

FACULTAD DE INGENIERÍA

Escuela Académico Profesional de Ingeniería Ambiental

Tesis

**Efecto del vermicompost en el crecimiento de alfalfa
(Medicago sativa L.) y contenido de cadmio en un
suelo contaminado de Huaripampa, Jauja. 2022**

Sheyla Mayli Unocc Vega

Para optar el Título Profesional de
Ingeniera Ambiental

Huancayo, 2023

Repositorio Institucional Continental
Tesis digital



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

INFORME DE CONFORMIDAD DE ORIGINALIDAD DE TESIS

A : FELIPE GUTARRA MEZA
Decano de la Facultad de Ingeniería

DE : ANDRES ALBERTO AZABACHE LEYTON
Asesor de tesis

ASUNTO : Remito resultado de evaluación de originalidad de tesis

FECHA : 30 de setiembre de 2023

Con sumo agrado me dirijo a vuestro despacho para saludarlo y en vista de haber sido designado asesor de la tesis titulada: ““EFECTO DEL VERMICOMPOST EN EL CRECIMIENTO DE ALFALFA (*Medicago sativa* L.) Y CONTENIDO DE CADMIO EN UN SUELO CONTAMINADO DE HUARIPAMPA, JAUJA. 2022”. ”, perteneciente a la estudiante(s) UNOCC VEGA Sheyla Mayli, de la E.A.P. de Ingeniería Ambiental; se procedió con la carga del documento a la plataforma “Turnitin” y se realizó la verificación completa de las coincidencias resaltadas por el software dando por resultado 16 % de similitud (informe adjunto) sin encontrarse hallazgos relacionados a plagio. Se utilizaron los siguientes filtros:

- Filtro de exclusión de bibliografía SI NO
- Filtro de exclusión de grupos de palabras menores (Nº de palabras excluidas: 20) SI NO
- Exclusión de fuente por trabajo anterior del mismo estudiante SI NO

En consecuencia, se determina que la tesis constituye un documento original al presentar similitud de otros autores (citas) por debajo del porcentaje establecido por la Universidad.

Recae toda responsabilidad del contenido de la tesis sobre el autor y asesor, en concordancia a los principios de legalidad, presunción de veracidad y simplicidad, expresados en el Reglamento del Registro Nacional de Trabajos de Investigación para optar grados académicos y títulos profesionales – RENATI y en la Directiva 003-2016-R/UC.

Esperando la atención a la presente, me despido sin otro particular y sea propicia la ocasión para renovar las muestras de mi especial consideración.

Atentamente,



ANDRES ALBERTO AZABACHE LEYTON
Asesor de tesis

DECLARACIÓN JURADA DE AUTENTICIDAD

Yo, UNOCC VEGA Sheyla Mayli, identificado(a) con Documento Nacional de Identidad No. 74281835, de la E.A.P. de Ingeniería Ambiental de la Facultad de Ingeniería la Universidad Continental, declaro bajo juramento lo siguiente:

1. La tesis titulada: "EFECTO DEL VERMICOMPOST EN EL CRECIMIENTO DE ALFALFA (*Medicago sativa* L.) Y CONTENIDO DE CADMIO EN UN SUELO CONTAMINADO DE HUARIPAMPA, JAUJA. 2022". , es de mi autoría, la misma que presento para optar el Título Profesional de Ingeniero Ambiental.
2. La tesis no ha sido plagiada ni total ni parcialmente, para la cual se han respetado las normas internacionales de citas y referencias para las fuentes consultadas, por lo que no atenta contra derechos de terceros.
3. La tesis es original e inédita, y no ha sido realizado, desarrollado o publicado, parcial ni totalmente, por terceras personas naturales o jurídicas. No incurre en autoplagio; es decir, no fue publicado ni presentado de manera previa para conseguir algún grado académico o título profesional.
4. Los datos presentados en los resultados son reales, pues no son falsos, duplicados, ni copiados, por consiguiente, constituyen un aporte significativo para la realidad estudiada.

De identificarse fraude, falsificación de datos, plagio, información sin cita de autores, uso ilegal de información ajena, asumo las consecuencias y sanciones que de mi acción se deriven, sometiéndome a las acciones legales pertinentes.

30 de Setiembre del 2023.



Sheyla Mayli UNOCC VEGA

DNI. No. 74281835

Tesis

INFORME DE ORIGINALIDAD

16%	16%	3%	3%
INDICE DE SIMILITUD	FUENTES DE INTERNET	PUBLICACIONES	TRABAJOS DEL ESTUDIANTE

FUENTES PRIMARIAS

1	docplayer.es Fuente de Internet	4%
2	repositorio.unfv.edu.pe Fuente de Internet	2%
3	repositorio.ucss.edu.pe Fuente de Internet	1%
4	1library.co Fuente de Internet	1%
5	repositorio.unap.edu.pe Fuente de Internet	1%
6	www.sidalc.net Fuente de Internet	1%
7	www.coursehero.com Fuente de Internet	1%
8	revistas.lamolina.edu.pe Fuente de Internet	1%
9	www.revistas.unitru.edu.pe Fuente de Internet	<1%

10	qdoc.tips Fuente de Internet	<1 %
11	es.scribd.com Fuente de Internet	<1 %
12	www.oftalmo.com Fuente de Internet	<1 %
13	es.slideshare.net Fuente de Internet	<1 %
14	rstudio-pubs-static.s3.amazonaws.com Fuente de Internet	<1 %
15	repositorio.uncp.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
16	purl.org Fuente de Internet	<1 %
17	repositorio.lamolina.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
18	idus.us.es Fuente de Internet	<1 %
19	scielo.conicyt.cl Fuente de Internet	<1 %
20	repositorio.udh.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
21	repositorio.untels.edu.pe Fuente de Internet	<1 %

22	repositorio.ucv.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
23	www.unheval.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
24	ri.agro.uba.ar Fuente de Internet	<1 %
25	terralatinoamericana.org.mx Fuente de Internet	<1 %
26	repositorio.unsm.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
27	aprenderly.com Fuente de Internet	<1 %
28	Submitted to Universidad Nacional del Centro del Peru Trabajo del estudiante	<1 %
29	dokumen.pub Fuente de Internet	<1 %
30	repositorio.uap.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
31	helvia.uco.es Fuente de Internet	<1 %

Excluir citas

Activo

Excluir coincidencias < 20 words

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Continental, especialmente a todos los docentes de la carrera de Ingeniería Ambiental, por haberme formado académicamente.

A mi asesor de tesis el ingeniero ANDRÉS ALBERTO AZABACHE LEYTON por brindarme su tiempo para poder asesorarme y tenerme paciencia en todo el proceso de investigación.

DEDICATORIA

A mi madre REYNA VEGA VALERIO quien me brinda su apoyo incondicional a lo largo de mi vida para lograr concluir mi carrera profesional.

A mis hermanas por estar apoyando en cada paso que doy en mi vida, la cual fue fuente de inspiración para seguir adelante.

ÍNDICE GENERAL

AGRADECIMIENTOS	iv
DEDICATORIA	viii
ÍNDICE GENERAL	ix
ÍNDICE DE TABLAS.....	vii
ÍNDICE DE FIGURAS	ix
RESUMEN	x
ABSTRACT	xi
INTRODUCCIÓN.....	xii
CAPÍTULO I:	14
PLANTEAMIENTO DEL ESTUDIO	14
1.1 Planteamiento y formulación del problema	14
1.1.1 Planteamiento del problema	14
1.1.2 Formulación del problema.....	15
1.2 Objetivos	16
1.2.1 General	16
1.2.2 Específicos.....	16
1.3 Justificación e importancia	16
1.3.1 Justificación	16
1.3.2 Importancia.....	16
1.4 Hipótesis y descripción de variables.....	17
1.4.1 Hipótesis	17
1.4.2 Descripción de variables.....	18
CAPÍTULO II:.....	20
MARCO TEÓRICO.....	20
2.1 Antecedentes del problema	20
2.1.1 Nacionales	20
2.1.2 Internacionales.....	23
2.2 Bases teóricas.....	26
2.2.1 La contaminación del suelo por cadmio	26

2.2.2	Bioacumulación de cadmio	27
2.2.3	Efecto del cadmio sobre el crecimiento y desarrollo de alfalfa.....	31
2.2.4	La fitorremediación	33
2.2.5	El vermicompost.....	33
2.2.6	El cultivo de alfalfa	40
2.3	Definición de términos básicos.....	41
CAPÍTULO III:		43
METODOLOGÍA.....		43
3.1	Método y alcance de la investigación	43
3.1.1	Método de investigación.....	43
3.1.2	Alcance de la investigación	44
3.2	Diseño de la investigación	45
3.3	Población y muestra.....	49
3.3.1	Población	49
3.3.2	Muestra	49
3.4	Técnicas e instrumentos de recolección de datos	50
3.4.1	Evaluaciones realizadas	50
3.4.2	Procesamiento de datos	51
CAPÍTULO IV:		53
RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....		53
4.1	Resultados del tratamiento y análisis de la información.....	53
4.1.1	Efecto de la dosis de vermicompost en el crecimiento del cultivo de alfalfa.	53
4.1.2	Contenido de cadmio (Cd) del cultivo de alfalfa.....	57
4.1.3	Factores de bioconcentración (FB) y traslocación (FT) del cultivo de alfalfa	59
4.1.4	Contenido de cadmio total en el suelo.....	63
4.2	Prueba de hipótesis	63
4.2.1	Hipótesis específica 1:	63
4.3	Prueba de hipótesis	74
4.3.1	Hipótesis específica 2:	74
4.4	Prueba de hipótesis	81
4.4.1	Hipótesis específica 3:	81

4.5	Discusión de resultados	83
	CONCLUSIONES	86
	RECOMENDACIONES	87
	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	88
	ANEXOS	104

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Operacionalización de variables.....	19
Tabla 2. Concentración de Cd (mg/kg) en el suelo y su bioacumulación en plantas y sus factores de transferencia (FT).....	29
Tabla 3. Tratamientos en estudio.....	45
Tabla 4. Caracterización fisicoquímica del suelo del experimento.....	46
Tabla 5. Análisis de cadmio en el vermicompost.....	47
Tabla 6. Esquema del análisis de variancia del Diseño Completamente al Azar (DCA).....	52
Tabla 7. Resultados de la altura de planta de alfalfa (cm) en un suelo de Huaripampa, contaminado con Cd con diferentes dosis de vermicompost. 2022.	53
Tabla 8. Resultados de la longitud de raíz de alfalfa (cm) en un suelo de Huaripampa, contaminado con Cd con diferentes dosis de vermicompost. 2022.	54
Tabla 9. Resultados de la materia seca de la parte aérea de alfalfa (g) en un suelo de Huaripampa, contaminado con Cd con diferentes dosis de vermicompost. 2022.	55
Tabla 10. Resultados de la materia seca de la raíz de alfalfa (g) en un suelo de Huaripampa, contaminado con Cd con diferentes dosis de vermicompost. 2022.	56
Tabla 11. Resultados del contenido de cadmio en la parte aérea de alfalfa (mg/kg) en un suelo de Huaripampa, contaminado con Cd, con diferentes dosis de vermicompost. 2022.	57
Tabla 12. Resultados del contenido de cadmio en la raíz de alfalfa (mg/kg) en un suelo de Huaripampa, contaminado con Cd con diferentes dosis de vermicompost. 2022.	58
Tabla 13. Resultados del factor de bioconcentración (FBC) en alfalfa en un suelo de Huaripampa, contaminado con Cd con diferentes dosis de vermicompost. 2022.	59
Tabla 14. Resultados del factor de bioconcentración radicular (FBR) en alfalfa en un suelo de Huaripampa, contaminado con Cd con diferentes dosis de vermicompost. 2022.	60

