompost, que como material orgánico del suelo incrementó la Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC en adelante) del suelo (38). En este experimento, la fuente de materia orgánica estaba descompuesta y eso explica los valores altos de CIC en el suelo, porque la materia orgánica descompuesta aporta gran cantidad de cargas negativas, como reporta Martel *et. al.* (38) acerca de que que el grado de descomposición - humificación de materiales orgánicos también genera una disparidad de valores en esta propiedad físico-química del suelo.

- Contenido de carbonato de calcio:

No hubo efecto significativo de la aplicación de vermicompost en el contenido de carbonato de calcio del suelo contaminado con HTP, variando los contenidos entre 1.433 (70 %  $\text{CaCO}_3$ ) y 2.163 % (50 %  $\text{CaCO}_3$ ), valores calificados de nivel medio en un suelo ( $\text{CaCO}_3 = 1 - 5$  %, ver anexo 02), lo que no causaría implicaciones negativas en el suelo del experimento, especialmente a las plantas (35).

- pH del suelo:

El pH del suelo en los tres tratamientos con vermicompost no presentó diferencias significativas, con un rango de variación de pH entre 7.573 (50 %) hasta 7.600 (70 %). La disminución del pH, respecto al valor inicial, afecta la movilidad de los contaminantes en el suelo, especialmente su solubilidad, aumentándola (17).

- Contenido de materia orgánica:

Los tratamientos con vermicompost no presentaron una significancia estadística para el contenido de materia orgánica, con un rango de variación del contenido de materia orgánica después del experimento entre 30.640 % (0 %) y 35.813 % (50 %).

El incremento promedio observado en el suelo del experimento ejerce una influencia favorable sobre las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo (17). La materia orgánica proporcionó gran parte de la CICE del suelo y retención de agua. Se incrementa la estabilización de los agregados del suelo, además de mejorar el crecimiento de las plantas (17).

El alto contenido de materia orgánica en el suelo del presente experimento, va a incrementar la actividad microbial, produciendo mayor degradación de los HTP, como lo reportó Silvana *et. al.* (20) después de culminar el ensayo de biorremediación de suelos contaminados con petróleo, donde incorporó biosólidos y compost de biosólidos frente a tratamientos de biorremediación convencionales (laboreo, humectación y aireación); los tratamientos con biosólidos redujeron en 83 % y 65 % los Hidrocarburos de Fracción Pesada (HFP).

- Contenido de nitrógeno total:

No se observó diferencias significativas en el contenido de nitrógeno total del suelo en los tratamientos de vermicompost, con un rango de variación entre 0.418 gNt/kg (70 %) hasta 0.911 gNt/kg (50 %). Los valores encontrados son altos, lo cual se atribuye al alto contenido de materia orgánica; el nitrógeno total no puede ser aprovechado directamente por los organismos, sino después de haber sido transformados a compuestos inorgánicos. Las formas más importantes del nitrógeno inorgánico son el amonio y el nitrato (49).

Las fuentes de nitrógeno inorgánico liberadas de la descomposición microbial de las formas orgánicas (vermicompost), se constituyen en una

fuelle de nutrientes para favorecer la degradación de HTP, como se reportó en el trabajo de investigación de Martínez *et. al.* (1), donde emplearon lodos residuales como fuente de nutrientes en la biorremediación de un suelo contaminado con hidrocarburos concluyendo que la presencia de nutrientes fueron factores importantes en aumentar el porcentaje de degradación de hidrocarburos.

- Contenido de fósforo disponible:

Los tratamientos con 50 % y 70 % de vermicompost incrementaron significativamente el contenido de fósforo disponible en el suelo, lo cual se atribuye a la aplicación de los tratamientos de vermicompost que aporta materia orgánica descompuesta al suelo y compuestos orgánicos de fósforo, los cuales son mineralizados a través de la actividad microbial para suministrar fósforo disponible a la solución suelo (48).

Este incremento de fósforo causado por el incremento de vermicompost al suelo es favorable, porque disminuirá la aplicación de fertilizantes fosfatados, pero un alto contenido de este elemento en el suelo puede conducir a la acumulación en la superficie de los suelos de muchas cuencas agrícolas. El agua de escorrentía de estas cuencas agrícolas junto con las aguas residuales de cuencas urbanas, constituye uno de los tipos más serios de contaminación del agua, debido al alto fósforo disponible en el suelo (17).

- Contenido de potasio disponible:

Los tratamientos de 50 % y 70 % de vermicompost superaron estadísticamente el contenido de potasio disponible al tratamiento testigo, lo cual se atribuye a la liberación de este elemento en forma iónica, desde el vermicompost, constituyéndose en un aporte de potasio al suelo, en función de las dosis aplicadas (48), aunque manteniéndose en niveles bajos a medios en el suelo en el suelo (K:<100 mg/kg a K:100-240 mg/kg respectivamente).



- Biomasa de *Hordeum vulgare L.*:

- Materia seca de la parte aérea:

El tratamiento con 70 % de vermicompost sobresalió en el peso de materia seca de la parte aérea, superando significativamente al testigo, lo cual muestra que el vermicompost utilizado como fuente de materia orgánica para el suelo contaminado favorece la actividad microbial e influye en el mayor crecimiento aéreo de *Hordeum vulgare L.* como lo reporta Hernández *et. al.* (108), quienes al ensayar la fitorremediación de un suelo contaminado con petróleo extra pesado, utilizando *Megathyrus maximus* como planta indicadora, encontraron que la especie utilizada disminuyó el contenido de hidrocarburos y la actividad microbial fue mayor respecto al tratamiento sin planta indicadora, posiblemente por la presencia de una rizósfera que favorece dicha actividad.

Los resultados del presente experimento están reportados como subletales, es decir, la presencia de alta concentración de HTP en el suelo no matan a las plantas sino que limitan su crecimiento (65), como se observa en el tratamiento sin lombricompost, donde el contenido de materia seca se redujo en un 95.66 % respecto al tratamiento con 70 % de vermicompost

- Materia seca de la parte radicular:

Los resultados del peso de materia seca de la parte radicular de *Hordeum vulgare L.* presentaron diferencias significativas, sobresaliendo el tratamiento con 70 %; estos resultados son corroborados por lo reportado en la evaluación de la germinación y crecimiento vegetativo de diferentes especies de pastos, sometidos a diferentes concentraciones de hidrocarburos donde se concluyó en un retraso de crecimiento de todas las plantas evaluadas (66), es decir la presencia de hidrocarburos en el suelo retrasa el crecimiento de la planta.

La alteración del crecimiento vegetativo de *Hordeum vulgare L.* (observado en el presente estudio) por efecto de la alta concentración de HTP también ha sido reportado en otro estudio con cebada, donde se observó síntomas de clorosis y mayor abstención del crecimiento con el incremento de la concentración del contaminante (65).

## CONCLUSIONES

1. El suelo contaminado con hidrocarburos tuvo las siguientes características fisicoquímicas: la textura del suelo fue calificada como gruesa, predominando la arena entre las fracciones granulométricas. El contenido de carbonatos, la densidad aparente, el potasio disponible y el nitrógeno total fueron calificados como bajos. El pH fue calificado como neutro, mientras que el contenido de materia orgánica, el P disponible y la Capacidad de Intercambio Catiónico Efectiva (CICE) fueron calificados como altos, predominando el calcio como catión cambiante.
2. 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.
3. La aplicación de vermicompost al suelo contaminado con HTP tuvo el siguiente efecto en la biomasa seca aérea y radicular: el peso seco de la parte aérea de *Hordeum vulgare L.* fue afectado por la presencia de HTP en el suelo, lográndose un incremento significativo con la aplicación de 70 % de vermicompost con un

promedio de 1.913 g/unidad experimental, superior estadísticamente al tratamiento testigo que solo alcanzó un promedio de 0.375 g/unidad experimental. El vermicompost en dosis de 70 % sobresalió en el peso radicular de *Hordeum vulgare L.*, alcanzando un promedio de 1.260 g, superior estadísticamente al tratamiento sin vermicompost que solo obtuvo un promedio de 0.270 g/unidad experimental.

## **RECOMENDACIONES**

1. Repetir el presente ensayo utilizando vermicompost para la remediación de suelos contaminados con petróleo y evaluando las propiedades físicas, químicas y biológicas por un periodo experimental más largo.
2. Realizar ensayos de biorremediación de suelos contaminados con petróleo de uso industrial y agrícola para evaluar los efectos de los tratamientos biológicos en las propiedades físicas, químicas y biológicas de los suelos afectados.
3. Realizar los análisis de suelos contaminados con petróleo, en sus diferentes parámetros, considerando réplicas de muestras para verificar la confiabilidad de resultados, utilizando métodos de análisis validados.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. MARTÍNEZ, A. y otros. *Biorremediación de suelo contaminado con hidrocarburos empleando lodos residuales como fuente alterna de nutrientes*. s.l., México: Revista Internacional de Contaminación Ambiental, Agosto de 2011. **27**, 3, págs. 241-252. 0188-4999.
2. VOLKE, T. y VELASCO, J. *Tecnologías de remediación para suelos contaminados*. México: Instituto Nacional de Ecología, 2002. págs. 27-32. 968-817-557-9.
3. EWEIS, J. y otros. *Bioremediation principles*. Maidenhead, Reino Unido: McGraw-Hill Book Company Europe, 1998. pág. 296. 00705777323.
4. RIVERA, Y. y DENDOOVEN, L. *Dynamics of carbón, nitrogen and hydrocarbons in diésel-contaminated soil amended with biosolids and maize*. s.l.: Chemosphere, 2004. **54**, 3, págs. 379-386.
5. LEE, S. y otros. *Degradation characteristics of waste lubricants under different nutrient conditions*. s.l.: J Hazard Mater., 8 de Mayo de 2007. **143**, págs. 65-72.
6. VELÁSQUEZ, J. *Contaminación de suelos y aguas por hidrocarburos en Colombia. Análisis de la fitorremediación como estrategia biotecnológica de recuperación*. Colombia: Revista de Investigación Agraria y Ambiental, 2017. **8**, 1, págs. 151-167. 2145-6453.
7. SPIER, C. y otros. *Distribution of hydrocarbons released during the 2010 MC252 oil spill in deep offshore waters*. s.l.: Environmental Pollution, 2013. **173**, págs. 224-230. 0269-7491.
8. ADAMS, R., ZAVALA, J. y MORALES, F. *Concentración residual de hidrocarburos en suelo del trópico. II: afectación a la fertilidad y suelos*. Caracas, Venezuela: Interciencia, Julio de 2008. **33**, 7, págs. 483-489. 0378-1844.
9. D.A., E. y otros. [ed.] Amherst Scientific Publishers. *Development of fraction specific reference doses (RfDs) and reference concentration (RfCs) for total petroleum hydrocarbons (TPH)*. Amherst, MA: Association of Environmental Health and Sciences, 1997. **4**, pág. 137. 1884940137.

