

UNIVERSIDAD CATÓLICA SEDES SAPIENTIAE

FACULTAD DE INGENIERÍA AGRARIA



**Eficiencia de la lombriz roja californiana en la remoción de plomo
de suelos agrícolas adyacentes a la mina Colquisiri – Huaral**

**TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE
INGENIERO AMBIENTAL**

AUTORES

Andrea Liset Merca Menor

Silhi Marilet Pérez Herrera

ASESOR

Roger Manuel Mestas Valero

Lima, Perú

2022

METADATOS COMPLEMENTARIOS**Datos de los Autores****Autor 1**

Nombres	
Apellidos	
Tipo de documento de identidad	
Número del documento de identidad	
Número de Orcid (opcional)	

Autor 2

Nombres	
Apellidos	
Tipo de documento de identidad	
Número del documento de identidad	
Número de Orcid (opcional)	

Autor 3

Nombres	
Apellidos	
Tipo de documento de identidad	
Número del documento de identidad	
Número de Orcid (opcional)	

Autor 4

Nombres	
Apellidos	
Tipo de documento de identidad	
Número del documento de identidad	
Número de Orcid (opcional)	

Datos de los Asesores**Asesor 1**

Nombres	
Apellidos	
Tipo de documento de identidad	
Número del documento de identidad	
Número de Orcid (Obligatorio)	

Asesor 2

Nombres	
Apellidos	
Tipo de documento de identidad	
Número del documento de identidad	
Número de Orcid (Obligatorio)	

Datos del Jurado

Presidente del jurado

Nombres	
Apellidos	
Tipo de documento de identidad	
Número del documento de identidad	

Segundo miembro

Nombres	
Apellidos	
Tipo de documento de identidad	
Número del documento de identidad	

Tercer miembro

Nombres	
Apellidos	
Tipo de documento de identidad	
Número del documento de identidad	

Datos de la Obra

Materia*	
Campo del conocimiento OCDE Consultar el listado:	
Idioma	
Tipo de trabajo de investigación	
País de publicación	
Recurso del cual forma parte (opcional)	
Nombre del grado	
Grado académico o título profesional	
Nombre del programa	
Código del programa Consultar el listado:	

***Ingresar las palabras clave o términos del lenguaje natural (no controladas por un vocabulario o tesauro).**

ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS

ACTA N° 016 - 2023/UCSS/FIA/DI

Siendo las 04:00 p.m. del 14 de marzo de 2023 a través de la plataforma virtual zoom de la Universidad Católica Sedes Sapientiae, el Jurado de Tesis integrado por:

- | | |
|-----------------------------------|-----------------|
| 1. Amada Victoria Larco Aguilar | presidente |
| 2. Wilson Pérez Dávila | primer miembro |
| 3. Eduardo Enrique León Alcántara | segundo miembro |
| 4. Roger Manuel Mestas Valero | asesor |

Se reunieron para la sustentación virtual de la tesis titulada **Eficiencia de la lombriz roja californiana en la remoción de plomo de suelos agrícolas adyacentes a la mina Colquisiri – Huaral** que presentan las bachilleres en Ciencias Ambientales, **Andrea Liset Merca Menor y Silhi Marilet Pérez Herrera**, cumpliendo así con los requerimientos exigidos por el reglamento para la modalidad de titulación; la presentación y sustentación de un trabajo de investigación original, para obtener el Título Profesional de **Ingeniero Ambiental**.

Terminada la sustentación y luego de deliberar, el Jurado acuerda:

APROBAR

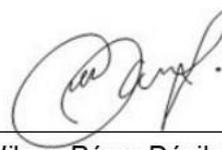
DESAPROBAR

La tesis, con el calificativo de **BUENA** y eleva la presente Acta al Decanato de la Facultad de Ingeniería Agraria, a fin de que se declare **EXPEDITA** para conferirle el **TÍTULO de INGENIERO AMBIENTAL**.

Lima, 14 de marzo de 2023.



Amada Victoria Larco Aguilar
PRESIDENTE



Wilson Pérez Dávila
1° MIEMBRO



Eduardo Enrique León Alcántara
2° MIEMBRO



Roger Manuel Mestas Valero
ASESOR

Anexo 2

CARTA DE CONFORMIDAD DEL ASESOR(A) DE TESIS / INFORME ACADÉMICO/ TRABAJO DE INVESTIGACIÓN/ TRABAJO DE SUFICIENCIA PROFESIONAL CON INFORME DE EVALUACIÓN DEL SOFTWARE ANTIPLAGIO

Lima, 3 de octubre de 2023

Señor(a),
Wilfredo Mendoza Caballero
Jefe del Departamento de Investigación
Facultad de Ingeniería Agraria - UCSS

Reciba un cordial saludo.

Sirva el presente para informar que **la tesis**, bajo mi asesoría, con título: **“Eficiencia de la lombriz roja californiana en la remoción de plomo de suelos agrícolas adyacentes a la mina Colquisiri – Huaral, 2020”**, presentado por **Perez Herrera Silhi Marilet** con código de estudiante 2015101880 y DNI 73105775 y **Merca Menor Andrea Liset** con código de estudiante 2015101785 y DNI 70542963, para optar **el título profesional** de Ingeniero Ambiental ha sido revisado en su totalidad por mi persona y **CONSIDERO** que el mismo se encuentra **APTO** para ser sustentado ante el Jurado Evaluador.

Asimismo, para garantizar la originalidad del documento en mención, se le ha sometido a los mecanismos de control y procedimientos antiplagio previstos en la normativa interna de la Universidad, **cuyo resultado alcanzó un porcentaje de similitud de 9 %** (poner el valor del porcentaje)*. Por tanto, en mi condición de asesor(a), firmo la presente carta en señal de conformidad y **adjunto el informe de similitud del Sistema Antiplagio Turnitin**, como evidencia de lo informado.

Sin otro particular, me despido de usted. Atentamente,

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Roger Mestas', is centered above a horizontal line.

Firma del Asesor (a)
Roger Manuel Mestas Valero
DNI N°: 23842285
ORCID: 0000-0002-5097-9988
Facultad de Ingeniería Agraria
UCSS

(*) De conformidad con el artículo 8°, del Capítulo 3 del Reglamento de Control Antiplagio e Integridad Académica para trabajos para optar grados y títulos, aplicación del software antiplagio en la UCSS, se establece lo siguiente:

Artículo 8°. Criterios de evaluación de originalidad de los trabajos y aplicación de filtros

El porcentaje de similitud aceptado en el informe del software antiplagio para trabajos para optar grados académicos y títulos profesionales, **será máximo de veinte por ciento (20%) de su contenido, siempre y cuando no implique copia o indicio de copia.**

DEDICATORIA

Mi tesis va dedicada a Dios, por regalarme la vida y haberme permitido el inicio de mi formación profesional. A mi familia, sobre todo a mis padres y abuelitos, quienes han creído siempre en mí, por ser los pilares más importantes de mi vida, mostrándome cada día su aprecio y su apoyo constante, y por estar conmigo en los momentos más difíciles de mi vida, los amo. A todos ellos dedico esta investigación porque fomentaron en mí el deseo de poder superarme para lograr una de mis muchas metas propuestas y a mi hermana darle las gracias por sus consejos y por creer en mí, durante estos años de mi formación personal.

Andrea Merca

Dedico este trabajo a Dios quien ha sido mi guía y fortaleza hasta el día de hoy. Tíos, hermanas y primos que me han apoyado continuamente con palabras de aliento, paciencia y consejos que me han permitido llegar a cumplir una de mis más grandes metas propuestas. A mis padres por inculcarme valores, principios y sobre todo a ser perseverante ante las adversidades porque Dios siempre será mi fortaleza. A mis familiares que, con oraciones, palabras de aliento hicieron de mí una persona maravillosa y de una u otra manera aportaron en la realización de la presente investigación y a cumplir mis metas y objetivos trazados. A mis amigos, que me apoyaron continuamente cuando más lo necesitaba, mil gracias siempre los recordare.

Silhi Pérez

AGRADECIMIENTO

Agradezco a Dios y a mi familia que me han brindado su apoyo incondicional para la ejecución de la investigación, en especial a mis padres que son mi fuente de inspiración, por estar en los momentos más difíciles de mi vida y de mi formación académica, a todos mis profesores que se encargaron de brindarme los conocimientos necesarios para llegar a concluir esta etapa profesional. Agradecer con mucho amor a mi hermana por ser quien me brindo todo su apoyo y esfuerzo para que continúe adelante, a mis docentes de primaria y secundaria por los conocimientos brindados a lo largo de mi preparación como profesionales.

Andrea Merca.

Agradezco a Dios por bendecirme la vida, por guiar cada uno de mis pasos a largo de mi vida, y sobre todo ser mi fortaleza en los momentos de debilidad y sobre todo de dificultad. Gracias a mis Padres por creer y confiar en mí, por su consejos y valores que me han inculcado. Agradezco a cada uno de mis docentes quienes me han brindado sus conocimientos a lo largo del proceso de formación, a nuestro asesor Roger Mestas Valero y de manera especial al Profesor Armando Chiclla Salazar quien ha guiado, revisado y ha hecho posible la presente investigación.

Silhi Pérez.

ÍNDICE GENERAL

	Pág.
ÍNDICE GENERAL	v
ÍNDICE DE TABLAS	vii
ÍNDICE DE FIGURAS	viii
RESUMEN	x
ABSTRACT	xi
INTRODUCCIÓN	1
OBJETIVOS	4
CAPÍTULO I: MARCO TEÓRICO	5
1.1. Antecedentes	5
1.2. Bases teóricas especializadas	13
1.2.1. Remediación	13
1.2.2. Metales pesados	19
1.2.4. Suelo contaminado	22
1.2.6. Lombricultura	24
1.2.7. Características del suelo	37
CAPÍTULO II: MATERIALES Y MÉTODOS	39
2.1. Diseño de investigación	39
2.1.1. Lugar y fecha	39
2.1.2. Materiales	39
2.1.3. Descripción del experimento	43
2.1.4. Tratamientos	50
2.1.5. Unidades experimentales	52
2.1.6. Identificación de variables y mensuración	52
2.1.7. Diseño estadístico	54
2.1.8. Análisis estadístico de datos	54

CAPÍTULO III: RESULTADOS	55
3.1. Resultados de la caracterización inicial de los parámetros fisicoquímicos y plomo (Pb) del suelo agrícola.....	55
3.2. Efecto de las lombrices en el porcentaje de remoción de plomo (Pb)	56
3.3. Resultados del efecto del tiempo de exposición de las lombrices en el porcentaje de remoción de plomo (Pb)	57
3.4. Efecto de la actividad de la lombriz en los parámetros fisicoquímicos de los suelos agrícolas después del experimento	60
3.4.1. Potencial de hidrógeno (pH).....	60
3.4.2. Conductividad eléctrica (C.E.)	61
3.4.3. Materia orgánica (M.O).....	62
3.4.4. Fósforo (P).....	64
3.4.5. Carbonato de calcio (CaCO ₃)	65
3.4.6. Capacidad de intercambio catiónico (CIC)	67
3.4.7. Clase textural	68
CAPÍTULO IV: DISCUSIONES	69
CAPÍTULO V: CONCLUSIONES	72
CAPÍTULO VI: RECOMENDACIONES	74
REFERENCIAS	75
TERMINOLOGÍA	82
APÉNDICE	84

ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. <i>Resumen de las principales tecnologías de remediación de suelos</i>	16
Tabla 2. <i>Resumen de las ventajas y desventajas de los tratamientos biológicos</i>	16
Tabla 3. <i>Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para suelo</i>	23
Tabla 4. <i>Codificación de tratamientos</i>	51
Tabla 5. <i>Descripción de los tratamientos</i>	51
Tabla 6. <i>Matriz de operacionabilidad de variables</i>	53
Tabla 7. <i>Caracterización de suelo inicial</i>	55
Tabla 8. <i>Comparación de medias de la densidad de lombrices vs la remoción de plomo (Pb)</i>	56
Tabla 9. <i>Comparación de medias del período de exposición vs la remoción de plomo (Pb)</i>	58
Tabla 10. <i>Comparación de medias de la densidad de lombrices y el tiempo de exposición vs la remoción de plomo (Pb)</i>	59
Tabla 11. <i>Comparación de medias de la densidad de lombrices y el tiempo de exposición vs pH</i>	60
Tabla 12. <i>Comparación de medias de la cantidad de lombrices y el tiempo de exposición vs la conductividad eléctrica (C.E)</i>	61
Tabla 13. <i>Comparación de medias de la densidad de lombrices y el tiempo de exposición vs materia orgánica (M.O)</i>	63
Tabla 14. <i>Comparación de medias sobre la cantidad de lombrices y el tiempo de exposición vs fósforo (P)</i>	64
Tabla 15. <i>Comparación de medias de la densidad de lombrices y el tiempo de exposición vs carbonato de calcio (CaCO₃)</i>	66
Tabla 16. <i>Comparación de medias de la densidad de lombrices y el tiempo de exposición vs capacidad de intercambio catiónico (C.I.C)</i>	67

ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
<i>Figura 1.</i> Morfología de la lombriz roja californiana	28
<i>Figura 2.</i> Anatomía de la lombriz roja californiana.....	32
<i>Figura 3.</i> Localización geográfica del área	42
<i>Figura 4.</i> Ubicación de los puntos de muestreo	44
<i>Figura 5.</i> Desarrollo del experimento	49
<i>Figura 6.</i> Prueba de Tukey para la densidad de lombrices vs la remoción de plomo (Pb) .	57
<i>Figura 7.</i> Prueba de Tukey para el período de exposición vs la remoción de plomo (Pb) .	58
<i>Figura 8.</i> Prueba de Tukey para la densidad de lombrices y el tiempo de exposición vs la remoción de plomo (Pb)	59
<i>Figura 9.</i> Prueba de Tukey de la densidad de lombrices y el tiempo de exposición vs potencial de hidrógeno (pH).....	60
<i>Figura 10.</i> Prueba de Tukey para la densidad de lombrices y el tiempo de exposición vs conductividad eléctrica (C.E)	62
<i>Figura 11.</i> Prueba de Tukey de la densidad de lombrices y el tiempo de exposición vs materia orgánica (M.O)	63
<i>Figura 12.</i> Prueba de Tukey para la densidad de lombrices y el tiempo de exposición vs fósforo (P).....	65
<i>Figura 13.</i> Prueba de Tukey para la densidad de lombrices y el tiempo de exposición vs carbonato de calcio (CaCO ₃)	66
<i>Figura 14.</i> Prueba de Tukey para la densidad de lombrices y el tiempo de exposición vs capacidad de intercambio catiónico (C.I.C)	68

ÍNDICE DE APÉNDICES

	Pág.
Apéndice 1. Resultados del análisis de caracterización de parámetros físico-químicos y plomo.....	84
Apéndice 2. Fotografía de la fase de campo y fase experimental	88
Apéndice 3. Parámetros para la interpretación de los análisis de caracterización del sustrato	95
Apéndice 4. Comparación de medias mediante el Test Tukey de las variables del estudio	97

RESUMEN

La investigación se realizó con suelo agrícola proveniente de la localidad de Jecuán, en Huaral, provincia de Huaral, en la región de Lima. El estudio tuvo como objetivo evaluar la eficiencia de la lombriz roja californiana en la remoción de plomo en los suelos adyacentes a la mina Colquisiri. Para la ejecución del estudio se empleó el diseño experimental y cuantitativo, en la cual se evaluaron 12 tratamientos y tres repeticiones compuestos por las siguientes concentraciones: T uno, T dos y T tres (un kg de suelo contaminado + un kg de estiércol de conejo + 80 lombrices) expuestas en un periodo de 15, 30 y 45 días respectivamente, T cuatro, T quinto y T seis (uno kg de suelo contaminado + un kg de estiércol de conejo + 110 lombrices) expuestas a un periodo de 15, 30 y 45 días; T siete, T ocho y T nueve (un kg de suelo contaminado + un kg de estiércol de conejo + 140 lombrices) expuestas a un periodo de 15, 30 y 45 días; T10, T11 y T12 (un kg de suelo contaminado + un kg de estiércol de conejo + 170 lombrices), analizados a los 15, 30 y 45 días respectivamente. Los resultados determinaron que con una densidad de 170 lombrices se logró una mayor remoción con 24,98 ppm de plomo respecto a las demás densidades y en un periodo de 45 días se logró mayor remoción de plomo de 23,25 ppm respecto al resto de periodos de exposición, a la vez, se evidenció variaciones en los parámetros fisicoquímicos producto del efecto de esta especie. El estudio ha demostrado como resultado que la *Eisenia fétida* es eficiente en la remoción de plomo en relación a la cantidad de lombrices y tiempo de exposición, se recomienda el uso de lombrices rojas californianas para la biorremediación de suelos contaminados por metales pesados.

Palabras claves: Suelo agrícola, biorremediación, *Eisenia fétida*, estiércol de conejo, plomo (Pb), remoción.

ABSTRACT

The research was carried out with agricultural soil from the town of Jecucán, in Huaral, Huaral province, in the Lima region. The objective of the study was to evaluate the efficiency of the Californian red worm in the removal of lead in the soils adjacent to the Conquisiri mine. For the execution of the study, the experimental and quantitative design was used, in which 12 treatments and three repetitions composed of the following concentrations were evaluated: T one, T two and T three (one kg of contaminated soil + one kg of rabbit manure + 80 worms) exposed for a period of 15, 30 and 45 days respectively; T four, T five and T six (one kg of contaminated soil + one kg of rabbit manure + 110 worms) exposed for a period of 15, 30 and 45 days respectively; T seven, T eight and T nine (one kg of contaminated soil + one kg of rabbit manure + 140 worms) exposed for a period of 15, 30 and 45 days respectively; T10, T11 and T12 (one kg of contaminated soil + one kg of rabbit manure + 170 worms) exposed for a period of 15, 30 and 45 days respectively. The results determined that with a density of 170 worms, a greater lead removal was achieved with 24,98 ppm compared to the other densities and in a period of 45 days a greater lead removal of 23, 25 ppm was achieved compared to the rest of the exposure periods, to at the same time, variations in the physicochemical parameters were evidenced as a result of the effect of this species. The study has shown as a result that *Eisenia fetida* is efficient in the removal of lead in relation to the number of worms and exposure time, the use of Californian red worms is recommended for the bioremediation of soils contaminated by heavy metals.

Keywords: Soil, bioremediation, *Eisenia fetida*, rabbit manure, lead (Pb), removal.

INTRODUCCIÓN

La contaminación de los suelos es un problema que no solo se ve a nivel local sino también a nivel global planteando un dificultoso desafío para la producción agrícola, la seguridad alimentaria y la salud humana. Uno de los aspectos que genera preocupación es la alta contaminación por plomo que se ha presentado en los últimos años, ello debido a que son muchos los productos que en la cotidianidad contienen este mineral, además de la inadecuada manipulación que el hombre le ha dado, destacando como fuente principal las baterías de los vehículos y, seguidamente las actividades relacionadas con la minería. En un estudio elaborado por Reyes *et al.* (2016) en Colombia, se realizaron muestreos de plomo en sus cuencas principales, logrando demostrar la presencia de este metal pesado – plomo (Pb) en las poblaciones que habitan las riberas del río Marmato, Bogotá, Cauca la Pintada, Achí y Pinillos a causa de actividad minera y agroindustria, debido a que se utiliza el agua para regadío de cultivos agrícolas y consumo humano.

Asimismo, se tiene que, en el Perú, específicamente en la ciudad de la Oroya se comprobó que los suelos que se encuentran frente al Complejo Metalúrgico están impactados en altas concentraciones de plomo (Pb) superando los valores dados en el ECA-SUELO para vivienda, suelos comerciales, extractivos e industriales. Además, se encontró que las precipitaciones son la principal fuente de transporte del metal proveniente de las escorias, llegando así al río Mantaro y perjudicando la vida acuática y los suelos fértiles (Calderón, 2017). Similarmente ocurre en Cajamarca, siendo aún más alarmante, debido a que se ha evidenciado la contaminación en los alimentos de consumo diario, como es el caso de la *Solanum tuberosum* “papa”. Esto debido a que son cultivados en la cuenca de los ríos Mashcon y Chonta los cuales han sido contaminados por un mal manejo de residuos que realiza la Minería Yanacocha (Luna y Rodríguez, 2016).

En el país la contaminación por plomo está presente en diferentes zonas, alarmantes todas las evidencias, además generalmente asociadas con una de las más importantes actividades industriales peruanas como lo es la minería, perjudicando otros sectores relevantes incluso, como lo es la agricultura; tal y como lo demuestra Romero (2017), quien menciona que los suelos agrícolas ubicado a los alrededores de la Mina Colquisiri han sido contaminados con

plomo (Pb), superando el límite establecido por el ECAs (Estándares de Calidad Ambiental para suelos) de 70 ppm.

Considerando esta preocupante realidad, es evidente los expertos busquen alternativas solucionantes dentro de los albores del desarrollo sostenible, siendo necesario implementar una serie de tecnologías que ayuden a recuperar suelos degradados o impactados por actividades mineras. Una técnica bastante empleada en los diversos estudios es el proceso biotecnológico (vermicompostaje) que consiste en degradar y estabilizar los residuos orgánicos a través de condiciones aerobias y mesófilas, donde la lombriz es capaz de ingerir, triturar y descomponer los residuos mediante la actividad de enzimas digestivas y bacterias existentes en sus intestinos que actúan con o sin oxígeno como señala Edwards (1998) citado por Fernández (2011). Además, Barbaran (2017) realizó un trabajo de investigación enfocado en la reducción de cromo en suelos contaminados por agroquímicos utilizando lombrices de tierra en donde concluye que la especie *Eisenia fetida* (Savigny) tiene una buena capacidad para reducir elementos tóxicos como el cromo (Cr) en suelos contaminados con agroquímicos, siendo su importancia buscar las condiciones óptimas del suelo agrícola. Es por ello que, la aplicación de lombrices para la remediación de suelos contaminados es una opción de tratamiento muy eficiente y de bajo costo, es fácil realizarlo y no requiere de mucho tiempo para obtener resultados, puede ser aplicado por los mismos pobladores para recuperar sus zonas agrícolas y abonarlas para así mejorar las condiciones del suelo.

El presente estudio está conformado por el capítulo I por una introducción breve sobre los aspectos generales de la investigación, seguido del capítulo II que contempla la metodología que describe los procesos que se han realizado, el capítulo III presenta los resultados obtenidos de la evaluación del experimento, asimismo, el capítulo IV señala las discusiones donde se comparan los resultados obtenidos con autores que realizaron investigaciones similares, seguidamente el capítulo V expone las conclusiones finales de la investigación y por último se manifiesta en el capítulo VI las recomendaciones para futuras investigaciones.

Este estudio experimental evaluó la eficiencia de *Eisenia fetida* “lombriz californiana”, conocida por ser una especie de lombriz muy eficiente en la remoción de metales pesados

de los suelos, incluyendo el plomo. Sin embargo, la eficiencia de esta lombriz en la remoción de plomo del suelo puede depender de varios factores, incluyendo la concentración inicial de plomo en el suelo, la presencia de otros contaminantes, la duración del tratamiento y las condiciones ambientales.

En cuanto al caso específico de suelos agrícolas adyacentes a la mina Colquisiri en Huaral, la eficiencia de la lombriz californiana en la remoción de plomo dependerá de las características del suelo y de la concentración de plomo presente en el mismo. Sin embargo, es importante tener en cuenta que el uso de lombrices para remediar suelos contaminados es una técnica relativamente nueva y aún se están realizando investigaciones para determinar la eficacia y la aplicabilidad de esta técnica en diferentes contextos.