Tabla 15. Resultados del factor de bioconcentración total (FBT) en alfalfa en un suelo de Huaripampa, contaminado con Cd con diferentes dosis de vermicompost. 2022.	61
Tabla 16. Resultados del factor de traslocación (FT) en alfalfa en un suelo de Huaripampa, contaminado con Cd con diferentes dosis de vermicompost. 2022.	62
Tabla 17. Resultados del contenido final de cadmio (ppm) en el suelo de Huaripampa, contaminado con Cd, cultivado con alfalfa, con diferentes dosis de vermicompost. 2022.....	63
Tabla 18. Prueba de normalidad de Shapiro-Wilks para la altura de planta de alfalfa.	64
Tabla 19. Análisis de variancia para la altura de planta de alfalfa (cm).....	65
Tabla 20. Prueba de normalidad de Shapiro-Wilks para la longitud de raíz de alfalfa.	66
Tabla 21. Análisis de variancia para la longitud de raíz de alfalfa (cm).	66
Tabla 22. Prueba de normalidad de Shapiro-Wilks para la materia seca aérea.....	68
Tabla 23. Análisis de variancia para la materia seca de la parte aérea de alfalfa (g).	68
Tabla 24. Prueba de normalidad de Shapiro-Wilks para la materia seca de la raíz.....	69
Tabla 25. Análisis de variancia para la materia seca de la raíz de alfalfa (g).....	70
Tabla 26. Prueba de normalidad de Shapiro-Wilks para el contenido de Cd en la parte aérea.	71
Tabla 27. Análisis de variancia para el contenido de Cd en la parte aérea (mg/kg).....	71
Tabla 28. Prueba de normalidad de Shapiro-Wilks para el contenido de Cd en la raíz.	72
Tabla 29. Análisis de variancia para el contenido de Cd en la raíz (mg/kg).	73
Tabla 30. Prueba de normalidad de Shapiro-Wilks para el FBA.	75
Tabla 31. Análisis de variancia para el FBA.	75
Tabla 32. Prueba de normalidad de Shapiro-Wilks para el FBR.	76
Tabla 33. Prueba de normalidad de Shapiro-Wilks para el FBT.....	78
Tabla 34. Prueba de normalidad de Shapiro-Wilks para el FT.	79
Tabla 35. Análisis de variancia para el FT.	80
Tabla 36. Prueba de normalidad de Shapiro-Wilks para el contenido de Cd en el suelo.....	82
Tabla 37. Análisis de variancia para el contenido de Cd en el suelo.	82

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Presentación diagramática de fuentes de Cd, absorción por las plantas, efectos sobre el crecimiento de la planta y salud humana y como las enmiendas orgánicas reducen la absorción de Cd por las plantas y mejoran el crecimiento de la planta (4).....	30
Figura 2. Figura 2. Efectos de metales pesados esenciales y no esenciales sobre la alfalfa (80).....	32
Figura 3. Esquema de los mecanismos de las lombrices de tierra en remediación de metales (87).....	38
Figura 4. Diagrama de flujo del proceso experimental	48
Figura 5. Mapa de ubicación del suelo del experimento.	49
Figura 6. Prueba de Duncan para longitud de raíz.	67
Figura 7. Prueba de Duncan para el contenido de Cd la raíz de alfalfa.....	73
Figura 8. Prueba de Kruskal Wallis para el FBR de alfalfa.	77
Figura 9. Prueba de Kruskal Wallis para el FBT de alfalfa.....	78
Figura 10. Prueba de Duncan para el FT de alfalfa.	80
Figura 11. Prueba de Duncan para el contenido promedio de Cd en el suelo.....	83

RESUMEN

Objetivo: *Determinar el efecto del vermicompost en el crecimiento y contenido de cadmio en el cultivo de alfalfa (*Medicago sativa* L.) en un suelo contaminado de Huaripampa, Jauja, 2022.*

Metodología: Se ensayó cinco dosis de vermicompost: dos, cuatro, seis, ocho y diez por ciento, más un testigo absoluto, dispuestos en un diseño completamente al azar, con tres repeticiones. Se utilizó como especie vegetal *Medicago sativa* L., sembrado en macetas de 3 kg de capacidad, con suelo contaminado de Huaripampa, por un periodo de 102 días. Se evaluó el crecimiento de alfalfa: altura de la planta, longitud de la raíz, materia seca aérea y radicular; así también se calculó el factor de bioacumulación y el factor de traslocación y el contenido de Cd en la parte aérea, radicular y suelo.

Conclusiones: La altura de planta no fue significativamente diferente, la longitud de raíz fue significativamente superior con 8 % de vermicompost, no se presentó diferencias significativas en el contenido de Cd en la parte aérea, la dosis de 10 % de VC tuvo superioridad significativa en el contenido de Cd en la raíz, el factor de bioacumulación aéreo no fue significativamente diferente en todos los tratamientos, el factor de bioacumulación radicular y total fue significativamente superior con 10 % de vermicompost, el factor de traslocación fue superior con 2 % de vermicompost y el tratamiento con 10 % de vermicompost disminuyó significativamente en contenido de Cd en el suelo.

Palabras clave: *fitorremediación, cadmio, vermicompost, medicago sativa, contaminación*

ABSTRACT

Objective: *To determine the effect of vermicompost on the growth and cadmium content in the cultivation of alfalfa (Medicago sativa L.) in a contaminated soil in Huaripampa, Jauja - 2022.*

Methodology: Five doses of vermicompost were tested: two, four, six, eight and ten percent, plus an absolute control, arranged in a completely random design, with three repetitions. *Medicago sativa L.* was used as plant species, planted in 3 kg capacity pots, with contaminated soil from Huaripampa, for a period of 102 days. Alfalfa growth was evaluated: plant height, root length, aerial and root dry matter; thus, the bioaccumulation factor and the translocation factor and the Cd content in the aerial, root and soil parts were also calculated.

Conclusions: Plant height was not significantly different, root length was significantly higher with 8% vermicompost, there were no significant differences in Cd content in the aerial part, the dose of 10% VC had significant superiority in the Cd content in the root, the aerial bioaccumulation factor was not significantly different in all treatments, the root and total bioaccumulation factor was significantly higher with 10 % vermicompost, the translocation factor was higher with 2 % vermicompost and treatment with 10 % vermicompost significantly decreased Cd content in the soil.

Keywords: phytoremediation, cadmium, vermicompost, *medicago sativa*, contamination

INTRODUCCIÓN

Se ha venido reportando como una práctica común por varias décadas, el uso de los residuos orgánicos como enmiendas del suelo, debido a los efectos benéficos en el mejoramiento de sus propiedades, siendo los residuos orgánicos comúnmente utilizados: el estiércol de los animales, biosólidos, el compost, residuos de cultivo y sustancias húmicas (1). Dentro de los compost, el *vermicompost* es una enmienda orgánica que contribuye a la movilidad del cadmio en los suelos (2). Como componente orgánico que se agrega al suelo, el vermicompost mejora el crecimiento de las plantas y afecta la disponibilidad de contaminantes, entre otros efectos favorables. La abundancia de minerales de producción son bastante variables; sin embargo, como ventajas conviene desechar a mayor rapidez su alteración en el suelo, originando una apresurada disponibilidad de los componentes minerales y orgánicos para el cultivo, y la intención de estimular que ejerce sobre el metabolismo microbiano y vegetal (3).

En este trabajo de investigación se plantea el uso de vermicompost como material orgánico preparado por el hombre para ser aplicado en suelos contaminados con cadmio, reportados en diversos lugares del Valle del Mantaro.

La enmienda orgánica tiene efecto sobre el movimiento y biodisponibilidad de cadmio (Cd) en el suelo. Las propiedades físico – químicas tienen un rol primordial en la disponibilidad de Cd. Generalmente en la fracción disponible de Cd en el suelo disminuye cuando se incrementa en materia orgánica y contenido de arcilla en el suelo (4).

El presente trabajo consta de cuatro capítulos:

Capítulo I: se presenta el planteamiento del estudio, formulación del problema, objetivos, justificación e importancia, hipótesis y descripción de variables.

Capítulo II: se desarrolla el marco teórico, se incluye los antecedentes del problema, nacionales e internacionales, las bases teóricas y la definición de términos básicos.

Capítulo III: se menciona la metodología, incluye el método, alcance, tipo, nivel de investigación, diseño, población y muestra; así como técnicas e instrumentos de recolección de datos.

Capítulo IV: se presentan los resultados del tratamiento y análisis de la información para las variables evaluadas de planta y suelo; así como la contrastación de las hipótesis y la discusión de resultados.

Finalmente se incluyen las conclusiones, recomendaciones y referencias bibliográficas.

El Autor

CAPÍTULO I

PLANTEAMIENTO DEL ESTUDIO

1.1 Planteamiento y formulación del problema

1.1.1 Planteamiento del problema

El vermicompost es el resultado del procedimiento de compostar usando lombrices y microorganismos. Es un proceso aeróbico de la materia orgánica que se finaliza en la estabilización. Del mismo modo que el compost maduro, es el producto final es materia orgánica procesada por lombrices, específicamente *Eisenia foetida*, conocida a menudo llamado lombrices rojas de californiana, a pesar de ser Europea (5). Como cualquier compost, el vermicompost hay mejoría en la estructura del suelo, incrementa la retención de agua y contribuye microorganismos beneficiosos, así como enzimas y otros metabolitos implicados en la modificación de la materia orgánica (6).

En el suelo, el cadmio (Cd) es un oligoelemento en el entorno natural, incluidas las plantas; no es fundamental para la vida, pero es preocupante porque es perjudicial para los animales y plantas cuando se almacena en los tejidos (7).

Del mismo modo estas concentraciones naturales de metales pesados dependen primariamente del tipo de material parental que da origen al suelo; sin embargo, las entradas antropogénicas pueden conducir a concentraciones muy altas por encima de las que se encuentran en las fuentes, naturales causando la contaminación del suelo (8).

Entre los metales pesados, el cadmio (Cd), es utilizado principalmente en la producción de baterías o pigmentos de níquel/cadmio y estabilizadores de PVC en la industria metalúrgica, es uno de los elementos que frecuentemente registrado como contaminante metálico. Este metal pesado se transfiere al ambiente a través de las emisiones de la industria metalúrgica o aplicación de fertilizantes fosfatados en la agricultura (8). Así mismo, es un metal altamente carcinogénico que puede causar reacciones tóxicas aún a bajas concentraciones (1), su enriquecimiento en el suelo es considerado un gran problema ambiental (9). Este elemento traza no es considerado un elemento esencial y no tiene un rol definido en el crecimiento y

desarrollo de seres humanos, plantas y animales, su concentración en la litosfera es en promedio 0.2 mg/kg, en las rocas sedimentarias 0.3 mg/kg y en los suelos 0.53 mg/kg (10).

En los suelos del Valle del Mantaro, se ha reportado altas concentraciones de cadmio, principalmente por el riego con aguas del río Mantaro (11). En los suelos contaminados con cadmio, las raíces de las plantas lo pueden absorber fácilmente para luego transportarlo a las partes aéreas en donde interaccionan con procedimientos fisiológicos y bioquímicos, perjudicando la morfología y tasa de desarrollo de la planta (12). Por lo tanto, la colocación de enmiendas orgánicas al suelo favorece la inmovilización del Cd a través de las reacciones de adsorción, debido al incremento de la retención por el incremento de la carga superficial de los sólidos del suelo (2).

Uno de los cultivos comunes en el Valle del Mantaro es la alfalfa (*Medicago sativa* L.), la cual es utilizada como forraje para el alimento de animales menores (cuy, conejo) y mayores (vacunos, ovinos, entre otros). Al desarrollarse esta planta en suelos agrícolas contaminados, es probable la absorción de metales pesados, afectando su crecimiento, por ello, se pretende analizar el efecto del vermicompost en el crecimiento y contenido de cadmio en la alfalfa en un suelo agrícola de Huaripampa, Jauja.

1.1.2 Formulación del problema

1.1.2.1 Problema general

¿Cuál es el efecto del vermicompost en el crecimiento y contenido de cadmio en el cultivo de alfalfa (*Medicago sativa* L.) en un suelo contaminado de Huaripampa, Jauja - 2022?

1.1.2.2 Problemas específicos

- ¿En qué medida las dosis crecientes de vermicompost influyen en el crecimiento y contenido de cadmio en alfalfa (*Medicago sativa* L.) en un suelo contaminado de Huaripampa?
- ¿Cómo influyen las dosis crecientes de vermicompost en los factores de bioacumulación y translocación de Cd por la planta de alfalfa (*Medicago*

sativa L.) en un suelo contaminado de Huaripampa con dosis crecientes de vermicompost?