10. ÑUSTEZ, D., PAREDES, D. y CUBILLOS, J. *Bioremediation for degradation of total hydrocarbons present in the sediments of a fuel service station*. Risaralda, Colombia: Revista Técnica de Ingeniería, Abril de 2014. **37**, 1. 0254-0770.
11. GARCÍA, C. *Recuperación del suelo contaminado con petróleo utilizando Micronanoburbujas de aire-ozono a nivel de laboratorio*. Lima: Universidad César Vallejo, 17 de Julio de 2017. págs. 10-20.
12. ÁNGELES, O. *Situación actual de la contaminación por actividades de hidrocarburos en la Selva Peruana*. Lima, Perú: Universidad Nacional Agraria la Molina, 2018. 1.
13. BUENDÍA, H. *Biorremediación de suelos contaminados por hidrocarburos mediante el compost de aserrín y estiércol*. Lima, Callao: Revista del Instituto de Investigación, Julio-Diciembre de 2012. **15**, 30, págs. 123-130.
14. DIRECCIÓN GENERAL DE SALUD Y AMBIENTE. [ed.] Francisco GUEVARA ROBLES. *Manual de Difusión Técnica N° 01: Gestión de los Residuos Peligrosos en el Perú*. Lima: Ministerio de Salud, Noviembre de 2006.
15. RODRIGUEZ, I. *Reciclado en suelos de lodos en refinería: Nuevas aproximaciones para la biodegradación de hidrocarburos mediante el manejo de enmiendas orgánicas*. s.l., España: Universidad de Murcia, 2013. págs. 40-50.
16. VÁSQUEZ, J. y LOLI, O. *Compost y vermicompost como enmiendas en la recuperación de un suelo degradado por el manejo de *Gypsophila paniculata**. Trujillo: Scientia Agropecuaria, 2018. **9**, 1, págs. 43-52. 2077-9917.
17. WEIL, R. y BRADY, N. *The nature and Properties of Soils*. New York USA: Fourteenth, 2008. 14.
18. FAGERIA, N., BALIGAR, V. y CLARK, R. *Physiology of crop production*. New York: Food Products Press, 2006.
19. GARCIA, R. y otros. *Uso de cachaza y bagazo de caña de azúcar en la remoción de hidrocarburos en suelo contaminado*. s.l., México: Revista internacional de contaminación ambiental, 2011. **27**, 1, págs. 31-39. 0188-4999.

20. SILVANA, C., MARTINEZ, M. y AROCENA, L. *Estudio comparativo del agregado de enmiendas orgánicas e inorgánicas en procesos de biorremediación de suelos norpatagónicos contaminados con petróleo*. Lima, Perú: Revista de la Sociedad Química del Perú, 2014. **80**, 4, págs. 251-261. 1810-634X.
21. SAUCEDO, B., MARQUEZ, L. y SÁNCHEZ, J. *Biostimulation of a soil impacted by waste car oil and phytoremediation with Zea Mays*. s.l., México: Journal of the Selva Andina Research Society, 2016. **7**, 2, págs. 86-94. 2072-9294.
22. QUIÑONES, E. y otros. *Emergence and growth of maize in a crude oil polluted soil*. Texcoco, México : Colegio de Postgraduados- Agrociencia, Diciembre de 2003. **37**, 6, págs. 585-594.
23. HERNÁNDEZ, I. y MAGER, D. *Uso de panicum maximum y brachiaria brizantha para fitorremediar suelos contaminados con crudo de petróleo liviano*. s.l., Venezuela: Biagro, 2003. **15**, 3, págs. 145-155. 1316-3361.
24. KOMILIS, D. y TIMOTHEATOU, E. *Bioremediation of a Diesel-contaminated Soil: Effect of Compost Addition*. s.l.: Global Science, 2011. págs. 113-119.
25. MARÍN, T. *Corn (Zea mays) growth in petroleum contaminated soil, remediated with orange (Citrus sinensis) peel extract*. s.l.: Enfoque UTE, Setiembre de 2016. **7**, 3, págs. 1-13. 1390-9363.
26. TAMAYO, L. *Efecto del compost de cáscara de Citrus limon sobre la degradación de hidrocarburos totales de petróleo en suelos contaminados provenientes de Refinería Talara*. Lima, Perú: Universidad Cesar Vallejo, 2016. págs. 1-73.
27. BUENDÍA, H. *Bioremediation of hydrocarbon contaminated soils using saw dust and manure compost*. Lima, Perú: Rev. del Instituto de Investigación (RIIGEO), FIGMMG-UNMSM, 2012.
28. RODRÍGUEZ, P. *Efecto del humus de lombriz en la remediación de suelos contaminados con crudo de petróleo. Ucayali, Perú*. Pucallpa, Perú: s.n., 2018.
29. BUSTAMANTE, G. y SILVA ORA, J. *Efecto de la materia orgánica en la biorremediación de suelo contaminado con hidrocarburos de petróleo en establecimientos de servicios*. Lambayeque, Perú: Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo, 2019.



30. LEONEL, M. y MORENO, D. *Biorremediación de suelos contaminados con hidrocarburos en cultivo de tomate*. s.l., Colombia: Universidad Agraria de Colombia, Octubre de 2018.
31. DORAN, J. y PARKIN, T. *Defining Soil Quality for a Sustainable Environment*. s.l., Wisconsin, EE.UU.: Soil Science Society of America, 1994. 35, págs. 1-21. 0-89118-807-X.
32. LARSON, W. y PIERCE, F. *Conservation and enhancement of soil quality*. s.l., Bangkok, Thailand: International Board for Soil Research and Management, 1991. págs. 175-203.
33. NANNIPIERI, P., GRECO, S. y CENCCATO, B. [ed.] JM Bollag y G. Stotzky. *Ecological significance of the biological activity in soil*. s.l., Nueva York, EE.UU.: Marcel Dekker, 1990. 6, págs. 293-355. 19911950379.
34. MINISTERIO DEL AMBIENTE. *Estándares de Calidad Ambiental para suelo. D.S. N° 011-2017-MINAM*. s.l.: Diario Oficial El Peruano, 2017.
35. PORTA, J., LÓPEZ- ACEVEDO, M. y ROQUERO DE LABURU, C. *Edafología para la agricultura y el medio ambiente*. España: Mundi Prensa , 2003.
36. LAL, R. y SHUKLA, M. *Principles of Soil Physics*. New York: Marcel Dekker, 2004.
37. FAUSEY, N. *Encyclopedia of Soil Science*. second [ed.] Rattan Lal. *Drainage: Aeration, and Trafficability*. s.l.: Boca Raton, 2016.
38. MARTEL, Y., DE KIMPE, C. y LAVERDIERE, M. *Cation exchange capacity of clay-rich soils in relation to organic matter, mineral composition, and surface area*. s.l.: Soil Sci. Soc. Am., 1978. 42, págs. 764-767.
39. MILLER, W. *Interregional predictability of cation-exchange capacity by multiple regression*. s.l.: Plant Soil, 1970. 33, págs. 721-725.
40. MELICH, A. *Chemistry in the Soil Environment*. [ed.] Dowdy R.H., y otros. *Charge properties in relation to sorption and desorption of select cations and anions*. Madison: Soil Sci.Soc.Am., 1981. págs. 47-75.

41. SOIL SURVEY STAFF. 2 *Soil taxonomy: a basic system of soil classification for making and interpreting soil surveys*. [US Department of Agriculture Soil Conservation Service]. Washington : Agricultural Handbook 436, 1999.
42. TAN, K. 4 *Principles of Soil Chemistry*. s.l.: CRC Press Taylor & Franciss Group, 2011.
43. SPOSITO, G. *The Chemistry of Soils*. New York: Oxford University Press, 1989. pág. 227.
44. BESOAIN, E. *Mineralogía de arcillas de suelos*. San Jose, Costa Rica: Instituto Interamericano de Ciencias Agrícolas, 1985.
45. MIRSAL, I. 2 *Soil pollution. Origin, monitoring & remediation*. s.l.: Springer, 2004. pág. 312.
46. GAUCHER, G. *Les Facteurs de la Pedogenese*. Bélgica: s.n., 1981. pág. 73.
47. CRESSER, M., KILLHAMN, K. y EDWARDS, T. *Soil chemistry and its applications*. Cambridge, UK: Cambridge Evironmental Chemistry Series 5, 1993. pág. 192.
48. HAVLIN, J. y otros. 8 *Soil Fertility and Fertilizers: An Introduction to Nutrient Management*. Boston, USA: Pearson, 2014.
49. FUENTES, J. 1 *Manual practico sobre utilizacion de suelo y fertilizantes*. Madrid, España: Mundi Prensa, 2002. pág. 159.
50. PRICE, G. 3 *Auatralian Soil Fertility Manual*. s.l.: Csiro Publishing, 2012.
51. DOMÍNGUEZ, V. 3 *Tratado de Fertilización*. España: Mundi Prensa, 1997.
52. MENGEL, K. y KIRKBY, E. *Principles of Plant Nutrition*. Switzerland: International Potash Institute Basel, 1987. 4, 1.
53. KNOX, A. y otros. *Sources and practices contributing to soil contamination*. Madison, Wisconsin, USA: Agronomy, 1999. 37, págs. 53-58.
54. CASTRO, J. Short delay in timing of emergence determines establishment success. *Pinus sylvestris across microhabitats*. s.l.: Annals of botany, 2006. págs. 1233-1240.
55. ESCALANTE, E. *Estudio de ecotoxicidad de un suelo contaminado con hidrocarburos*. s.l., México: Universidad Autónoma Metropolitana, 01 de Enero de 2000.