Es por ello que se va a estudiar su influencia en los parámetros fisicoquímicos como potencial de hidrógeno (pH), conductividad eléctrica (C.E), materia orgánica (M.O), carbonato de calcio (CaCO_3), fósforo (P), potasio (K) y capacidad de intercambio catiónico (CIC) en suelos agrícolas contaminados por relaves mineros provenientes de la mina Colquisiri en la provincia de Huaral, que serviría como antecedente para futuros estudios de remediación en suelos, permitiendo así darle mayor importancia a la disposición de los relaves y sobre todo darles un tratamiento para evitar la contaminación de las zonas aledañas.

OBJETIVOS

Objetivo general

Evaluar la eficiencia de la lombriz roja californiana en la remoción de plomo en suelos agrícolas adyacentes a la mina Colquisiri – Huaral, 2020.

Objetivos específicos

- Determinar el efecto de la densidad de lombrices en el porcentaje de remoción de plomo de suelos agrícolas adyacentes a la mina Colquisiri.

- Determinar el efecto del tiempo de exposición de la densidad de lombrices en el porcentaje de remoción de plomo de suelos agrícolas adyacentes a la mina Colquisiri.

- Determinar el efecto de la actividad de la densidad de las lombrices en los parámetros físico-químicos de los suelos agrícolas antes y después del experimento.

CAPÍTULO I: MARCO TEÓRICO

1.1. Antecedentes

Ámbito internacional

Zaltauskaitmi *et al.* (2020) realizaron un estudio con la finalidad de investigar los efectos del plomo (Pb) en la *Eisenia fétida* y su potencial para recuperarse de la exposición al plomo (Pb) donde utilizaron suelo artificial seco de la OCDE en Kaunas, Lituania. La investigación fue de tipo experimental en el cual emplearon cinco tratamientos con tres repeticiones y un control con las siguientes concentraciones: 40, 250, 500, 1000 y 2500 mg Pb kg⁻¹. Añadieron diez lombrices adultas, lavadas y pesadas (cultivadas en el laboratorio) expuestas al contaminante por un período de cuatro semanas y después del período de exposición transfirieron cinco lombrices de tierra a cada contenedor con suelo OCDE limpio y manteniéndolas por un período de recuperación de cuatro semanas. Para la evaluación de la bioconcentración de plomo (Pb) las lombrices fueron colocadas en una caja Petri por 48 horas para eliminar su contenido intestinal y para la medición de plomo emplearon un espectrómetro de absorción atómica Shimadzu AA-6800. Utilizaron el análisis de varianza de una vía (ANOVA) para evaluar el efecto de la concentración de plomo en los puntos finales y para determinar las diferencias significativas hicieron uso de la prueba de Dunnett con la prueba LSD, todo el análisis estadístico lo realizaron utilizando el software Statistica. Los resultados demostraron que la cantidad de plomo (Pb) acumulado por las lombrices aumentaron linealmente en relación a la concentración de plomo (Pb) en el suelo durante el periodo de exposición ($R^2=0,94$). El factor de bioconcentración estuvo en un rango de 0,14 +/- 0,002 a 0,30 +/- 0,001 lo cual indicaba una baja biodisponibilidad de plomo (Pb) en el suelo y una baja capacidad de las lombrices para acumular plomo (Pb). Durante el período de recuperación de cuatro semanas la concentración de plomo fue de 2,07 a 5,34 veces menor que al período de exposición al contaminante. Las lombrices de tierra pre expuestas a la concentración más alta de plomo 2500 mg.kg⁻¹ no logró eliminar el plomo (Pb) del cuerpo y la concentración de plomo (Pb) no cambio significativamente durante el período de cuatro

semanas. Los autores concluyeron que la *Eisenia fétida* pre expuestos a niveles bajos de plomo (Pb) tienen el potencial de recuperar su crecimiento y disminuir las bioconcentraciones de plomo (Pb).

Hashemi *et al.* (2018) en Irán realizaron un estudio con el objetivo de biorremediar plomo (Pb) y zinc (Zn) en suelos contaminados a través del compost de *Eisenia fetida* “lombriz californiana”. Este estudio fue cuantitativo experimental in vitro, donde utilizaron 108 muestras. Para ello, las concentraciones iniciales de plomo (Pb) fueron de 50 mg/kg y 100 mg/kg, y de zinc (Zn) 40 mg/kg y 80 mg/kg, respectivamente. Asimismo, agregaron un total de 30 lombrices a cada maceta en condiciones óptimas para la supervivencia de la lombriz por un período de 14 y 28 días. Para la medición del zinc (Zn) y plomo (Pb) emplearon un kit de absorción atómica y para el análisis de datos utilizaron el análisis de varianza, prueba t y pruebas post hoc en SPSS 23 y Design-Expert 7,00 con un nivel de significancia de 0,05. Los resultados demostraron que la concentración inicial del plomo (Pb) de 3 mg/kg alcanzó 78,2 mg/kg en un intervalo de 14 días y 58,2 mg/kg en un intervalo de 28 días disminuyendo a 0,22 mg/kg y a 0,42 mg/kg respectivamente; la concentración de plomo (Pb) de 53 mg/kg alcanzó 33,35 mg/kg en un intervalo de 14 días y 25,21 mg/kg en un intervalo de 28 días disminuyendo a 19,65 mg/kg y 27,79 mg/kg en el suelo respectivamente; la concentración de plomo (Pb) de 103 mg/kg alcanzó 57,02 mg/kg en un intervalo de 14 días y 37,65 mg/kg en un intervalo de 28 días disminuyendo a 45,98 mg/kg y 65,35 mg/kg respectivamente; la concentración de plomo (Pb) de 53 mg/kg alcanzó 33,35 mg/kg en un intervalo de 14 días y 25,21 mg/kg en un intervalo de 28 días disminuyendo a 19,65 mg/kg y 27,79 mg/kg en el suelo respectivamente. La concentración de zinc (Zn) de 6 mg/kg alcanzó 5,64 mg/kg en un intervalo de 14 días y 5,31 mg/kg en un intervalo de 28 días disminuyendo a 0,36 mg/kg y 0,69 mg/kg en el suelo; la concentración de zinc (Zn) de 64 mg/kg alcanzó 29,43 mg/kg en un intervalo de 14 días y 22,19 mg/kg en un intervalo de 28 días disminuyendo a 16,57 mg/kg y 23,81 mg/kg en el suelo; la concentración de zinc (Zn) de 86 mg/kg alcanzó 50,99 mg/kg en un intervalo de 14 días y 35,58 mg/kg en un intervalo de 28 días disminuyendo a 35,01 mg/kg y 50,42 mg/kg en el suelo respectivamente. Los autores concluyeron que *Eisenia fétida* tiene una función óptima para eliminar el plomo (Pb) y el zinc (Zn) del suelo contaminado a través de su potencial para bioacumular y eliminar contaminantes del suelo.

Atacho *et al.* (2017), realizaron un estudio utilizando dos soluciones de vermicompost en diferentes concentraciones con el propósito de restaurar la condición del suelo ácido de la Sierra de San Luis en el estado de Falcón, Venezuela. El objetivo del estudio fue determinar la causa de la variación de la acidez intercambiable, incremento de pH y mayor presencia de nutrientes en el suelo. El diseño para esta investigación fue experimental, en el que consideraron un diseño completamente al azar. Utilizaron una población de una parcela de suelo de la Universidad Experimental Francisco de Miranda en la cual evaluaron soluciones de vermicompost denominados como: Uredo 1, 2, 3 y Pozón 1, 2, 3 en concentraciones de 50, 75 y 100 % a partir de la disgregación del lixiviado resultado del proceso de vermicompostaje; realizándose tres repeticiones con un total de 21 unidades experimentales por un período de 15 y 45 días. Asimismo, los parámetros analizados fueron: respiración basal, pH, cationes cambiables, materia orgánica, acidez intercambiable y saturación de bases. A la vez, emplearon el análisis de varianza (ANAVAR) y prueba de Tukey HSD ($p < 0,05$) para la comparación de medias y para el análisis estadístico usaron el paquete estadístico de Infostat versión 1.1. Según el análisis de laboratorio señalaron que los tratamientos evaluados incrementaron el valor de pH superior a 4,05; la respiración basal fue significativamente más alta ($p < 0,05$) en los tratamientos Uredo 2 y Pozón 2 con 2,42 y 2,36 $\mu\text{g CO}_2 \text{ g}^{-1} \text{ h}^{-1}$; y el vermicompost Uredo 3 y Uredo 2 fueron más eficientes en el descenso de la acidez intercambiable a valores 1,88 y 1,87 cmol kg^{-1} respectivamente. El estudio concluyó en que la solución de vermicompost Uredo es viable para restaurar las condiciones de suelos con problemas por acidez.

Zapata *et al.* (2017) tuvieron como objetivo biorremediar suelos expuestos a mercurio (Hg) resultantes de la actividad minera en la localidad de Segovia. El estudio fue experimental donde muestrearon suelo contaminado de la localidad de Segovia, Colombia; para homogenizarlo con suelo fértil obtenido de un vivero y utilizarlo en cuatro tratamientos de diversas concentraciones de 70-30, 30-70 y 50-50 de suelo contaminado de mercurio con respecto a suelo fértil y un tratamiento control con lombrices rojas, evaluando el desarrollo de los microorganismos mediante cultivos. Para el análisis de datos utilizaron el ANOVA mediante el software estadístico STAT GRAPHIC. Asimismo, los resultados obtenidos de laboratorio demostraron que las colonias de microorganismos fueron bastante bajas, encontrándose solo levaduras, mesófilos y enterobacterias el primer día, evidenciando así los problemas de contaminación de suelo debido al bajo rango de microorganismos. Sin

embargo, a los 90 días observaron que en todos los tratamientos que contenían lombrices, los microorganismos incrementaron con el tiempo. Finalmente, los autores concluyeron que mientras más se consuma la materia orgánica presente en el suelo se va incrementando la presencia de microorganismos en todos los tratamientos evaluados, ocasionando una interacción entre ellos y probablemente logrando la inmovilización del mercurio presente en las muestras, todo gracias a las excreciones generadas por las lombrices que mejoran las condiciones químicas y físicas aportando N, P y K, con lo cual se logra la fertilidad del suelo e incremento la comunidad microbiana del mismo, al concluir la ejecución encontraron colonias en ordenes donde se percibe que los suelos no presentan contaminación.

Camiletti (2016) en España realizó una investigación con el objetivo de desarrollar un proceso de post-tratamiento de compost (restos de poda de jardín, residuos agrícolas y ganaderos, lodos de depuradora y lodos de la industria agroalimentaria) a través del vermicompostaje haciendo uso de *Eisenia fetida* “lombriz californiana”. Dicho estudio fue cuantitativo experimental con una población de ingredientes de diferente naturaleza (restos de poda de jardín, residuos agrícolas y ganaderos, lodos de depuradora y lodos de la industria agroalimentaria). Los tratamientos empleados fueron 9: C-1 (Estiércol de cabra (78,4 %) + césped (10,1 %) + paja cereal (11,5 %)); C-2 (Lodo EDAR Torre Vieja (29,6 %) + restos poda morera (70,4 %)); C-3 (Lodo EDAR Orihuela (29,5 %) + hoja palmera (36,8 %) + poda morera (33,7 %)); C-4 (Lodo EDAR Orihuela (42,2 %) + hoja palmera (57,8 %)); C-5 (EDAR carrizales (36,2 %) + hoja palmera (63,8 %)); C-6 (Lodo EDAR algarrozo (29,5 %) + caña río (70,5 %)); C-7 (Lodo EDARI (27,5 %) + tronco de palmera (72,5 %)); C-8 (Lodo EDARI (19,6 %) + caña de río (80,4 %)) y C-9 (Lodo EDARI (40,9 %) + restos de poda EPSO (59,1%)). Utilizó para el diseño estadístico el ANOVA de un factor para cada tipo de material y la prueba de Tukey con una probabilidad del 95 %. Los resultados demostraron en cuanto a parámetros de calidad durante el experimento de vermicompostaje que existió un incremento de índice de germinación (IG) en todos los tratamientos y un incremento de la CCC con niveles significativos, como el C6 (106 %), también logró una reducción de los niveles de materia orgánica (MOT) tras el vermicompostaje excepto en el C1, C2 y C5, otro beneficio ha sido la disminución del sodio el cual era muy alto en el compost inicial dicho descenso ha sido para todos los casos excepto para C1 donde no se produjo ningún cambio de valor tras el vermicompostaje. El autor concluyó que el vermicompostaje como post-tratamiento de compost de residuos de distinta naturaleza aumenta la calidad del compost

original y que este proceso es más complejo ya que determina la velocidad de las lombrices en transformar el residuo, además de la supervivencia de la misma.

Mosquera (2016) realizó una investigación con el objetivo de evaluar el desempeño de la técnica de lombricompostaje en suelos degradados por la minería ejecutado en el Municipio de Unión Panamericana del Departamento de Choco, Colombia. Este estudio fue experimental cuantitativo con un alcance correlacional. Asimismo, empleó un modelo matemático factorial con asignación completamente al azar (DCA). Para la investigación utilizó suelo contaminado con mercurio (Hg) procedente de la minería a cielo abierto de aproximadamente 2 ha donde tomó un total de 15 submuestras y lo distribuyó en los siguientes tratamientos incluido el testigo: T1: suelo contaminado con Hg (100 %) + lombrices (*Eisenia fétida*), T2: suelo contaminado con Hg (50 %) + compost no contaminado (50 %) + lombrices (*Eisenia fétida*), T3: Compost contaminado con Hg (100 %) + lombrices (*Eisenia fétida*), y T4: Compost no contaminado + *Eisenia fétida*. El análisis estadístico aplicado fue un análisis de varianza y Prueba de Tukey HSD ($p < 0,05$) para la comparación de medias. Los resultados a nivel de laboratorio permitieron determinar que T3 registró una mayor remoción de Hg del 65 %, seguido T2 con el 43 % y T1 con el 28 %. Finalmente, el autor concluyó que T3 presentó la mayor remoción de Hg con el 65 %, seguido T2 con el 43 % y T1 con el 28 %. Asimismo, existió variabilidad significativa en la caracterización físico-químicos, en cuanto a las densidades y tamaño de los individuos el T1 aumento en 20 y 5 % respectivamente y los tratamientos restantes hasta un 50 % más.

Paco *et al.* (2011), desarrollaron una investigación donde evaluaron la biotransformación de residuos generados de la cocina (Rc), pulpa de café (Pc) y cartón (C) a través de la técnica de compostaje y vermicompostaje. El estudio fue ejecutado en la ciudad de Carmen Pampa del departamento de la Paz-Bolivia. El diseño fue experimental donde emplearon tres tratamientos y tres repeticiones para realizar comparaciones entre métodos de obtención en calidad. El sustrato inicial para compostaje fue de 1 m³ y en cuanto a vermicompostaje utilizaron 0,02 m³ por un periodo de 120 días. El análisis estadístico que emplearon fue el análisis de varianza para determinar las variaciones de un conjunto de datos con un nivel de error de 5 % entre tratamientos y para la confrontación de datos emplearon la prueba “t” de Student. De acuerdo a los resultados, el método de vermicompostaje logró descomponer la

Pc en un periodo de tres meses con 98,33 % luego le sigue el C y Rc; por otro lado, en el método de compostaje, el tratamiento con Rc logró descomponerse en tres meses con tres semanas con 90,40 %, seguido por Pc y C. A partir de 1 m³ de sustrato obtuvieron 271,62 kg y 465,83 kg de abono de Pc; 249,71 kg y 446 kg de abono de Rc; 212,48 kg y 404 kg de abono de C, en compost y vermicompost respectivamente. Finalmente, los bioabonos fueron clasificados como bajos, K alto, Ca en compost bajo y en vermicompost medio, Mg bajo y pH ligeramente alcalino. Los autores concluyeron que estas técnicas son unas alternativas ecológicas para obtener abono orgánico y a la vez es medio para reducir la contaminación por residuos generados en casa.

Ámbito nacional

Contreras *et al.* (2021), realizaron una investigación cuyo objetivo fue determinar que unidad experimental es más eficaz entre el compostaje y vermicompostaje para biorremediar suelos donde hay presencia de cadmio (Cd) y plomo (Pb) provenientes de pasivos ambientales mineros de Huamantanga, Cantá. La investigación fue descriptiva cuasi experimental con enfoque cuantitativo y con un diseño de investigación experimental. La población tomada fue en los suelos contaminados por pasivos min kg sustrato + 7,5 kg estiércol de cuy + 10 kg suelo contaminado). Los tratamientos aplicados para vermicompostaje fueron 3: T1V: 5 kg sustrato + 2,5 kg estiércol de cuy + 250 g *Eisenia fétida* +10 kg suelo contaminado, T2V: 5 kg sustrato + 5 kg estiércol de cuy + 250 g *Eisenia fétida* + 10 kg suelo contaminado y T3V: 5 kg sustrato + 7,5 kg estiércol de cuy + 250 g *Eisenia fétida* +10 kg suelo contaminado. Por ende, el proceso de biorremediación fue determinada a través de la ecuación de porcentaje de la reducción de la concentración de Pb y Cd en el tiempo establecido. Para hallar las concentraciones de plomo (Pb) y cadmio (Cd) emplearon el software IBM SPSS Statistics Base 24, prueba de Shapiro-Wilk, ANOVA y Tukey. Los resultados que obtuvieron mostraron que el T1V logró una mayor reducción con el 76,99 % respecto con los otros dos tratamientos de vermicompostaje T2V (74,12 %) y T3V (56,22 %), en cuanto a cadmio el que logró una mayor eficiencia fue el T1V (75,11 %), seguido del T2V (73,52 %) y T3V (56,59 %). Asimismo, para el compostaje se obtuvo mayor eficiencia en el tratamiento T3C con un valor de 52,77 %, seguido de los tratamientos T2C con 25,01 % y T1C con 15,60 %, en cuanto a cadmio el tratamiento T3C fue el más eficiente 47,16 % sucesivo del tratamiento T2C con 11,93 % y T3C con 0,45 %. Finalmente, los autores concluyeron que la técnica del vermicompostaje es más eficaz que la técnica del

compostaje para la reducción de plomo y cadmio en suelos contaminados por pasivos mineros.

Febres (2019), realizó una investigación enfocada a evaluar la tecnología más efectiva para el tratamiento de suelos contaminados por plomo (Pb) y determinar la cantidad de plomo (Pb) presente en el suelo del departamento de Arequipa, Perú. La investigación fue de tipo experimental en el cual aplicó estímulos (X) a unidades experimentales (UE); observándose la reacción (Y) y registrando el resultado (O); estableciendo la relación causa-efecto. El diseño experimental fue un Diseño Completo al Azar (DCA). Para ello utilizó 60 kg suelo de terrenos cercanos a la vía de evitamiento de Arequipa y evaluaron cuatro tratamientos siguientes: T1: suelo contaminado con Pb + estiércol de lombriz + girasol, T2: suelo contaminado con Pb + estiércol de lombriz, T3: suelo contaminado con Pb + girasol y T4: suelo contaminado con Pb. Además, aplicó el análisis de varianza. Los resultados en el laboratorio demostraron que el T2 presentó una alta remoción de plomo con el 81,21 %, siendo estadísticamente significativo en comparación con los demás tratamientos el T1, T4 y T3. El T2 demostró disminuir el plomo (Pb) de 212,05 ppm a 22,77 ppm con una remoción de 98,30 ppm; este último también aumentó el contenido de materia orgánica, capacidad de intercambio iónico, pH y niveles de N, P y K en el suelo puesto a prueba. Finalmente, el autor concluyó que al emplear el *Helianthus annuus* “girasol” y estiércol de la lombriz roja se logra inmovilizar el plomo mediante la acumulación en sus raíces o también por la percolación en la rizósfera, impidiendo la propagación a la capa freática.

Laricano (2018), elaboró un trabajo de investigación cuyo objetivo fue analizar los rangos de reducción del suelo contaminado con mercurio (Hg) a través de la vermicomposta utilizando diversas concentraciones y períodos de exposición. La investigación fue cuantitativa con alcance correlacional y el diseño de la investigación fue experimental. La población estuvo conformada por los suelos contaminados con mercurio proveniente de la zona de la Corporación Minera Ananea S.A - Mina Rinconada tomándose una muestra de 108 kg utilizándose 27 kg distribuidos en 9 celdas para los 3 tratamientos utilizados: T1: 10 kg suelo Hg + 100 lombrices + ½ kg de estiércol, T2: 10 kg suelo Hg + 200 lombrices + 1 kg de estiércol, T3: 10 kg suelo Hg + 300 lombrices + 1½ kg de estiércol. Para la evaluación de mercurio utilizó el método EPA 7471B espectrofotometría de absorción atómica de vapor

frío y el modelo de regresión lineal con un alfa de 0,05 de significancia a través del programa de Infostat versión estudiantil 2017. Posteriormente, los resultados obtenidos del laboratorio demostraron una disminución de mercurio (Hg) de 167,5 mg Hg/kg a 16,28 mg Hg/kg. Todos los tratamientos demostraron reducción después de los 15 días TA-1 = 108,80 mg Hg/kg; TB-1 = 60,59 mg Hg/kg; TC-1 = 64,76 mg Hg/kg; 30 días TA-2 = 63,07 mg Hg/kg; TB-2 = 59,10 mg Hg/kg; TC-2 = 57,56 mg Hg/kg; 45 días TA-3 16,15 mg Hg/kg; TB-3 15,57 mg Hg/kg; TC-3 17,12 mg Hg/kg. Finalmente, el autor concluyó que el estudio es eficiente para la reducción de mercurio (Hg) empleando la técnica de vermicomposta utilizando diferentes concentraciones y períodos de exposición.

Barbaran (2017), desarrolló una investigación con la finalidad de analizar los niveles de reducción de cromo (Cr) en suelos contaminados por agroquímicos con la aplicación de la *Eisenia fetida* para remediar dicho suelo de la localidad de Huarabi, distrito de Santa Rosa de Quives, provincia de Canta, ya que este es utilizado con fines agrícolas. Dicho trabajo tuvo un enfoque cuantitativo de alcance correlacional con un diseño de investigación experimental. Tomó una población de 120 ha y una muestra de suelos de 6,24 m³ e instaló 3 tratamientos con las siguientes concentraciones: T1: 5 kg de lombriz + 25 kg de tierra con Cr, T2: 10 kg de lombriz + 25 kg de tierra con Cr, T3: 15 kg de lombriz + 25 kg de tierra con Cr. Para el análisis de datos utilizó el programa de Microsoft Excel 2013 y IBM SPSS. Los resultados arrojados a nivel de laboratorio demostraron que el tratamiento T3 presentó más altas concentraciones de plomo en los tallos y raíces, obteniéndose una alta cantidad en la repetición 3 con 39,7 ppm. Asimismo, los cultivos sembrados con vermicompost que evidenciaron una alta absorción de concentración de plomo fue el tratamiento T3, donde la repetición 3 presentó 70,6 ppm, seguida de la repetición 1 con 59,5 ppm y en la que hubo menor absorción de plomo fue en la repetición 4 con 16,5 ppm. Posteriormente, concluyó que se logró reducir la concentración de cromo empleando a la lombriz de tierra en suelos contaminados por agroquímicos.