- ¿En qué medida varía la concentración de Cd en un suelo contaminado de Huaripampa debido a dosis crecientes de vermicompost con el cultivo de alfalfa (*Medicago sativa* L.)?

1.2 Objetivos

1.2.1 General

Determinar el efecto del vermicompost en el crecimiento y contenido de cadmio en el cultivo de alfalfa (*Medicago sativa* L.) en un suelo contaminado de Huaripampa, Jauja - 2022.

1.2.2 Específicos

- Determinar el efecto de dosis crecientes de vermicompost en el crecimiento y contenido de cadmio en alfalfa (*Medicago sativa* L.) en un suelo contaminado de Huaripampa.
- Calcular los factores de bioacumulación y translocación de Cd en la planta de alfalfa en un suelo contaminado de Huaripampa con dosis de crecientes de vermicompost
- Evaluar la concentración de cadmio en un suelo contaminado de Huaripampa, por efecto de dosis crecientes de vermicompost en el cultivo de alfalfa (*Medicago sativa* L.).

1.3 Justificación e importancia

1.3.1 Justificación

La aplicación de abonos orgánicos a suelos contaminados permitirá evaluar el crecimiento de esta especie vegetal, indicada por su altura y formación de materia seca, utilizada como alimento para animales de consumo humano, como son los vacunos, ovinos. Asimismo, la cantidad de Cd que absorbe la planta en sus diferentes órganos sea en hojas, tallos y raíces, indicará su carácter fitorremediador de suelos contaminados, disminuyendo las concentraciones de este metal pesado en suelos agrícolas.

1.3.2 Importancia

Al evaluar el efecto del vermicompost aplicado al suelo contaminado de Huaripampa, se determinará si la contaminación del suelo afecta al crecimiento de la planta, en qué órganos de la alfalfa se acumula el Cd y si esto constituye un carácter fitoextractor o fitoestabilizador, que limitaría su uso como alimento de animales. Es necesario resaltar que el vermicompost por su carácter adsorbente de contaminantes puede disminuir la disponibilidad en el suelo y limitar la absorción de Cd por la planta disminuyendo así la concentración del metal pesado en la planta y a la vez remediando el suelo contaminado.

1.4 Hipótesis y descripción de variables

1.4.1 Hipótesis

1.4.1.1 General

Ho: El vermicompost no influye significativamente en el crecimiento y contenido de cadmio en el cultivo de alfalfa (*Medicago sativa* L.) en un suelo contaminado de Huaripampa.

H1: El vermicompost influye significativamente en el crecimiento y contenido de cadmio en el cultivo de alfalfa (*Medicago sativa* L.) en un suelo contaminado de Huaripampa.

1.4.1.2 Específicas

Ho1: Las dosis crecientes de vermicompost no influyen significativamente en el crecimiento y contenido de cadmio en alfalfa (*Medicago sativa* L.) en un suelo contaminado de Huaripampa.

Ha1: Las dosis crecientes de vermicompost influyen significativamente en el crecimiento y contenido de cadmio en alfalfa (*Medicago sativa* L.) en un suelo contaminado de Huaripampa.

Ho2: Las dosis crecientes de vermicompost no incrementan los factores de bioacumulación y translocación de Cd en la planta de alfalfa (*Medicago sativa* L.).

Ha2: Las dosis crecientes de vermicompost incrementan los factores de bioacumulación y translocación de Cd en la planta de alfalfa (*Medicago sativa* L.).

Ho3: Las dosis crecientes de vermicompost no disminuyen significativamente la concentración de Cd en un suelo de Huaripampa cultivado con alfalfa (*Medicago sativa* L.) con dosis crecientes de vermicompost.

Ha3: Las dosis crecientes de vermicompost disminuyen significativamente la concentración de Cd en un suelo de Huaripampa cultivado con alfalfa (*Medicago sativa* L.) con dosis crecientes de vermicompost.

1.4.2 Descripción de variables

Variable independiente (X): Vermicompost

Indicadores:

Dosis de vermicompost: 0, 2, 4, 6, 8, 10 %

Variable dependiente (Y):

Y1: Crecimiento de la planta de alfalfa

Indicadores: altura de planta, longitud de raíz, materia seca aérea y radicular

Y2: Cadmio

Indicadores: concentración en el suelo, concentración en parte aérea y radicular de alfalfa, FBC, FT

Tabla 1. Operacionalización de variables

VARIABLES	DEFINICIÓN CONCEPTUAL	DIMENSIONES		INDICADORES
Independiente (X1): Vermicompost	También denominado vermicompost, resultado de un procedimiento biológico en que la materia orgánica se convierte en humus, por descomposición aeróbica elaborada especialmente por lombrices (13).	- Dosis de vermicompost		- 00 %
				- 02 %
				- 04 %
				- 06 %
				- 08 %
				- 10 %
Dependiente (Y1): Crecimiento de la alfalfa	Cambios cuantitativos que tienen lugar durante el desarrollo de una planta (14).	Altura de planta		cm
		Longitud de raíz		cm
		Materia seca aérea		g
		Materia seca radicular		g
Dependiente (Y2): Contenido de cadmio	Cadmio: Es un elemento traza en el ambiente natural, incluyendo el suelo y las plantas. No es esencial para la vida, es interesante porque es perjudicial para los animales y las plantas cuando se acumulan en sus tejidos (7).	Planta	Parte aérea (Tallo y Hoja)	mg.kg ⁻¹
			Parte radicular (Raíz)	mg.kg ⁻¹
			Factor de bioacumulación	Cd hojas/Cd suelo Cd raíz/Cd suelo Cd planta/Cd suelo
			Factor de translocación	Cd hojas/Cd raíz
			Suelo	Concentración

Fuente: *Elaboración propia*

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1 Antecedentes del problema

2.1.1 Nacionales

En el artículo de investigación titulado: “Efectos del cadmio sobre el crecimiento y la composición elemental de la alfalfa en cultivo de arena”, tuvo como objetivo evaluar los efectos del nivel de cadmio en el ambiente de arena sobre el crecimiento de la alfalfa y el contenido de Cd, Ca, Cu, Fe, K, Mg, Mn, N, Na, P, S, y Zn. Los tratamientos fueron tres dosis de cadmio: 0, 5 y 25 mg/kg de arena, utilizando semilla de alfalfa en San Pedro en un número de 20, en cada recipiente. Los tratamientos estuvieron dispuestos en un diseño de bloques completos al azar, cada unidad experimental tuvo 1 kg de arena, las plantas se desarrollaron durante 60 días, siendo periódicamente regadas y fertilizadas. A mayor dosis de cadmio se observaron notorias reducciones de clorofila, lo cual limitó la fotosíntesis, afectando el crecimiento vegetal. Ningún tratamiento mostró deficiencia o exceso de nutrientes de ninguno de los minerales estudiados, la alta concentración de cadmio provocó una concentración preferencial de elementos nutritivos en la parte aérea respecto a la raíz (7).

En el trabajo de tesis titulado: “Rizofiltración de alfalfa (*Medicago sativa* L.) y coliflor (*Brassica oleracea* var. Botrytis), para tratamiento de suelos contaminados con cadmio y plomo en San José de Parac (Huarochiri – Lima) 2018-1”, tuvo como objetivo la aplicación del método de rizofiltración para la absorción de metales pesados, Pb y Cd presentes en los suelos. Se seleccionaron alfalfa y coliflor para absorber estos minerales durante el proceso fenológico y durante un periodo experimental de 2 a 3 meses. El análisis de las muestras mostró una reducción de plomo de hasta un 78% en alfalfa y una reducción del 85 % en coliflor. Para el cadmio se obtuvo una reducción de 49 % en alfalfa y 47 % en coliflor. Estos datos han logrado demostrar que estas dos especies logran reducir significativamente la concentración de Pb y Cd en suelos contaminados en valores muy superiores, por ejemplo, el girasol, logrando valores inferiores al ECA (15).

En el trabajo de tesis titulado: “Evaluación de la capacidad fitoextractora de la alfalfa (*Medicago sativa*) en la remediación de suelos degradados por fertilización sintético en la E.E.A El Mantaro”, tiene como objetivo evaluar la capacidad fitoextractora de esta leguminosa forrajera para remediar suelos degradados por la excesiva fertilización sintética. Se instaló tres parcelas de alfalfa en suelos con niveles altos de fertilización con tres densidades de siembra: baja, media y alta. Los resultados indicaron que la alfalfa puede extraer una gran cantidad de metales pesados: el cadmio de 11.56 % a 34.03 %; níquel de 13.03 % a 23.78 % y plomo de 5.49 % a 25.93 %. Es una planta que excluye y estabiliza los metales pesados en las raíces, los factores de bioconcentración y translocación fueron menores de uno para Cd, Pb y Ni, lo que se evidencia que las plantas de alfalfa no pueden transferir metales pesados de raíces a la parte aérea de manera eficiente (16).

En el trabajo de investigación titulado: “Evaluación de la capacidad fitoextractora de la alfalfa (*Medicago sativa*) y perejil (*Proselinum crispum*) en la remediación de suelos contaminados por plomo en el distrito de Anta – Carhuaz, 2016”, se evaluaron suelos contaminados con plomo y regados directamente con las aguas del río Santa. Las muestras fueron de 250 g de suelo, los resultados analíticos demostraron que ambas especies de plantas reducen la concentración de plomo en el suelo, considerándose como resultados positivos en la remediación de suelos contaminados con plomo (17).

En el trabajo de tesis titulado: “Cuantificación de metales pesados cobre (Cu), cadmio (Cd) y cromo (Cr) en alfalfa (*Medicago sativa*) variedad California en el pueblo tradicional de Congata, 2018”, tiene el objetivo de cuantificar la concentración de Cu, Cd y Cr en alfalfa en el pueblo tradicional de Congata. Identificando tres áreas de muestreo en tres estados de crecimiento: 1 mes (1978 m²), dos meses (2164 m²) y tres meses (3575 m²). Los análisis de agua mostraron que los tres elementos tuvieron concentración menor al ECA. En el suelo, el Cd superó el valor del ECA, los resultados de análisis en la planta de alfalfa para Cd, Cr y Cu, fueron 0,06 mg/kg, 0,82 mg/kg y 13,57 mg/kg, respectivamente, sin diferencias significativas según el periodo de crecimiento. Respecto a la normativa internacional, solo el cromo se encuentra dentro de los niveles establecidos (18).

En el trabajo de tesis titulado: “Utilización de las especies *Medicago sativa* y *Taraxacum officinale* en la fitorremediación de plomo, mercurio y cadmio del botadero Yacutina”, se desarrolló un experimento con un testigo (suelo del botadero) y dos tratamientos (*Medicago sativa* y *taraxacum officinale*). La concentración promedio de Pb fue de 9.41 mg/kg, debajo del estándar de calidad ambiental, para Hg estuvo a bajo del límite de detección, la concentración de Cd fue de 5.60 mg/kg, la cual supero el estándar de calidad ambiental. Después de aplicar la fitorremediación con *M. sativa*, la concentración de Pb en el suelo se redujo a 8.50 mg/kg, mientras tanto la *T. officinale* fue de 7.39 mg/kg; para Cd fue de 1.13 mg/kg con *M. sativa* y de 1.36 mg/kg con *T. officinale*; ambos valores debajo del estándar de calidad ambiental. Los resultados mostraron que la especie con mayor retención de Pb fue *T. officinale* y la especie con mayor remoción de Cd fue *M. sativa*, por lo tanto, ambas especies son promisorias para la descontaminación de estos metales pesados en los suelos (19).