56. SPEIGHT, J. [ed.] Jhon Wiley and Sons. *The chemistry and technology of petroleum*. 2014.
57. SAEED, T., AL-MATROUK, K. y AL-HASHASH, H. *Assessment of the changes in the chemical composition of the crude oil spilled in the Kuwait desert after weathering for five years*. s.l.: Environment International, February de 1998. **24**, 1-2, págs. 141-152. 0160-4120.
58. GARCÍA, M. [ed.] Laureano Canoira y Juan Francisco Llamas. *Los hidrocarburos policíclicos aromáticos asociados a combustibles fósiles. Caracterización, análisis y remediación*. s.l.: Universidad Politécnica de Madrid, 2005.
59. GAFONOVA, O. y YARRANTON, H. *The stabilization of water in hydrocarbon emulsions by asphaltenes and resins*. s.l.: Journal of Coloid and Interface Science, 2001. **241**, 2, págs. 469-478.
60. SILVA, T. y otros. *Effect of biodegradation on biomarkers released from asphaltenes*. s.l.: Organic Geochemistry, August de 2008. **39**, 8, págs. 1249-1257.
61. VASALLO, J. y HERRERA, D. *Seminario de hidrocarburos*. s.l., Neuquén, Argentina: Escuela Superior de Salud y Ambiente. Universidad Nacional del Comahue, 2002.
62. ATLAS, R. *Petroleum microbiology*. s.l., New York: Macmillan Publishing Company, 1984. págs. 453-459.
63. KOSTECKI, P. *Petroleum Contaminated Soils*. s.l., U.S.A.: Lewis Publishers, 1989. **1**, págs. 115-127.
64. ALBERS, P. Handbook of Ecotoxicology. [ed.] David J. HOFFMAN. *Petroleum and individual polycyclic aromatic hydrocarbons*. s.l., U.S.A.: Lewis Publishers, 1995. págs. 330-355.
65. CHAINEAU, C., MOREL, J. y OUDOT, J. *Land treatment of oil-based drill cuttings in an agricultural soil*. United States, United States: Journal of Environmental Quality, 01 de Julio de 1996. **25**, 4, págs. 858-867.
66. WUXING, L. y otros. *Phytoremediation of oilfield sludge after prepared bed bioremediation treatment*. s.l.: International Journal of Phytoremediation, 26 de Marzo de 2010. **12**, 3, págs. 268-278.

67. LÓPEZ DE MESA, J. y otros. *Biorremediación de suelos contaminados con hidrocarburos derivados del petróleo*. Bogotá, Colombia: Nova- Publicación Científica, 2006. **4**, 5, págs. 82-90. 1794-2470.
68. CLARK, L. Hydrocarbon pollution control and remediation of groundwater. a brief review. s.l.: Quaterly Journsl of Engineering Geology, 1995. 28. S93-S100.
69. GAN, S., LAU, E. y Ng, H. *Remediation of soils contaminated with polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs)*. Malasia: Journal of Hazardous Materials, 2009. **175**, 2-3, págs. 532-549. 0304-3894.
70. XU, Y. y LU, M. *Bioremediation of crude oil-contaminated soil: comparison of different biostimulation and bioaugmentation treatments*. China: Journal of Hazardous Materials, 15 de julio de 2010. págs. 395-401.
71. OLGUÍN, E., HERNÁNDEZ, M. y SÁNCHEZ, G. *Contaminación de manglares por hidrocarburos y estrategias de biorremediación, fitorremediación y restauración*. México: Revista internacional de contaminación ambiental, 2007. **23**, 3, págs. 139-154. 0188-4999.
72. LOYA DEL ÁNGEL, D. *Tecnologías para la restauración de suelos contaminados por hidrocarburos*. México: Universidad Veracruzana, 09 de julio de 2013. págs. 25-40.
73. CUNNINGHAM, S. y BERTI, W. *Remediation of contaminated soil wiyh green plants: an overview*. s.l.: In Vitro Cellular & Developmental Biology, 1993. **29**, 4, págs. 207-212. 1475-2689.
74. FERRERA, R. y otros. *Procesos de biorremediación de suelo y agua contaminados por hidrocarburos del petróleo y otros compuestos orgánicos*. s.l.: Revista Latinoamericana de Microbiología, 2006. **48**, 2, págs. 179-187.
75. LÓPEZ, A. *Biorremediación y fitorremediación en suelos contaminados*. s.l., España: Real Academia Nacional de Farmacia. págs. 73-80.
76. COVARSE, M. y otros. *Characterization of water extractable organic matter in a deep soil profile*. s.l.: Chemosphere , 2006. **62**, 10, págs. 1583-1590.
77. CASTELO, A. y otros. *Residual mushroom compost as soil conditioner and bio-fertilizer in tomato production*. México: Revista Chapingo Serie Horticultura, 20016. **XXII**, 2, págs. 83-93. 1027-152X.

78. SAAVEDRA, M. *Biodegradación de Alperujo utilizando hongos del género Pleurotus y anélidos de la especie Eisenia foetida*. Granada: Universidad de Granada, 2007. págs. 44-100.
79. VILLEGAS, V. y LAINES, J. *Vermicompostaje: I avances y estrategias en el tratamiento de residuos sólidos orgánicos*. s.l., México: Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas, 2017. **8**, 2, págs. 393-406.
80. CAI, Q. y otros. *Concentration and speciation of heavy metals in six different sewage sludge-composts*. Agosto de 2007. **147**, 3, págs. 1063-1072.
81. HAIT, S. y TARE, V. *Transformation and availability of nutrients and heavy metals during integrated composting-vermicomposting of sewage sludges*. s.l.: Ecotoxicol Environ Saf. , 2012. **79**, págs. 214-224.
82. FERRUZZI, C. *Manual de lombricultura*. s.l., Madrid, España: Mundi - Prensa, 1986. **1**, pág. 138.
83. CÁRCAMO, J. *Efecto de tres fuentes de abono orgánico (Vacaza, Compost de Residuos Sólidos Urbanos y Humus de lombriz) en el crecimiento y rendimiento del cultivo de noni (Morinda citrifolia L.) durante el primer año de establecimiento en un inceptisol de pucallpa*. Pucallpa - Perú: Universidad Nacional de Ucayali, 2008.
84. XIUCHAO, S. y otros. *Heavy Metal And Nutrient Changes During Vermicomposting Animal Manure Spiked With Mushroom Residues*. s.l.: Waste Management, 2014. **34**, 11, págs. 1977-1983.
85. KHWAIRAKPAM, M. y BHARGAVA, R. *Vermitechnology for sewage sludge recycling*. s.l.: J. Hazard. Mater, 2009. **161**, 2, págs. 948-954.
86. GONZÁLEZ, E. *El ambiente: mucho más que ecología*. s.l.: Academia Nacional de Educación Ambiental, 1999. págs. 1-3.
87. MINISTERIO DEL AMBIENTE. *Glosario de términos: Sitios contaminados*. Perú: s.n. págs. 1-17.
88. FULLERTON, A. y otros. *Human Influence on the Spatial Structure of Threatened Pacific Salmon Metapopulations*. México: Conservation Biology, 2011. **25**, 5.

89. SÁNCHEZ, V. y GUIZA, B. *Glosario de términos sobre medio ambiente*. s.l.: Unesco-PNUMA Programa Internacional de Educación Ambiental, 1989.
90. ASOCIACIÓN ESPAÑOLA DE TOXICOLOGÍA. [ed.] M. Repetto y P. Sanz. *Glosario de términos toxicológicos*. España: Sevilla: AET, 1995.
91. THE EDITORS OF ENCYCLOPAEDIA BRITANNICA. *Biogeochemical cycle*. América Latina: Encyclopædia Britannica, 16 de Junio de 2016.
92. SOIL SCIENCE SOCIETY AMERICAN SSSA. *Glossary of Soil Science Terms*. USA: Madison, 2015.
93. NUTBEAM, D. Centro Colaborador de Promoción de la Salud, Departamento de Salud Pública y Medicina Comunitaria. *Glosario de Promoción de la Salud*. Ginebra: Universidad de Sydney, 1998.
94. HERNÁNDEZ, I. y MAGER, D. *Use of Panicum maximum and Brachiaria brizantha to phytoremediate polluted soils with light crude oil*. s.l., Venezuela: Biagro, 2003. **15**, 3, págs. 145-155. 1316-3361.
95. CASTELLS, X. *Diccionario de términos ambientales: Reciclaje de residuos industriales*. Madrid: Díaz de Santos, 2012. 978-84-9969-366-8.
96. QUICENO, Y. *El método crítico de Karl Popper: La Falsabilidad como criterio de demarcación entre la ciencia y la metafísica*. s.l.: Ciencia en la escuela.
97. EYSSAUTIER DE LA MORA, M. *Investigation methodology*. México: Cengage Learning, 2006. **5**, 1.
98. CALMORIN, L. y CALMORIN, M. Second edition. *Research methods and thesis writing*. Manila, Philipines: Rex Book Store, 2007.
99. VALDERRAMA, S. *Pasos para elaborar proyectos y tesis de investigación científica*. Lima, Perú: San Marcos de Aníbal Jesús Paredes Galván, 2006. **1**.
100. BADI, M. y otros. *Experimental designs and scientific research*. México: UANL, 2007. **4**, 2. 1665-9627.
101. FERNÁNDEZ, R., TRAPERO, A. y DOMÍNGUEZ, J. *Experimentation in agriculture*. Sevilla: Consejería de Agricultura y Pesca, 2010.

102. GABRIEL, J. y otros. *Diseños experimentales: Teoría y practica para experimentos agropecuarios*. Jipijapa, Ecuador: Grupo COMPAS, Universidad Estatal del Sur de Manabí (UNESUM), 2017. pág. 146.
103. NUÑEZ, R. y otros. *Fitorremediación: fundamentos y aplicaciones*. México: Ciencias - Academia Mexicana de Ciencias, 2004. **55**, 3.
104. MARTÍNEZ , V. y LÓPEZ, F. *Effets of Hydrocarbon pollutants on the physical and chemical properties of clay soil*. México: Terra, 2000. **19**, 1, págs. 9-17.
105. MINISTERIO DE AGRICULTURA Y RIEGO. *Reglamento de Clasificación de Tierras según su Capacidad de Uso Mayor*. Lima, Perú: s.n., 2009.
106. MÉNDEZ, M. y otros. *Determinación de hidrocarburos totales de petróleo (TPH) usando CG-FID en suelos de un patio de tanques en desuso situado en Catia La Mar-Venezuela*. s.l.: Revista Ciencia e Ingeniería, 2011. **32**, 1, págs. 31-38. 1316-7081.
107. SHAHI, D. *Practical on Vermicompost, Department of Soil Science & Agriculture*. s.l.: Chemistry Birsa Agricultural University, 2008.
108. HERNÁNDEZ, I., NAVAS, G. y INFANTE, C. *Fitorremediación de un suelo contaminado con petróleo extra pesado con *Megathyrsus maximus**. s.l., México : Revista internacional de contaminación ambiental, 2017. **33**, 3, págs. 495-503. 0188-4999.

## **ANEXOS**



Anexo 01. Matriz de consistencia.