Santos (2017), realizó un estudio con el objetivo de evaluar la eficiencia de tres sustratos orgánicos para la obtención de humus de lombriz roja californiana (*Eisenia fetida*) en San Juan de Lurigancho. El estudio fue de enfoque cuantitativo, descriptivo con un diseño experimental. La población estuvo constituida por la cantidad de estiércol de conejo y vaca

que genera la granja la Joya ubicada en Jicamarca, provincia de Huarochiri, el cual utilizó una muestra de 27 kg de estiércol (13,5 kg de estiércol de conejo y 13,5 kg de estiércol de vaca). Realizó cuatro tratamientos con sus tres respectivas réplicas constituidas por: T1: 50 % de estiércol de vaca + 50 % de residuos, T2: 50 % de estiércol de conejo + 50 % de residuos, T3: 25 % de estiércol de vaca + 25 % de estiércol de conejo + 50 % de residuos y T4: 100 % de residuos orgánicos. Usó el diseño completamente al azar y para el análisis de datos emplearon el software estadístico SAS ya que ayudó a realizar el análisis de varianza (ANOVA) en conjunto con la prueba de Duncan para realizar pruebas de comparación múltiples y diferenciar que tratamiento es mejor. Los resultados mostraron que hubo una influencia de las características químicas de los sustratos orgánicos en la obtención de humus de la lombriz, para nitrógeno (N) el tratamiento T3 (1,51 %), T2 (1,56 %), T4 y T1 con (1,76 %) y (1,97 %), para fósforo (P) T1 (0,57 %), T3 (0,83 %), T2 (0,87 %) y T4 (0,92 %), para pH T1 (7,01), T3 (7,03), T2 (7,42) y T4 (7,58), para conductividad eléctrica solo el T2 (2,97) y T3 (3,13), para materia orgánica solo el T4 (Testigo) cumple con la normativa para humus y para potasio (K) todos los tratamientos sobrepasan los valores analíticos. Finalmente, el autor concluyó que si existe eficiencia de los sustratos para la obtención de humus y además influye los componentes de los sustratos orgánicos.

1.2. Bases teóricas especializadas

1.2.1. Remediación

Es un método que tiene como propósito remover los contaminantes presentes en el medio ambiente (componentes bióticos y abióticos). En ese ámbito, busca reducir los problemas generados por la extracción de minerales encontrados en el subsuelo, por ende, la viabilidad de la remediación dependerá de la normativa que vele por la protección del ambiente y de la vida humana (Domenech y Peral, 2006).

a. Tecnologías de remediación

De acuerdo con Infante (2021), mencionó que las técnicas para la descontaminación de suelos, sedimentos y desechos sólidos que contienen hidrocarburos son varias y varían desde las fisicoquímicas hasta las biológicas, teniendo como finalidad principal cumplir con los criterios de limpieza o exigencias establecidas en la normativa ambiental de nuestro País, por lo tanto, significa que el suelo o desecho ha sido remediado.

Este tipo de técnicas son utilizadas para la recuperación de suelos y aguas freáticas, las cuales tienen como finalidad disminuir la toxicidad, impedir la propagación o acumulación de contaminantes presentes en diferentes recursos naturales, ya sea modificando la composición del contaminante o con ayuda de fenómenos físicos y químicos. Hoy en día se cuenta con una serie de métodos aplicados para restaurar ambientes deteriorados, la mayoría comprobadas a través de su eficiencia y otras en procesos prácticos. Para determinar la tecnología aplicada va a depender principalmente de las peculiaridades que presenta el suelo y la sustancia tóxica, de la eficiencia de los tratamientos y de la viabilidad de la tecnología asignada para recuperar los suelos (Candia, 2011).

b. Clasificación de las tecnologías de remediación

De acuerdo a lo expuesto por Candia (2011), se agrupan según el propósito de acción tomando en cuenta los siguientes principios:

- De acuerdo con el tipo de tratamiento están los métodos de confinamiento encargados de modificar los parámetros fisicoquímicos del medio impidiendo la propagación de los contaminantes

- De acuerdo con el lugar de aplicación, cuando es *in situ* se realiza en el mismo ambiente afectado y *ex situ* se procede a la recolección de una muestra del ambiente afectado y en un lugar propicio se realiza dicho procedimiento de remediación.

Por otro lado, Gonzales *et al.* (2019), mencionaron diferentes tipos de tecnologías de remediación, de las cuales se señaló algunas de ellas:

- Bioestimulación: Consiste en la incorporación de oxígeno y/o nutrientes al sustrato contaminado con la finalidad de estimular la actividad de los microorganismos autóctonos permitiendo la biodegradación de los contaminantes.

- Bioaumentación: Implica la incorporación de microorganismos vivos que tienen la capacidad de degradar el material contaminado en cuestión y así poder lograr su biodegradación o biotransformación.

- Biolabranza: Esta tecnología generalmente consiste en la mezcla con agentes de volumen y nutrientes, donde se remueve periódicamente para favorecer su aireación. Durante la biolabranza, el suelo contaminado se mezcla con suelo limpio.

- Bioventeo: Se logra la biodegradación aerobia del contaminante por medio del suministro de aire en el medio contaminado.

Dependiendo del tipo de tratamiento existen los métodos biológicos encargados a través de la digestión de organismos remover sustancias tóxicas; los métodos fisicoquímicos son capaces de disgregar, modificar y aprovechar la estructura de la sustancia nociva; los métodos térmicos son aquellos que a elevadas temperaturas logran volatizar y difundir el contaminante. Según su evolución se clasifican en tecnologías clásicas que son usadas para determinar la efectividad en relación con costos, eficiencia de fácil acceso y tecnología innovadora. A continuación, en la Tabla 1 y 2, Candia (2011) detalla las principales tecnologías de remediación y las ventajas y desventajas según el tratamiento.

Tabla 1*Resumen de las principales tecnologías de remediación de suelos*

Tratamientos biológicos	Tratamientos térmicos	Tratamientos físico-químicos
Bioaumentación	Calentamiento por conducción	Adición de enmiendas
Biodegradación asistida	Calentamiento por radiofrecuencia	Barreras de suelo seco
Transformación de metales	Calentamiento por resistencia eléctrica	Barreras físicas
Bioventing	Desorción térmica	Estabilización fisicoquímica
Compostaje	Creación	Lavado de suelos
Fitorremediación	Inyección de vapor	Oxidación UV
Landfarming	Pirolisis	
Lodos biológicos	Vitrificación	
Pilas biológicas		

Nota: Elaboración propia partir de Candia (2011).**Tabla 2***Resumen de las ventajas y desventajas de los tratamientos biológicos*

Tratamientos biológicos	Tratamientos térmicos
Permite realizar una rápida limpieza.	Tratamiento costoso.
Son tecnologías beneficiosas para el medio ambiente.	Los costos aumentan de acuerdo al equipo y energía empleada.
Generalmente los contaminantes son eliminados del medio identificado.	Costosos en mano de obra y capital.

Nota: Elaboración propia partir de Candia (2011).**c. Tratamientos biológicos**

Volque y Velasco (2002), señala que este tipo de estrategia actúa en función de las actividades catabólicas de los organismos y de su facultad para aprovechar los contaminantes como principal alimento y energía. Además, la biodegradación de los contaminantes orgánicos, va depender de la composición química del compuesto y de la clase microbiana degradadora. La técnica de biorremediación considera reacciones de óxido-reducción, procesos de sorción e intercambio catiónico, inclusive hay presencia de reacciones de acomplejamiento y quelación que son producto de la inmovilización del metal. En este tipo de método es posible utilizar organismos autóctonos o exógenos y realizarlo in situ o ex situ,

en condiciones aerobias. A continuación, se describen algunos tratamientos biológicos actuales:

- Bioestimulación: Implica la circulación de soluciones acuosas a través del suelo contaminado, con la finalidad de estimular e incrementar la actividad de los microorganismos autóctonos y de esa manera lograr biodegradar los contaminantes orgánicos o bien la fijación de los contaminantes inorgánicos in situ.

- Bioaumentación: Es empleada cuando es necesario de un tratamiento inmediato en un medio alterado por cualquier tipo de contaminación, o si la microflora autóctona es deficiente en número o tiene baja capacidad remediadora. El tamaño del inóculo a emplear va depender de dimensión de la zona contaminada, dispersión del contaminante y velocidad de crecimiento de los microorganismos.

- Biolabranza: El medio alterado por diversos contaminantes es biorremediado en el mismo sitio del arado, es decir, el sustrato contaminado es mezclado con otros agentes de volumen y nutrientes, a la vez es removido periódicamente para favorecer su aireación.

- Composteo: Es un proceso controlado, utilizado para tratar suelos y sedimentos contaminados para obtener subproductos inocuos estables. Consiste en mezclar agentes de volumen con sustancias biodegradables formando biopilas.

- Biorremediación en fase de lodos: Es utilizado para tratar suelos heterogéneos y poco permeables, a la vez es empleada cuando hay presencia sustancias altamente peligrosas generadas por efluentes u emisiones gaseosas. Uno de los métodos comúnmente empleados para biorremediar es el biorreactor de lodos donde se realiza una mezcla del suelo constantemente con un líquido y la degradación se logra a través fase acuosa por microorganismos.

d. Tratamientos físico – químicos

Este tipo de tecnologías aprovechan las propiedades físicas y/o químicas de los contaminantes para destruir, disgregar o estabilizar la contaminación. Cabe señalar que estas tecnologías pueden ser utilizadas con enfoques de atenuación o en el caso de aguas subterráneas pueden transformar los contaminantes a una forma más aceptable. Asimismo, son muy efectivos en suelos de textura más grande, aunque en fracciones más finas de la matriz pueden extenderse su aplicabilidad para contaminantes que son más soluble y volátiles (Alba, 2011).

- Adición de enmiendas: Busca inmovilizar y disminuir las concentraciones de sales y metales con la incorporación de fertilizantes orgánicos al medio. Además, proporcionan sustancias nutritivas al suelo cumpliendo un rol fundamental en la recuperación fisicoquímica y biológica de los suelos altamente degradados.

- Barreras de suelo seco: Consiste en la inserción de aire seco al suelo con el fin de ser secado y por consiguiente lograr inmovilizar los elementos nocivos y así evitar la emigración de estos hacia los reservorios de agua subterránea.

- Barreras físicas: Se realiza la introducción de paredes impermeables en el suelo para evitar la migración de la contaminación aplicándose esta tecnología solo cuando la contaminación es muy localizada.

- Estabilización físico-química: Consiste en la incorporación de componentes como cemento hidráulico, óxido de calcio que aseguren la inmovilización o circulación de elementos nocivos para el medio ambiente.

- Extracción de aire: Es la extracción de los contaminantes adsorbidos en las partículas del suelo mediante la volatilización a través de pozos de extracción que conducen el

aire de los contaminantes a la superficie donde pueden recibir un tratamiento especializado.

e. Tratamientos térmicos

Emplean el calor para incrementar la volatilización, quemar, descomponer o fundir los contaminantes en el suelo. Para el caso de contaminantes orgánicos implican altas temperaturas (>1000 °C) como la incineración o vitrificación logrando disminuir el contaminante y parte importante de la matriz. Dichos tratamientos se consideran procesos en dos pasos, donde los contaminantes son desorbidos a bajas temperaturas (<600 °C) y después son quemados; algunas propiedades del suelo esenciales pueden ser mantenidas a bajas temperaturas (Alba, 2011).

- Calentamiento por conducción térmica: Se realiza a través del calor haciendo uso de recipientes de acero o cobijas que recubran la superficie del medio para la destrucción del contaminante.
- Calentamiento por radio frecuencia: Evaporación de contaminantes.

1.2.2. Metales pesados

Son aquellas sustancias que tienen bajas o altas concentraciones de compuestos tóxicos o nocivos como por ejemplo los elementos metálicos. La mayoría de los elementos químicos están presentes de forma natural en la superficie terrestre ya sea como minerales o compuestos diferentes (Londoño *et al.*, 2016). Por otro lado, son considerados elementos químicos cuya densidad es mayor a 5 g/mL y están presentes en abundancia en la corteza terrestre. Se clasifican en tres clases en relación con su reactividad con otros elementos de clase A que son los que normalmente reaccionan con el oxígeno como el Al, Ca, Sr, Ba y La; clase B reaccionan más con el azufre como el Cu, Hg y Ag; clase C son los metales de afinidad intermedia como el Fe, Co, Ni, Zn, As, Cd, Pb y Cu. Asimismo, algunos son

esenciales para el funcionamiento de los organismos vivos requiriéndose en cantidades traza, pero se vuelven tóxicos cuando se incrementa las concentraciones (Calva y Torres, 2004).

1.2.3. Plomo

Es un metal obtenido de la galena, la cerusita, la anglesita, cromatos y arseniatos, considerado un elemento químico, blando, persistente a la corrosión, presenta un tono azulado, se torna oscuro fácilmente al exponerse al aire sucediendo un punto de ebullición de 1740 °C, generando vapores de 550 °C en adelante y no se biodegrada. A la vez, es un metal fácil de obtenerlo, manejarlo, dúctil y fácil de fundirlo, gracias a estas cualidades que posee es el metal más utilizado a nivel industrial como doméstico (Álvarez *et al.*, 2010).

a. Efectos del plomo en la salud humana

Este metal no es considerado necesario para la función biológica de los organismos vivos, por ende, la cantidad mínima presente en la sangre debería ser el 0 ug/dl, en la actualidad la gran mayoría de los seres vivos presentan una cierta concentración de plomo en la sangre. La Organización Mundial de la Salud considera como intoxicación de este metal a un rango mayor de 15 ug/dl, mientras que el Control de los Estados Unidos establece valores iguales o mayor a 10 ug/dl como tóxicos para la salud (Paucar, 2015).

b. Datos y cifras del plomo

El plomo al ser tóxico puede acumularse en los órganos humanos ocasionando daños a una serie de sistemas principalmente en niños, asimismo, esta sustancia llega a distribuirse por el torrente sanguíneo hasta llegar al cerebro, hígado, riñones, huesos y dientes en el cual se va almacenando a lo largo del tiempo.

Además, esta sustancia tóxica se ha convertido en un uso frecuente (fabricación de baterías de plomo y ácido para vehículos de motor) de los seres humanos generando mucha contaminación en el medio ambiente en diferentes partes del mundo poniendo en riesgo a la salud humana y la vida de otros seres vivos (Organización Mundial de la Salud [OMS], 2021).

c. Fuentes y vías de exposición

La OMS (2021), señala que las personas pueden contaminarse de plomo en ambientes donde trabajan o en el entorno que les rodea por:

- La inhalación de partículas producidas por la fundición de compuestos que incluye plomo, como al realizar actividades de fundición de metales, clasificación de residuos sólidos o trabajos de pintado con materiales que contienen plomo.
- La ingesta de polvo, bebidas o alimentos contaminados, como aguas canalizadas por tuberías hechas a base de plomo o al ingerir productos que se presentan en envases hechos a base de esmalte de este metal.
- Uso de determinados productos cosméticos y medicamentos no regulados, por ejemplo, en determinados tipos de kohl y en algunos medicamentos tradicionales se ha encontrado niveles elevados de este metal tóxico.

d. Carga de morbilidad por la exposición a plomo

La Organización Mundial de la Salud (2021) señala que el Instituto de Sanimetría y Evaluación Sanitaria estimó para el año 2019, que el plomo provocó 900 000 defunciones y 21,7 millones de vida a causa de los efectos en la salud correspondiendo mayormente a los países de bajos recursos económicos. Además, se determinó que, en el año 2019, los individuos expuestos a plomo presentaron el 62,5 % de los casos idiopáticos, el 8,2 % cardiopatía hipertensiva, 7,2 % cardiopatía isquémica y el 5,65 % accidentes cerebrovasculares.

1.2.4. Suelo contaminado

Es todo aquel terreno que ha sido alterado en relación con sus propiedades fisicoquímicas y biológicas provocando una incompatibilidad de uso de suelo y una amenaza para el medio ambiente y la salud de la población (Fernández y García, 2013, citado por Mijangos, 2014).

Se le denomina suelo contaminado a todo aquel que presenta una alteración negativa en sus características físicas, químicas o biológicas debido a la presencia de compuestos peligrosos de origen antrópico en altas concentraciones causando daños en la salud humana. Por ende, es necesario conocer los estándares de calidad ambiental de suelos (ECAs) para así determinar si es un suelo contaminado y así poder identificar si es un peligro de origen toxicológicos, por contaminación, físicos y utilización de agua de abastecimiento contaminada (Sabroso y Pastor, 2004).

1.2.5. Normas nacionales

Según el Ministerio del Ambiente (MINAM, 2017) es el encargado de presentar los rangos permisibles de contaminantes en el suelo como:

- Normativa ECA-SUELO: En el Perú existe el D.S N° 011-2017-MINAM, el cual fue aprobado el 2 de diciembre del 2017, es una norma ambiental que establece los Estándares de Calidad Ambiental para suelo agrícola, suelo residencial/parques, suelo industrial/comercial. En la Tabla 3 se especifica las concentraciones permitidas para cada parámetro en mg/kg (MINAM, 2017).

Tabla 3*Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para suelo*

Parámetros en mg/kg PS	Usos del Suelo			Métodos de ensayo
	Suelo Agrícola	Suelo Residencial / parques	Suelo comercial/industrial /extractivo	
Orgánicos				
Hidrocarburos aromáticos volátiles				
Benceno	0,03	0,03	0,03	
Tolueno	0,37	0,37	0,37	EPA 8260
Etilbenceno	0,082	0,082	0,082	EPA 8021
Xilenos	11	11	11	
Hidrocarburos poliaromáticos				
Naftaleno	0,1	0,6	22	EPA 8260 EPA 8021
Benzo(a) pireno	0,1	0,7	0,7	EPA 8270 EPA 8270
Hidrocarburos de Petróleo				
Fracción de hidrocarburos F1 (C6-C10)	200	200	500	EPA 8015
Fracción de hidrocarburos F2 (>C10-C28)	1200	1200	5000	EPA 8015
Fracción de hidrocarburos F3 (>C28-C40)	3000	3000	6000	EPA 8015
Compuestos Organoclorados				
Bifenilos policlorados – PCB ⁽¹⁴⁾	0,5	1,3	33	EPA 8082 EPA 8270
Tetracloroetileno	0,1	0,2	0,5	EPA 8260
Tricloroetileno	0,01	0,01	0,01	EPA 8260
Inorgánicos				
Arsénico	50	50	140	EPA 3050 EPA 3051
Bario total ⁽¹⁵⁾	750	500	2 000	EPA 3050 EPA 3051
Cadmio	1,4	10	22	EPA 3050 EPA 3051
Cromo total	**	400	1 000	EPA 3050 EPA 3051
Cromo VI	0,4	0,4	1,4	EPA 3060/ EPA 7199 ó DIN EN
Mercurio	6,6	6,6	24	15192 ⁽¹⁶⁾ EPA 7471
Plomo	70	140	800	EPA 6020 ó 200.8 EPA 3050
Cianuro Libre	0,9	0,9	8	EPA 3051 EPA 9013 SEMWW

Nota: Elaboración propia partir de MINAM (2017). Límites máximos permisibles de contaminantes en el suelo. https://www.minam.gob.pe/wp-content/uploads/2017/12/DS_011-2017-MINAM.pdf.

1.2.6. Lombricultura

Schuldts *et al* (2007), mencionaron que dicha biotecnología limpia, es de bajo costo, de fácil manejo y al alcance de cualquier productor perteneciente al ámbito agroindustrial que desee aprovechar sus residuos orgánicos biodegradables con la finalidad de convertirlo en abono orgánico y proteínas. De acuerdo con lo expuesto por Mosquera (2016), la lombricultura comenzó en California, Estados Unidos, se expandió hacia Europa y a nivel mundial; empleando normas y técnicas para la productividad de *Eisenia fetida* y es que en el cual utilizaban lombrices para degradar la materia orgánica y obtener como producto final un eficiente abono orgánico, ayudando a la recuperación de suelos infértiles.

Por eso mismo, es que la lombriz actualmente es considerada una especie eficaz que ayuda a lidiar con la contaminación que el ser humano produce y realiza una notable rehabilitación de los restos orgánicos contaminados por agentes infecciosos y metales pesados. Las lombrices constituyen un recurso potencial de gran interés en la sostenibilidad de la agricultura, pues, participan activamente en la regulación de las propiedades físicas del suelo, la dinámica de la materia orgánica del entorno y el crecimiento de las plantas (Paco *et al*, 2011).

Somarriba y Guzmán (2004), definen a esta técnica como una actividad agropecuaria en la cual se basa en la crianza técnica de especies de lombrices en sustrato con la finalidad de generar humus de lombriz, el cual será utilizado como abono enteramente orgánico rico en nutrientes y como fuente de proteína. Asimismo, señala que la lombricultura tiene un aporte ecológico ya que usa diferentes sustratos reciclados empleados en su alimentación y a su vez un aporte tecnológico por los fenómenos microbiológicos y bioquímicos que suceden durante el proceso de fermentación de la alimentación de las lombrices a partir de materiales orgánicos.

a. Taxonomía de la lombriz roja californiana

Somarriba y Guzmán (2004) presenta la siguiente clasificación taxonómica:

Nombre científico: *Eisenia fétida* (Savigny,1826)

Género: *Eisenia*

Especie: *Eisenia fetida*

Reino: Animal

Tipo: Anélido (cuerpo anillado)

Familia: Lumbricidae

b. Características morfológicas

Somarriba y Guzmán (2004) menciona algunas características de mayor importancia de la *Eisenia fetida* (Figura 1):

- Color: Es de color rojo potente, conocida a nivel internacional con el nombre de lombriz roja, la coloración no solo depende del pigmento de la piel sino también por la sangre o por lo que contiene el intestino.

- Tamaño y peso: Una lombriz desarrollada mide aproximadamente entre 3 – 10 cm, con diámetro entre 3 – 5 mm y peso de un gramo.

- Forma: Su cuerpo es de forma redonda, presentan secciones cuadrangulares, la sección posterior puede ser aplastada y la superficie espaldar es rayado.

- Segmentos: Son anillos que son parte de la lombriz.

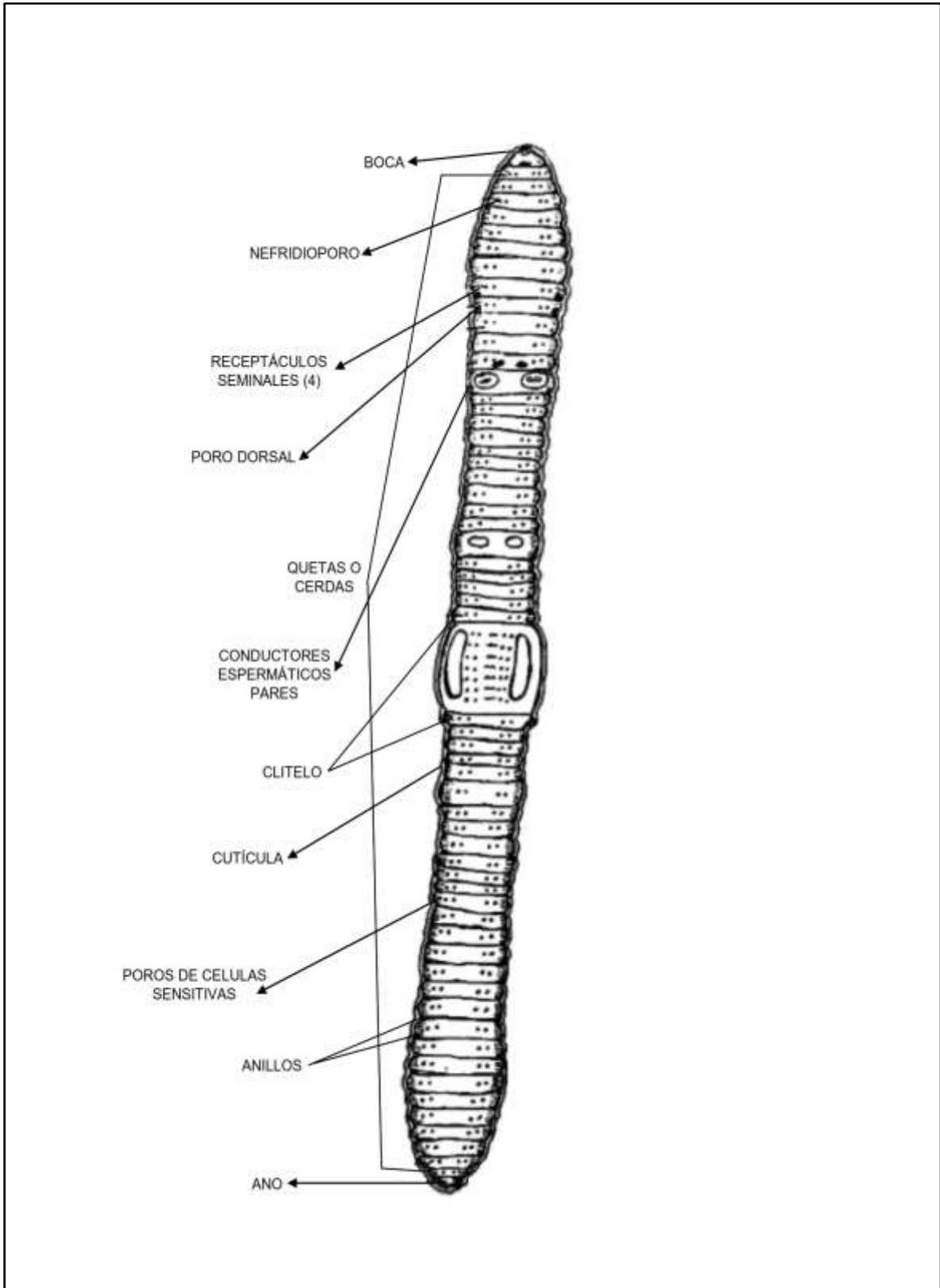
- Surcos intersegmentarios: Son rayas en forma de anillos de manera sucesiva y se reconocen en el espaldar de la lombriz por el epitelio más delgado de la musculatura circular.