En el trabajo de tesis titulado: “Capacidad fitorremediadora de la “alfalfa” *Medicago sativa* L. en suelos contaminados con plomo evaluada en dos etapas de crecimiento, Végueta, Huarua”, se desarrolló un experimento bajo un tinglado, con la finalidad de conocer la capacidad fitorremediadora de la alfalfa en suelos contaminados con 3 tipos de plomo (Pb): 70, 140 y 210 mg/kg, así como un control (0 mg Pb/kg), se realizaron experimentos en macetas evaluados durante 45 y 90 días. Se encontró que las raíces obtenían mayor extracción que en las partes aéreas; la concentración más alta de Pb tuvo menos efecto en la altura de la planta. El factor de bioconcentración fue menor de 1, determinando que la alfalfa es una planta expulsora de Pb. El factor de traslocación fue menor de 1 calificando a esta leguminosa como una planta fitoestabilizadora (20).

En el trabajo de tesis titulado: “Evaluación de la capacidad fitoextractora de la alfalfa (*Medicago sativa*) y rábano (*Raphanus sativus*) sobre la remoción de Hg en suelos contaminados por la actividad minera”, se realizó un experimento con muestras de suelo contaminado por el centro minero de Ollachea - Puno, por 10 semanas, con dos tratamientos: 25 % y 50 % de suelo contaminado para cada especie de planta, dispuestos en un diseño completamente al azar con arreglo factorial 2 x 2. Los

resultados mostraron que la alfalfa remueve mayor cantidad de Hg con un 58,72 % respecto al rábano. Se concluyó que, las dos especies brindan resultados efectivos en la remoción de suelos contaminados con mercurio (21).

2.1.2 Internacionales

En el trabajo de investigación titulado: "Determinación de cadmio en alfalfa *Medicago sativa*, irrigada con aguas residuales", tiene como objetivo determinar la concentración de cadmio en cultivos de alfalfa en el tejido Plan de San Luis, Torreón, Coahuila, cuyos terrenos de cultivos son regados con aguas residuales de origen municipal. El ensayo se realizó un diseño de bloques completamente al azar con 12 repeticiones, cada parcela de dimensiones de 18 m x 180 m. Se obtuvieron 12 muestras por bloque, se encontró que la mayor concentración de cadmio se localizó en el bloque 5 con un valor de 6.07 mg/kg y la menor concentración en el bloque dos con 0.74 mg/kg. Estas diferencias fueron estadísticamente significativas, lo cual se atribuyó a la ubicación de cada bloque sobre la entrada del efluente (22).

En el trabajo de investigación titulado: "Phytotoxicidad and remediation of heavy metals by alfalfa (*Medicago sativa*) in soil-vermicompost media", se desarrolló un experimento en un invernadero para determinar el efecto fitotóxico de metales pesados tales como: Cd, Cu, Ni, Pb y Zn sobre el desarrollo de esta leguminosa: germinación de la semilla, crecimiento de raíz y tallo, biomasa y absorción de metales en un suelo con vermicompost. Los metales elegidos fueron distribuidos a concentraciones de 0, 5, 10, 20, 40 y 50 ppm por separado en un experimento de macetas en una relación suelo: vermicompost de 3:1. La germinación y crecimiento de raíz y tallo fueron afectados por los metales en concentraciones de 40 y 50 ppm; sin embargo, las dosis de 5 a 10 ppm estimularon el crecimiento del tallo y raíz e incrementaron la biomasa. El vermicompost fue usado debido a que enlaza metales e incrementa la absorción de Ca, Na, Mg, Fe, Zn, Mn y Cu. Se concluyó que el uso de vermicompost en el suelo fue efectivo para remediar los metales pesados (23).

En el trabajo de investigación titulado: "Potential of *Medicago sativa* for uptake of cadmium from contaminated environment", se estudió la absorción de cadmio por *M. sativa* var. Col, en condiciones de cultivo in vitro, las plantas crecieron inicialmente en medio líquido conteniendo el medio Murashige & Skoog, después

se transfirieron a una solución Steinberg conteniendo Cd como $\text{Cd}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ a concentraciones de 0, 5, 10, 20 y 50 mg/mL. El experimento se continuó por un periodo de 21 días, se observó que el crecimiento de alfalfa fue afectado por concentraciones de 20 y 50 mg/mL; mientras que las bajas concentraciones de Cd no afectaron el crecimiento de la planta. Los resultados expusieron que las raíces concentraron 12360 $\mu\text{g Cd/g}$, mientras que los tallos concentraron 1920 $\mu\text{g Cd/g}$ en el tratamiento con 50 mg/mL. Se concluyó que la fitorremediación con alfalfa en solución hidropónica durante 21 días, tuvo el potencial de absorber del 80 al 85 % de cadmio (24).

En el trabajo de investigación titulado: “Remediation of cadmium and lead polluted soil using thiol-modified biochar”, se preparó biochar con paja de arroz modificado con tiol por una reacción de esterificación con β -mercaptoetanol y utilizado para la remediación de suelos contaminados con Cd y Pb. La caracterización del biochar reveló que los grupos tiol fueron exitosamente insertados en la superficie del biochar e involucrados en la complejación de iones metálicos. Los experimentos de adsorción por lotes indicaron que la adsorción de Cd y Pb sobre el biochar se describió bien un pseudo segundo orden de modelo cinético y una isoterma de Langmuir. La capacidad de adsorción máxima para Cd y Pb en los sistemas simples de metal fueron 45.1 y 61.4 mg/g respectivamente. En los sistemas binarios de metales el biochar adsorbió selectivamente Cd sobre Pb. El Cd y Pb fueron removidos principalmente a través de complejación superficial. En el experimento de incubación del suelo (28 días), el biochar disminuyó la disponibilidad de Cd en 34.8 a 39.2 %. Esta investigación demostró al biochar como una enmienda efectiva para la remediación de suelos contaminados con metales pesados (25).

En el trabajo de investigación titulado: “Remediation techniques for cadmium-contaminated dredged river sediments after land disposal”, se examinó tres técnicas de remediación, incluyendo estabilización, lixiviación y fitorremediación. Los resultados experimentales mostraron que la estabilización disminuyó la tasa de lixiviación de Cd, de 33.3 % a 14.3 %, disminuyendo efectivamente la toxicidad ambiental del Cd ambiental, pero no disminuyó la cantidad total de Cd en el suelo. La lixiviación del suelo con ácido cítrico y ácido oxálico alcanzó tasas de remoción

de 90.1 % y 92.4 % respectivamente. La fitorremediación, comparada a estas dos técnicas fue más eficiente y fácil de implementar y tuvo menos contaminación secundaria, pero tomó más tiempo, usualmente varios años. Se concluyó que la lixiviación fue la mejor técnica para el tratamiento oportuno frente a una contaminación de Cd en sedimentos rivereños (26).

En el artículo de investigación titulado: “The immobilization of soil cadmium by the combined amendment of bacteria and hidroxyapatite”, tiene como objetivo inmovilizar el cadmio en el suelo contaminado combinando métodos. Los experimentos fueron realizados para investigar los efectos de la hidroxiapatita (HA) y la bacteria *Cupriavidus* sp. Strain ZSK sobre el pH del suelo y cadmio extractable con DTPA. Los experimentos en macetas estudiaron los efectos de las enmiendas combinadas sobre tres especies de plantas incluyendo margarita, diente de león y ramina. Los resultados mostraron que la HA no mostró influencia sobre el crecimiento de la bacteria, al incrementar las concentraciones de HA, aumentó el pH y disminuyó el Cd, al combinar ambos métodos, el Cd disminuyó en un 58.2 %, y la acumulación de Cd en ramina, diente de león y margarita disminuyó en un 44.9 %, 51.0 % y 38.7 %, respectivamente. Estos resultados sugieren que la inmovilización por la combinación de HA y bacterias es un método potencial para disminuir el Cd disponible en el suelo y la acumulación de Cd en las plantas (27).

En el trabajo de investigación titulado: “*Medicago sativa* L. enhances the phytoextraction of cadmium and zinc by *Ricinus communis* L. on contaminated land in situ” se seleccionó para un experimento, un lugar de reubicación de una fábrica contaminada con Cd y Zn en Shangai y según los resultados de una evaluación de riesgo potencial ecológico de metales pesados, el área de estudio fue dividida en 3 niveles de contaminación: ligero, moderado y alto. Los resultados mostraron que la presencia de *M. sativa* pudo incrementar significativamente la altura y biomasa de *R. comunis*, y hubo un mayor impacto sobre el contenido de clorofila de *R. comunis* a mayor nivel de contaminación. Las diferencias en niveles de contaminación podrían cambiar significativamente el contenido de aceite de *R. comunis*, pero *M. sativa* puede aliviar el impacto de los metales pesados. La presencia de *M. sativa* incrementó la cantidad acumulada de Cd y Zn en *R. comunis* en 1.14 y 2.19 veces,

respectivamente. En conclusión, la siembra asociada de *R. comunis* y leguminosas puede ser una alternativa para suelos contaminados con metales pesados (28).

En el artículo de investigación titulado: “Effects of organic and inorganic amendments on bio-accumulation and partitioning of Cd in *Brassica juncea* and *Ricinus communis*”, se estudió diferentes enmiendas fertilizantes en diferentes experimentos. La aplicación al suelo de vermicompost, urea, fosfato diamónico, biofertilizantes (*Basillus subtilis* y *Azotobacter chroococum*), causó un incremento significativo en la biomasa fresco y seco de raíces y tallos de ambas especies. El contenido de proteína y prolina en las hojas incrementó con la aplicación de estos fertilizantes, sin embargo, disminuyó el nivel de malonaldehído. La aplicación de Cd disminuyó el contenido de proteína, pero aumentó el contenido de prolina. La aplicación de urea, fosfato diamónico y biofertilizantes incrementó la absorción de Cd en raíces y tallos de ambas especies, mientras que el vermicompost, urea y el fosfato diamónico disminuyeron la acumulación del metal. *R. communis* fue el más tolerante y extrajo la mayor cantidad de Cd que *B. juncea*, la acumulación del metal se incrementó por la aplicación de fertilizantes inorgánicos en *R. communis* (29).

2.2 Bases teóricas

2.2.1 La contaminación del suelo por cadmio

El cadmio (Cd) es liberado al ambiente en proporciones cambiables desde fuentes naturales y actividades humanas. Las expulsiones volcánicas, los incendios forestales, las partículas llevadas por el aire y la brisa marina están dentro de las fuentes naturales de Cd, la meteorización de las rocas igualmente colaborar en su liberación (30). Las rocas máficas y ultramáficas contienen altas cantidades de Cd y después de su meteorización liberan cantidades significativas al suelo (31). Las pizarras negras contienen alrededor de 100 mg Cd/kg y el suelo derivado de sus depósitos está enriquecido con Cd (32).

En comparación con otras fuentes, la contribución total de las fuentes naturales a la contaminación del suelo es solo del 10 % y el 90 % es liberado al medio ambiente a través de fuentes antropogénicas incluido la utilización de fertilizantes fosfatados, la quema de combustibles fósiles, labores metalúrgicos, residuos de la producción del cemento, lodos residuales, residuos industriales y municipales, fundición y

procesamiento de minerales de metales (33). Es decir que el Cd es usado en estabilizadores plásticos, pigmentos, paneles solares, baterías y revestimientos de acero para la resistencia a la corrosión. Otras fuentes incluyen la fabricación de plásticos de cloruro de polivinilo, aleaciones, fungicidas, soldaduras, aceites de motor, fabricación de caucho y textiles (34).

Según los hallazgos de la British Geological Survey, la producción mundial de Cd en el 2020 fue aproximadamente 24,500 toneladas métricas (35). En el 2016, la producción mundial de Cd excluyendo a los Estados Unidos de América, fue de 23 000 toneladas métricas (36). Así también, el Cd se presenta en todas las minas de zinc como elemento accesorio debido a su similaridad geoquímica, de tal forma que cantidades sustanciales de este elemento son liberadas al ambiente durante su fundición. En la producción de Zn el polvo rico en Cd que es liberado a la atmósfera tiene un corto periodo de residencia y se deposita localmente (37).

Los suelos urbanos son principalmente contaminados con Cd desde los procesos industriales y las emisión de los vehículos (38). La contaminación de los suelos agrícolas con Cd a partir del riego con aguas residuales contribuye en una gran extensión a la contaminación del suelo como en diferentes fuentes, la utilización de fertilizantes fosfatados es considerado una de las principales fuentes de Cd que ingresa al suelo agrícola (39), siendo la mayor concentración de Cd en el suelo (16.7 mg/kg) que se reportó en Francia, seguido por Bélgica (7.61 mg/kg) y China (7.43 mg/kg) (4).