Problema	Objetivos	Hipótesis	Variables	Metodología
<p>Problema general:</p> <p>¿Cuál es el efecto de la aplicación de diferentes dosis de vermicompost en la biomasa de <i>Hordeum vulgare L.</i> cultivado en un suelo contaminado con hidrocarburos de un taller mecánico, Chilca - 2019?</p> <p>Problemas específicos:</p> <p>*¿Cuáles son las características fisicoquímicas del suelo contaminado con hidrocarburos de un taller mecánico, Chilca - 2019?</p> <p>*¿Cuál es el efecto de la aplicación del vermicompost con dosis de 0 %, 50 %, 70 % en las propiedades físicas y químicas de un suelo contaminado con hidrocarburos de un taller mecánico, Chilca - 2019?</p> <p>*¿Cuál es el efecto de la aplicación del vermicompost con dosis de 0 %, 50 %, 70 % en la biomasa seca aérea y radicular de <i>Hordeum vulgare L.</i> cultivado en un suelo contaminado con hidrocarburos de un taller mecánico, Chilca - 2019?</p>	<p>Objetivo general:</p> <p>Determinar el efecto de la aplicación de diferentes dosis de vermicompost en la biomasa de <i>Hordeum vulgare L.</i> cultivado en un suelo contaminado con hidrocarburos de un taller mecánico, Chilca - 2019.</p> <p>Objetivos específicos:</p> <p>*Determinar las características fisicoquímicas del suelo contaminado con hidrocarburos de un taller mecánico, Chilca - 2019.</p> <p>*Determinar el efecto de la aplicación del vermicompost con dosis de 0 %, 50 %, 70 % en las propiedades físicas y químicas de un suelo contaminado con hidrocarburos de un taller mecánico, Chilca - 2019.</p> <p>*Determinar el efecto de la aplicación del vermicompost con dosis de 0 %, 50 %, 70 % en la biomasa seca aérea y radicular de <i>Hordeum vulgare L.</i> cultivado en un suelo contaminado con hidrocarburos de un taller mecánico, Chilca - 2019.</p>	<p>Hipótesis general:</p> <p>*H<sub>1</sub>: La aplicación de diferentes dosis de vermicompost afecta positivamente en la biomasa de <i>Hordeum vulgare L.</i> cultivado en un suelo contaminado con hidrocarburos de un taller mecánico, Chilca - 2019.</p> <p>*H<sub>0</sub>: La aplicación de diferentes dosis de vermicompost no afecta positivamente en la biomasa de <i>Hordeum vulgare L.</i> cultivado en un suelo contaminado con hidrocarburos de un taller mecánico, Chilca - 2019.</p>	<p>Variable independiente:</p> <p>*Vermicompost.</p> <p>Variable dependiente:</p> <p>*Suelos contaminados con hidrocarburos.</p> <p>*Cebada (<i>Hordeum vulgare L.</i>).</p>	<p>Método general y específico:</p> <p>*Hipotético - deductivo.</p> <p>Tipo de investigación:</p> <p>*Aplicada.</p> <p>Nivel de investigación:</p> <p>*Explicativa.</p> <p>Diseño de la investigación:</p> <p>*Experimental.</p> <p>Población:</p> <p>*La población está constituida por el suelo contaminado del taller mecánico "Unión" en el distrito de Chilca.</p> <p>Muestra:</p> <p>*La muestra está constituida por la masa de un suelo representativo del taller mecánico "Unión", contaminado con derrames derivados del petróleo, en una cantidad aproximada de 20kg, obtenidas a partir de 20 muestras simples para construir una muestra compuesta, en un área aproximada de 90 m<sup>2</sup>.</p>

Anexo 02. Resultados de los análisis de las muestras de suelo.

Página 1 de 4



LABORATORIO DE ENSAYO ACREDITADO POR EL  
ORGANISMO PERUANO DE ACREDITACIÓN INACAL - DA  
CON REGISTRO N° LE - 028



**INFORME DE ENSAYO N° MA19120130  
CON VALOR OFICIAL**

**Nombre del Cliente** : ERIKA MILAGROS ESPINOZA ESTRELLA  
**Domicilio Legal** :  
**Solicitado Por** : ERIKA MILAGROS ESPINOZA ESTRELLA  
**Referencia:** MUESTRA COMPUESTA SUPERFICIAL

**DATOS DE LA MUESTRA**

**Procedencia** : HUANCAYO - JUNIN **Fecha de Muestreo** : 03/12/2019  
**Plan de Muestreo** : Realizado por el Cliente **Fecha de Recepción** : 05/12/2019  
**Cantidad de Muestras** : 9 **Fecha Inicio Ensayo** : 05/12/2019  
**Condición de la Muestra** : Frascos de plástico y/o vidrio, preservados y refrigerados

**MÉTODOS DE ENSAYO**

Parámetros	Normas
Capacidad Intercambio Catiónico (*)	NOM-021-RECNAT-2000 AS-12
Carbonatos (*)	NOM-021-RECNAT-2000 AS-29
Clase Textural (*)	NOM-021-RECNAT-2000 AS-09
Densidad (*)	NOM-021-RECNAT-2000 AS-05
Fosforo disponible (*)	NOM-021-RECNAT-2000 AS-10
Materia orgánica (*)	NOM-021-RECNAT-2000 AS-07
Nitrógeno total - kjeldahl (suelos) (*)	NOM-021-SEMARNAT-2000, Item 7.3.17 AS-25 y Item 7.1.8 AS-08. Especificaciones de Fertilidad, Salinidad y clasificación de suelo (Validado-Modificado)
pH - Suelos	EPA 9045-D, Rev4, 2004
Porosidad (*)	NOM-021-RECNAT-2000 AS-05
Potasio disponible (*)	NOM-021-RECNAT-2000 AS-19
Salinidad (*)	NOM-021-RECNAT, 2000

(\*) Los métodos indicados no han sido acreditados por el INACAL-DA.

SIGLAS: "EPA": U.S. Environmental Protection Agency. Methods for Chemical Analysis of Water and Wastes.

**USO DEL INFORME**

- 1.- El presente informe solo es válido para el lote de muestras de la referencia.
- 2.- El lote de muestras que incluye el presente informe y/o muestras dimitidas en el caso que sean solicitadas por el cliente o entidad licitante serán descartadas a los 30 días calendario de la fecha de emisión de este documento, salvo que su preservación exija un periodo menor, en este caso el periodo de custodia será definido por los requisitos del método empleado.
- 3.- El presente informe de ensayo es un documento oficial de interés público, su adulteración o uso indebido constituye delito contra la fe pública y es regulada de acuerdo a las leyes vigentes tanto en materia civil como penal. Está prohibida la reproducción parcial o total del presente informe, salvo autorización escrita de J. Ramón del Perú S.A.C.
- 4.- Los resultados de los ensayos no deben ser utilizados como una certificación de conformidad con normas de producto o como certificado del sistema de calidad de la entidad que lo produce.

45 años al servicio de la Minería y el Medio Ambiente. Visitenos en : [www.jramoncorp.com](http://www.jramoncorp.com)



Laboratorio: Av. Los Eucaliptos, Sector Santa Gertrudis, Parcela 5 Lurin  
Central: +51 1 5133399  
E-mail: [jramon@jramoncorp.com](mailto:jramon@jramoncorp.com)



LABORATORIO DE ENSAYO ACREDITADO POR EL  
ORGANISMO PERUANO DE ACREDITACIÓN INACAL - DA  
CON REGISTRO N° LE - 028



### INFORME DE ENSAYO N° MA19120130 CON VALOR OFICIAL

Cod. Cliente	M1	M2	M3	M4	M5		
Cod. Lab.	MA19120130.01	MA19120130.02	MA19120130.03	MA19120130.04	MA19120130.05		
Tipo de Producto	Suelo; suelo	Suelo; suelo	Suelo; suelo	Suelo; suelo	Suelo; suelo		
Fecha de Muestreo	03/12/2019	03/12/2019	03/12/2019	03/12/2019	03/12/2019		
Hora de Muestreo	16:00	16:00	16:00	16:15	16:25		
Cadena de Custodia	54654	54654	54654	54654	54654		
Parámetros	Unidad	L.D.	Resultados				
Capacidad Intercambio Catiónico (*)			0,30	0,30	1,47	4,46	4,94
Aluminio	meq/100g	N.A.	0,04	0,03	0,09	0,00	0,00
Calcio Intercambiable	meq/100g	N.A.	24,21	24,15	25,18	28,38	31,65
Magnesio Intercambiable	meq/100g	N.A.	1,51	1,59	2,14	10,57	11,52
Potasio Intercambiable	meq/100g	N.A.	0,50	0,52	0,57	4,16	5,33
Sodio Intercambiable	meq/100g	N.A.	0,01	0,03	1,46	4,46	4,94

Cod. Cliente	M6	M7	M8	M9		
Cod. Lab.	MA19120130.06	MA19120130.07	MA19120130.08	MA19120130.09		
Tipo de Producto	Suelo; suelo	Suelo; suelo	Suelo; suelo	Suelo; suelo		
Fecha de Muestreo	03/12/2019	03/12/2019	03/12/2019	03/12/2019		
Hora de Muestreo	16:35	16:45	16:50	17:00		
Cadena de Custodia	54654	54654	54654	54654		
Parámetros	Unidad	L.D.	Resultados			
Capacidad Intercambio Catiónico (*)			4,78	9,54	6,83	7,39
Aluminio	meq/100g	N.A.	0,00	0,01	0,00	0,00
Calcio Intercambiable	meq/100g	N.A.	29,98	34,80	33,36	33,59
Magnesio Intercambiable	meq/100g	N.A.	10,82	16,06	14,40	13,61
Potasio Intercambiable	meq/100g	N.A.	5,18	9,11	7,84	5,23
Sodio Intercambiable	meq/100g	N.A.	4,78	9,65	6,83	7,39

#### USO DEL INFORME:

- 1.- El presente informe solo es válido para el lote de muestras de la referencia.
- 2.- El lote de muestras que incluye el presente informe y/o muestras derivadas en el caso que sean solicitadas por el cliente o entidad licitante serán descartadas a los 30 días calendario de la fecha de emisión de este documento, salvo que su practicidad exija un periodo menor, en este caso el periodo de custodia será definido por los requisitos del método empleado.
- 3.- El presente informe de ensayo es un documento oficial de interés público, su adulteración o uso indebido constituye delito contra la fe pública y es regulada de acuerdo a las leyes vigentes tanto en materia civil como penal. Está prohibida la reproducción parcial o total del presente informe, salvo autorización escrita de J. Ramon del Perú S.A.C.
- 4.- Los resultados de los ensayos no deben ser utilizados como una certificación de conformidad con normas de producto o como certificado del sistema de calidad de la entidad que lo produce.