- Prostomio: Empieza en el segmento principal la protuberancia dorsal que comienza en el cual está distante por un surco y hay cinco clases de prostomio (prolóbico, preopilóbico, epilóbico abierto, y tanilóbico).
- Peristomio: Es el segmento que cubre la boca y no presenta cerdas con una superficie suave y está conformada por surcos longitudinales.
- Cerdas: Se desarrollan en los tejidos de la piel las estructuras locomotoras, considerado el principal carácter taxonómico externo. Presentes en el segundo y ausentes en el segmento último del cuerpo.
- Poros dorsales: Son orificios diminutos presentes en los surcos intersegmentarios a lo largo de la estructura de la lombriz.
- Metridioporos: Son orificios excretores presentes en cada segmento un par en la estructura de la lombriz.
- Poros espermatecales: Se encuentran en ciertos surcos intersegmentarios pre-clitelaes.
- Poros femeninos: Localizados en la recta 14 de la especie.
- Poros masculinos: Son orificios encargados de transferir el semen.
- Surcos seminales: Hace referencia las vías transitorias que se ubican desde los poros masculinos hasta el clitelo.

- Clitelo: Tiene una forma anular el cual ayuda a envolver los segmentos, con un espesor granular encargado de secretar la materia que forma los capullos, cápsula donde se aloja los huevos.

Figura 1

Morfología de la lombriz roja californiana



Nota. Tomada de Mejía (2000).

c. Características anatómicas

Alas y Alvarenga (2002), señala que después de realizar una disección se puede observar algunas de las características más sobresalientes como se visualiza en la Figura 2:

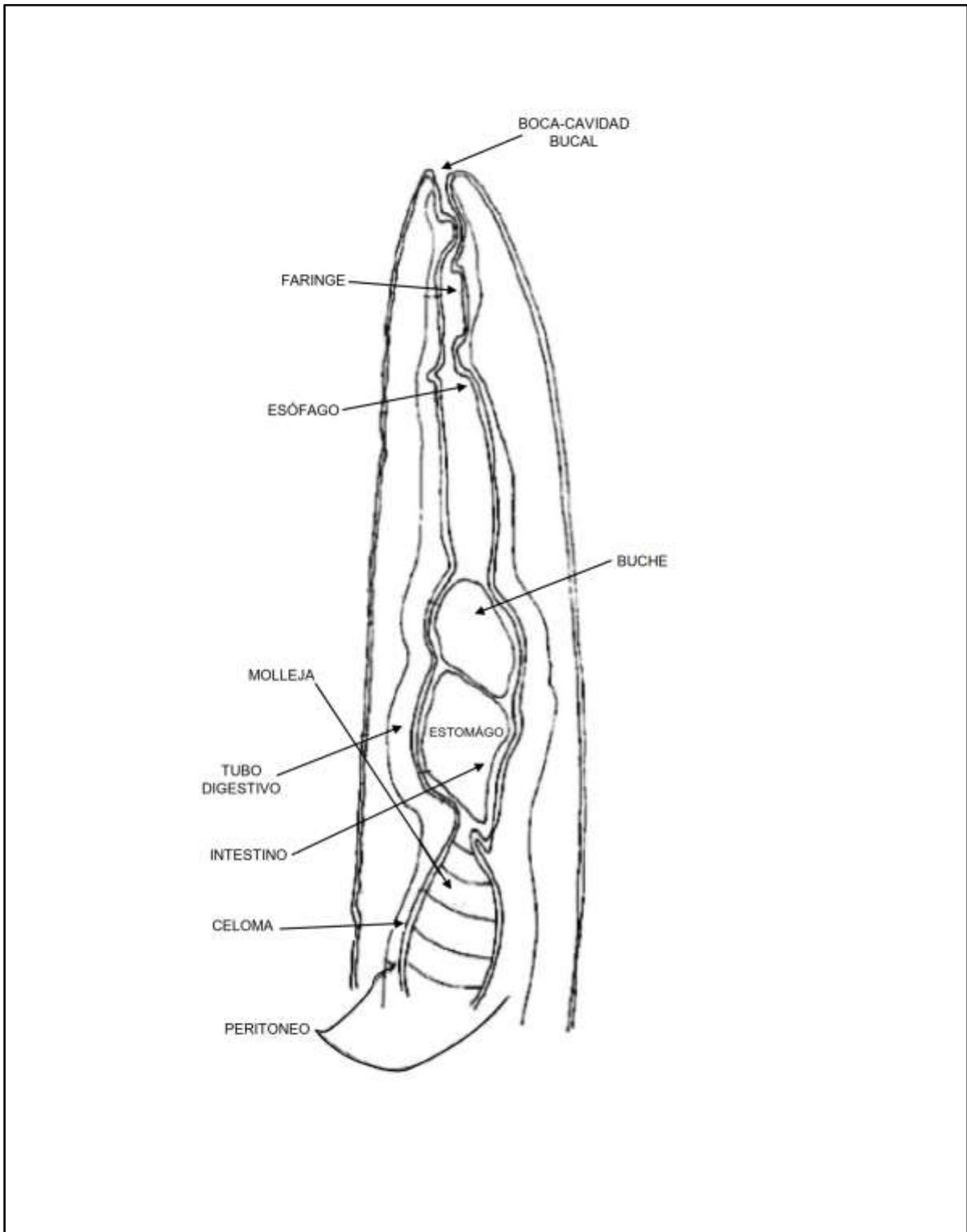
- Pared del cuerpo: Cubierta por un peritoneo delgado y suave, encontrándose entre la masa circular de las células pigmentadas, tejido conjunto y capilares sanguíneos.
- Tabiques: Conocidos como septos, que se encargan de separar los segmentos secuenciales que están conformados en el peritoneo.
- Glándulas de Morren: Son aquellas encargadas de generar calcio ubicadas en el esófago.
- Faringe: Es la primera división del tubo digestivo seguido de la boca.
- Molleja: Se ubica en el esófago con una estructura gruesa y musculosa del tubo digestivo.
- Buche: Se ubica entre el esófago y la molleja de contextura ancha y paredes delgadas.
- Esófago: Es recto y largo donde se depositan 3 glándulas calcíferas.
- Intestino: Se reconoce por la presencia de las válvulas y transición brusca con el esófago.

- Nefridios: Conocidos como holonefridios el cual posee un par de nefridios por segmentos y metanefridios por contar con más de un órgano principal del sistema excretor.
- Bazo dorsal y ventral: Son considerados los principales del aparato circulatorio ubicándose sobre el tubo digestivo y el bazo ventral debajo de este. En algunas ocasiones el bazo dorsal puede ser doble.
- Bazo supra-intestinal y supra-esofágico: Es un bazo impar que no siempre estará ubicado entre el esófago, intestino y el bazo dorsal.
- Bazo extra-esofágico: Bazo que corre a los lados del esófago y los corazones a veces se fusionan en un bazo único sobre el esófago.
- Corazones: Están ubicadas en la región esofágica del cuerpo y se presentan en tres clases: corazones laterales, corazones intestinales y corazones latero intestinales.
- Testículos: Están conformados por dos pares pequeños situados entre los segmentos 10 y 12, es considerada holándrica cuando tiene dos pares de testículos y meroándrica cuando tiene un par.
- Pabellones testiculares: Se presenta de forma alargada en diferentes canales y son identificas por el color brillante a causa de los espermatozoides aglutinados.
- Conductores masculinos: Son aquellos que liberan a los espermatozoides pertenecientes a cada testículo, prolongándose a la parte posterior del cuerpo.

- Sacos testiculares: Es la cámara que cubre los testículos y pabellones testiculares constituidos por el peritoneo.
- Vesículas seminales: Son tejidos pares del tabique después y antes de los segmentos testiculares, con características voluminosas y suaves a causa de la presencia de los espermatozoides.
- Ovarios: Por lo general son un par denominadas metaginadas, sin embargo, no es muy frecuente que tengan dos pares y pueden denominarse halogénicas.
- Ovisacos: Son tejidos pares del tabique posterior del segmento donde se encuentra ubicado el ovario.
- Espermatecas: Son aquellos receptores de los espermatozoides generados por la otra lombriz al momento de la cópula.

Figura 2

Anatomía de la lombriz roja californiana



Nota. Tomada de Mejía (2000).

d. Principales cualidades de la *Eisenia fetida*

Somarriba y Guzmán (2004), establece las siguientes cualidades:

- Presenta un orificio que le permite succionar los alimentos teniendo en cuenta que no cuenta con la presencia de dientes.

- La presencia de rayos solares es letal para la lombriz inmediatamente.

- Es de cuerpo redondo, anillado y cuenta con 120 - 175 segmentos, cubierta de una cutícula fina de color blanco rosa, cuando la lombriz es adulta mide entre 6 – 8 cm de largo, con diámetro entre 3 – 5 mm y el color varía a rojizo oscuro.

- Respiran por medio de la piel excretando humus el cual es necesario que este se mantenga húmedo para la deposición de humus.

- El aparato circulatorio de la lombriz está conformado por cinco pares de corazones y tres pares de riñones.

- Se le considera hermafrodita ya que presenta ambos sexos y no permite autofecundarse, por ello es necesario que otro individuo de su misma especie se acople.

- El clitelium es un anillo que presenta una glándula cuya función es expulsar capullos donde se encuentran sus huevecillos.

- Se encuentran aptas para su reproducción cuando a los 3 meses ya formaron el clitelo que permite el apareamiento durante un mínimo de 7 días y tiene un tiempo de duración de 15 minutos dando lugar a 1 500 individuos por año.

Por otro lado, Loza *et al* (2011) señalan:

- En los Estados Unidos la cría de lombrices data de unos 50 años, siendo la lombriz roja californiana.
- La lombriz roja (*Eisenia ssp.*) se desarrolla bien bajo temperaturas promedio de 30°
- Las lombrices tienen capacidad de poder autoregenerarse.
- Está conformada de 80 % agua y 20 % materia seca debido a que cuenta con 65 % de proteína.

e. Condiciones ideales y desfavorables de su hábitat

Según Mejía (2000), menciona las siguientes condiciones:

- Uso del alimento (residuos orgánicos) de manera natural con aire, agua y sin presencia de olores.
- El pH del alimento es de 6 – 8,5.
- Humedad idónea de 75 %.

- Temperatura interna del medio de 15 – 25 °C.
- Peso medio de la lombriz adulta es de 1 g.
- Riego con agua esterilizada y potable.
- Cada año el m² de 160,000 lombrices rojas produce 200 kg de humus al 45 % de humedad.
- La superficie requerida es de 6000 m² como mínimo de un suelo permeable.

f. Alimento de la lombriz

Según Mejía (2000), menciona que como parte de su dieta alimenticia de la especie *Eisenia fetida* se puede utilizar los siguientes guanos:

- Estiércol de vaca: Tiene alto contenido de nutrientes, cuando hay presencia de exceso de humedad tiende apelmazarse no permitiendo que las lombrices se desarrollen en ese medio, por ello es importante añadir fibras vegetales.
- Estiércol de conejo: Alimento más deseable por las lombrices debido a sus propiedades físicas y de fácil manejo.
- Estiércol de caballo: Considerado como un buen alimento para las lombrices y fácil de manejarlo.

- Estiércol de oveja: Es un alimento muy eficiente y fácil de manejarlo.

- Estiércol de gallina: Para disminuir la concentración de proteínas, aumentar su volumen y evitar la saturación de la humedad es necesario ser mezclado con fibra de vegetales.

- Estiércol de cerdo: Para disminuir la concentración de proteínas y aumentar su volumen requiere de la incorporación de fibra vegetal.

- Desechos de vegetales: Es necesario añadir fibra vegetal al alimento de la lombriz para facilitar el acceso al momento que la degradación tenga la característica de papilla.

- Aserrín y viruta: Son provenientes de restos de maderas y las maderas rojas son letales para el desarrollo de la lombriz ya que presentan tanino y lignina. Por ello, es recomendable utilizar aserrín y viruta debido a que la presencia de microorganismos que presenta el estiércol ayuda a la disgregación de la lignina.

g. Estiércol de *Eisenia fetida*

Candelaria *et al.* (2013), definen a las excretas de esta especie como un fertilizante natural que se obtiene de la modificación de los desechos vermicompostados y ser aplicados como abonos orgánicos en suelos deteriorados.

Mamani (2011), citado por Ticona (2016), lo define como fertilizante bioorgánico obtenido por la ingesta de la lombriz siendo un abono no fermentado y puede ser asimilado como nutriente por las plantas, contiene una humedad de 55 %.

1.2.7. Características del suelo

a. Características físicas

- Estructura del suelo: Es el arreglo de las partículas presentes en el suelo considerando los agregados o elementos estructurales (Rucks *et al.*, 2004).

- Coloración del suelo: Depende del nivel de oxidación de los compuestos minerales como los óxidos, sulfuros, sulfatos, carbonatos y varía con la cantidad de humedad presente en el suelo (Rucks *et al.*, 2004).

- Consistencia del suelo: Es definida como las manifestaciones de las fuerzas físicas de cohesión y adhesión actuando dentro del suelo a varios contenidos de humedad (Rucks *et al.*, 2004).

- Porosidad del suelo: Es la cantidad de suelo que no está obstruido por algún sólido que está determinado por características cualitativas y cuantitativas (Rucks *et al.*, 2004).

- Consistencia del suelo: Normalmente es determinado por el peso de las sustancias sólidas por el volumen estándar de partículas, existen dos formas de densidad (real y aparente) (Rucks *et al.*, 2004).

- Textura del suelo: Se representa el porcentaje en que se encuentran los elementos que constituyen el suelo como la arena, limo y arcilla, considerando que este factor es importante para la fijación del sistema radículas de las plantas y su nutrición (Rucks *et al.*, 2004).

b. Características químicas

- Capacidad de intercambio catiónico (CIC): detecta las cargas negativas encontradas en los minerales y compuestos orgánicos de la corteza terrestre, además, indica la cantidad de cationes que pueden ser retenidas (FAO, 2022).
- pH: es un indicador de filtración de iones e indica si el suelo es ácido o alcalino, sus valores varían de 3,5 (ácido) - 9,5 (alcalino) (FAO, 2022).
- Nitrógeno: es un elemento de gran importancia, nutritivo para las plantas y es distribuido en la naturaleza (FAO, 2022).
- Salinización: es la acumulación de sales en el nivel freático salino del suelo y se transporta con el agua a la superficie a través de un ascenso capilar (FAO, 2022).

CAPÍTULO II: MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Diseño de investigación

El diseño de la investigación fue experimental y es que estos se caracterizan por ser diseños de investigación que se usan generalmente para evaluar alguna medida numérica; sin embargo, con estos diseños también se evalúan otro tipo de intervenciones (Zurita – Cruz, 2018).

En ese sentido es preciso para la manipulación de variables independientes produciendo cambios en las dependientes, el estudio fue cuantitativo y es que este es un método de investigación que utiliza herramientas de análisis matemático y estadístico para describir, explicar y predecir fenómenos mediante datos numéricos, ya que se generaron datos para demostrar la hipótesis y el alcance de esta investigación fue explicativo (Hernández *et al.*, 2014).

2.1.1. Lugar y fecha

La presente investigación se realizó con suelo proveniente de la localidad de Jecuán, distrito y provincia de Huaral – Lima, ubicada en las coordenadas UTM WGS84 Zona 18 L 251 845,74 m E 8 728 679,03 m S, comprendiendo la franja costera respecto a todo el valle Chancay ubicado a una altitud de 188 m s.n.m (Figura 3).

2.1.2. Materiales

- Suelo agrícola: 50 kg aproximadamente procedentes de la zona adyacente a la mina Colquisiri.

- Estiércol de conejo: Procedente de la ONG-ALEV un total de 24 kg.

- Lombrices californianas: 3 kg de *Eisenia fétida* “lombriz roja californiana”.

- Tapers: Capacidad de 3 kg utilizado en el proceso experimental, del mismo modo, se utilizaron tapers de un litro de capacidad donde las lombrices pasaron la prueba de hambre por 12 horas.

- Agua desionizada: 4 galones de agua destilada utilizados para el lavado de las lombrices y mezclado de suelo con el estiércol.

- Papel toalla: Utilizado como base en los tapers para que las lombrices reposen y pasen la prueba de hambre.

- Dispensador de agua: Que se utilizó para humedecer el papel toalla y el sustrato utilizado.

- Hojas bond: Para el rotulado de cada tratamiento empleado.

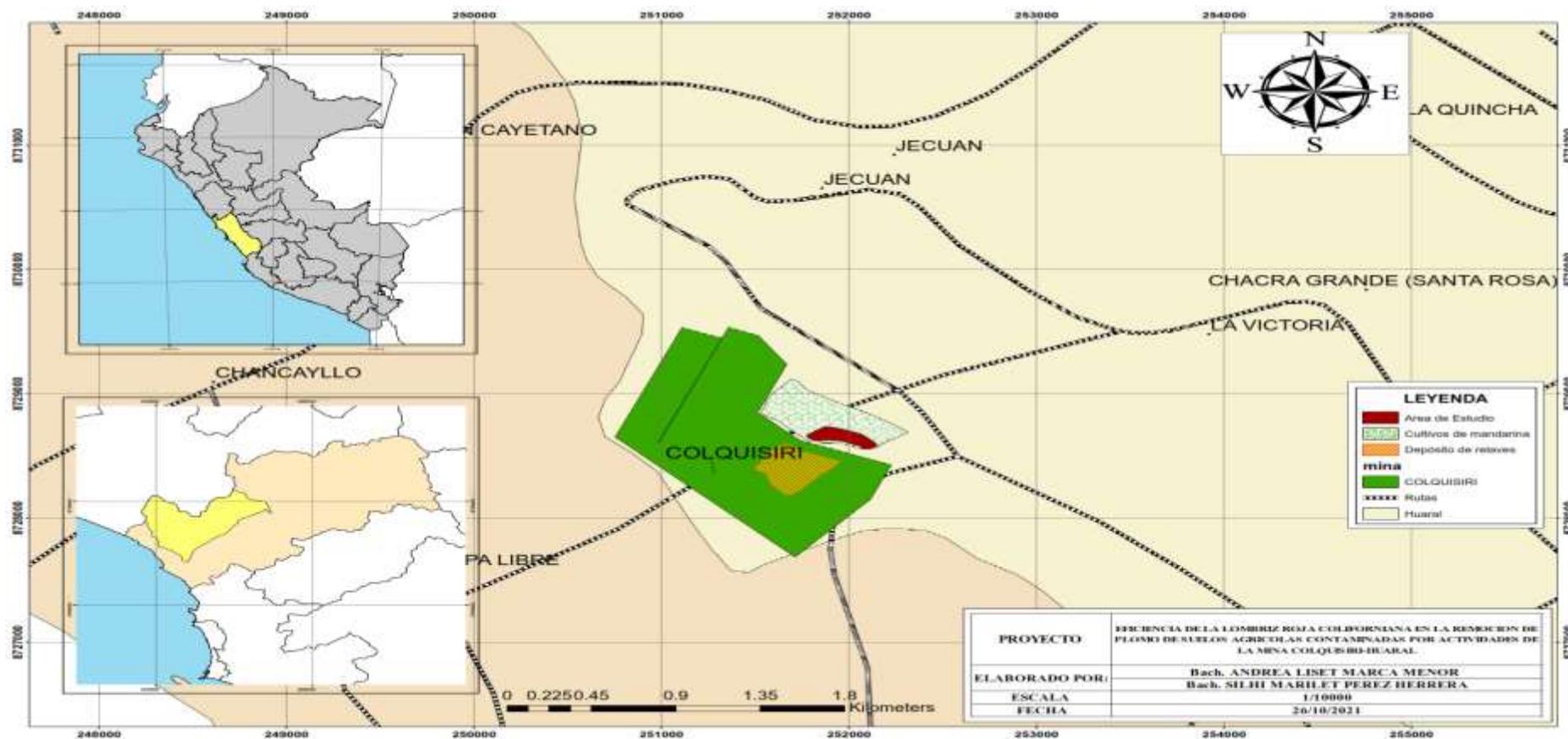
- Brochetas de bamboo: Separadores utilizados como soportes del cartel con el rotulado del tratamiento.

- Tina: Utilizado para el lavado de las lombrices y humectación de la tierra contaminada con el estiércol de conejo.

- Marcador: Se utilizó para la rotulación de cada uno de los puntos de donde se procedió a retirar la muestra de suelo.
- Plástico: Se utilizó para realizar el tamizado y cuarteo de la muestra de suelo en campo.
- Saco: Se utilizó para el transporte de la muestra de suelo recolectada.
- Wincha (Stanley): Utilizada para la medición de las dimensiones del área de donde se procedió a retirar la muestra de suelo.
- Balanza: Se utilizó la balanza de capacidad de 5 kg de la marca Kitchen Sacale Nops para el correcto pesaje de la cantidad de tierra contaminada y estiércol de conejo.
- GPS: Se utilizó el equipo de la marca Garmin para determinar las coordenadas UTM de cada uno de los puntos donde se toma la muestra.
- Tamiz: Utilizado para cernir con un diámetro de 2-3 mm.
- Guardapolvo
- Guantes quirúrgicos de látex

Figura 3

Localización geográfica del área



Nota. Elaboración propia.