2.2.2 Bioacumulación de cadmio

La absorción de Cadmio por las plantas desde el suelo necesita de una concentración y una biodisponibilidad, mientras que unas pequeñas cantidades son directamente tomadas desde la atmósfera a través de la deposición de partículas de polvos contaminados (40). Al mismo tiempo los metales pesados ingresan a las células de las plantas se presenta a través del mismo sistema de transporte usado para la absorción de macro y micronutrientes. La absorción de Cd se presenta a través de transportadores transmembrana, involucrados en la captación de magnesio (Mg), calcio (Ca), hierro (Fe), zinc (Zn) y cobre (Cu) (41).

El Cd del suelo contaminado puede fácilmente ser absorbido por las raíces de la planta y transportado a las partes aéreas en donde interactúan con procesamiento bioquímicos y fisiológicos, perjudicando la morfología de la planta y su etapa de desarrollo (12). La transferencia de Cd a las plantas desde suelos contaminados ha sido reportada en varios estudios, sin embargo, se ha dado poco enfoque a los mecanismos involucrados en la bioacumulación de Cd en diferentes especies de plantas y tipos de suelo, lo que conduce a un error en la interpretación de datos. Por ejemplo, la mayoría de estudios enfocan la bioacumulación de Cd en suelos y plantas, pero no muestran los mecanismos (42).

En forma similar, los datos medidos están en su mayoría basados en la concentración de Cd total en los suelos, antes que la fracción biodisponible lo cual conduce a cierta incertidumbre respecto a la magnitud de la acumulación de Cd. La transferencia del suelo a la planta es generalmente medida como una relación entre la concentración de Cd en la planta y la concentración de Cd en el suelo respectivo (43), tal y como se presenta en la siguiente ecuación:

$$FT = \frac{Cd\ planta}{Cd\ suelo}$$

Donde:

FT = factor de transferencia

Cd planta = concentración de Cd en la planta

Cd suelo = concentración de Cd en el suelo (43)

Los valores de FT para Cd varían según la especie de la planta y depende de los factores que incluyan en el pH del suelo, textura, estructura, conductividad eléctrica, materia orgánica, geología, caracteres geológicos del área y enmiendas usadas en los suelos. El valor de los FT calculados de diferentes estudios se presentan en la Tabla 2 (4).

Tabla 2. Concentración de Cd (mg/kg) en el suelo y su bioacumulación en plantas y sus factores de transferencia (FT).

Cd en el suelo	Especie de planta	Cd en tejido	FT	Referencias
0.30	Papa	0.11	0.366	(44)
7.61	Frijol	0.24	0.031	(45)
7.43	Pepino	0.66	0.088	(46)
0.14	Papa	0.70	5	(47)
5.54	Lechuga	0.213	0.0384	(48)
0.8-2.58	Lechuga	0.40-0.91	0.5	(49)
0.84	Espinaca	0.52	0.619	(50)
0.67	Espinaca	0.20	0.29	(51)
3	Lechuga	0.27	0.09	(52)
0.325	Arroz	0.23	0.71	(53)
3.54	Lechuga	0.08	0.023	(54)
0.99	Mostaza	0.62	0.63	(43)
2.98	Mostaza	0.28	0.094	(55)
0.19	Arroz	0.03	0.16	(56)
0.9	Lechuga	4.22	4.69	(57)
16.7	Lechuga	14.98	0.897	(58)
1.2	Lechuga	0.13	0.11	(59)
1.7	Tomate	0.03	0.018	(60)
0.75	Papa	0.18	0.24	(61)
0.098	Calabaza	0.09	0.92	(62)
0.17	Lechuga	0.049	0.29	(63)
0.52-4.5	Lechuga	0.18	0.346	(64)
7.1	Col china	3.57	0.502	(65)

Fuente: *Elaboración propia*

Generalmente, varias especies de plantas toleran ciertas cantidades de Cd, no obstante en ciertas concentraciones puede estimular a la fitotoxicidad. Las concentraciones de Cd que causan fitotoxicidad varían enormemente con las especies de plantas. Las plantas hiperacumuladoras pueden acumular más de 0.01 % de su peso seco de la parte aérea sin mostrar síntomas de toxicidad (65). Asimismo, las concentraciones de Cd >5 a 10 µg Cd/g materia seca, son dañino para la demasiables las plantas (66). Se ha reportado una disminución en longitud de hoja y peso fresco de hojas de ajo silvestre con la aplicación de Cd (67). El Cd reduce el contenido de clorofila y la concentración de ATP (adenosina trifosfato) (68), y abstiene la fotosíntesis de las hojas afecta la biosíntesis de clorofila y la actividad del centro de reacción fotoquímica (69).

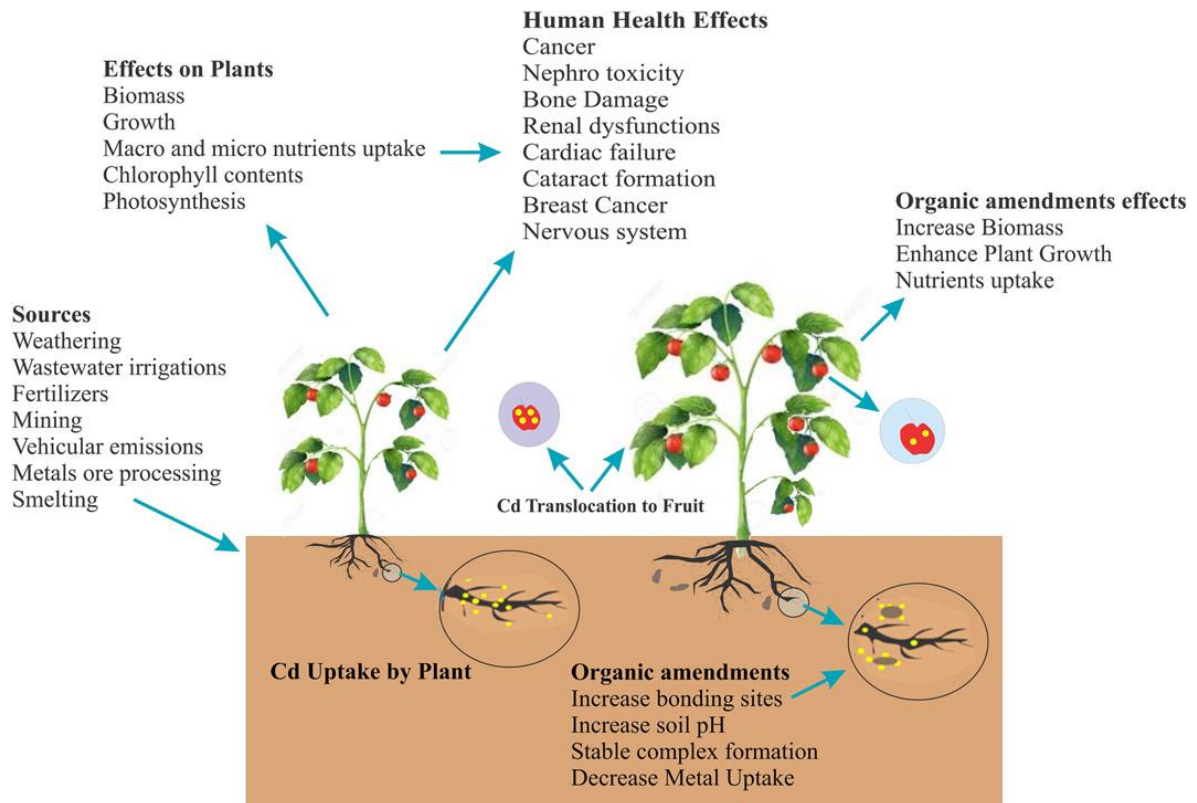


Figura 1. Presentación diagramática de fuentes de Cd, absorción por las plantas, efectos sobre el crecimiento de la planta y salud humana y como las enmiendas orgánicas reducen la absorción de Cd por las plantas y mejoran el crecimiento de la planta (4).

Fuente: (4)

Una planta ideal para fitoextracción debería tener un FT (factor de traslocación) y un FBC (Factor de Bioacumulación) mayor a la unidad. Según el reporte de investigadores, las plantas hiperacumuladoras pueden acumular $100 \text{ mg Cd.kg}^{-1}$, 1000 mg.kg^{-1} de cobre (Cu), arsénico (As), níquel (Ni), cobalto (Co), selenio (Se) y cromo (Cr); así como 10000 mg.kg^{-1} de manganeso (Mn) y zinc (Zn). Las plantas con alta tolerancia a metales, baja tasa de transporte de metal y mayor diversidad microbológica son consideradas candidatas clave para la fitoestabilización (70).

El FBC (factor de bioacumulación) de las plantas es calculado usando la siguiente fórmula (71):

$$\text{Factor de Bioacumulación (FBC)} = \frac{(\text{metal pesado en parte aérea de la planta, mg. kg}^{-1})}{(\text{metal pesado en suelo, mg. kg}^{-1})}$$

Se conoce que los metales pesados se acumulan en los tejidos de las plantas, pero la cantidad varía para cada una de ellas. El FBC (Factor de Bioacumulación) es una medida de cuánto una planta puede absorber en comparación al suelo circundante, este indicador es muy importante ya que ayuda a los investigadores a entender cómo las plantas reaccionan frente a la contaminación y a la subsecuente disminución de los suelos contaminados (72).

2.2.3 Efecto del cadmio sobre el crecimiento y desarrollo de alfalfa

La toxicidad del cadmio (Cd) reduce la absorción de nutrientes y agua en algunos cultivos. Las concentraciones de Cd de 300 y 50 mg Cd/kg de suelo reducen significativamente la presencia de K, Mg y Fe afectando a la longitud de la raíz y tallo, así como la acumulación de materia seca. Asimismo, inhibe el desarrollo fisiológico, morfológico, su funcionamiento y altera el metabolismo de las plantas (73), también retarda el proceso de germinación e impide el crecimiento de las plántulas después de la germinación(74), se ha mostrado que el Cd causa otros efectos negativos incluyendo estrés oxidativo, genotoxicidad, inhibición de la función fotosintética (75).

Se ha investigado la expresión de los genes relacionado al estrés de Cd, actividad enzimática y niveles de metabolitos en alfalfa, donde se reveló que 1 mM de Cd disminuyó el nivel de proteína soluble y genera mayor fuga de electrolitos, quelación de hierro, actividad de la enzima reductasa y niveles totales de fitoquelatina, citrato y malato en raíces y brotes en plántulas de alfalfa de 7 días de edad junto con la regulación positiva de tres genes relacionados con Fe: transportadores de Fe, transportadores de metales y reductasa de quelato de hierro. Debido al estrés de Cd, la actividad enzimática de catalasa, ascorbato peroxidasa y superóxido dismutasa en las raíces de plantas de alfalfa tolerantes disminuyó

significativamente, mientras que el contenido de H₂O₂ aumentó como signo de estrés oxidativo (76).

En forma similar, se ha reportado que la presencia de Cd incrementó el peso seco y porcentaje de germinación relativa en líneas tolerantes de *Medicago truncatula*, mientras que se redujo la cantidad de almidón hidrolizado y resultó en actividad de la enzima dismutasa superoxidativa como un signo del incremento de nivel de tolerancia en tallos junto con un alto nivel de H₂O₂ (77). Sin embargo, se ha encontrado un bajo nivel de peroxidación lipídica y la pérdida de la integridad de la membrana plasmática en las raíces, además de los parámetros anteriormente mencionados para tallos, excepto para H₂O₂ (78).