45 años al servicio de la Minería y el Medio Ambiente. Visitenos en : [www.jramoncorp.com](http://www.jramoncorp.com)



Laboratorio: Av. Los Eucaliptos, Sector Santa Genoveva, Parcela 5 Lurín  
Central: +51 1 5133990  
E-mail: [jramon@jramoncorp.com](mailto:jramon@jramoncorp.com)



LABORATORIO DE ENSAYO ACREDITADO POR EL  
ORGANISMO PERUANO DE ACREDITACIÓN INACAL - DA  
CON REGISTRO N° LE - 028



Registro N°LE - 028

### INFORME DE ENSAYO N° MA19120130 CON VALOR OFICIAL

Cod. Cliente	M1	M2	M3	M4	M5		
Cod. Lab.	MA19120130.01	MA19120130.02	MA19120130.03	MA19120130.04	MA19120130.05		
Tipo de Producto	Suelo; suelo	Suelo; suelo	Suelo; suelo	Suelo; suelo	Suelo; suelo		
Fecha de Muestreo	03/12/2019	03/12/2019	03/12/2019	03/12/2019	03/12/2019		
Hora de Muestreo	16:00	16:00	16:08	16:15	16:25		
Cadena de Custodia	54654	54654	54654	54654	54654		
Parámetros	Unidad	L.D.	Resultados				
Carbonatos (*)	%	0,1	2,92	1,34	1,83	2,28	1,93
Densidad (*)	g/cm3	N.A.	0,22	0,25	0,32	0,30	0,19
Fosforo disponible (*)	ppm	0,10	12,42	11,46	12,42	54,94	146,5
Materia orgánica (*)	%	0,01	23,2	39,12	29,6	24,08	45,2
Nitrogeno total - kjeldahl (suelos) (*)	mg/kg	0,5	497,2	992,2	732,9	625,8	1.133
pH - Suelos	Und. pH	0,01	7,61	7,59	7,56	7,50	7,71
Porosidad (*)	%	1	<1	<1	<1	<1	<1
Potasio disponible (*)	mg/kg	0,3	8,36	13,53	10,36	78,12	82,35
Salinidad (*)	ppt	1	1,34	1,89	1,65	3,22	3,99
Clase Textural (*)							
Porcentaje de arcilla	%	0,5	1,44	1,44	1,44	1,44	1,44
Porcentaje de arena	%	0,5	96,56	96,56	96,56	96,56	96,56
Porcentaje de limo	%	0,5	2,00	2,00	0,00	0,00	2,00
Clase Textural (*)	NA	-	Arenosa	Arenosa	Arenosa	Arenosa	Arenosa

#### USO DEL INFORME

- 1.- El presente informe solo es válido para el lote de muestras de la referencia.
- 2.- El lote de muestras que incluye el presente informe y/o muestras diferentes en el caso que sean solicitadas por el cliente o entidad licitante serán descartadas a los 30 días calendario de la fecha de emisión de este documento, salvo que su permeabilidad sea un periodo menor, en este caso el periodo de custodia será definido por los requisitos del método empleado.
- 3.- El presente informe de ensayo es un documento oficial de interés público, su adulteración o uso indebido constituye delito contra la fe pública y es regulada de acuerdo a las leyes vigentes tanto en materia civil como penal. Está prohibida la reproducción parcial o total del presente informe, salvo autorización escrita de J. Ramon del Perú S.A.C.
- 4.- Los resultados de los ensayos no deben ser utilizados como una certificación de conformidad con normas de producto o como certificado del sistema de calidad de la entidad que lo produce.

45 años al servicio de la Minería y el Medio Ambiente. Visitenos en : [www.jramoncorp.com](http://www.jramoncorp.com)



Laboratorio: Av. Los Eucaliptos, Sector Santa Genoveva, Parcela 5 Lurin  
Central: +51 1 5133390  
E-mail: [jramon@jramoncorp.com](mailto:jramon@jramoncorp.com)



LABORATORIO DE ENSAYO ACREDITADO POR EL  
ORGANISMO PERUANO DE ACREDITACIÓN INACAL - DA  
CON REGISTRO N° LE - 028



### INFORME DE ENSAYO N° MA19120130 CON VALOR OFICIAL

Cod. Cliente	M5		M7		M8		M9	
	MA19120130.05		MA19120130.07		MA19120130.08		MA19120130.09	
Cod. Lab.	MA19120130.05		MA19120130.07		MA19120130.08		MA19120130.09	
Tipo de Producto	Suelo; suelo		Suelo; suelo		Suelo; suelo		Suelo; suelo	
Fecha de Muestreo	03/12/2019		03/12/2019		03/12/2019		03/12/2019	
Hora de Muestreo	16:35		16:45		16:50		17:00	
Cadena de Custodia	54654		54654		54654		54654	
Parámetros	Unidad	L.D.	Resultados					
Carbonatos (*)	%	0,1	2,28	1,83	2,38	<0,10		
Densidad aparente(*)	g/cm3	N.A.	0,35	0,16	0,19	0,16		
Fosforo disponible (*)	ppm	0,10	159,2	345,5	283,4	265,9		
Materia orgánica (*)	%	0,01	38,16	20,32	25,28	49,28		
Nitrógeno total - kjeldahl (suelos) (*)	mg/kg	0,5	975,3	501,7	620,1	1 314		
pH - Suelos	Und. pH	0,01	7,51	7,58	7,65	7,57		
Porosidad (*)	%	1	<1	<1	<1	<1		
Potasio disponible (*)	mg/kg	0,3	91,24	124,5	105,5	81,25		
Salinidad (*)	ppt	1	1,73	5,02	3,39	3,33		
<b>Clase Textural (*)</b>								
Porcentaje de arcilla	%	1	1,44	1,44	1,44	1,44		
Porcentaje de arena	%	1	96,56	96,56	96,56	94,56		
Porcentaje de limo	%	1	2,00	0,00	0,00	4,00		
Clase Textural (*)	NA	-	Arenosa	Arenosa	Arenosa	Arenosa		

Legenda: L.D = Límite de detección PS= Peso Seco N.A. = No aplica

(\*) Los métodos indicados no han sido acreditados por el INACAL-DA.

Tiempo de Perecibilidad de Muestras	
Carbonatos y Bicarbonatos : 14días	Salinidad : 90días

Lurin, 16 de Diciembre del 2019

*Zaida Contreras*  
Zaida Contreras Pacheco  
Supervisora de Laboratorio Químico  
CGP 1162

#### USO DEL INFORME

- 1.- El presente informe solo es válido para el lote de muestras de la referencia.
- 2.- El lote de muestras que incluye el presente informe y/o muestras dirimientes en el caso que sean solicitadas por el cliente o entidad licitante serán descartadas a los 30 días calendario de la fecha de emisión de este documento, salvo que su perecibilidad exija un periodo menor, en este caso el periodo de custodia será definido por los requisitos del método empleado.
- 3.- El presente informe de ensayo es un documento oficial de interés público, su adulteración o uso indebido constituye delito contra la fe pública y es regulada de acuerdo a las leyes vigentes tanto en materia civil como penal. Está prohibida la reproducción parcial o total del presente informe, salvo autorización escrita de J. Ramon del Perú S.A.C.
- 4.- Los resultados de los ensayos no deben ser utilizados como una certificación de conformidad con normas de producto o como certificado del sistema de calidad de la entidad que lo produce.

45 años al servicio de la Minería y el Medio Ambiente. Visitenos en : [www.jramoncorp.com](http://www.jramoncorp.com)



Laboratorio: Av. Los Eucaliptos, Sector Santa Genoveva, Parcela 5 Lurin  
Central: +51 1 5133300  
E-mail: [jramon@jramoncorp.com](mailto:jramon@jramoncorp.com)



LABORATORIO DE ENSAYO ACREDITADO POR EL  
ORGANISMO PERUANO DE ACREDITACIÓN INACAL - DA  
CON REGISTRO N° LE - 028



## INFORME DE ENSAYO N° SA19090330 CON VALOR OFICIAL

Nombre del Cliente : ELIZABETH GUSELLA MACHUCA MARIQUE  
Domicilio Legal :  
Solicitado Por : ELIZABETH GUSELLA MACHUCA MARIQUE  
Referencia : MUESTRA COMPUESTA SUPERFICIAL

### DATOS DE LA MUESTRA

Procedencia : HUANCAYO JUNIN  
Fecha de Muestreo : 08/06/2019  
Plan de Muestreo : Realizado por el Cliente  
Fecha de Recepción : 08/09/2019  
Cantidad de Muestras : 1  
Fecha Inicio Ensayo : 08/09/2019  
Condición de la Muestra : Frascos de plástico y/o vidrio, preservados y refrigerados

### MÉTODOS DE ENSAYO

Parámetros	Normas
Capacidad Intercambio Catiónica (°)	NOM-021-REGC/M7-2000, AB-10
Carbonato de calcio (°)	NOM-021-REGC/M7-2000
Clase Textural (°)	NOM-021-REGC/M7-2000, AB-09
Densidad (°)	NOM-021-REGC/M7-2000, AB-05
Potasio disponible (°)	NOM-021-REGC/M7-2000, AB-10
Materia orgánica (°)	NOM-021-REGC/M7-2000, AB-07
Nitrógeno total - Kjeldahl (sueros) (°)	NOM-021-REGC/M7-2000, Item 7.3.17, AN-2017 Item 7.1, ICA-08, Especificaciones de Pureza, Estabilidad y Clasificación de suero (último Modificado)
pH - Suero	BPA 9045-01, Rev.4, 2004
Porosidad (°)	NOM-021-REGC/M7-2000, AB-05
Potasio disponible (°)	NOM-021-REGC/M7-2000, AB-10
Salinidad (°)	NOM-021-REGC/M7-2000

8044B "PVA" U.S. Environmental Protection Agency Methods for Chemical Analysis of Water and Wastes

#### NOTAS IMPORTANTES

- 1.- El presente informe solo es válido para el lote de muestras de la referencia.
- 2.- El lote de muestras que incluye al presente informe, y/o muestras diferentes en el caso que sean solicitadas por el cliente o entidad demandante serán desechadas a los 30 días calendario de la fecha de emisión de este documento, salvo que la particularidad de un particular método de ensayo o el período de validez de este informe sea definido por los requisitos del método aplicado.
- 3.- El presente informe de ensayo es un documento oficial de carácter público, su elaboración y sus contenidos concuerdan íntegramente con la ley y los requisitos de acuerdo a las leyes vigentes sobre el tema en el caso que corresponda. Este documento es reproducción parcial o total del presente informe, salvo autorización expresa de J. Ramon del Perú S.A.S.
- 4.- Los resultados de los ensayos no deben ser utilizados como una declaración de conformidad con normas de productos o como certificado del sistema de calidad de la entidad que lo produce.