2.1.3. Descripción del experimento

a. Fase de campo

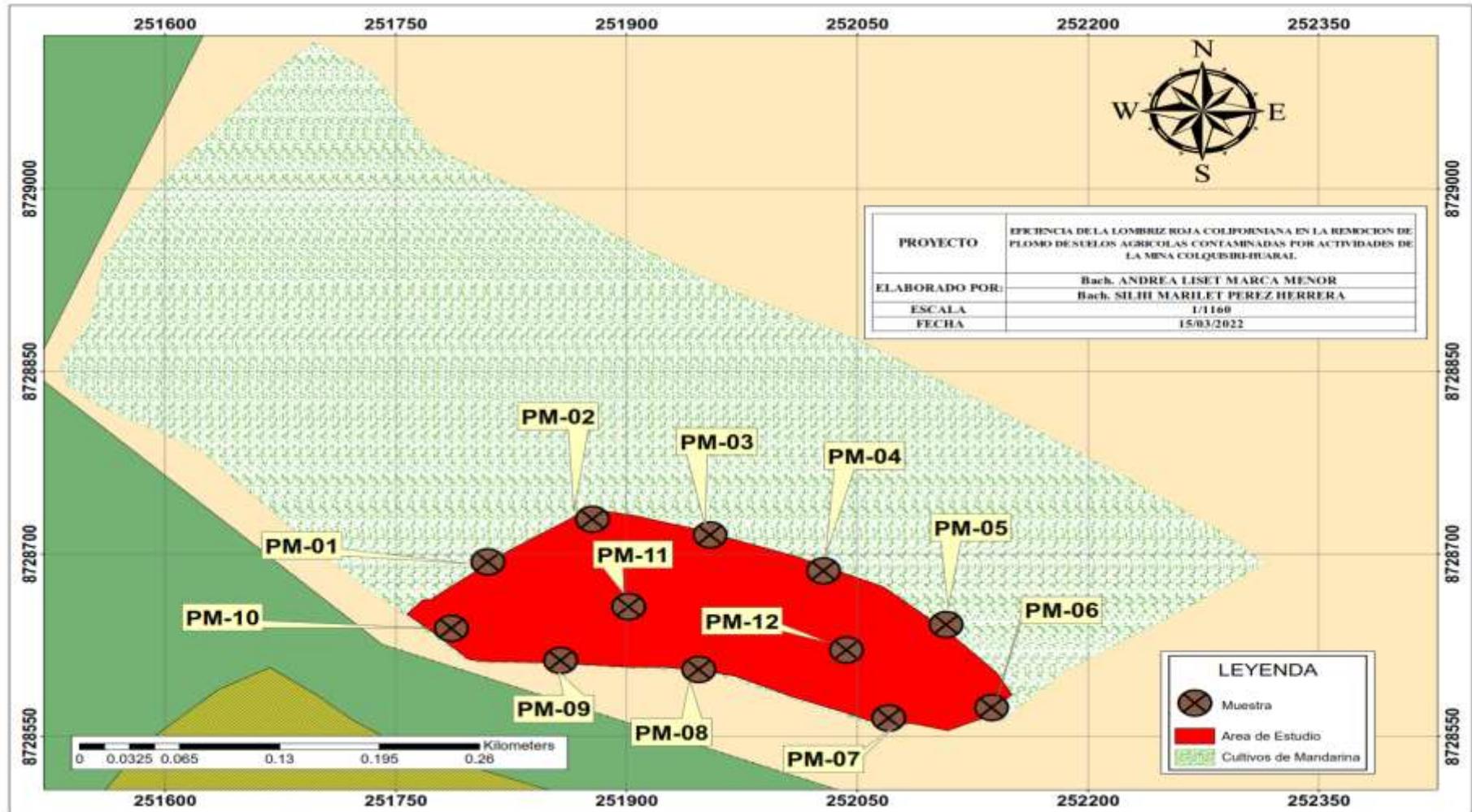
- Recolección de la muestra de suelo

Para llevar a cabo la investigación, se identificó una zona agrícola de 2 hectáreas cercana a la mina Colquisiri, que estaba afectada por niveles de plomo superiores al rango permitido de 70 mg/kg en suelo agrícola. Se seleccionaron 12 puntos de muestreo dentro de esta zona y en cada punto se realizó una calicata de 1m² con una profundidad de 30 cm, lo que resultó en una cantidad total de 40 kg de tierra.

Posteriormente, siguiendo el proceso de cuarteo descrito en la guía de muestra de suelos establecida en el marco del D.S. N° 002 MINAM (2013), se seleccionó una muestra de 50 kg de tierra para llevar a cabo el experimento. Esta muestra fue la que se utilizó para evaluar la eficiencia de la lombriz californiana en la remoción de plomo del suelo contaminado. (Figura 4).

Figura 4

Ubicación de los puntos de muestreo



Nota. Elaboración propia.

- **Determinación de los parámetros fisicoquímicos (pH, C.E, M.O, P, K, clase textural y CIC) y Pb del suelo inicial**

Para la determinación de los parámetros fisicoquímicos y plomo (Pb) de la muestra inicial fue trasladado un kilogramo de suelo al laboratorio de la Universidad Nacional Agraria La Molina (UNALM) con el fin de realizar la respectiva caracterización del sustrato.

b. Fase experimental

La segunda parte del experimento fue llevada a cabo en la ciudad de Lima en el distrito de Carabaylo ubicado en las coordenadas UTM WGS84 Zona 18 L latitud: -11,89 y longitud: -77,0269 en el mes de julio del 2021. A continuación, se describe cada uno de los procesos realizados durante la elaboración del experimento (Figura 5) basándose en la metodología de Laricano (2018):

- **Cernido y pesado**

La tierra extraída y el estiércol de conejo recolectado fueron cernidos mediante un tamiz de diámetro aproximado de 2 – 3 mm para afinar la textura de las muestras, eliminar grumos y filtrar impurezas. Luego se realizó el pesado de cada uno de los componentes mencionados en una balanza de 5 kg de capacidad de la marca Kitchen Sacale Nops.

- **Mezclado y humedecido**

El proceso consistió en homogenizar la tierra y el estiércol de conejo con 750 mL de agua desionizada hasta obtener un 75 % de humedad. Asimismo, Palafox *et al.* (2012), señaló una técnica de medición de la humedad donde se debe colocar una cápsula de porcelana a peso constante, pesar 25 g tomando en cuenta el peso de la cápsula y seguido a ello anotar el peso de la muestra. A través de una estufa de 103 a 104 °C se realizó el secado por 24 h, posteriormente se colocó en un desecador para enfriar y pesar nuevamente, registrando el peso total y realizando el siguiente cálculo.

$$H_s = \frac{(P_i - P_f)}{(M - (P_i - P_f)) \times 100}$$

Donde:

H_s : humedad del suelo (%)

P_i : peso inicial (peso de la muestra + peso constante de la cápsula, en g)

P_f : peso final después de secar (peso de la muestra seca + peso constante de la cápsula, en g)

M : peso inicial de la muestra utilizada (25 g)

El suelo debe contener una humedad que varía entre los 35 a 45 %. Para ser ajustada se procede con el siguiente cálculo, donde se puede determinar la cantidad de agua que debe incorporarse al suelo durante la prueba tal como señala Palafox *et al.* (2012).

$$H_f = H_r - H_s$$

Donde:

H_f = humedad a adicionar o faltante en el suelo (%)

$$W = \frac{M \times H_f \times f}{100}$$

Donde:

W = cantidad de agua para adicionar (mL)

M = peso de la muestra (g)

f = factor de conversión (1 mL/g)

H_f = humedad a adicionar o faltante en el suelo (%)

- **Prueba de hambre**

Para la obtención de las lombrices utilizadas en el experimento, se recurrió a la ONG ALEV “Asociación de Líderes de Educación Verde” y se aplicó un muestreo simple. El procedimiento consistió en tomar una muestra de lodo al azar en cada tratamiento y contar la cantidad y tamaño de las lombrices. Se realizaron tres repeticiones para obtener un promedio de cada montaje.

Antes de comenzar el experimento, se sometió a las lombrices a una prueba de hambre para vaciar sus intestinos y asegurarse de que no habría residuos en sus sistemas digestivos que pudieran afectar los resultados. El procedimiento se llevó a cabo de la siguiente manera: primero, se lavaron las lombrices con agua destilada en un recipiente y luego se colocaron en una placa Petri o envase cerrado sobre papel filtro humedecido con agua desionizada durante 12 horas.

Para determinar el género y la especie de las lombrices utilizadas en el experimento, se requeriría una identificación taxonómica más detallada y especializada que involucra la observación de características físicas y morfológicas específicas.

Sin embargo, puedo proporcionar algunas generalidades sobre las lombrices de tierra comunes utilizadas en la vermicompostaje, que podrían ser las mismas que se utilizaron en este experimento. Hay varias especies de lombrices de tierra, pero las más comunes son *Eisenia fetida* y *Eisenia andrei*. Ambas especies son comúnmente utilizadas en la producción de vermicompost y se pueden distinguir por características como el tamaño y la pigmentación.

Las lombrices de tierra en general, tienen cuerpos alargados y segmentados que les permiten moverse en el suelo. También presentan un anillo visible en cada segmento de su cuerpo y pueden variar en tamaño y color. Los expertos en la identificación de lombrices pueden observar características detalladas, como la forma y el número de cerdas en los segmentos del cuerpo, así como las características del clitelo (una banda de tejido que produce la cápsula de huevo), para ayudar a determinar el género y la especie de una lombriz en particular.

En resumen, para determinar con precisión el género y la especie de las lombrices utilizadas en este experimento, se requeriría una identificación taxonómica más detallada por parte de un experto en el campo

- **Adición de las lombrices**

Una vez que se ha realizado el mezclado y humedecido tanto la tierra contaminada como el estiércol de conejo, se procedió a añadir la densidad de lombrices determinadas para cada tratamiento.

- **Envasado**

La mezcla de suelo y estiércol de conejo (debido a que es un alimento deseable por las lombrices y de fácil manejo) fueron depositados según medida en tapers de plástico con una distribución uniforme, dejando un espacio en el centro del envase para colocar las lombrices y puedan desplazarse una vez colocadas.

- **Instalación de los experimentos**

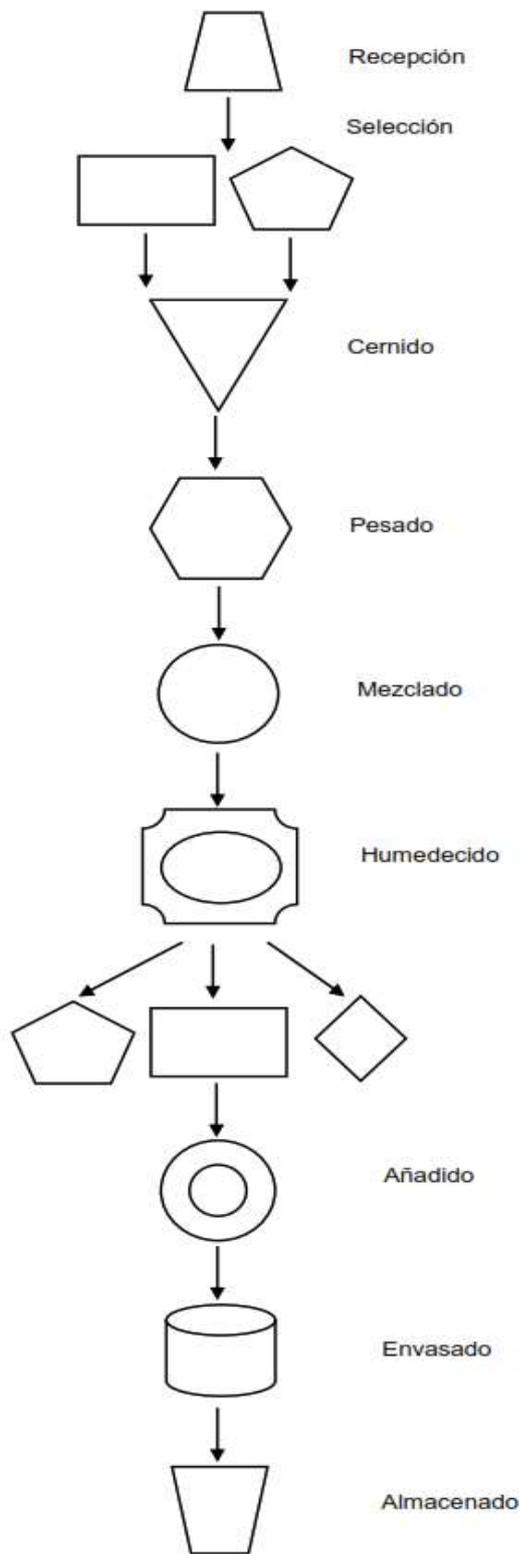
Se instaló el experimento colocando las lombrices que superaron la “prueba de hambre” de 24 horas en cajas con el suelo homogenizado en densidades de 80, 110, 140 y 170 unidades siguiendo la metodología utilizada por Laricano (2018).

- **Almacenado**

Por último, se realizó el envasado para cada uno de los tratamientos que fueron almacenados entre 15 días, 30 días y 45 días hasta culminar el tiempo planteado.

Figura 5

Desarrollo del experimento



ESQUEMA DE OPERACIONES		
Símbolo	Nombre	Actividad
	Almacenamiento (I)	1
	Inspección y proceso	1
	Inspección	1
	Proceso	1
	Inspección y proceso	1
	Proceso	1
	Proceso	1
	Almacenamiento (F)	1
TOTAL		8

Nota. Elaboración propia.

El primer muestreo se llevó a cabo a los 15 días de iniciado el experimento. Consistió en tomar una muestra de 1 kg de suelo de cada tratamiento, para luego distribuirlos en diferentes densidades las lombrices sobrevivientes. Posteriormente, las muestras de suelo fueron enviadas al laboratorio de suelos de la Facultad de Agronomía de la Universidad Nacional Agraria La Molina, para su respectiva caracterización y para determinar el porcentaje de plomo presente en cada muestra.

Para determinar el porcentaje de remoción de metales, se utilizó la espectrofotometría de absorción atómica (AA) para medir las concentraciones de plomo antes y después del tratamiento con las lombrices. Luego, se aplicó la siguiente ecuación (Torres *et al.*, 2018):

$$(\%)remoción = \frac{C_o - C_t}{C_o} \times 100$$

Donde C_o es la concentración inicial de plomo en el suelo antes del tratamiento y C_t es la concentración de plomo en el suelo después del tratamiento con las lombrices. Este cálculo permite determinar el porcentaje de plomo que fue removido del suelo gracias a la acción de las lombrices.

2.1.4. Tratamientos

Los tratamientos estudiados fueron 12 como resultado de la interacción de los factores en estudio el cual estuvo conformado por cuatro densidades de lombrices roja californianas, suelo contaminado con plomo (Pb) y estiércol de conejo, los mismos que están descritos en la Tabla 4 y en la Tabla 5 se describe la codificación de cada tratamiento. Las densidades de lombrices usadas en cada tratamiento fueron adaptadas de Laricano (2018).

Tabla 4*Codificación de tratamientos*

Variables	Codificación
Período de exposición (días)	15 (a1)
	30 (a2)
	45 (a3)
Densidad de lombrices (unidades)	80 (b1)
	110 (b2)
	140 (b3)
	170 (b4)

Nota. Elaboración propia.**Tabla 5***Descripción de los tratamientos*

Codificación de tratamientos	Descripción
T0 Suelos agrícolas + estiércol de conejo	
T1 a1b1	(1kg de suelo agrícola + 1 kg estiércol de conejo) + 80 lombrices
T4 a1b2	(1kg de suelo agrícola + 1 kg estiércol de conejo) + 110 lombrices
T7 a1b3	(1kg de suelo agrícola + 1 kg estiércol de conejo) + 140 lombrices
T10 a1b4	(1kg de suelo agrícola + 1 kg estiércol de conejo) + 170 lombrices
T2 a2b1	(1kg de suelo agrícola + 1 kg estiércol de conejo) + 80 lombrices
T5 a2b2	(1kg de suelo agrícola + 1 kg estiércol de conejo) + 110 lombrices
T8 a2b3	(1kg de suelo agrícola + 1 kg estiércol de conejo) + 140 lombrices
T11 a2b4	(1kg de suelo agrícola + 1 kg estiércol de conejo) + 170 lombrices
T3 a3b1	(1kg de suelo agrícola + 1 kg estiércol de conejo) + 80 lombrices
T6 a3b2	(1kg de suelo agrícola + 1 kg estiércol de conejo) + 110 lombrices
T9 a3b3	(1kg de suelo agrícola + 1 kg estiércol de conejo) + 140 lombrices
T12 a3b4	(1kg de suelo agrícola + 1 kg estiércol de conejo) + 170 lombrices

Nota. Elaboración propia.

2.1.5. Unidades experimentales

En el estudio descrito, se utilizó *Eisenia fetida* como un organismo modelo para investigar su capacidad para remover el plomo del suelo agrícola contaminado. Sin embargo, la unidad experimental real no fue la lombriz de tierra en sí, sino el sistema suelo-lombriz, que consistió en la lombriz de tierra y el suelo agrícola contaminado que se colocó en la caja de plástico. El suelo y la lombriz de tierra se consideran una unidad funcional porque interactúan entre sí y tienen un impacto en el comportamiento y la supervivencia del otro.

Por lo tanto, la unidad experimental en este estudio fue el sistema suelo-lombriz, que se utilizó para investigar la capacidad de la lombriz de tierra para remover el plomo del suelo contaminado.

La unidad experimental se replicó en varios bloques, que se refieren a las diferentes cajas de plástico que contenían los diferentes tratamientos. Por lo tanto, la unidad experimental fue el sistema suelo-lombriz, que se repitió en múltiples bloques.

2.1.6. Identificación de variables y mensuración

En el presente estudio, es importante definir con mayor precisión las variables que se toman en cuenta y a su vez definir la manera que se midió cada una de estas variables (Tabla 6).

Variable independiente: Aplicación de *Eisenia fetida* “lombriz roja californiana”. Se realizó el conteo de diferentes unidades de 80, 110, 140 y 170 lombrices que fueron depositadas en 36 tapers de 20 cm de alto x 30 cm de largo.

Variable dependiente: Remoción de plomo (Pb) en suelos contaminados por relaves mineros a través de la eficiencia de *Eisenia fetida* “lombriz roja californiana”.

Tabla 6

Matriz de operacionabilidad de variables

Variables	Definición conceptual	Definición operacional	Dimensiones	Indicadores	Escala de medición
Independiente: <i>Eisenia fétida</i> “lombriz roja californiana”	La lombriz roja es una especie de lombriz de tierra capaz de convertir los metales pesados en humus rico en nutrientes.	Densidades de <i>Eisenia fétida</i> para reducir plomo.	Nº de lombrices	Conteo de lombrices	Unidades de lombriz
Dependiente: Remoción de plomo en suelos agrícolas	Un suelo es denominado contaminado cuando la cantidad de contaminantes superan los niveles dispuestos por el ECA suelo.	Remoción de plomo en suelo agrícola, expuesto a diferentes tiempos a las lombrices. Variación de los parámetros fisicoquímicos del suelo después de utilizar lombrices.	Remoción de plomo Análisis de suelos en laboratorio	$(\%) = \frac{CO - CT}{CO} \times 100$ pH C.E CaCO ₃ M.O P K Clase textural Cationes cambiabiles Pb Cd	(%) Numérico (mS/cm) (%) (%) (ppm) (ppm) - - (ppm) (ppm)

Nota. Elaboración propia.

2.1.7. Diseño estadístico

Para este estudio se empleó el diseño completamente al azar (DCA) con arreglo factorial $(4*3) + 1$.

$$Y_{ijk} = \mu + t_i + \beta_j + t\beta_{ij} + \delta_k + \varepsilon_{ijk}$$

Diseño estadístico: DCA

Donde:

Y_{ijk} = variable respuesta

μ = efecto común de todas las observaciones

t_i = efecto de la i-ésimo del factor tiempo de exposición

β_j = efecto de la j-ésimo nivel del factor densidad de lombrices

$t\beta_{ij}$ = interacción del i-ésimo nivel del factor tiempo de exposición con el j-ésimo nivel del factor densidad de lombrices

δ_k = efecto del k-ésimo nivel

ε_{ijk} = error del modelo

2.1.8. Análisis estadístico de datos

Se utilizó el software estadístico Infostat versión 2020I estudiantil para procesar los datos obtenidos del laboratorio, a través del método de ANOVA a un nivel de confianza del 95 %, además, se realizó la prueba de Tukey para determinar las variaciones posteriores al ANOVA.

CAPÍTULO III: RESULTADOS

3.1. Resultados de la caracterización inicial de los parámetros fisicoquímicos y plomo (Pb) del suelo agrícola

Para la determinación de los parámetros fisicoquímicos y plomo (Pb) de la muestra inicial o tratamiento control fue trasladado un kilogramo de suelo al laboratorio de la Universidad Nacional Agraria La Molina (UNALM) con el fin de realizar la respectiva caracterización del sustrato.

La Tabla 7 muestra los resultados de la caracterización inicial de los parámetros fisicoquímicos y plomo (Pb) que fue realizada en el laboratorio de la Universidad Nacional Agraria la Molina, donde se evaluaron el pH, C.E, CaCO₃, M.O, P, K, capacidad de intercambio catiónico, clase textural y concentración de plomo (Pb).

Tabla 7

Caracterización de suelo inicial

Parámetros evaluados	Resultados
pH (1:1)	7,71
C.E (dS.m ⁻¹)	8,69
CaCO ₃ (%)	2,86
M.O (%)	10,39
P (ppm)	678,8
CIC (cmol ⁽⁺⁾ .kg ⁻¹)	11,20
Pb (ppm)	52,09
Clase textural	Franco arenosa

Nota. Elaboración propia.

3.2. Efecto de las lombrices en el porcentaje de remoción de plomo (Pb)

Los resultados obtenidos de nuestras muestras procesadas en el laboratorio de suelos de la Facultad de Agronomía de la Universidad Nacional Agraria la Molina) (Apéndice 1) fueron evaluados mediante el análisis de varianza (ANOVA) donde se comprobó que el valor de F calculado es mayor al p-valor, lo cual indica que los promedios de los tratamientos son diferentes (Apéndice 4).

En la Figura 6 se evidencia la comparación de medias mediante la prueba de Tuckey la misma que indica que existe diferencia significativa entre los tratamientos. A la vez muestra que con una densidad de 170 lombrices se logró una remoción de 24,98 ppm de plomo (Pb) el cual estuvo conformado por el T10, T11 y T12; seguido con una densidad de 140 lombrices se logró una remoción de 25,06 ppm de plomo (Pb) conformado por el T7, T8 y T9; luego con una densidad de 80 lombrices se logró una remoción de 25,20 ppm de plomo (Pb) conformado por el T1, T2 y T3 y finalmente con una densidad de 110 lombrices se logró una remoción de 26,40 ppm de plomo (Pb) conformado por el T4, T5 y T6. Siendo la densidad de 170 lombrices la más significativa en la remoción de plomo (Pb) Tabla 8.

Tabla 8

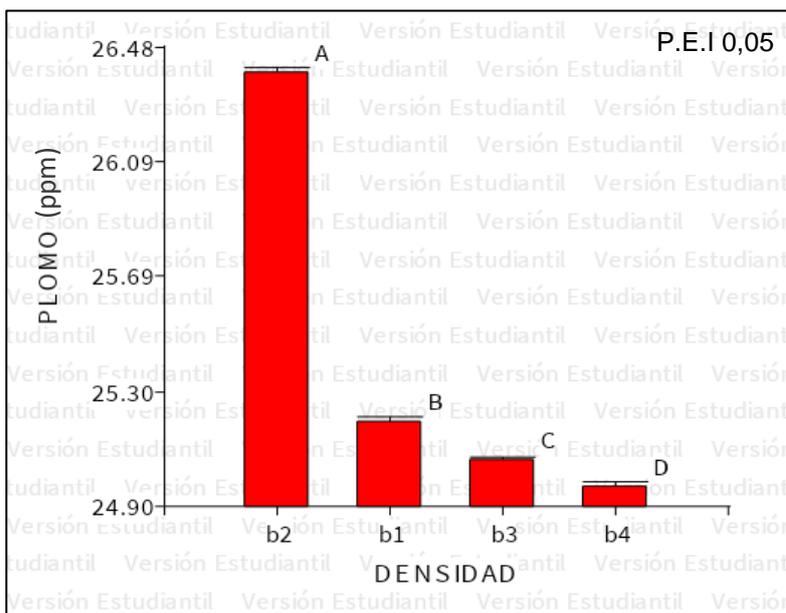
Comparación de medias de la densidad de lombrices vs la remoción de plomo (Pb)

Densidad	Medias	n	E.E.	
b2	26,40	9	0,01	A
b1	25,20	9	0,01	B
b3	25,06	9	0,01	C
b4	24,98	9	0,01	D

Nota. Elaboración propia.

Figura 6

Prueba de Tukey para la densidad de lombrices vs la remoción de plomo (Pb)



Nota. Software Infostat.