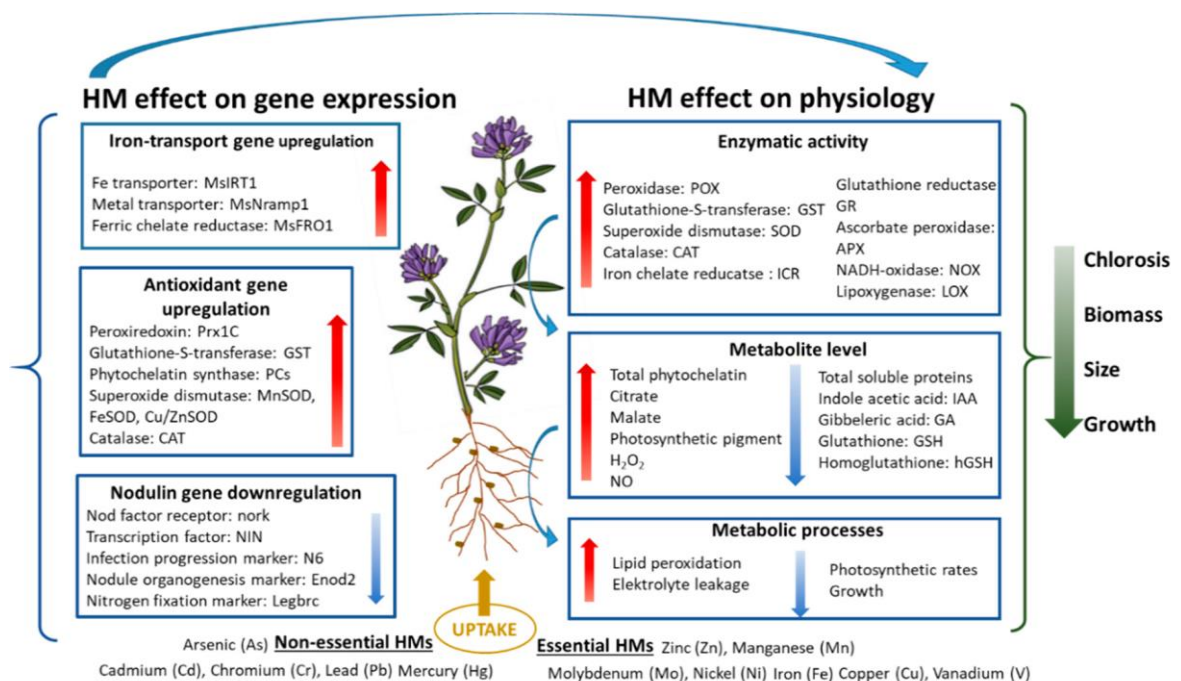


Figura 2. Efectos de metales pesados esenciales y no esenciales sobre la alfalfa (78)

Fuente: (78)

2.2.4 La fitorremediación

El éxito de la fitorremediación está basado en la comprensión de los efectos de los metales pesados sobre las plantas. En la medida que los metales pesados no son esenciales no pueden ser incorporados en el metabolismo de la planta, es particularmente importante prevenir que los metales pesados ejerzan sus efectos dañinos. Una manera posible de extraer metales pesados del suelo contaminado es absorberlas y concentrarlas en especies de plantas acumuladoras y luego removerlas del lugar (79). Así como la biomasa que se forma de la fitorremediación, puede ser usada para recuperar el metal si es económicamente viable (80). Para ello hay aproximadamente 400 especies de plantas alrededor del mundo que son capaces de hiperacumular metales pesados (cadmio, cromo, cobre, manganeso, níquel y zinc) (80).

La mayoría de las plantas acumuladoras son miembros de la familia Brassicaceae, pero las especies de plantas que son simbióticas con bacterias que fijan nitrógeno, como la alfalfa, tienen el potencial para fitorremediación. Sin embargo, en estas plantas, la fijación de metales se presenta principalmente en la zona radicular, lugar de la simbiosis y la extracción desde el suelo es un desafío adicional. La fitorremediación es exitosa si el metabolismo de la planta permanece intacto durante la acumulación. La literatura sobre metales pesados ha mostrado que mayormente especies capaces de hiperacumulación no han desarrollado gran masa foliar o no se han desarrollado a gran escala (79).

2.2.5 El vermicompost

2.2.5.1 Características

El vermicompost es el resultante del procesamiento de compostar residuos orgánicos empleando lombrices con la ayuda de microorganismos, es un proceso aeróbico que termina en la estabilización de la materia orgánica (81). Durante este procedimiento los minerales insolubles se disuelven poniéndolos a disposición de las plantas cuando se aplica vermicompost al suelo. Asimismo, otros componentes orgánicos son complicado como la celulosa se descomponen parcialmente en compuestos más sencillos por las bacterias presentes en el tracto digestivo de la lombriz, incrementando la disponibilidad de nitrógeno.

Para el vermicompost, la especie de lombriz utilizada comercialmente es la *Eisenia foetida*, conocida comúnmente como la lombrices rojas californianas, pese a ser originaria de Europa, su nombre de foetida se debe al olor de los exudados que produce (82).

Del mismo modo que el compost, el vermicompost hay mejoramiento de la estructura del suelo, incrementa la retención de agua, contribuye microorganismos beneficiosos, enzimas y distintos metabolitos que colaboran en la modificación de la materia orgánica (82). De la misma forma, la ciencia de utilizar lombrices de tierra para mejorar la producción de alimentos, desafíos ambientales y otros, está referida como vermitecnología (83). Un aspecto importante de la vermitecnología que ha recibido poca atención es la vermirremediación, un término usado para describir el proceso por el cual las lombrices de tierra limpian el suelo de contaminantes (84).

2.2.5.2 Funciones del vermicompost en el suelo

La agricultura intensiva que está caracterizada por la labranza convencional, fertilización masiva y repetida, alto uso de pesticidas y baja diversidad de plantas, tiene un impacto negativo sobre la biodiversidad del suelo. En este contexto, la agricultura orgánica o ecológica ha emergido como una forma alternativa de cultivo que promueve los procesos naturales del suelo y permite reducir los impactos negativos sobre la biota del suelo (85). Sin embargo, este tipo de agricultura sostenible no alcanza los estándares de productividad de la agricultura intensiva, y se requieren estrategias novedosas eco amigables para incrementar los rendimientos de los cultivos y mantener la fertilidad y biodiversidad del suelo. Aunque la dinámica biológica del suelo es fundamental para el balance y productividad de los ecosistemas naturales, este hecho es aún ignorado en el manejo de ecosistemas, tales como los ecosistemas agrícolas (86).

La biodiversidad es baja en la agricultura intensiva comparada con la agricultura orgánica o ecosistemas naturales (87). Esta reducida biodiversidad implica una capacidad funcional baja para resistir al estrés ambiental de un sistema suelo (86), además, las comunidades con alta biodiversidad son más

productivas y sostenibles que las de baja diversidad. Por lo tanto, la pérdida de algunas especies o grupos funcionales en sistemas agrícolas manejados intensivamente conducen a una mayor inadaptación en el funcionamiento del ecosistema que lo observado en ecosistemas naturales. La productividad de la planta depende de las interrelaciones superficiales de diferentes grupos funcionales y los consorcios microbianos del suelo que proporcionan funciones clave al ecosistema (88). Por lo tanto, la biodiversidad del suelo es un concepto clave en la agricultura sostenible, así como en la biorremediación de suelos contaminados.

La producción y uso del vermicompost puede ser una prometedora estrategia eco amigable para promover la fertilidad del suelo al suministrar nutrientes y comunidades microbiales. Los materiales orgánicos más comunes usados para el vermicompostaje son estiércol de animales, biosólidos generados en plantas de tratamiento de aguas residuales, biosólidos derivados de industrias que procesan materiales orgánicos (olivo y productos lácteos), la fracción orgánica de los residuos sólidos (85).

El vermicompostaje consiste en la descomposición biooxidativa de la materia orgánica muerta en un ambiente mesófilo (< 30 °C) creado por la acción cooperativa de especies de lombrices de tierra detritívoros (*Eisenia foetida*, *E. andrei*), microorganismos y en menor extensión otros miembros de la comunidad de descomponedores de la fauna del suelo. Durante el proceso de vermicompostaje, las propiedades físicas, microbiológicas y bioquímicas de la materia orgánica son mayormente modificadas y estabilizadas (89). Las lombrices de tierra son conductores claves del proceso debido a la contribución significativa que hacen en la fragmentación de los residuos orgánicos y dispersión de los microorganismos, estas lombrices de tierra juegan un rol significativo en la actividad microbial al triturar la materia orgánica y mejorar el área superficial disponible para el ataque microbial (90).

A través de estas y otras actividades específicas, las lombrices de tierra mejoran la eficiencia de las comunidades microbiales y sus tasas de conversión, incrementando así substancialmente las tasas de descomposición del sustrato.

Además de los microorganismos, las lombrices de tierra también afectan otras biotas del suelo, directamente, a través de la ingestión de protozoos y microfauna presente en las redes alimentarias detriticas o indirectamente, modificando la disponibilidad de recursos de estos organismos (89).

El enriquecimiento nutricional, microbial y enzimático del vermicompost es alcanzado por un proceso a largo plazo que incluye dos estados sucesionales: un estado activo y un estado de maduración (90). El estado activo está caracterizado por la actividad de la alimentación de las lombrices de tierra que contribuyen a modificar las propiedades físicas y químicas de la materia prima, tal como su composición microbial (90).

Durante este estado, las lombrices están en continuo movimiento y excavando en el sustrato, por lo tanto, contribuyen a su oxigenación y homogenización, lo que acelera su descomposición. Por otro lado, la actividad alimenticia de las lombrices también altera las propiedades biológicas y fisicoquímicas del sustrato conforme pasa por sus vísceras. Durante este tránsito gastrointestinal de materia orgánica, muchas enzimas digestivas producidas por las mismas lombrices y microorganismos simbiotes impulsan la descomposición de la materia orgánica, dichas enzimas extracelulares rompen una extensa variedad de moléculas orgánicas, incluye la celulosa y compuestos fenólicos. Debido al alto contenido de carbono orgánico, estas enzimas digestivas se hacen estables al enlazarse a los complejos orgánicos (85).

El estado de maduración empieza una vez que las lombrices salen del sustrato procesado y las nuevas comunidades microbianas se hacen cargo de la descomposición adicional de moléculas más recalcitrantes (91). Durante la etapa de maduración, los procesos asociados y más cercanos a la presencia del material no procesado por el tránsito a través del sistema digestivo de la lombriz y con modificación física del material digestado, contribuyen a la posterior descomposición del sustrato; por lo tanto, el vermicompost alcanza un estado óptimo en términos de sus propiedades biológicas, marcadas por su capacidad para promover el crecimiento de la planta y reducir sus enfermedades. La duración de ambos estados de vermicompost es altamente variable; la etapa

activa depende de la especie de lombriz, su población dinámica y las condiciones ambientales, la etapa de maduración depende de la eficiencia de la etapa activa (89).

2.2.5.3 Efecto del vermicompost en suelos contaminados

Globalmente, el suelo está sujeto a la contaminación antropogénica, industrial, agrícola y otros. Estos contaminantes incluyen compuestos o elementos químicos orgánicos e inorgánicos, especialmente metales (83). Debido a los altos costos y la desestabilización ecológica y ambiental asociada con los métodos de remediación fisicoquímica tradicional, la atención se ha cambiado por alternativas biológicas *in situ*, algunas investigaciones y estudios de revisión sobre vermiremediación están disponibles, pero la mayoría se enfoca en contaminantes orgánicos, poniendo poca atención a los mecanismos de acción de lombrices y vermiremediación de contaminantes inorgánicos, especialmente metales (92).

Los metales son no biodegradables, por lo tanto, el mecanismo principal para remediar los metales del suelo conocido por las lombrices de tierra es a través de la absorción termal e ingesta intestinal para luego acumularlo en sus cuerpos. Muchos metales están asociados con la toxicidad y tanto plantas como animales acumuladores deben poseer mecanismos y dispositivos apropiados para hacer frente a las altas cargas del metal (92).

Las lombrices de tierra pueden absorber metales y excretar algunos de estos a través de sus glándulas calcíferas, los metales no excretados se acumulan en su cuerpo. La forma básica de cómo las lombrices acumulan y hacen frente a una gran carga de metal es a través de la inducción de metalotioneínas para luego almacenarlos junto a las metalotioneínas en estructuras como los nódulos de desecho (cuerpos marrones formados dentro del cuerpo cavidad) y cloragógeno (células grasas de la pared intestinal) (93).