40 años al servicio de la Minería y el Medio Ambiente. Visite en : [www.jramoncorp.com](http://www.jramoncorp.com)



Laboratorio Av. Los Escaleros, Sector Santa Gertrudis, Píscata II Lote  
Central - 01 1 855588  
Email: [jramon@jramoncorp.com](mailto:jramon@jramoncorp.com)



LABORATORIO DE ENSAYO ACREDITADO POR EL  
ORGANISMO PERUANO DE ACREDITACIÓN INACAL - DA  
CON REGISTRO N° LE - 028



### INFORME DE ENSAYO N° SA19090330 CON VALOR OFICIAL

Cod. Cliente	M1		
Cod. Lab.	MA19090078.01		
Tipo de Producto	Suelo; suelo		
Fecha de Muestreo	02/08/2019		
Hora de Muestreo	10:00		
Cadena de Custodia	53910		
Parámetros	Unidad	L.D.	Resultados
Capacidad Intercambio Cationico (*)			5,84
Calcio Intercambiable	meq/100g	N.A.	21,01
Magnesio Intercambiable	meq/100g	N.A.	4,61
Potasio Intercambiable	meq/100g	N.A.	0,62
Sodio Intercambiable	meq/100g	N.A.	0,55

Cod. Cliente	M1		
Cod. Lab.	MA19090078.01		
Tipo de Producto	Suelo; suelo		
Fecha de Muestreo	02/08/2019		
Hora de Muestreo	10:00		
Cadena de Custodia	53910		
Parámetros	Unidad	L.D.	Resultados
Carbonatos (*)	%	0,10	<0,10
Densidad aparente(*)	g/cm3	N.A.	1,20
Fosforo disponible (*)	ppm	0,1	21,74
Potasio disponible (*)	mg/kg	0,3	75,21
Materia orgánica (*)	%	0,01	12,48
Nitrógeno total - kjeldahl (suelos) (*)	mg/kg	0,5	242,4
pH - Suelos	Und. pH	r	7,67
Porosidad (*)	%	1	1
Porcentaje de Arena (*)	%	0,50	86,56
Porcentaje de Arcilla (*)	%	0,50	5,44
Porcentaje de Limo (*)	%	0,50	8,00
Clase Textural (*)	NA	-	Areno Fr.
Salinidad (*)	ppt	1	1,18

Legenda: LD = Límite de detección PS= Peso Seco r = Resolución N.A. = No aplica

Tempo de Percibilidad de Muestras
Salinidad : 90días

Lurin, 18 de Septiembre del 2019

*Zaida Contreras*  
Zaida Contreras Pachterre  
Supervisora de Laboratorio Químico  
CQP 1162

#### USO DEL INFORME

- 1.- El presente informe solo es válido para el lote de muestras de la referencia.
- 2.- El lote de muestras que incluye el presente informe y/o muestras derivadas en el caso que sean solicitadas por el cliente o entidad solicitante serán descartadas a los 30 días calendario de la fecha de emisión de este documento, salvo que su perecibilidad sea un periodo menor, en este caso el periodo de custodia será definido por los requisitos del método empleado.
- 3.- El presente informe de ensayo es un documento oficial de interés público, su adulteración o uso indebido constituye delito contra la fe pública y es regulada de acuerdo a las leyes vigentes tanto en materia civil como penal. Esta prohibida la reproducción parcial o total del presente informe, salvo autorización escrita de J. Ramon del Perú S.A.C.
- 4.- Los resultados de los ensayos no deben ser utilizados como una certificación de conformidad con normas de producto o como certificado del sistema de calidad de la entidad que lo produce.

45 años al servicio de la Minería y el Medio Ambiente. Visitenos en : [www.jramoncorp.com](http://www.jramoncorp.com)



Laboratorio: Av. Los Eucaliptos, Sector Santa Genoveva, Parcela 5 Lurin  
Central: +51 1 5133399  
E-mail: [jramon@jramoncorp.com](mailto:jramon@jramoncorp.com)



UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA  
FACULTAD DE CIENCIAS

LABICER (Laboratorio N° 12)

ANÁLISIS QUÍMICO, CONSULTORÍA E INVESTIGACIÓN



**INFORME TÉCNICO N° 1431 – 19 – LABICER**

1. **DATOS DEL SOLICITANTE**
  - 1.1 NOMBRE DEL SOLICITANTE : ELIZABETH GUISELLA MACHUCA MANRIQUE
  - 1.2 DNI : 19856626
2. **CRONOGRAMA DE FECHAS**
  - 2.1 FECHA DE RECEPCIÓN : 13 / 08 / 2019
  - 2.2 FECHA DE EMISIÓN : 20 / 08 / 2019
3. **ANÁLISIS SOLICITADO** : ANÁLISIS QUÍMICO
4. **DATOS REFERENCIALES DE LA MUESTRA SEGÚN EL CLIENTE**
  - 4.1 IDENTIFICACIÓN DE LA MUESTRA : 01 MUESTRA DE SUELO DE TALLER MECÁNICO
  - 4.2 PROCEDENCIA : TALLER MECÁNICO UNIÓN, CHILCA - HUANCAYO
  - 4.3 FECHA DE MUESTREO : 02 / 08 / 2019
5. **LUGAR DE RECEPCIÓN DE LA MUESTRA** : LABORATORIO LABICER - FACULTAD DE CIENCIAS
6. **CONDICIONES AMBIENTALES** : Temperatura: 20°C; Humedad relativa: 60 %
7. **EQUIPO UTILIZADO** : Equipo de Ultrasonido. DAIHAN Scientific, WUC-D10H.
8. **RESULTADOS**

ANÁLISIS	RESULTADO	MÉTODO DE REFERENCIA
Hidrocarburos totales de petróleo (HTP)	43386.7 ppm (ug de HTP/g de muestra) < 4.34 %	EPA 3550C

9. **VALIDEZ DEL INFORME TÉCNICO**

El Informe técnico es válido solo para la muestra y las condiciones indicadas en los ítems del uno (1) al cuatro (4) del presente informe técnico.

Bach. Natalia Chávez  
Analista Químico  
LABICER – UNI

MSc Otilia Acha de la Cruz  
Responsable de Análisis  
Jefa de Laboratorio  
CQP 202

El Laboratorio no se responsabiliza del muestreo ni de la procedencia de la muestra.





## INFORME DE ANALISIS DE MATERIA ORGANICA

SOLICITANTE : ELIZABETH GUISELLA MACHUCA MANRIQUE  
PROCEDENCIA : JUNÍN/ HUANCAYO  
MUESTRA DE : HUMUS DE LOMBRIZ  
REFERENCIA : H.R. 69777  
BOLETA : 3448  
FECHA : 10/09/19

Nº LAB	CLAVES	pH	C.E. dS/m	M.O. %	N %	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> %	K <sub>2</sub> O %
861	-	7.76	19.40	23.40	1.56	2.77	0.29

Nº LAB	CLAVES	CaO %	MgO %	Hd %	Na %
861	-	7.23	1.37	48.81	0.77

  
Ing. Braulio La Torre Martínez  
Jefe de Laboratorio

Anexo 03. Gráficos estadísticos complementarios.

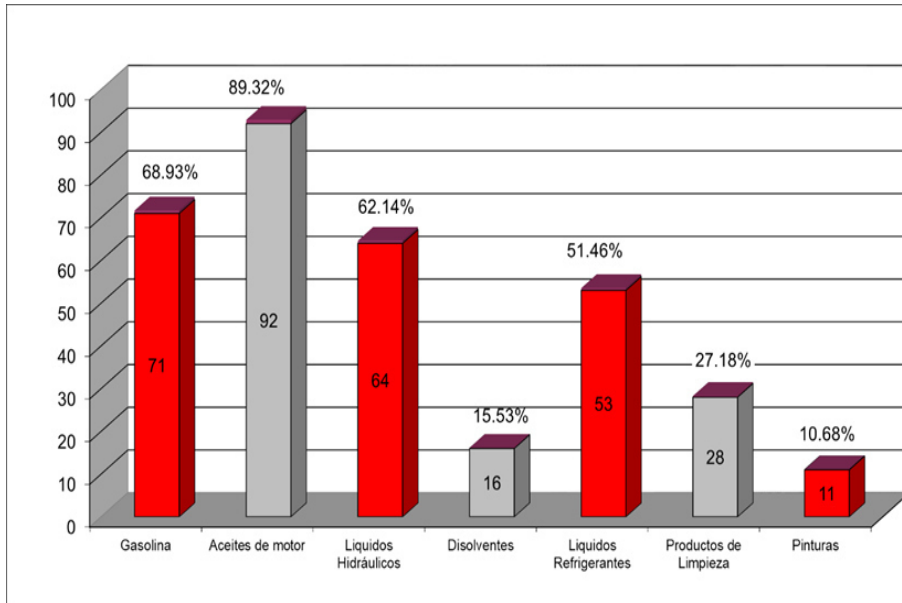


Gráfico. Insumos que utilizan en los talleres mecánicos del distrito de Chilca - Huancayo.

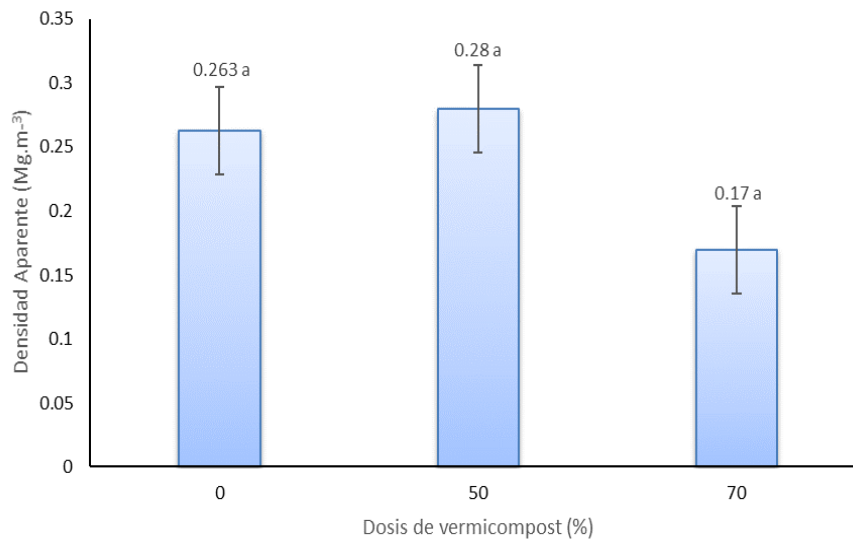


Gráfico. Densidad aparente según la dosis de vermicompost. Las barras al extremo superior de los rectángulos, representan el error típico.