3.3. Resultados del efecto del tiempo de exposición de las lombrices en el porcentaje de remoción de plomo (Pb)

El resultado del análisis efectuado a nuestras muestras en el laboratorio de suelos de la Facultad de Agronomía de la Universidad Nacional Agraria la Molina (ver Apéndice 1) fueron evaluados mediante el análisis de varianza (ANOVA) donde se comprobó que el valor de F calculado es mayor al p-valor, lo cual indica que los promedios de los tratamientos son diferentes (ver Apéndice 1).

En la Figura 7 se evidencia la comparación de medias mediante la prueba de Tuckey la misma que indica que existe diferencia significativa entre los períodos de exposición. Además, muestra que en un período de 45 días se logró una mayor remoción con una concentración de 23,25 ppm; seguido el período de 30 días con una concentración de 25,30 ppm y la menor remoción se evidenció en el período de 15 días. Siendo el período de 45 días el más significativo en la remoción de plomo (Pb) Tabla 9.

Tabla 9

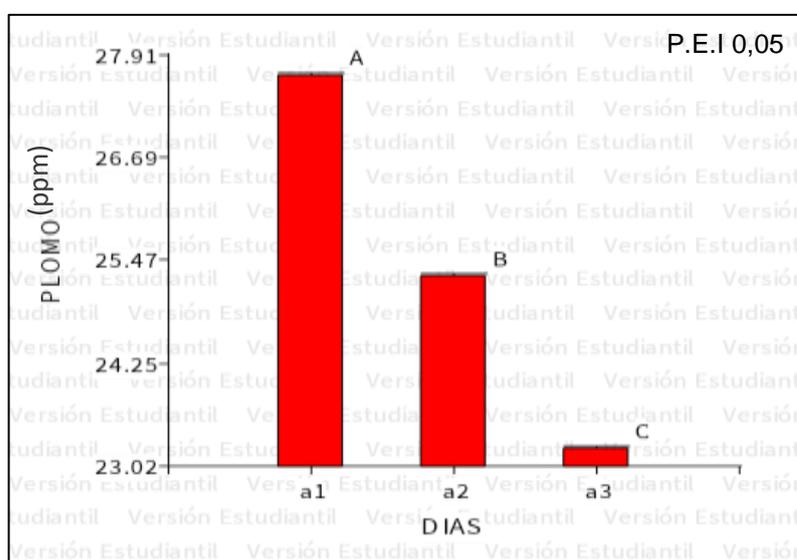
Comparación de medias del período de exposición vs la remoción de plomo (Pb)

Días	Medias	n	E.E.	
a1	27,68	12	0,01	A
a2	25,30	12	0,01	B
a3	23,25	12	0,01	C

Nota. Elaboración propia.

Figura 7

Prueba de Tukey para el período de exposición vs la remoción de plomo (Pb)



Nota. Software Infostat.

En la Figura 8 podemos apreciar la interacción de la densidad de lombrices y el tiempo de exposición entre la remoción de plomo (Pb) mediante la comparación de medias a través de la prueba de Tuckey, la cual nos indica que existe diferencia significativa entre los tratamientos T4 (a1b2), T7 (a1b3), T11 (a2b3), T1 (a1b1), T6 (a3b2), T3 (a3b1), T8 (a2b4) y T9 (a3b3), mientras que en los tratamientos T2 (a2b1), T10 (a1b4), T5 (a2b2) y T12 (a3b4) no se encontró diferencia alguna. Por otro lado, en la Tabla 10 se muestra que el tratamiento T4 (a1b2) logró una mayor remoción de plomo y la menor remoción le corresponde al tratamiento T9 (a3b3).

Tabla 10

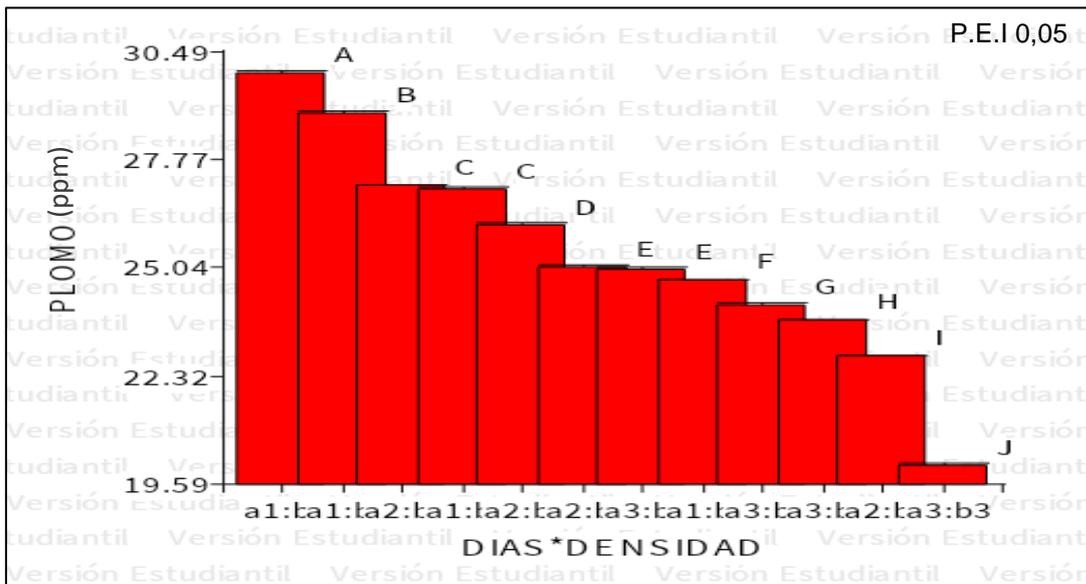
Comparación de medias de la densidad de lombrices y el tiempo de exposición vs la remoción de plomo (Pb)

Días	Densidad	Medias	n	E.E	
a1	b2	29,97	3	0,02	A
a1	b3	28,96	3	0,02	B
a2	b1	27,02	3	0,02	C
a1	b4	27,06	3	0,02	C
a2	b3	26,15	3	0,02	D
a2	b2	25,09	3	0,02	E
a3	b4	25,04	3	0,02	E
a1	b1	24,74	3	0,02	F
a3	b2	24,13	3	0,02	G
a3	b1	23,73	3	0,02	H
a2	b4	22,84	3	0,02	I
a3	b3	20,09	3	0,02	J

Nota. Elaboración propia.

Figura 8

Prueba de Tukey para la densidad de lombrices y el tiempo de exposición vs la remoción de plomo (Pb)



Nota. Software Infostat.

3.4. Efecto de la actividad de la lombriz en los parámetros fisicoquímicos de los suelos agrícolas después del experimento

3.4.1. Potencial de hidrógeno (pH)

En la Figura 9 se puede apreciar el efecto de la lombriz y el período de exposición en el pH del sustrato, mediante la comparación de medias a través de la prueba de Tuckey demuestra que el tratamiento T9 (a3b3) es diferente mientras que en el resto de los tratamientos no hay diferencia significativa. De igual manera muestra la Tabla 11 que el tratamiento a3 y a1 es el que logró mayor variación de pH en el sustrato.

Tabla 11

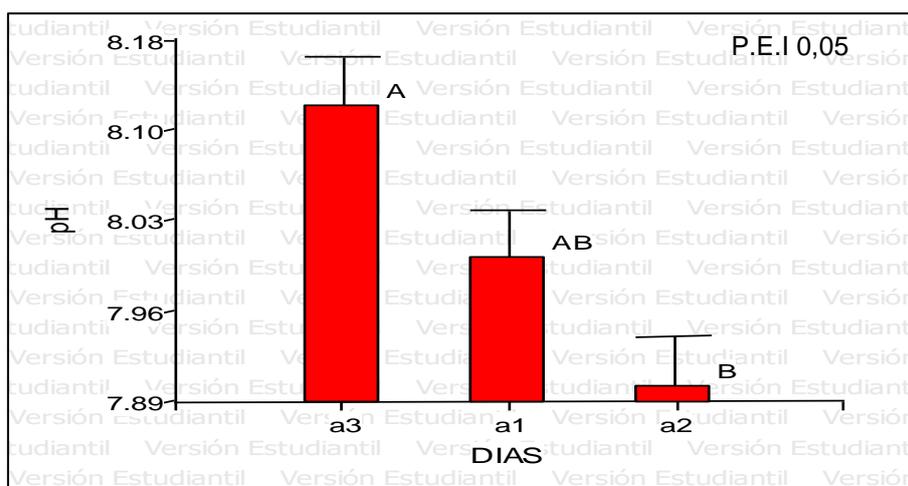
Comparación de medias de la densidad de lombrices y el tiempo de exposición vs pH

Días	Medias	n	E.E		
a3	8,13	12	0,04	A	
a1	8,00	12	0,04	A	B
a2	7,90	12	0,04		B

Nota. Elaboración propia.

Figura 9

Prueba de Tukey de la densidad de lombrices y el tiempo de exposición vs potencial de hidrógeno (pH)



Nota. Software Infostat.

3.4.2. Conductividad eléctrica (C.E.)

En la Figura 10 se puede evaluar el efecto de la lombriz y el período de exposición en la conductividad eléctrica, mediante la comparación de medias a través de la prueba de Tuckey la cual nos indica que en los tratamientos T1 (a1b1), T6 (a3b2), T3 (a3b1) y T7 (a1b3) no existe diferencia significativa, mientras que los tratamientos restantes son significativamente diferentes. Asimismo, la Tabla 12 evidencia que en el tratamiento T11 (a2b3) se logró una menor variación con 7,7 dS/m y en el tratamiento T12 (a3b4) se logró una mayor variación con 0,42 dS/m en relación a la conductividad eléctrica del sustrato muestreado.

Tabla 12

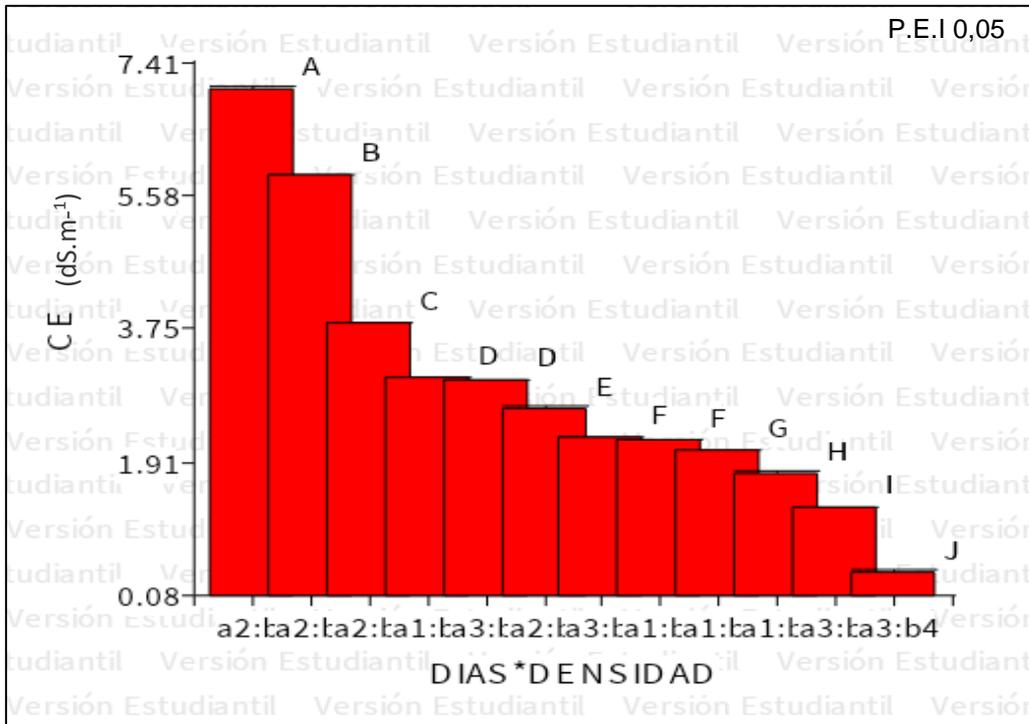
Comparación de medias de la cantidad de lombrices y el tiempo de exposición vs la conductividad eléctrica (C.E)

Días	Densidad	Medias	n	E.E	
a2	b3	7,07	3	0,01	A
a2	b2	5,88	3	0,01	B
a2	b1	3,82	3	0,01	C
a1	b1	3,07	3	0,01	D
a3	b2	3,04	3	0,01	D
a2	b4	2,67	3	0,01	E
a3	b1	2,25	3	0,01	F
a1	b3	2,22	3	0,01	F
a1	b4	2,07	3	0,01	G
a1	b2	1,78	3	0,01	H
a3	b3	1,31	3	0,01	I
a3	b4	0,42	3	0,01	J

Nota. Elaboración propia.

Figura 10

Prueba de Tukey para la densidad de lombrices y el tiempo de exposición vs conductividad eléctrica (C.E)



Nota. Software Infostat.

3.4.3. Materia orgánica (M.O)

En la Figura 11 se puede constatar el efecto de la lombriz y el período de exposición en la materia orgánica, mediante la comparación de medias a través de la prueba de Tukey se demuestra que los tratamientos T2 (a2b1) y T3 (a3b1) son diferentes, mientras que los tratamientos restantes no son significativamente diferentes. Asimismo, la Tabla 13 evidencia que en el tratamiento T11 (a2b3) se logró incrementar la materia orgánica mientras que en el T3 (a3b1) hubo una reducción de la misma.

Tabla 13

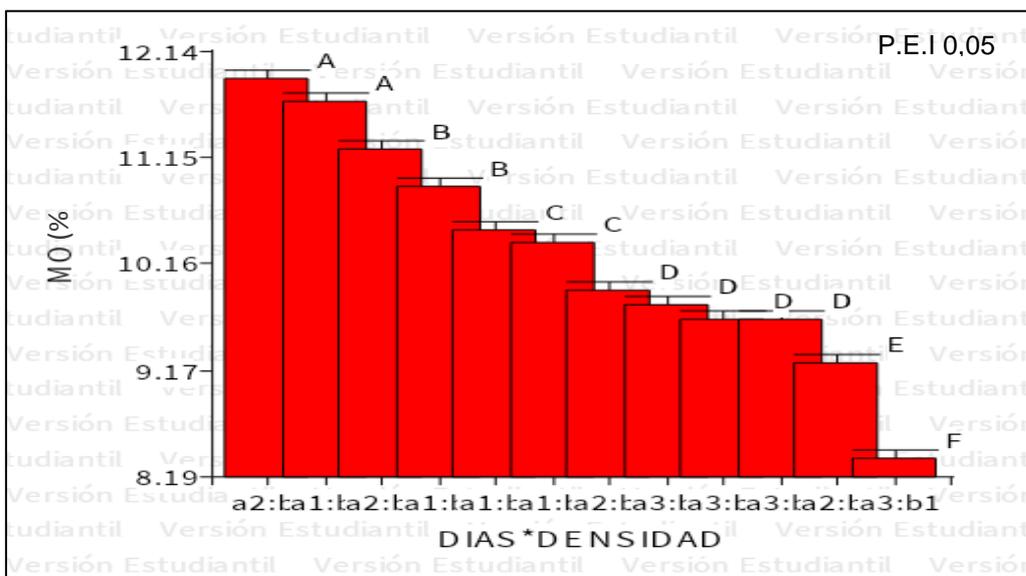
Comparación de medias de la densidad de lombrices y el tiempo de exposición vs materia orgánica (M.O)

Días	Densidad	Medias	n	E.E.	
a2	b3	11,88	3	0,08	A
a1	b4	11,68	3	0,08	A
a2	b4	11,22	3	0,08	B
a1	b2	10,88	3	0,08	B
a1	b1	10,48	3	0,08	C
a1	b3	10,37	3	0,08	C
a2	b2	9,93	3	0,08	D
a3	b4	9,78	3	0,08	D
a3	b3	9,66	3	0,08	D
a3	b2	9,65	3	0,08	D
a2	b1	9,25	3	0,08	E
a3	b1	8,37	3	0,08	F

Nota. Elaboración propia.

Figura 11

Prueba de Tukey de la densidad de lombrices y el tiempo de exposición vs materia orgánica (M.O)



Nota. Software Infostat.

3.4.4. Fósforo (P)

La Figura 12 muestra el efecto de la lombriz y el período de exposición en el fósforo (P) mediante la comparación de medias a través de la prueba de Tuckey detalla que en los tratamientos T5 (a2b2) y T11 (a2b3) no existe diferencia significativa mientras que los tratamientos restantes son significativamente diferentes. Por otro lado, en la Tabla 14 se puede apreciar que el tratamiento T9 (a3b3) hubo menor variación en cuanto a la presencia de fósforo (P).

Tabla 14

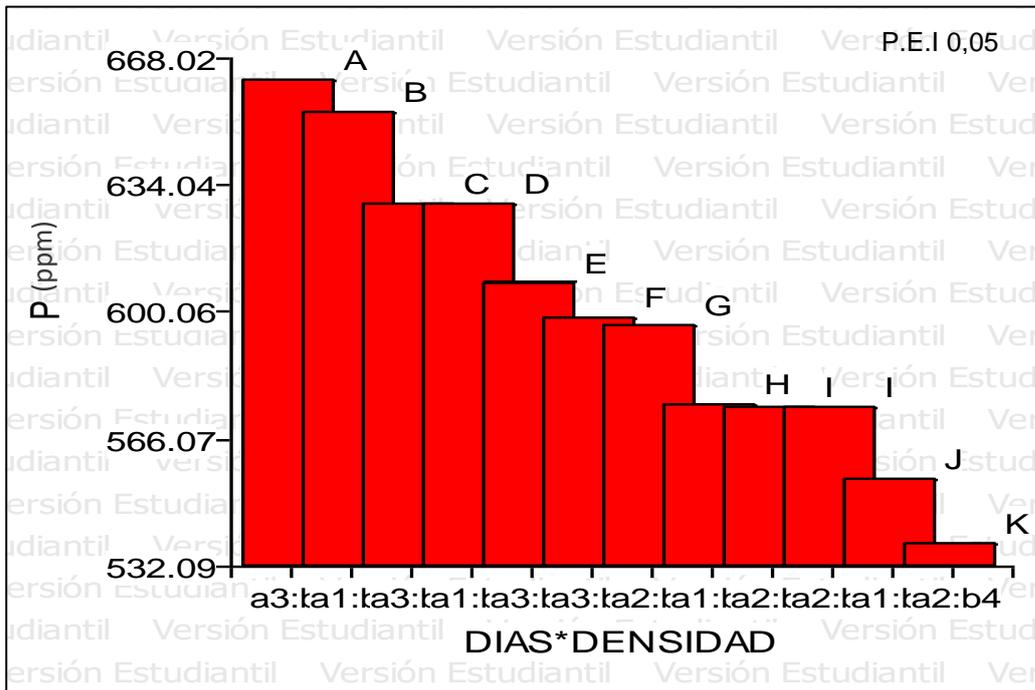
Comparación de medias sobre la cantidad de lombrices y el tiempo de exposición vs fósforo (P)

Días	Densidad	Medias	n	E.E	
a3	b3	661,77	3	0,08	A
a1	b1	653,63	3	0,08	B
a3	b1	629,12	3	0,08	C
a1	b2	628,60	3	0,08	D
a3	b2	608,00	3	0,08	E
a3	b4	598,15	3	0,08	F
a2	b1	596,27	3	0,08	G
a1	b3	575,40	3	0,08	H
a2	b2	574,30	3	0,08	I
a2	b3	574,23	3	0,08	I
a1	b4	555,12	3	0,08	J
a2	b4	538,27	3	0,08	K

Nota. Elaboración propia.

Figura 12

Prueba de Tukey para la densidad de lombrices y el tiempo de exposición vs fósforo (P)



Nota. Software Infostat.

3.4.5. Carbonato de calcio (CaCO₃)

En la Figura 13 se detalla el efecto de la interacción de la lombriz y el período de exposición en relación con carbonato de calcio (CaCO₃), mediante la comparación de medias a través la prueba de Tuckey expresa que el tratamiento T9 (a2b3) es diferente mientras que en el resto de los tratamientos no hay diferencia entre los promedios. De igual manera muestra la Tabla 15 que en el tratamiento T9 (a3b3) hubo una menor reducción de Carbonato de calcio (CaCO₃).

Tabla 15

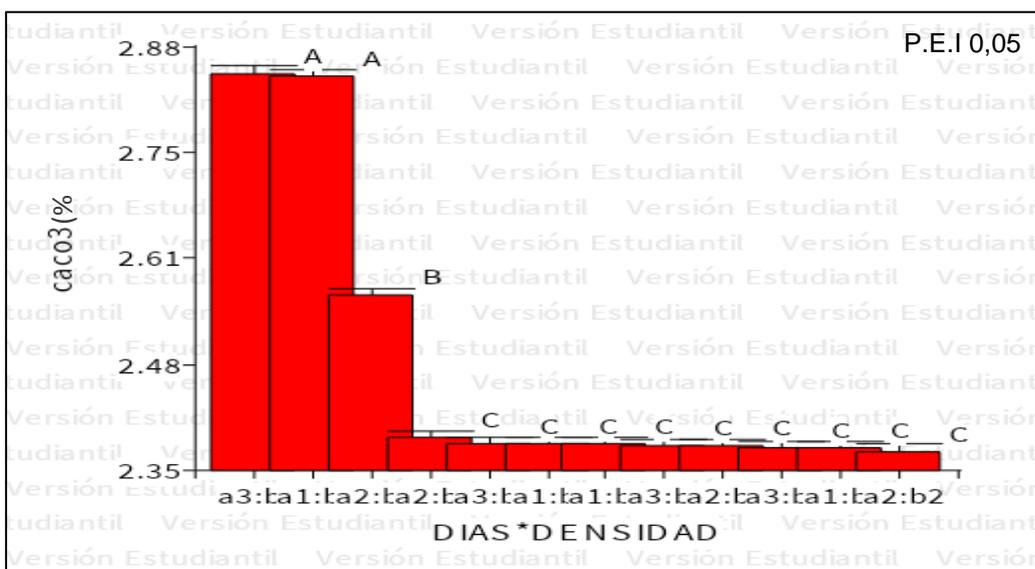
Comparación de medias de la densidad de lombrices y el tiempo de exposición vs carbonato de calcio (CaCO₃)

Días	Densidad	Medias	n	E.E	
a3	b3	2,85	3	0,01	A
a1	b2	2,84	3	0,01	A
a2	b3	2,57	3	0,01	B
a2	b4	2,39	3	0,01	C
a3	b1	2,38	3	0,01	C
a1	b3	2,38	3	0,01	C
a1	b1	2,38	3	0,01	C
a3	b2	2,38	3	0,01	C
a2	b1	2,38	3	0,01	C
a3	b4	2,38	3	0,01	C
a1	b4	2,37	3	0,01	C
a2	b2	2,37	3	0,01	C

Nota. Elaboración propia.

Figura 13

Prueba de Tukey para la densidad de lombrices y el tiempo de exposición vs carbonato de calcio (CaCO₃)



Nota. Software Infostat.

3.4.6. Capacidad de intercambio catiónico (CIC)

En la Figura 14 se puede constatar el efecto de la interacción de la lombriz y el período de exposición en relación a la capacidad de intercambio catiónico (CIC), mediante la comparación de medias a través la prueba de Tuckey muestra que en el tratamiento T9 (a2b3), T6 (a3b2) y T3 (a3b1) no existe diferencia, mientras que en el resto de tratamientos hay diferencia significativa. A la vez, en la Tabla 16 se observa que en el tratamiento T5 (a2b2) hubo un mayor incremento de capacidad de intercambio catiónico (CIC) y en el tratamiento T7 (a1b3) una mayor reducción de este mismo.