Las funciones de las metalotioneínas han sido descritas como homeostasis y detoxificación de metales (94). El principal sitio de compartimentación para metales secuestrados, incluidos Cd, Pb, Zn y Ca, es la matriz cloragosómica que es una serie de vesículas intracelulares ubicadas alrededor del tubo digestivo,

especialmente la parte posterior. Tal compartimentación parece impedir la diseminación de grandes concentraciones de estos metales en otros tejidos de lombrices, por lo tanto, puede representar una desintoxicación estratégica basada en la acumulación e inmovilización (95).

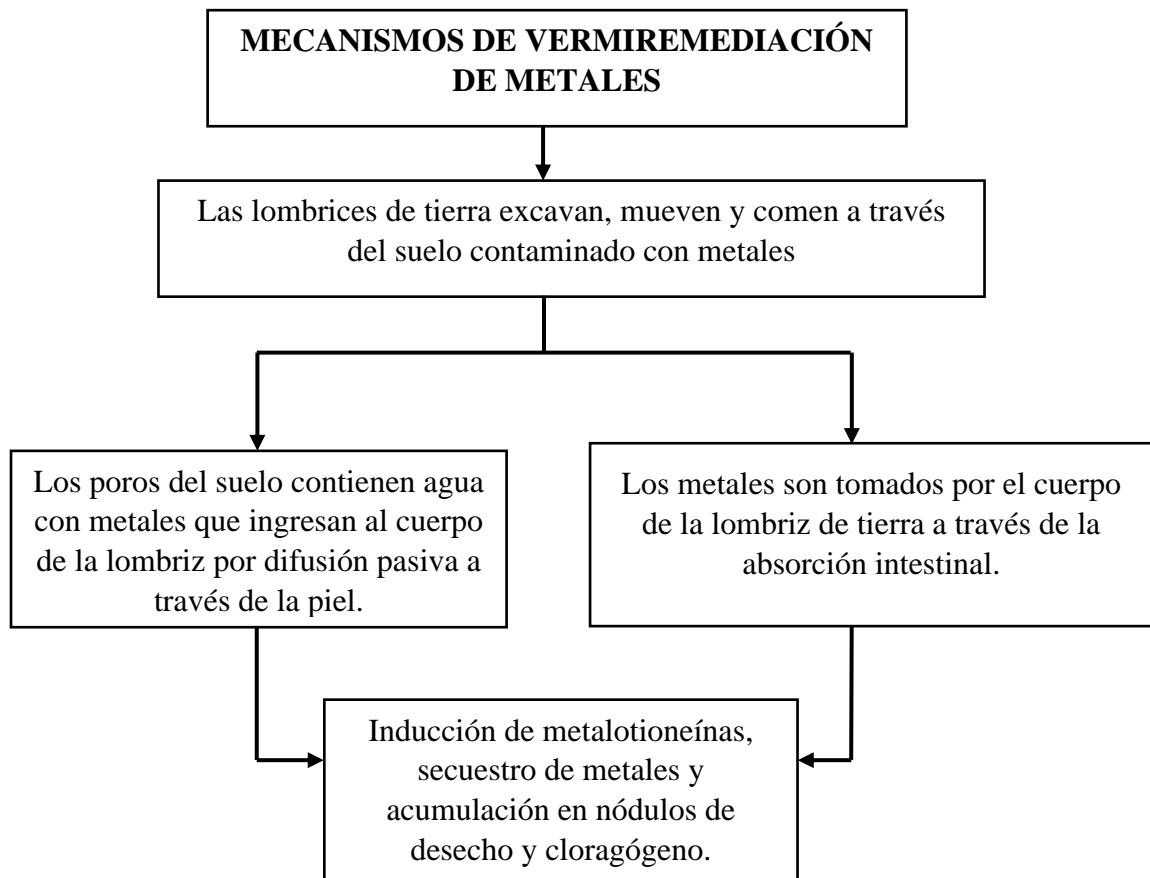


Figura 3. Esquema de los mecanismos de las lombrices de tierra en remediación de metales (92).

Fuente: (92)

Se ha enfatizado que uno de los principales impactos del proceso de vermicompostaje sobre la especiación química de metales es la reducida disponibilidad de los nutrientes, probablemente por la formación de complejos *metal-humus*; sin embargo, emerge la pregunta: *¿el vermicompostaje tiene el mismo efecto sobre los metales presentes en un suelo cuando son usados como enmienda?*, aunque sus características químicas, físicas y biológicas aportan un

excelente sustrato adsorbente de metales, reduce su biodisponibilidad y toxicidad en el suelo, del cual se han reportado pocos datos al respecto (85). El vermicompost puede retener metales tóxicos eficientemente desde la solución suelo, por ejemplo, en ensayos de adsorción y desorción cinética con diferentes soluciones de Pb^{+2} y Cd^{+2} para comparar la capacidad de enlace de metal de estiércol de vacuno y el vermicompost derivado de este material, se observó que el vermicompost retuvo mejor ambos metales. El uso de la espectroscopía infrarroja transformada de Fourier, reveló que el vermicompost derivado de estiércol vacuno mostró grupos funcionales tales como: -OH (alcohol alifático), -COOH (compuestos aromáticos) y enlaces como C=O y C-O (carbonatos y alcohol alifático) y P-O (fosfatos), esto explica la alta capacidad funcional del vermicompost para enlazar estos dos metales pesados (96).

2.2.5.4 Ventajas de la vermirremediación de suelos

La vermirremediación presenta una serie de ventajas aparte de limpiar el suelo de contaminantes, en primer lugar, a diferencia de las técnicas de remediación fisicoquímica que usualmente involucran la excavación del suelo y su tratamiento con químicos, la vermirremediación no es eco-destructiva, sino ambientalmente amigable y potencialmente sostenible; en segundo lugar, el lugar donde se emplean lombrices de tierra para remediar suelos contaminados, incrementan sus actividades de microorganismos degradadores y enzimas, lo que conduce a un mejoramiento de la estructura del suelo y su disponibilidad de nutrientes para favorecer el desarrollo de la planta y producción del cultivo; en tercer lugar, los procesos de vermirremediación tienen la ventaja adicional de incrementar la biomasa de las lombrices de tierra que puede ser cosechada y utilizada como alimento del ganado y otros. En cuarto lugar, la vermirremediación es una técnica de remediación potencialmente rentable, cuando es comparada a algunos métodos de remediación fisicoquímica (92).

En las últimas dos décadas, el vermicompostaje ha emergido como una tecnología eco-amigable para mejorar las propiedades fisicoquímicas y biológicas de suelos degradados, así como para incrementar el rendimiento del

cultivo (89). El producto final del vermicompostaje, el vermicompost, es un material finamente dividido, poroso con varias propiedades benéficas relacionadas a la función del suelo como: alta capacidad de retención de agua, alto contenido de sustancias húmicas y nutrientes, comunidades de hongos y bacterias bien establecidas y grandes cargas de enzimas extracelulares. Pese a que tiene varias características adecuadas para la mitigar la contaminación del suelo, ha sido escasamente investigado con relación a la biorremediación (85).

2.2.6 El cultivo de alfalfa

La alfalfa es parte del grupo de las leguminosas (Leguminosae), una de las familias más grandes de angiospermas, con una aproximación de 700 variedades y 18000 tipo repartidas por todo el mundo, con mayor constancia en las zonas subtropicales y tropicales. Todas estas plantas se caracterizan por ser fijadoras de nitrógeno a efectos de la asociación con la bacterias del género *Ensifer* (anteriormente *Rhizobium*) que se localizan formando bultos en sus raíces (90). Esta especie cultivada, se denomina *Medicago sativa* L., constituida por una mezcla de híbridos. Los híbridos resultantes fueron completamente viables en generaciones sucesivas y tenían una alta regularidad meiótica dando lugar a la alfalfa cultivada (97).

Medicago sativa L., se caracteriza por ser una hierba perenne, frecuentemente erecta o ascendente, rara vez postrada, muy ramificada con tallos de 30 a 90 cm, herbáceos y foliosos; sus hojas con tres foliolos, el apical pedunculado, con dimensiones variables de 8 - 30 mm x 1,5-10 mm de forma obovada a linear - oblonga, cerrados en su último tercio, de obtusos a agudos o apiculados; envés con pelos largos no grandulíferos y haz glabra; estípulas ovado-lanceoladas, sub enteras o visiblemente dentadas en la base; racimos densos de 10 a 30 flores; pedúnculo claramente más largo que el peciolo de la hoja contigua; pedicelo de 1,5 a 3,5 mm (90).

La planta está constituida por una masa vegetal que se compone de hojas, tallos, corona (que une la raíz con la parte aérea) y raíz. En la corona y en la raíz se almacenan las reservas en modo de carbohidratos y proteínas que garantiza la respuesta de la planta a la cortadura y a la perseverancia del cultivo (97). Así como la alfalfa en sus diferentes variedades, es una de las leguminosas más cultivadas y primordial para la alimentación del ganado y la crianza de cuyes y conejos, tanto

por la abundancia de forraje cosechado de la superficie cultivada, como por su utilidad nutritiva. La planta muestra elevados niveles de proteína y minerales, al punto que la gran palatabilidad y alta digestibilidad en muchas especies animales (96).

2.3 Definición de términos básicos

- **Bioacumulación:** algunas sustancias químicas se acumulan en los tejidos de los organismos directamente a través de la cadena alimentaria y alcanzan concentraciones más altas en el medio ambiente al que están expuestas. Generalmente se refiere a la concentración de metales, pero el término también se aplica a sustancias orgánicas persistentes como los compuestos organoclorados (98).
- **Biodegradable:** la capacidad de la materia para asimilarse en el ecosistema en condiciones naturales para su descomposición por microorganismos en un periodo relativamente pequeño, aplicable tanto a materiales orgánicos como inorgánicos (99).
- **Estándar de calidad ambiental:** regulación de la concentración o categoría de elementos, sustancias o parámetros físicos, químicos y biológicos presentes en el aire, el agua o el suelo como receptores y que no supongan un riesgo significativo para la salud humana y ambiental (98).
- **Fuentes de contaminación:** sitio donde los contaminantes se liberan al medio ambiente, estos lugares de contaminación logran ser puntuales o precisas, dispersas en el lugar y móviles (98).
- **Recurso suelo:** es un conjunto de sustancias sólidas, líquidas y gaseosas que forman la superficie de la corteza terrestre o son producidas por el ser humano cuyos componentes son de sustancias orgánicas e inorgánicas (minerales), hayan sido apartados o mezclados cuyo límite superior es el aire o la superficie del agua (98).
- **Compost:** fertilizante orgánico valioso, producido por la descomposición de residuos con un contenido equilibrado de nutrientes, microorganismos y minerales (100).
- **Contaminación:** los cambios indeseables en las propiedades biológicas, físicas y químicas que pueden afectar negativamente a varios componentes del medio ambiente (101).

- **Contaminante:** componentes químicos, biológicos o radiactivos en cualquier estados físicos y apariencia que al adherirse o encontrarse en concentraciones superiores a su concentración normal en la atmósfera, el agua, el suelo, la fauna o cualquiera de los elementos de la naturaleza, altera y modifica su composición y estado natural (101).
- **Degradación de suelos:** disminución o pérdida de la producción y complicación biológicas, físicas, químicas y agroecológica de los suelos debido a la evolución natural o de la actividad humana (102).
- **Lombricultura:** cultivación y utilización de las lombrices de tierra en situaciones controlables, consiste en consumir y producir la materia orgánica o residuos biodegradables (103).
- **Materia orgánica:** un grupo de materiales de origen vegetal y animal que son completamente o parcialmente descompuestos por la actividad del microorganismos presentes en el suelo (100).
- **Metales pesados:** elementos potencialmente tóxicos con pesos atómicos elevados utilizados en procesos industriales, tales como el cadmio, cobre, plomo, mercurio y níquel, que en reducidas concentraciones llegan ser dañino para las plantas y animales (98).
- **Microorganismos:** criatura microscópicas como los virus, las bacterias, los hongos y protozoos que son dañinos o beneficiosos para los humanos según corresponda (98).
- **Nutriente:** elemento químico inorgánico fundamentales para el desarrollo y producción de vegetales(100).
- **Suelo agrícola:** suelos utilizados para la producción de cultivos, forrajes y pastos también se consideran suelos que contribuyen al crecimiento de los cultivos y al desarrollo de la ganadería. Esto incluye a los suelos que se clasifican como tierras agrícolas que proporcionan hábitat para especies permanentes y transitorias, así como para flora y fauna autóctonas, como es el caso de las reservas naturales protegidas (104).