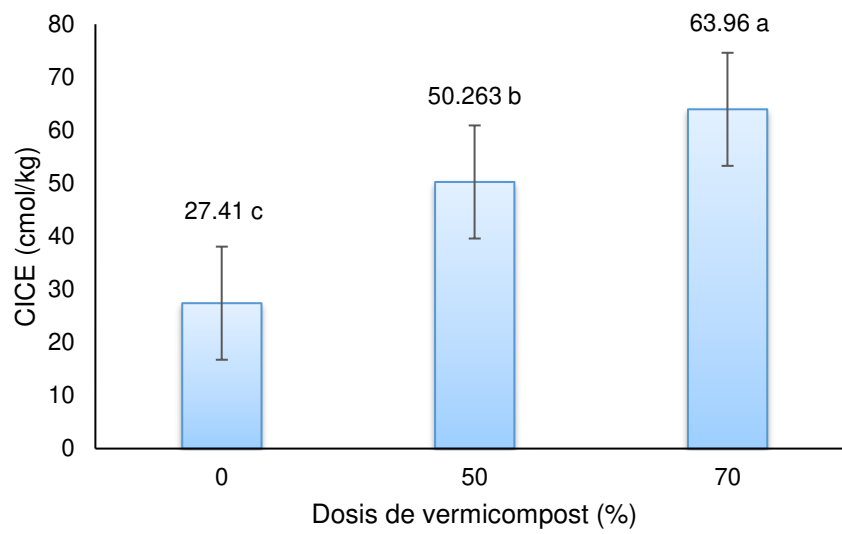


Gráfico. Capacidad de Intercambio Catiónica Efectiva (CICE) según la dosis de vermicompost. Las barras al extremo superior de los rectángulos representan el error típico.

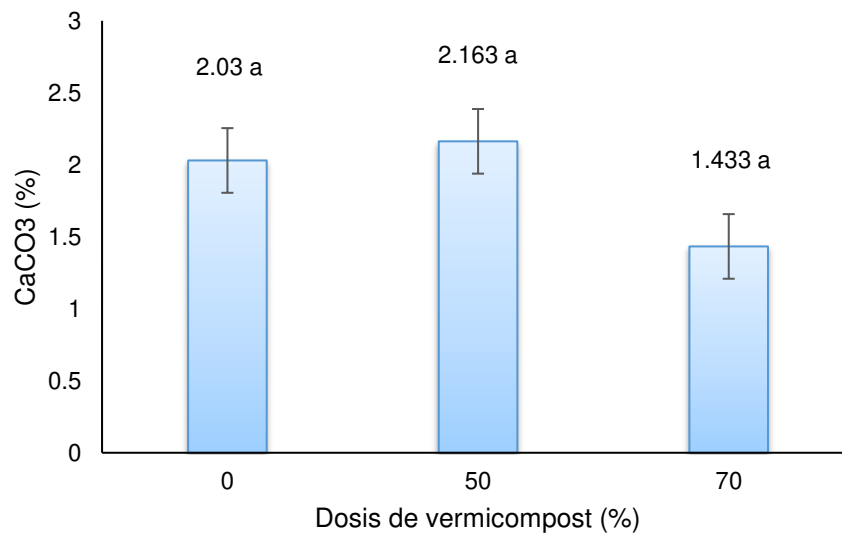


Gráfico. Contenido de Carbonato de Calcio según la dosis de vermicompost. Las barras al extremo superior de los rectángulos representan el error típico.

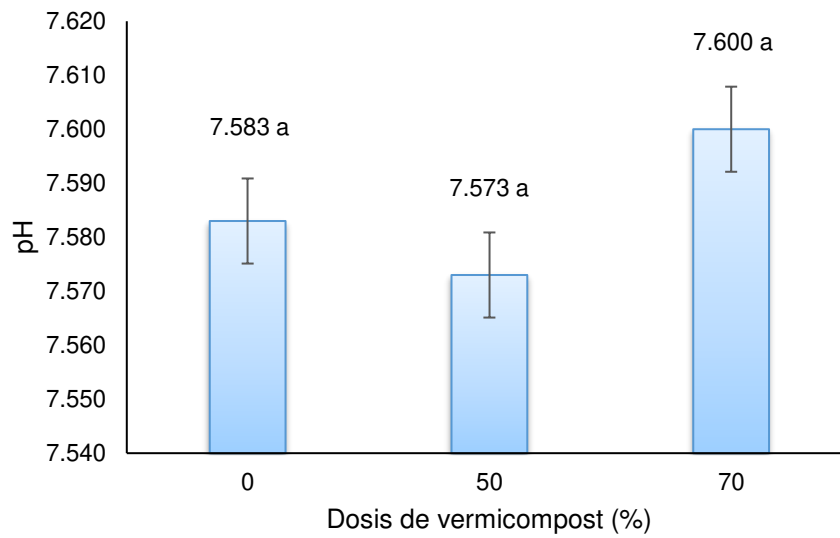


Gráfico. pH del suelo según la dosis de vermicompost. Las barras al extremo superior de los rectángulos representan el error típico.

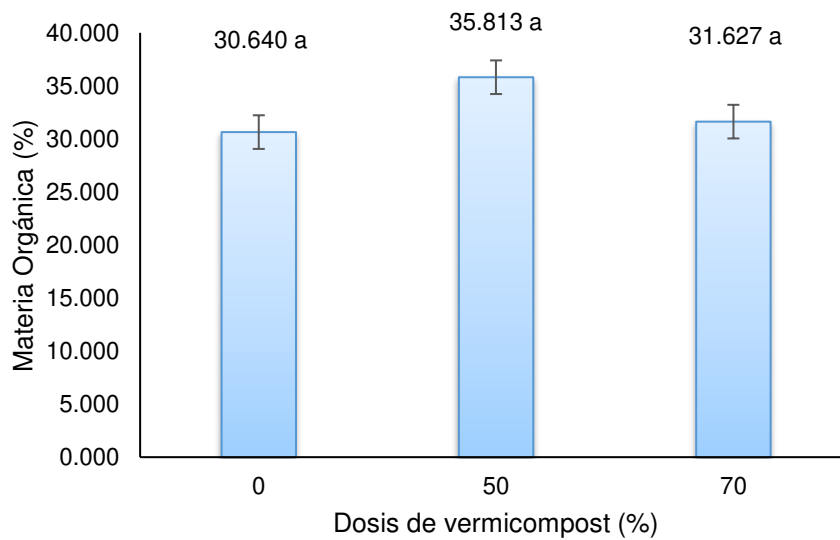


Gráfico. Contenido de materia orgánica del suelo, según la dosis de vermicompost. Las barras al extremo superior de los rectángulos representan el error típico.

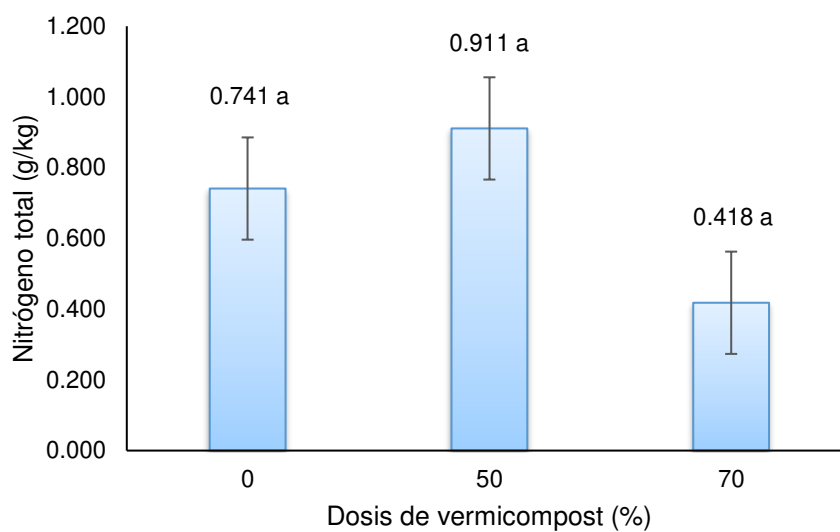


Gráfico. Contenido de nitrógeno total del suelo según la dosis de vermicompost. Las barras al extremo superior de los rectángulos representan el error típico.

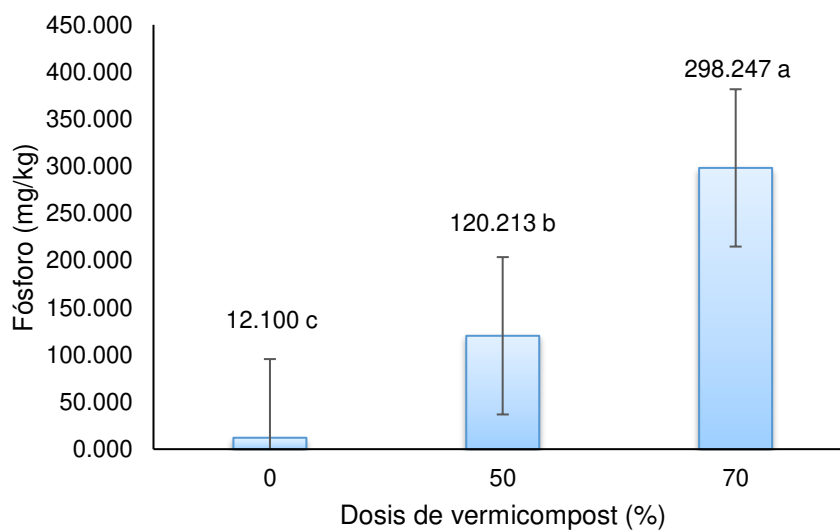


Gráfico. Contenido de fósforo disponible del suelo según la dosis de vermicompost. Las barras al extremo superior de los rectángulos representan el error típico.