Tabla 16

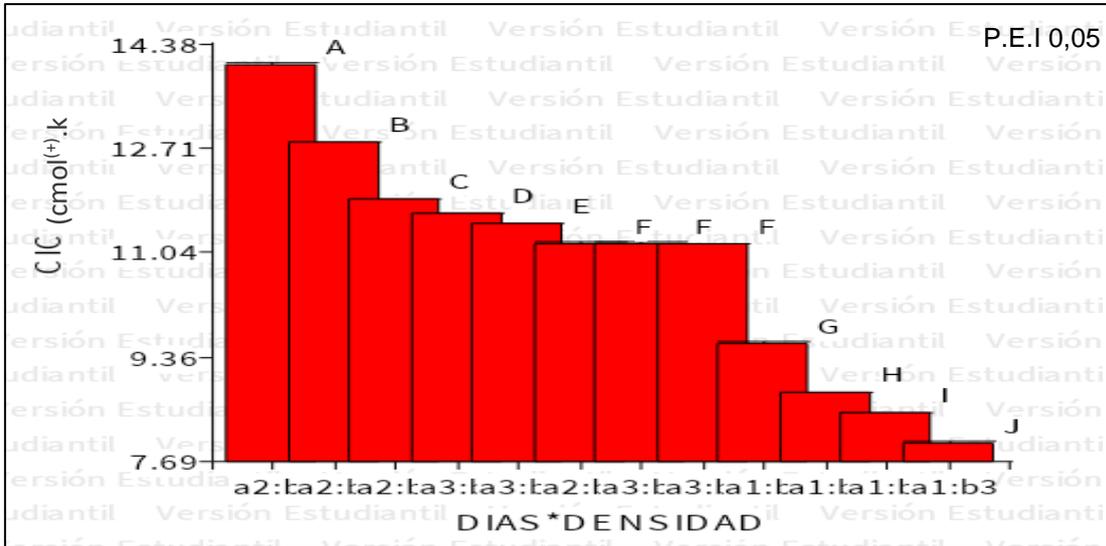
Comparación de medias de la densidad de lombrices y el tiempo de exposición vs capacidad de intercambio catiónico (C.I.C)

Días	Densidad	Medias	n	E.E	
a2	b2	14,7	3	0,01	A
a2	b1	12,80	3	0,01	B
a2	b4	11,89	3	0,01	C
a3	b4	11,68	3	0,01	D
a3	b3	11,51	3	0,01	E
a2	b3	11,20	3	0,01	F
a3	b2	11,19	3	0,01	F
a3	b1	11,19	3	0,01	F
a1	b4	9,60	3	0,01	G
a1	b1	8,80	3	0,01	H
a1	b2	8,47	3	0,01	I
a1	b3	7,99	3	0,01	J

Nota. Elaboración propia.

Figura 14

Prueba de Tukey para la densidad de lombrices y el tiempo de exposición vs capacidad de intercambio catiónico (C.I.C)



Nota. Software Infostat.

3.4.7. Clase textural

En los resultados de caracterización de la clase textural del sustrato para los 12 tratamientos evaluados, determinan que el sustrato se clasifica entre franco arenosa según el tamaño de las partículas (ver Apéndice 3).

CAPÍTULO IV: DISCUSIONES

Con respecto al número de lombrices en el porcentaje de remoción de plomo (Pb) la presente investigación obtuvo con 170 lombrices una mayor remoción de plomo (Pb) del 52%. El estudio de Hashemi *et al.* (2018) tiene coincidencias con la presente investigación cuando el investigador señala que la aplicación de *Eisenia fetida*, fue óptima para la eliminación del (Pb) y el zinc (Zn) del suelo y sustraer los contaminantes empleando el compost de la lombriz. Igualmente, le aporta validez a nuestro estudio Contreras *et al.* (2021) quienes al experimentar con 250 g de lombrices equivalente a 250 lombrices logró una remoción de plomo (Pb) del 76,99 % mayor a la remoción obtenida en el presente estudio, esto se debe a que Contreras utilizó mayor densidad de lombrices para su estudio demostrando que estos organismos son capaces de bioacumular metales como el plomo (Pb) y determinando que el vermicompostaje es la técnica más efectiva para reducir el plomo y el cadmio en los suelos contaminados por pasivos mineros.

En la misma orientación, Febres (2019) fundamenta nuestra investigación al indicar que el método más efectivo para determinar la cantidad de plomo (Pb) presente en el suelo, es mediante *Helianthus annuus* y el estiércol de la lombriz roja que inmoviliza el plomo a través de la acumulación en sus raíces o por percolación de la rizósfera que impide su propagación. Otra posición, propone Laricano (2018) para la reducción de los rangos de suelos contaminados con mercurio (Hg), empleando la técnica de vermicomposta a través de períodos de exposición es eficiente para la eliminación del mercurio (Hg) en los suelos. Técnica semejante experimentó Barbaran (2017) para la reducción de los niveles de cromo (Cr) en suelos contaminados por agroquímicos al emplear *Eisenia fetida* y remediar los suelos contaminados.

Para el primer objetivo específico determinar el efecto de la densidad de lombrices en el porcentaje de remoción de plomo de suelos agrícolas adyacentes a la mina Colquisiri, se

obtuvo con la densidad de 170 lombrices una mayor remoción de 52 % de plomo. Los datos obtenidos son sustentados por el estudio de Zapata *et al.* (2017) cuando pudo determinar mediante su estudio empleando concentraciones de 70 a 30, 30 a 70 y 50 a 50 de lombrices rojas en el suelo contaminado de mercurio con respecto a suelo fértil y un tratamiento control con lombrices rojas obteniendo que las excreciones contribuyen a la mejora las condiciones químicas y físicas aportando del suelo y por ende a la fertilidad del suelo al producir el aumento de la comunidad microbiana.

En relación al segundo objetivo específico determinar el efecto del tiempo de exposición de las lombrices en el porcentaje de remoción de plomo de suelos agrícolas adyacentes a la mina Colquisiri. Se determinó que en el tiempo correspondiente a 45 días se obtuvo una mayor remoción del 55 % plomo (Pb). El resultado se asemeja al estudio de Zaltauskaitmi *et al.* (2020) cuando experimentó con 40, 250, 500, 1000 y 2500 mg Pb kg⁻¹, y diez lombrices adultas, lavadas y pesadas expuestas al contaminante por un tiempo de cuatro semanas, resultando en el período de recuperación de cuatro semanas que la concentración de plomo fue de 2,07 a 5,34 veces menor que al período de exposición al contaminante. En el mismo orden, el estudio de Atacho *et al.* (2017), evaluó a partir de soluciones de vermicompost con Uredo la disgregación del lixiviado por un período de 15 y 45 días, en el análisis se determinó que la solución de vermicompost Uredo es viable para restaurar las condiciones de suelos con problemas por acidez, logrando mayor efectividad a los 45 días del tratamiento.

Finamente, la actividad de la lombriz en los parámetros físico-químicos del suelo después del experimento, demostró que el efecto de la lombriz provocó un incremento del pH del sustrato, donde se evidencia que en los tratamientos a los 45 días hubo mayor incremento, esto debido a la acción de las lombrices al generar elementos alcalinizantes como lo señala Piza (2017). A su vez con la investigación de Mosquera (2016) podemos corroborar que los resultados que obtuvo se asemejan con nuestro estudio al afirmar que existió variabilidad significativa en la caracterización físico-química, en cuanto a las densidades. En la conductividad eléctrica encontramos una reducción en todos los tratamientos, llegando a la conclusión que hubo esta disminución por el humus de la lombriz y comparando con el estudio de CONACYT (2019, citado por Santana y Turpo, 2021) efectivamente el humus de la lombriz tiene un extracto acuoso que disminuye a gran escala la conductividad eléctrica y

permite el lavado de sales en el suelo. En el presente estudio, también hubo variaciones en la materia orgánica, fósforo, carbonato de calcio y capacidad de intercambio catiónico debiéndose principalmente al sustrato utilizado y a la actividad de la lombriz, dichos resultados podemos sustentarlo con el estudio de (Magdoff y Weil 2004, citado por Huiza y Quispe, 2017) quienes afirman que la incorporación de abonos orgánicos (estiércol de conejo) libera nutrientes de forma lenta y mejora las propiedades físico-químicas del sustrato ayudando a la retención del agua. Igualmente, con el autor Shoeneberger *et al.* (2012), afirmamos que los valores de fósforo mayores a 12 ppm son considerados altos debido a que el guano de conejo presenta altas concentraciones de fósforo. Por otro lado, Mejía (2000) a través de su estudio realizado demostró que la lombriz posee tres pares de glándulas calcíferas las cuales funcionan como neutralizantes de los ácidos orgánicos y por consiguiente aportan en la variación de los parámetros físico químicos. El autor Ramos (2019), también aporta en la investigación ya que en su estudio demostró que en todos sus tratamientos evaluados hubo una baja capacidad de intercambio catiónico lo cual menciona que fue posiblemente por una baja presencia de materia orgánica y una baja concentración de arcilla que el suelo franco arenoso contiene, resultados totalmente similares a los nuestros ya que también trabajamos con suelo franco arenoso.

CAPÍTULO V: CONCLUSIONES

- Los resultados de la presente investigación evidencian que emplear la estrategia de remoción de contaminación por plomo (Pb) en los suelos por la vía orgánica es verdaderamente efectiva, demostrándose en el experimento que a medida que se incrementa el número de lombrices por volumen de sustrato se reduce la concentración de este mineral en los suelos adyacente a la mina Colquisiri, arrojando que los tratamientos compuestos por 170 lombrices por 2 kg de sustrato presentó el mayor porcentaje de remoción de plomo (52 %), mientras que los tratamientos compuestos por 80 lombrices por 2 kg de sustrato fue el que presentó menor porcentaje de remoción (49 %).
- El tiempo de exposición de la densidad de lombrices también tuvo un efecto significativo en el porcentaje de remoción de plomo en el presente estudio, obteniendo en el periodo de 45 días una mayor remoción de plomo de 55 % y la menor remoción en el periodo de 15 días con 47 % de remoción de plomo.
- Por otra parte, se llega a la conclusión sobre el análisis fisicoquímico inicial del suelo, el cual presenta una conductividad eléctrica inicial media, una baja cantidad de capacidad de intercambio catiónico a consecuencia de presentar una textura de franco arenoso, lo cual contribuye en la inmovilización de metales contaminantes. Evidenciándose por consiguiente que la eficiencia del procedimiento está determinada por el incremento del hidrógeno (pH) y la disminución de la conductividad eléctrica (C.E) lo cual permitió disminuir la materia orgánica (M.O).

- De acuerdo a los resultados se obtuvo una alta eficiencia del tratamiento del vermicompostaje en la disminución de concentración del plomo (Pb) mayor al 50 %, dejando evidencia de que la lombriz es un organismo que bioacumula el plomo (Pb).

CAPÍTULO VI: RECOMENDACIONES

- Persistir en cuanto a la biorremediación de suelos contaminados con metales pesados utilizando el tratamiento de vermicompostaje, considerando que es un tratamiento sustentable y económico en relación a costos de aplicación por lo que resulta rentable.
- Extender el tiempo de exposición de la lombriz roja californiana en el suelo contaminado para constatar su eficiencia, debido a que a mayor tiempo de exposición del tratamiento se logra una mayor remoción y tomar en cuenta el incremento de la cantidad de lombrices y estiércol de conejo (materia orgánica) y así conseguir resultados verídicos.
- Para la elaboración de vermicompostaje se debe considerar al momento de realizar el procedimiento experimental que sea un lugar con ausencia de hormigas, ya que ellas son una de las principales amenazas naturales para las lombrices.
- Para el manejo del proceso de biorremediación de suelos, se recomienda controlar los factores ambientales (humedad y temperatura) para permitir el desarrollo de la lombriz en condiciones óptimas.
- En la fase de selección de las lombrices se recomienda utilizar lombrices adultas ya que ayudarán a que su adaptación al ambiente sea más pronta y puedan tolerar altas concentraciones de contaminantes.

REFERENCIAS

- Acosta, C. (2006). El suelo agrícola, un ser vivo. *International Standard Serial Number*. 3 (5),55-60. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=2540941>
- Alas, R. y Alvarenga A. (2002). *Evaluación de sustratos de origen animal y vegetal en la producción de humus y carne de lombriz Eisenia fetida* [Tesis de grado, Universidad De El Salvador]. Repositorio institucional de la Universidad de El Salvador.
- Alba, G. (2011). *Estudio comparativo de tres diferentes métodos de remediación de suelo tipo gleysol contaminado con hidrocarburo*. [Tesis de grado, Centro de investigación y desarrollo tecnológico en electroquímica]. Repositorio institucional del CIDETEQ.
- Álvarez, C., Burger, M., De Ben, S., Dol, I., Feola, G., Gonzales, H., Gristo, P., Laborde, A., Mañay, N., Pose, D., Renfrew, D., Ruocco, G., Salvarrey, A., Siscar, E., Tomasina, F. y Touyá, E. (2010). *Plomo salud y medio ambiente*. pp. 11-248. Universidad de la República Montevideo.
- Arce, S. y Calderon, A. (2017). Suelos contaminados por plomo en la ciudad de la Oroya - Junín y su impacto en las aguas residuales del Río Mantaro. *Revista de Investigación FIGMMG-UNMSM*, 20(40), 48-55. <https://doi.org/10.15381/iigeo.v20i40.14389>
- Atacho, P., Rodríguez, N., Mogollón, J., Torres, D., Yendis, H. y López, M. (2017). Uso de soluciones de vermicompost para la biorremediación de un suelo ácido en la Sierra de San Luis-Venezuela. *Revista Científica A.S.A.* 1(8), 1 - 22. <https://revistas.uclave.org/index.php/asa/article/view/3393/2118>
- Barbaran, S. (2017). *Reducción de cromo en suelos contaminados por agroquímicos utilizando lombrices de tierra Eisenia fetida en el centro poblado Huarabi-Canta* [Tesis de grado, Universidad Cesar Vallejo]. Repositorio digital institucional. <https://hdl.handle.net/20.500.12692/3495>
- Calva, L y Torres, M. (2004). Metales pesados y sus efectos en organismos. <http://www2.izt.uam.mx/newpage/contactos/anterior/n51ne/metales.pdf>
- Candelaria, M., Navarro, M., Velázquez, C. y Velázquez, J. (2013). *Elaboración de abono orgánico a base de la lombriz roja californiana*. Procuraduría Agraria. https://www.academia.edu/14885603/Elaboraci%C3%B3n_de_abono_org%C3%A1nico_a_base_de_lombriz_roja_californiana

- Candia, J. (2011). *Manual de tecnologías de remediación de sitios contaminados*. https://fch.cl/wp-content/uploads/2019/10/manual-de-tecnologias-de-remediacion-de-sitios-contaminados_baja-1.pdf
- Camiletti, J. (2016). *Estudio de vermicompostaje de compost de residuos orgánicos de distinta naturaleza* [Tesis de maestría, Universidad Miguel Hernández de Elche]. Repositorio institucional RediUHM. <http://dspace.umh.es/handle/11000/2820>
- CONICET (2018). *Las lombrices de tierra versus contaminantes en suelos*. <https://www.conicet.gov.ar/lombrices-de-tierra-vs-contaminantes-en-suelos/>
- Contreras, M., Cuba, S. y Rojas, A. (2021). *Eficiencia del compostaje y vermicompostaje en la biorremediación de suelos contaminados con cadmio y plomo por pasivos ambientales mineros de Huamantanga, Cantá* [Tesis de grado, Universidad Nacional del Callao]. Repositorio institucional digital. <http://hdl.handle.net/20.500.12952/5802>
- Cuevas, M., Ferrera, R., Roldán, A., y Rodríguez, R. (2008). Ensayo de toxicidad subcrónica con la lombriz de tierra *Eisenia andrei*. Ensayos toxicológicos para la evaluación de sustancias químicas en agua y suelo: La experiencia en México. (pp, 275-283). México: Instituto Nacional de Ecología.
- Curvale, D. (2017). Lombrices de tierra como biomarcadores de efecto y exposición a xenobióticos metálicos (plomo y cadmio) en los Diques Cruz de Piedra y la Florida. *Acta Toxicol. Argentv* 25(3), 60-61. [researchgate.net/publication/328094984](https://www.researchgate.net/publication/328094984)
- Defensoría del Pueblo. (2015). *La minería sin control un enfoque desde la vulneración de los derechos humanos*. <https://www.defensoria.gov.co/public/pdf/InformedeMineria2016.pdf>
- Domenech, X. y Peral, J. (2006). *Química ambiental de sistemas terrestres*. Reverté S.A.
- Febres, S. (2019). *Remediación de suelos contaminados con plomo (Pb) mediante el empleo de girasol (*Helianthus annuus*) y estiércol de lombriz roja *Eisenia fetida* en condiciones controladas* [Tesis de grado, Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa]. Repositorio institucional Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa. <http://hdl.handle.net/20.500.12773/12074>
- Fernández, M. (2011). *Aplicación de la tecnología del vermicompostaje para la valorización agronómica de residuos y deterioro de cultivos de invernadero* [Tesis de doctorado, Universidad de Granada]. Repositorio Dialnet. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/tesis?codigo=61545>

- Flores-Hernández, L. A., Robledo-Paz, A., y Jimarez-Montiel, M. J. (2017). Medio de cultivo y sustitutos del agar en el crecimiento in vitro de orquídeas. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 8(6), 1315-1328.
- González, N. T., Méndez, J. P., García, F. P., Sandoval, O. A. A., y Santillán, Y. M. (2019). Tecnologías de remediación para suelos salinos.: Un caso de estudio: México. *Avances en Ciencias e Ingeniería*, 10(1), 13-26.
- Gutiérrez, H. y Vara, R. (2008). *Análisis y diseños de experimentos*. Mc Graw Hill. https://gc.scalahed.com/recursos/files/r161r/w19537w/analisis_y_diseno_experimentos.pdf
- Hashemi, H., Jodabakhshi, A., Alinia, B. y Abbasi, F. (2018). Bioremediation of lead and zinc contaminated soils by compost worm [Biorremediación de suelos contaminados con plomo y zinc por lombricomposta]. *J Health Sci Surveillance Sys*, 6(2), 58-63. [10.30476/JHSS.2019.80235.0](https://doi.org/10.30476/JHSS.2019.80235.0)
- Hernández, J., Zapata-Vivenes, Marcano, L., Nusetti, O. y Marcano, E. (2016). Respuestas bioquímicas en la lombriz de tierra *Eisenia andrei* expuesta a cadmio. *SABER Revista Multidisciplinaria del Consejo de Investigación de la Universidad de Oriente*. 28(3), 2-17. <https://www.redalyc.org/journal/4277/427750771010/html/>
- Hernández, R., Fernández, C., y Baptista, M. (2014). *Metodología de la investigación (6th ed.)*. Mc Graw Hill. <https://www.uca.ac.cr/wp-content/uploads/2017/10/Investigacion.pdf>
- Huiza, W. y Quispe, J. (2017). *Evaluación de las propiedades físicas y químicas del suelo de los tipos de pastizal del centro de investigación de camélidos sudamericanos – Lachoc* [Tesis de grado, Universidad Nacional de Huancavelica]. Repositorio institucional Universidad Nacional de Huancavelica. <http://repositorio.unh.edu.pe/handle/UNH/1171>
- Iannacone, J. A. (2018). *Toxicidad de sales de amonio sobre la lombriz de tierra Eisenia fetida* [Tesis de grado, Universidad Ricardo Palma]. Repositorio institucional Universidad Ricardo Palma. <http://repositorio.urp.edu.pe/handle/URP/1559>
- Infante, C. (2021). Criterios y tecnologías de remediación en suelos contaminados con hidrocarburos. *Comisión Editorial*, 29.
- Laricano, E. (2018). *Análisis comparativo de la biorremediación de suelos contaminados con mercurio por actividad minera, aplicando la tecnología del vermicomposta* [Tesis

de grado, Universidad Nacional del Altiplano]. Repositorio institucional Vicerrectorado de Investigación. <http://repositorio.unap.edu.pe/handle/UNAP/8584>

Londoño, L., Londoño, P., y Muñoz, F. (2016). Los riesgos de los metales pesados en la salud humana y animal. *Biotecnología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial*. 14(2), 145-153. [https://doi.org/10.18684/BSAA\(14\)145-153](https://doi.org/10.18684/BSAA(14)145-153)

Loza-Murguía, M., Mamani, F., y Sainz, H. (2011). Efecto de la Lombriz Roja Californiana *Eisenia fetida* durante el composteo y vermicomposteo en predios de la Estación Experimental de la Unidad Académica Campesina Carmen Pampa. *Journal of the Selva Andina Research Society*, 2(2), 24-39.

Luna, R. y Rodríguez, V. (2016). *Determinación de las concentraciones de cadmio y plomo en papa Solanum tuberosum cosechada en las cuencas de los ríos Mashcón y Chonta-Cajamarca* [Tesis de grado, Universidad Nacional Mayor de San Marcos]. CYBERTESIS Repositorio de Tesis Digitales. <https://hdl.handle.net/20.500.12672/4678>

Mancebo, A., Montano, R., González, C., González, Y., González, B., y Bada, A. M. (2008). Evaluación ecotoxicológica del FitoMas-H en lombriz de tierra y abejas. *ICIDCA. Sobre los Derivados de la Caña de Azúcar*, XLII(1-3), 69-75.

Mejía, P. (2000). Manual de Lombricultura. *Agroflor*, 13.

Mijangos, J. (2014). *Estudio de la rehabilitación del parque fundidora área de suelo contaminado con metales totales y lixiviables* [Tesis de grado, Universidad Nacional Autónoma de México]. Repositorio Facultad de Ingeniería. <http://132.248.52.100:8080/xmlui/handle/132.248.52.100/6938>

Ministerio del Ambiente (2012). *Glosario de términos para gestión ambiental peruana*. <http://siar.minam.gob.pe/puno/sites/default/files/archivos/public/docs/504.pdf>

Ministerio del Ambiente (2013). *Aprueban estándares de calidad ambiental para suelos*. <https://www.minam.gob.pe/calidadambiental/wpcontent/uploads/sites/22/2013/10/D-S-N-002-2013-MINAM.pdf>

Ministerio del Ambiente (2016). *Glosario de términos de sitios contaminados*. <https://www.minam.gob.pe/calidadambiental/wp-content/uploads/sites/22/2015/02/2016-05-30-Conceptos-propuesta-Glosario.pdf>

Ministerio del Ambiente (2017). *Aprueban estándares de calidad ambiental para suelo*. https://www.minam.gob.pe/wp-content/uploads/2017/12/DS_011-2017-MINAM.pdf

Mosquera, T. (2016). *Eficiencia del Lombricompostaje en la Biorremediación de Suelos Degradados por la Minería a Cielo Abierto en el Municipio de Unión Panamericana Departamento del Choco* [Tesis de grado, Universidad de Manizales]. Repositorio Institucional Universidad de Manizales. <https://ridum.umanizales.edu.co/xmlui/handle/20.500.12746/2929>

Organización Mundial de la Salud (2021). *Intoxicación por plomo*. <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/lead-poisoning-and-health>

Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación [FAO] (2022). *Portal de suelos de la FAO*. <https://www.fao.org/soils-portal/soil-survey/clasificacion-de-suelos/sistemas-numericos/propiedades-quimicas/es/>

Paco, G., Loza, M., Mamani, F. y Sains, H. (2011). Efecto de la lombriz roja californiana *Eisenia fetida* durante el composteo y vermicomposteo en predios de la Estación Experimental de la Unidad Académica Campesina Carmen Pampa. *Selva Andina Research Society*. 2(2), 24-39. <http://www.scielo.org.bo/pdf/jsars/v2n2/a04.pdf>

Palafox, A., Hernández, A., López, J. y Cuevas, M. (8 de junio de 2012). *Evaluación de la toxicidad de los suelos mediante bioensayos con lombrices*. <http://www2.inecc.gob.mx/publicaciones2/libros/665/evaluacion.pdf>

Paucar, R. (2015). *Determinación de los niveles de plomo en la sangre en la población económicamente activa en la ciudad de Lima* [Tesis de maestría, Universidad de Piura]. Repositorio Institucional PIRHUA. <https://hdl.handle.net/11042/2783>

Piza, C. (2017). *Determinación de la calidad de humus de lombriz roja californiana Eisenia fetida a partir de los procesos en el tratamiento de alimento ofertado* [Tesis de grado, Universidad Mayor de San Andrés]. Repositorio Institucional Universidad Mayor de San Andrés.

Real Academia Española (2021). *Lombriz*. <https://dle.rae.es/lombriz?m=form>

Real Academia Española (2021). *Mina*.

- Ramos, C., Castro, A., León, N., Alvaréz, J. y Huerta, E. (2019). Lombricomposta para recuperar la fertilidad de suelo franco arenoso y el rendimiento de cacahuete (*Arachis hypogaea* L.). *Terra Latinoamericana*, 37(1), 45-55.
- Reyes, J., Vergara, I., Torres, O., Díaz, M. y Gonzales, E. (2016). Contaminación por metales pesados: Implicaciones en la salud, ambiente y seguridad alimentaria. *Revista Ingeniería, Investigación y Desarrollo*, 16(2), 66-67.
- Romero, P. R., y Cantú, A. M. (Eds.). (2008). *Ensayos toxicológicos para la evaluación de sustancias químicas en agua y suelo: la experiencia en México*. Instituto Nacional de Ecología.
- Romero, M. (2017). *Eficiencia de la alfalfa asociada a enmiendas orgánicas para la reducción de diferentes concentraciones de plomo en la mina Colquisiri Huaral* [Tesis de grado, Universidad Cesar Vallejo]. Repositorio Digital Institucional de la Universidad Cesar Vallejo.
- Rucks, L., Garcia, F., Kaplan, A., Ponce de León, J. y Hill, M. (2004). *Propiedades físicas del suelo*. Universidad de la República.
- Sabroso, M. y Pastor, A. (2004). Guía sobre suelos contaminados. *CEPYME ARAGON*, 12.
- Santana, M. y Turpo, G. (2021). *Remediación de suelos salinos con vermicompost elaborado a partir de residuos industriales del olivo en un fundo del distrito de la Yarada-Los Palos, Tacna, 2021* [Tesis de grado, Universidad privada de Tacna]. Repositorio Universidad Privada de Tacna.
- Santos, C. (2017). *Eficiencia de tres sustratos orgánicos para la obtención de humus de Lombriz Roja Californiana Eisenia fetida en San Juan de Lurigancho, 2017* [Tesis de grado, Universidad Cesar Vallejo]. Repositorio Digital Institucional de la Universidad Cesar Vallejo. <https://hdl.handle.net/20.500.12692/16616>
- Sarmiento, L., Meléndes, M. y Loyola, J. (2016). *Salud y ambiente*.
- Sepulveda, T. y Velasco, J. (2002). Tecnologías de Remediación para Suelos Contaminados. Instituto Nacional de Ecología. pp. 64.
- Schoeneberger, P., Wysocki, D. y Benham, E. (2012). *Field book for describing and sampling soils*. Lincoln, NE.; Natural Resources Conservation Service, USDA. National Soil Center.

- Siavosh, S. (2016). *La acidez del suelo, una limitante comun para la producción de café*.
- Somarriba, R., y Guzmán, F. (2004). *Guía de lombricultura*. Universidad Nacional Agraria. <https://repositorio.una.edu.ni/2409/1/nf04s693.pdf>
- Schuldt, M., Christiansen, R., Scaturice, L. A., y Mayo, J. P. (2007). Lombricultura. Desarrollo y adaptación a diferentes condiciones de temperie. *REDVET. Revista Electrónica de Veterinaria*, VIII(8), 1-10.
- Ticona, J. (2016). *Lenteja de agua (Lemna gibba) y estiércol de vacuno en el comportamiento biológico de la lombriz Eisenia fetida en Puno* [Tesis de grado, Universidad Nacional del Altiplano]. Repositorio Institucional de la Universidad Nacional del Altiplano.
- Torres, M., López, D. y Windeboxhel. (2018). Evaluación de los procedimientos de remoción de metales pesados en los residuos de la DQA. *Revista INGENIERIA UC*. 25(1), 1-15.
- Zapata, I., Martínez, L., Posada, E., Gonzales, M. y Saldarriaga, J. (2017). Efectos de la lombriz roja californiana (*Eisenia fetida*), sobre el crecimiento de los microorganismos en suelos contaminados con mercurio de Segovia, Antioquia. *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*. 27(1), 77-90. <https://doi.org/10.18359/rcin.1911>
- Zaltauskaitmi, J., Kniuiptymi, I. y Kugelytmi, U. (2020). *Lead impact on the earthworm Eisenia fetida and earthworm recovery after exposure*. Springer nature Suiza Ag.
- Zurita-Cruz, J. N., Márquez-González, H., Miranda-Novales, G., y Villasís-Keever, M. A. (2018). Estudios experimentales: diseños de investigación para la evaluación de intervenciones en la clínica. *Revista alergia México*, 65(2), 178-186.

TERMINOLOGÍA

Concentración: La relación de una sustancia disuelta o contenida en una cantidad dada de otra sustancia (Ministerio del Ambiente [MINAM], 2016).

Contaminación ambiental: La acción y estado que resulta de la introducción por el hombre de contaminantes al ambiente por encima de las cantidades y/o concentraciones máximas permitidas, tomando en consideración el carácter acumulativo o sinérgico de los contaminantes en el ambiente (Sarmiento *et al.*, 2016).

Cultivo: Es el ejercicio de sembrar semillas en la misma tierra, realizando trabajos cotidianos para generar productos como frutos de estos mismos. (Flores *et al.*, 2017).

Límite máximo permisible: Instrumento de gestión ambiental que regula la concentración o el grado de elementos, sustancias o parámetros físicos, químicos y biológicos que caracterizan a un efluente o una emisión, que al ser excedida causa o puede causar daños a la salud, al bienestar humano y al ambiente (Ministerio del Ambiente [MINAM], 2012).

Lombriz: Gusano de la clase de los anélidos, de color blanco o rojizo, de cuerpo blando, cilíndrico, aguzado en el extremo donde está la boca, redondeado en el opuesto con hábitat en terrenos húmedos y ayuda a la formación del mantillo transformando en parte la tierra (Real Academia Española [RAE], 2021).

Mina: Excavación que se hace para extraer un mineral (RAE), 2021).

Pasivo ambiental: Impactos negativos generados por las actividades productivas o de servicios abandonados, con o sin responsable identificable y en donde no se haya realizado un cierre de actividades regulado y certificado por la autoridad correspondiente (MINAM, 2012).

Potencial de hidrógeno: Es definido como la cantidad de iones de hidrógeno en la solución del suelo. Este afecta la disponibilidad de nutrientes y minerales para las plantas, así como también a muchos procesos del suelo. La escala de pH se utiliza como un indicador de la concentración de iones hidrógeno en el suelo (Siavosh, 2016).

Remediación: Tarea o conjunto de tareas a desarrollarse en un sitio contaminado con la finalidad de eliminar o reducir contaminantes, a fin de asegurar la protección de la salud humana y la integridad de los ecosistemas (MINAM, 2016).

Suelo: Material no consolidado compuesto por partículas inorgánicas, materia orgánica, agua, aire y organismos, que comprende desde la capa superior de la superficie terrestre hasta diferentes niveles de profundidad (MINAM, 2016).

Suelo Agrícola: Cotidianamente consideramos que el suelo es el lugar de soporte donde el hombre construye sus moradas creando ciudades; en el caso del medio rural, suponemos que es donde crecen las plantas y cohabitan los animales (Acosta, 2006).

Tratamiento: Conjunto de acciones que se aplican sobre las unidades experimentales y que son objeto de comparación (Gutiérrez y Vara, 2008).

2. A los 15 días de exposición



UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA
FACULTAD DE AGRONOMIA - DEPARTAMENTO DE SUELOS
LABORATORIO DE ANALISIS DE SUELOS, PLANTAS, AGUAS Y FERTILIZANTES
ANALISIS DE SUELOS : CARACTERIZACION



Solicitante : ANDREA LISET MERCA MENOR

Departamento : LIMA

Distrito : PUENTE PIEDRA

Referencia : H.R. 74902-087C-21

Bolt.: 4692

Provincia : LIMA

Predio :

Fecha : 09/09/2021

Número de Muestra		pH (1:1)	C.E. (1:1) dS/m	CaCO ₃ %	M.O. %	P ppm	K ppm	Análisis Mecánico			Clase Textural	CIC	Cationes Cambiables					Suma de Cationes	Suma de Bases	% Sat. De Bases
Lab	Claves							Arena %	Limo %	Arcilla %			Ca ⁺²	Mg ⁺²	K ⁺	Na ⁺	Al ⁺³ + H ⁺			
7745	MUESTRA T1	8.02	3.09	2.39	10.51	653.8	5070	86	6	8	A.Fr.	8.80	3.96	2.37	1.84	0.63	0.00	8.80	8.80	100
7746	MUESTRA T4	8.10	1.79	2.86	10.90	628.7	5020	90	2	8	A.	8.48	4.23	2.63	1.10	0.52	0.00	8.48	8.48	100
7747	MUESTRA T7	8.02	2.24	2.39	10.11	575.6	4960	86	6	8	A.Fr.	8.00	4.02	2.55	0.92	0.51	0.00	8.00	8.00	100
7748	MUESTRA T10	7.98	2.09	2.39	11.69	555.2	5220	84	8	8	A.Fr.	9.60	5.31	2.88	0.80	0.61	0.00	9.60	9.60	100

A = Arena ; A.Fr. = Arena Franca ; Fr.A. = Franco Arenoso ; Fr. = Franco ; Fr.L. = Franco Limoso ; L = Limoso ; Fr.Ar.A. = Franco Arcillo Arenoso ; Fr.Ar. = Franco Arcilloso ; Fr.Ar.L. = Franco Arcillo Limoso ; Ar.A. = Arcillo Arenoso ; Ar.L. = Arcillo Limoso ; Ar. = Arcilloso

Número de Muestra		Pb ppm
Lab.	Claves	
7745	MUESTRA T1	24.76
7746	MUESTRA T4	30.02
7747	MUESTRA T7	28.97
7748	MUESTRA T10	27.09



Constantino Calderón Mendoza
Constantino Calderón Mendoza
 Jefe del Laboratorio

Av. La Molina s/n Campus UNALM - Telf.: 614-7800 Anexo 222 Teléfono Directo: 349-5622 Celular: 946-505-254
 e-mail: labsuelo@lamolina.edu.pe

3. A los 30 días de exposición



UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA
FACULTAD DE AGRONOMIA - DEPARTAMENTO DE SUELOS
LABORATORIO DE ANALISIS DE SUELOS, PLANTAS, AGUAS Y FERTILIZANTES



ANALISIS DE SUELOS : CARACTERIZACION

Solicitante : ANDREA MERCA MENOR

Departamento : LIMA
 Distrito : PUENTE PIEDRA
 Referencia : H.R. 74994-100C-21

Bolt: 4717

Provincia : LIMA
 Predio :
 Fecha : 27/09/2021

Número de Muestra		pH (1:1)	C.E. (1:1) dS/m	CaCO ₃ %	M.O. %	P ppm	K ppm	Análisis Mecánico			Clase Textural	CIC	Cationes Cambiables					Suma de Cationes	Suma de Bases	% Sat. De Bases
Lab	Claves							Arena %	Limo %	Arcilla %			Ca ⁺²	Mg ⁺²	K ⁺	Na ⁺	Al ⁺³ + H ⁺			
9039	T2	7.89	3.84	2.39	9.28	596.4	4020	78	10	12	Fr.A.	12.80	3.97	2.97	4.96	0.90	0.00	12.80	12.80	100
9040	T5	7.89	5.89	2.39	9.94	574.4	3850	74	16	10	Fr.A.	14.08	4.92	3.87	4.45	0.84	0.00	14.08	14.08	100
9041	T11	7.97	2.68	2.39	11.24	538.4	3750	80	10	10	Fr.A.	10.88	2.50	2.62	5.06	0.70	0.00	10.88	10.88	100
9042	T8	7.93	7.08	2.58	11.90	574.4	3980	80	8	12	Fr.A.	11.20	2.70	2.68	5.09	0.73	0.00	11.20	11.20	100

A = Arena ; A Fr. = Arena Franca ; Fr.A. = Franco Arenoso ; Fr. = Franco ; Fr.L. = Franco Limoso ; L = Limoso ; Fr.Ar.A. = Franco Arcillo Arenoso ; Fr.Ar. = Franco Arcilloso ; Fr.Ar.L. = Franco Arcillo Limoso ; Ar.A. = Arcillo Arenoso ; Ar.L. = Arcillo Limoso ; Ar. = Arcilloso

Número de Muestra		Pb ppm
Lab.	Claves	
9039	T2	27.14
9040	T5	25.13
9041	T11	22.88
9042	T8	26.17



Dr. Constantino Calderón Mendoza
 Jefe del Laboratorio

Av. La Molina s/n Campus UNALM - Telf.: 614-7800 Anexo 222 Teléfono Directo: 349-5622 Celular: 946 - 505 - 254
 e-mail: labsuelo@lamolina.edu.pe

4. A los 45 días de exposición



UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA
FACULTAD DE AGRONOMIA - DEPARTAMENTO DE SUELOS
 LABORATORIO DE ANALISIS DE SUELOS, PLANTAS, AGUAS Y FERTILIZANTES
ANALISIS DE SUELOS : CARACTERIZACION



Solicitante : ANDREA LISET MERCA MENOR

Departamento : LIMA
 Distrito : PUENTE PIEDRA
 Referencia : H.R. 75093-111C-21

Bolt.: 4743

Provincia : LIMA
 Predio :
 Fecha : 06/10/2021

Número de Muestra		pH (1:1)	C.E. (1:1) dS/m	CaCO ₃ %	M.O. %	P ppm	K ppm	Análisis Mecánico			Clase Textural	CIC	Cationes Cambiables					Suma de Cationes	Suma de Bases	% Sat. De Bases
Lab	Claves							Arena %	Limo %	Arcilla %			Ca ⁺²	Mg ⁺²	K ⁺	Na ⁺	Al ⁺³ + H ⁺			
9538	T 3	8.04	2.27	2.39	8.38	629.2	3530	78	16	6	A.Fr.	11.20	6.82	3.25	0.93	0.20	0.00	11.20	11.20	100
9539	T 6	8.13	3.05	2.39	9.67	608.0	4160	78	16	6	A.Fr.	11.20	6.29	3.48	1.17	0.26	0.00	11.20	11.20	100
9540	T 9	8.12	1.31	2.86	9.67	661.9	4550	72	20	8	Fr.A.	11.52	6.58	3.63	1.10	0.22	0.00	11.53	11.53	100
9541	T 12	8.00	0.42	2.39	9.80	598.2	4080	80	16	4	A.Fr.	11.68	6.88	3.70	0.91	0.19	0.00	11.68	11.68	100

A = Arena ; A.Fr. = Arena Franca ; Fr.A. = Franco Arenoso ; Fr. = Franco ; Fr.L. = Franco Limoso ; L = Limoso ; Fr.Ar.A. = Franco Arcillo Arenoso ; Fr.Ar. = Franco Arcilloso ; Fr.Ar.L. = Franco Arcillo Limoso ; Ar.A. = Arcillo Arenoso ; Ar.L. = Arcillo Limoso ; Ar. = Arcilloso

Número de Muestra		Pb ppm
Lab.	Claves	
9538	T 3	23.78
9539	T 6	24.20
9540	T 9	20.14
9541	T 12	25.08



Dr. Constantino Calderón Mendoza
 Jefe del Laboratorio

Av. La Molina s/n Campus UNALM - Telf.: 614-7800 Anexo 222 Teléfono Directo: 349-5622 Celular: 946-505-254
 e-mail: labsuelo@lamolina.edu.pe

Apéndice 2. Fotografía de la fase de campo y fase experimental



Imagen 1. Ubicación de los puntos a monitorear (mediante GPS).



Imagen 2. Medición de cuadrantes (1m²).



Imagen 3. Excavación y tamizado de la tierra.



Imagen 4. Partición y recolección de muestras.



Imagen 5. Conteo y lavado de lombrices.



Imagen 6. Prueba de mortandad de las lombrices.



Imagen 7. Pesado del suelo y estiércol de conejo.



Imagen 8. Mezclado del suelo con el estiércol de conejo.



Imagen 9. Distribución del sustrato en los envases.



Imagen 10. Ingreso de las lombrices a los envases.



Imagen 11. Tratamientos instalados.



Imagen 12. Muestreo de suelos.



Imagen 13. Muestreo del suelo.



Imagen 14. Envío de muestras ha laboratorio.

Apéndice 3. Parámetros para la interpretación de los análisis de caracterización del sustrato

1. pH

Definición	Rango de pH
Ultra ácido	< 3,50
Extremadamente ácido	3,51 - 4,40
Muy fuertemente ácido	4,41 - 5,00
Fuertemente ácido	5,01 - 5,50
Moderadamente ácido	5,51 - 6,00
Ligeramente ácido	6,01 - 6,50
Neutro	6,51 - 7,40
Ligeramente básico	7,41 - 7,80
Moderadamente básico	7,81 - 8,40
Fuertemente básico	8,41 - 9,00
Muy fuertemente básico	> 9,0

Nota. Tomada por Shoeneberger (2012).

2. Conductividad eléctrica (dS.m⁻¹)

Definición	Rango de salinidad
No salino	< de 4
Muy ligeramente salino	4 - 8
Ligeramente salino	8 - 12
Moderadamente salino	12 - 15
Fuertemente salino	> 15

Nota. Tomada por Shoeneberger (2012).

3. Materia orgánica

Definición	%	g.kg ⁻¹
Bajo	< de 2	< de 20
Medio	2 - 4	20 - 40
Alto	> de 4	> de 40

Nota. Tomada por Shoeneberger (2012).

4. Fósforo disponible

Definición	Rango de P (ppm o mg.kg ⁻¹)
Bajo	0 – 7
Medio	7 – 14
Alto	> de 14

Nota. Tomada por Shoeneberger (2012).

5. Carbonato (CaCO₃) disponible

Concentración de CaCO ₃	Tipo
0 - 60	Blanda
61 - 120	Moderadamente dura
121 – 180	Dura
> 180	Muy dura

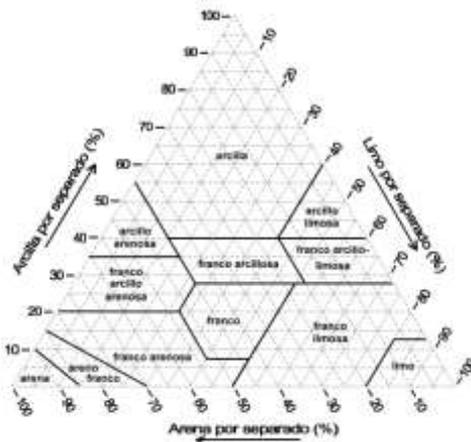
Nota. Tomada por Shoeneberger (2012).

6. Capacidad de intercambio catiónico (CIC) (me/100 g o cmol(+).kg⁻¹)

Definición	Rango de CIC (me/100 g o cmol ⁽⁺⁾ .kg ⁻¹)
Muy baja	< de 4
Baja	4 – 8
Moderadamente baja	8 – 12
Moderadamente alta	12 – 20
Muy alta	> de 20

Nota. Tomada por Shoeneberger (2012).

7. Tipos de texturas de suelos



Nota. Tomada por Shoeneberger (2012).

Apéndice 4. Comparación de medias mediante el Test Tukey de las variables del estudio

1. Análisis de varianza (ANOVA) de la densidad de lombrices y período de exposición versus la remoción de plomo (Pb)

Factor de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	Valor de F	p-valor
Modelo	238,99	11	21,73	13189,75	<0,0001
Días	118,19	2	59,10	35876,19	<0,0001
Densidad	11,94	3	3,98	2416,20	<0,0001
Días * densidad	108,86	6	18,14	11014,38	<0,0001
Error	0,04	24	1,6 E-03		
Total	239,03	35			

Nota. Elaboración propia. $DMS = 0,05278$ $CV = 16 \%$ P.E.I. 0,05

2. Análisis de varianza (ANOVA) de la densidad de lombrices y período de exposición versus el potencial de hidrógeno (pH)

Factor de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	Valor de F	p-valor
Modelo	0,31	11	0,03	13,58	<0,0001
Días	0,05	2	0,02	11,40	0,0001
Densidad	0,07	3	0,02	11,87	0,0001
Días * densidad	0,19	6	0,03	15,16	<0,0001
Error	0,05	24	2,1 E-03		
Total	0,36	35			

Nota. Elaboración propia. $DMS = 0,04666$ $CV = 16 \%$ P.E.I. 0,05

3. Análisis de varianza (ANOVA) de la densidad de lombrices y período de exposición versus conductividad eléctrica (C.E)

Factor de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	Valor de F	p-valor
Modelo	115,93	11	10,54	51269,79	<0,0001
Días	66,19	2	33,10	161011,47	<0,0001
Densidad	20,11	3	6,70	32604,81	<0,0001
Días * densidad	29,63	6	4,94	24021,73	<0,0001
Error	4,9 E ⁻³	24	2,1 E ⁻⁰⁴		
Total	115,93	35			

Nota. Elaboración propia. $DMS = 0,01462$ $CV = 48 \%$ P.E.I.0,05

4. Análisis de varianza (ANOVA) de la densidad de lombrices y período de exposición versus materia orgánica (M.O)

Factor de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	Valor de F	p-valor
Modelo	35,05	11	3,19	177,58	<0,0001
Días	15,04	2	7,52	419,08	<0,0001
Densidad	12,13	3	4,04	225,04	<0,0001
Días * densidad	7,88	6	1,31	73,20	<0,0001
Error	0,43	24	0,02		
Total	35,48	35			

Nota. Elaboración propia. $DMS = 0,013656$ $CV = 1,31 \%$ P.E.I.0,05

5. Análisis de varianza (ANOVA) de la densidad de lombrices y período de exposición versus fósforo (P)

Factor de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	Valor de F	p-valor
Modelo	48568,93	11	4415,36	245449,12	<0,0001
Días	17426,29	2	8713,15	484362,67	<0,0001
Densidad	18244,73	3	6081,58	338073,97	<0,0001
Días * densidad	12897,91	6	2149,65	119498,85	<0,0001
Error	0,43	24	0,02		
Total	48569,36	35			

Nota. Elaboración propia. $DMS = 0,13674$ $CV = 2 \%$ P.E.I.0,05

6. Análisis de varianza (ANOVA) de la densidad de lombrices y período de exposición versus carbonato de calcio (CaCO₃)

Factor de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	Valor de F	p-valor
Modelo	1,10	11	0,10	451,56	<0,0001
Días	0,04	2	0,02	86,11	<0,0001
Densidad	0,33	3	0,11	495,83	<0,0001
Días * densidad	0,73	6	0,12	551,25	<0,0001
Error	0,01	24	2,2 E ⁻⁰⁴		
Total	1,11	35			

Nota. Elaboración propia. $DMS = 0,01520$ $CV = 60 \%$ P.E.I.0,05

7. Análisis de varianza (ANOVA) de la densidad de lombrices y período de exposición versus capacidad de intercambio catiónico (CIC)

Factor de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	Valor de F	p-valor
Modelo	109,06	11	9,91	64891,40	<0,0001
Días	90,54	2	45,27	296311,33	<0,0001
Densidad	5,23	3	1,74	11419,65	<0,0001
Días * densidad	13,28	6	2,21	14490,96	<0,0001
Error	3,7 E ⁻⁰³	24	1,5 E ⁻⁰⁴		
Total	109,06	35			

Nota. Elaboración propia. $DMS = 0,01260$ $CV = 11 \%$ P.E.I.0,05