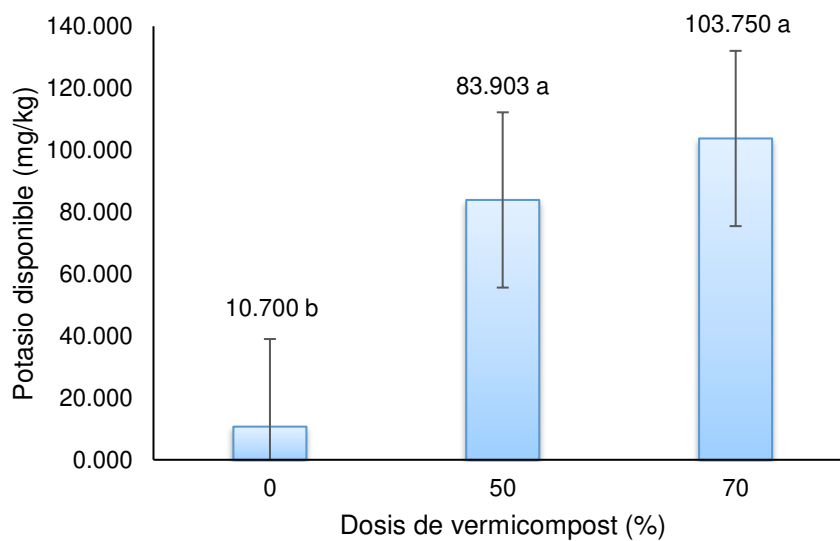


Gráfico. Contenido de potasio disponible del suelo según la dosis de vermicompost. Las barras al extremo superior de los rectángulos representan el error típico.

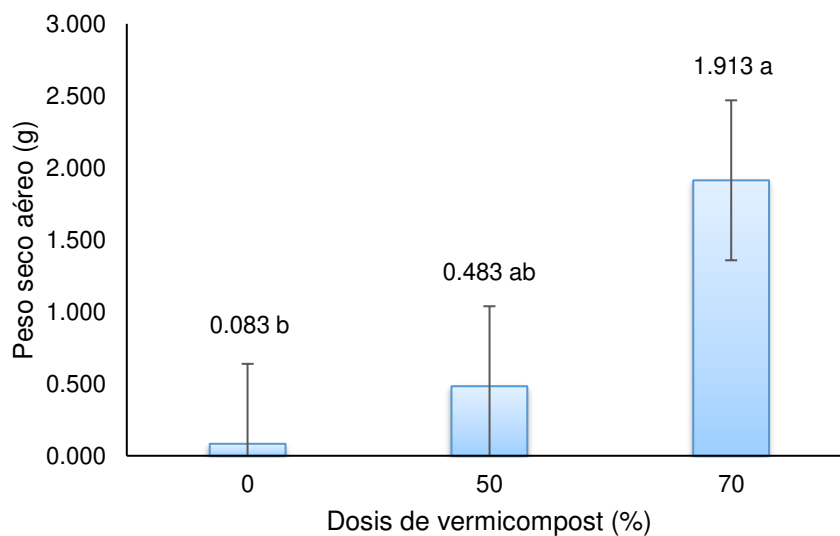


Gráfico. Peso seco aéreo de *Hordeum vulgare L.* según la dosis de vermicompost. Las barras al extremo superior de los rectángulos representan el error típico.

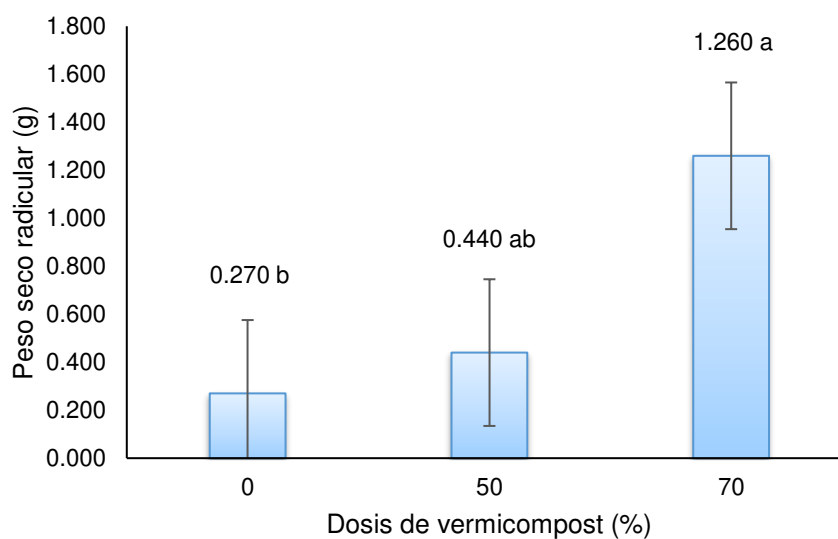


Gráfico. Peso seco radicular de *Hordeum vulgare* L. según la dosis de vermicompost. Las barras al extremo superior de los rectángulos representan el error típico.

### Anexo 03. Escala de interpretación de los análisis de suelos.

#### 1. Textura<sup>1</sup>:

Términos Generales		Clase textural	Símbolo
Suelos	Textura		
Arenosos	Gruesa	Arena	A.
		Arena franca	A.Fr.
Francos	Moderadamente gruesa	Franco arenoso	Fr.A.
	Media	Franco	Fr.
		Franco limoso	Fr.L.
		Limoso	L.
	Moderadamente fina	Franco arcilloso	Fr.Ar.
		Franco arcillo limoso	Fr.Ar.L.
Franco arcillo arenoso		Fr.Ar.A.	
Arcillosos	Fina	Arcillo arenoso	Ar.A.
		Arcillo limoso	Ar.L.
		Arcilloso	Ar.

2. Profundidad efectiva <sup>1</sup>:

<b>Término descriptivo</b>	<b>Profundidad (cm)</b>
Muy superficial	< 25
Superficial	25 - 50
Moderadamente profundo	50 - 100
Profundo	100 - 150
Muy profundo	> 150

3. Pendiente <sup>2</sup>:

<b>Pendientes cortas (laderas cortas) %</b>	<b>Pendientes largas (laderas largas) %</b>
0 - 4	0 - 2
4 - 8	2 - 4
8 - 15	4 - 8
15 - 25	8 - 15
25 - 50	15 - 25
50 - 75	25 - 50
> 75	50 - 75
	> 75

4. pH <sup>1</sup>:

<b>Rangos</b>	<b>Clases</b>
< 3.5	Ultra ácido
3.6 - 4.4	Extremadamente ácido
4.5 - 5.0	Muy fuertemente ácido
5.1 - 5.5	Fuertemente ácido
5.6 - 6.0	Moderadamente ácido
6.1 - 6.5	Ligeramente ácido
6.6 - 7.3	Neutro
7.4 - 7.8	Ligeramente alcalino



7.9 - 8.4	Moderadamente alcalino
8.5 - 9.0	Fuertemente alcalino
> 9.0	Muy fuertemente alcalino

5. Conductividad eléctrica <sup>1</sup>:

Clase	Calificación	Conductividad eléctrica dS/m
0	No salino	0 - 2
1	Muy ligeramente salino	2 - 4
2	Ligeramente salino	4 - 8
3	Moderadamente salino	8 - 16
4	Fuertemente salino	≥ 16

6. Materia orgánica <sup>2</sup>:

Nivel	%
Bajo	< 2
Medio	2 - 4
Alto	> 4

7. Fósforo disponible <sup>2</sup>:

Nivel	P (mg/kg)
Bajo	< 7
Medio	7 - 14
Alto	> 14

8. Potasio disponible <sup>2</sup>:

Nivel	K (mg/kg)
Bajo	< 100
Medio	100 - 240
Alto	> 240

9. Capacidad de Intercambio Catiónico <sup>3</sup>:

Nivel	CIC (cmol/kg)
Muy baja	< 4
Moderadamente baja	4 - 8
Baja	8 - 12
Moderadamente alta	12 - 20
Alta	> 20

10. Saturación de bases <sup>3</sup>:

Nivel	Suma de Cationes (%)	Acetato de Amonio (%)
Bajo	< 35	< 50
Medio	> 35	> 50

11. Calcáreo:

Nivel	P (mg/kg)
Bajo	< 1
Medio	1 - 5
Alto	5 - 15
Muy alto	> 15

12. Saturación de Aluminio <sup>3</sup>:

Nivel	Para cultivos		
	Susceptibles	Tolerantes	Muy tolerantes
Bajo	< 30	< 40	< 60
Alto	> 30	> 40	> 60

- (1) Soil Survey Division Staff. 1993. Soil Survey Manual. Soil Conservation Service. U.S. Department of Agriculture Handbook 18.  
 (2) Reglamento de Clasificación de Tierras según su Capacidad de Uso Mayor, Lima, Perú.  
 (3) Departamento de Suelos y Fertilizantes de la Universidad Nacional Agraria, La Molina 2002.

Cuadro 01. Composición de nutrientes del vermicompost y compost tradicional.

Nutrientes	Vermicompost	Compost convencional
N %	1.9	1.4
C/N	13.6	20.6
P (%)	2.0	1.8
K (%)	0.8	0.7
Zn (%)	100	80
Cu (ppm)	48	40
Mn (ppm)	500	260

Fuente: Practical on Vermicompost, Shahi, S.K.

Anexo 04. Panel fotográfico.



Fotografía 01. Taller mecánico "Unión".



*Fotografía 02. Recolección de muestras en el taller mecánico.*



*Fotografía 03. Chancado del suelo contaminado con hidrocarburos.*



*Fotografía 04. Tamizado del suelo contaminado con hidrocarburos.*



*Fotografía 05. Preparación de macetas para el experimento.*



*Fotografía 06. Humectación de las macetas.*



Fotografía 07. Siembra de la semilla de cebada (*Hordeum vulgare* L.).



Fotografía 08. Cultivo de *Hordeum vulgare* L. a los 23 días después de la siembra.



*Fotografía 09. Cultivo de Hordeum vulgare L. a los 70 días después de la siembra.  
Tratamiento 1 (muestra 1-3).*



*Fotografía 10. Cultivo de Hordeum vulgare L. a los 70 días después de la siembra.  
Tratamiento 2 (muestras 4-6).*



*Fotografía 11. Cultivo de Hordeum vulgare L. a los 70 días después de la siembra.  
Tratamiento 3 (muestra 7-9).*



*Fotografía 12. Extracción de la parte radicular.*





*Fotografía 13. Peso seco de la parte aérea de la biomasa del Hordeum vulgare L.*



*Fotografía 14. Peso seco de la parte radicular de la biomasa del Hordeum vulgare L.*



Fotografía 15. Pesado de las muestras de suelo para ser analizados.



Fotografía 16. Encuestas realizadas en los talleres mecánicos del distrito de Chilca.