CAPÍTULO III METODOLOGÍA

3.1 Método y alcance de la investigación

3.1.1 Método de investigación

3.1.1.1 General

El método general de la investigación fue hipotético - deductivo, basado en la hipótesis que el vermicompost incrementa el crecimiento de alfalfa y la concentración de cadmio en alfalfa *Medicago sativa* L. en un suelo contaminado. El método de investigación hipotético-deductivo, es un procedimiento que parte de suposiciones debidamente sustentadas en calidad de hipótesis y buscando refutarlas, deduciendo que las conclusiones deben confrontarse con los hechos (105).

Este método es ampliamente usado en la vida cotidiana como en la investigación científica y consiste en generar hipótesis sobre las posibles soluciones del planteamiento del problema y en su respectiva comprobación a partir de los datos, si coinciden con ellos. La generación de la hipótesis plantea dos escenarios: el primero, cuando la investigación está próxima al nivel observacional y se puede decir que es el nivel más simple y se formulan hipótesis del tipo empírico llevando a los experimentos; el segundo, cuando el sistema es teórico y se generan hipótesis de tipo abstracto (106).

En esta investigación se presentan los dos escenarios, considerando que una investigación no siempre tiene un modelo único, sino que debe buscar el mejor escenario para su nivel explicativo que pretenda conducirse. En este ámbito, el presente trabajo parte del modelo observacional del efecto de la aplicación de vermicompost en un suelo contaminado donde crece la alfalfa, el cual fue llevado a un experimento, para luego generar conclusiones profundas y teóricas basados en los resultados experimentales, generando nuevas hipótesis.

3.1.1.2 Específico

Se utilizó el método de análisis de tipo compuesta para la muestra del suelo de una parcela agrícola del distrito de Huaripampa que fue analizada en sus propiedades físicoquímicas: pH, carbonato de calcio, conductividad eléctrica, materia orgánica, fósforo, potasio textura, capacidad de intercambio catiónico, cationes cambiabiles, saturación de bases y acidez cambiabiles. Instalado el experimento con el suelo muestreado y después de sembrar el cultivo de alfalfa, se mandó analizar el contenido de cadmio en raíz, parte aérea y suelo. Los métodos de análisis utilizados fueron el estándar para cada determinación, estos datos luego fueron interpretados.

3.1.2 Alcance de la investigación

3.1.2.1 Tipo de investigación

La presente investigación es de tipo aplicada, por su naturaleza notoriamente práctica aplica las bases teóricas del comportamiento del vermicompost en el suelo contaminado de con cadmio, mediante su aplicación en diferentes dosis y evaluación del crecimiento de la alfalfa, la absorción de cadmio por parte de esta leguminosa y el contenido final de cadmio en el suelo.

Esta investigación es de tipo cuantitativo, pues se centra en aspectos observables y cuantificables como es el crecimiento de alfalfa, el contenido de cadmio en el suelo y en la planta.

3.1.2.2 Nivel de investigación

La investigación es explicativa, pues el interés está en revelar de qué manera las dosis de vermicompost (variable independiente) influyen en el crecimiento de la alfalfa, su contenido de cadmio y suelo (variables dependientes).

3.2 Diseño de la investigación

Se utilizó el diseño DCA (Experimental Completamente Aleatorizado) con seis (06) tratamientos y tres (03) repeticiones haciendo un total de 18 unidades experimentales.

Tabla 3. *Tratamientos en estudio.*

Nº	Tratamientos	Clave
1	3 kg de suelo + 0 % vermicompost + alfalfa	T1
2	3 kg de suelo + 2 % vermicompost + alfalfa	T2
3	3 kg de suelo + 4 % vermicompost + alfalfa	T3
4	3 kg de suelo + 6 % vermicompost + alfalfa	T4
5	3 kg de suelo + 8 % vermicompost + alfalfa	T5
6	3 kg de suelo + 10 % vermicompost + alfalfa	T6

Fuente: *Elaboración propia*

El modelo aditivo lineal del diseño experimental es el siguiente (107):

$$\gamma_{ik} = \mu + \tau_i + \varepsilon_{ij}$$

Donde:

γ_{ik} = cualquier observación del experimento

μ = media poblacional

τ_i = efecto del i-ésimo tratamiento

ε_{ij} = error experimental

Tabla 4. *Caracterización fisicoquímica del suelo del experimento*

PARÁMETRO	CONTENIDO	CALIFICACIÓN
Ph	7.59	Ligeramente alcalino
Conductividad eléctrica (dS/m)	2.78	Muy ligeramente salino
CaCO ₃ (%)	14.41	alto
Materia Orgánica (%)	2.42	Medio
Arena (%)	60	-
Limo (%)	31	-
Arcilla (%)	09	-
Clase textural	Franco Arenoso	Moderadamente gruesa
Fósforo (ppm)	21.2	Alto
Potasio (ppm)	95	Bajo
Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC) (meq/100g)	7.52	Moderadamente baja
Calcio cambiabile (meq/100q)	5.67	-
Magnesio cambiabile (meq/100g)	1.49	-
Potasio cambiabile (meq/100g)	0.20	-
Sodio cambiabile (meq/100g)	0.16	-
Hidrógeno + aluminio (meq/100 g)	0.00	-
Saturación de bases (%)	100.00	Alto
Acidez cambiabile (%)	0.00	Bajo
Cadmio total (ppm)	16.85	Contaminado

Fuente: *Laboratorio de Análisis de Suelos, Plantas, Aguas y Fertilizantes de la Universidad Nacional Agraria La Molina, Lima (Ver Anexo 1)*

El suelo de Huaripampa tiene un pH mayor a 7 que favorece con la disponibilidad de nutrientes para la planta de alfalfa, no presenta exceso de sales debido a que la lluvia es suficiente para lavar su probable acumulación. El alto contenido de carbonato de calcio es una evidencia de la presencia del material parental calcáreo, el contenido de materia orgánica es medio, lo cual limita la calidad del suelo. La textura tiene predominancia de arena, pero que no limita el manejo del suelo. La CIC del suelo es moderadamente baja debido al bajo contenido de arcilla. El contenido de K es limitante para su aprovechamiento por las plantas. El P no limita el crecimiento de la planta por su alto contenido en el suelo. Predomina el calcio entre los cationes cambiabiles, estando ausente el hidrógeno y aluminio, debido al pH mayor de 7 y tiene una alta saturación de bases. El contenido de cadmio supera el ECA de suelo del Perú (1.4 ppm) en un factor de contaminación de 12.04 [$FC_{Cd} = (16.85/1.4) = 12.04$] (Ver Tabla 4).

Tabla 5. *Análisis de cadmio en el vermicompost.*

Muestra	Parámetro	Resultado (ppm)	Calificación
Vermicompost	Cadmio total	1.91	Normal

Fuente: *Laboratorio de Análisis de Suelos, Plantas, Aguas y Fertilizantes de la Universidad Nacional Agraria La Molina, Lima (Ver Anexo 2).*

El contenido de Cd en el vermicompost se considera normal, pero aporta Cd al suelo del experimento (Ver Tabla 5).

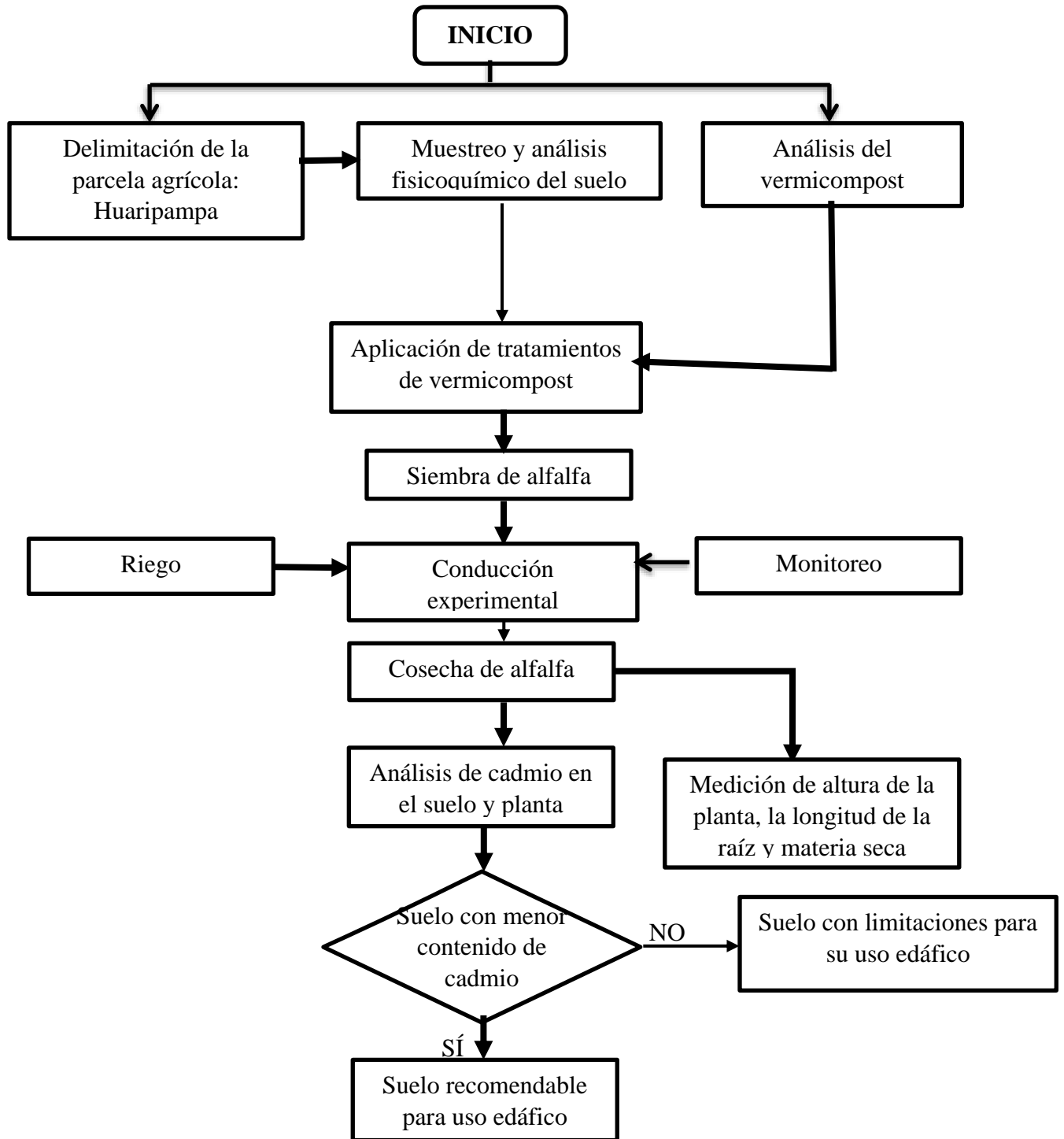


Figura 4. Diagrama de flujo del proceso experimental

Fuente: Elaboración propia

3.3 Población y muestra

3.3.1 Población

La población estuvo constituida por los suelos agrícolas contaminados de cadmio, del distrito de Huaripampa, provincia de Jauja.

3.3.2 Muestra

La muestra estuvo constituida por la masa de suelo agrícola de una parcela representativa del distrito de Huaripampa contaminado con cadmio, del horizonte superficial hasta una profundidad promedio de 20 cm en una cantidad aproximada de 70 kg, obtenida a partir de 15 muestras simples para constituir una muestra compuesta en un área aproximada de 6000 m². La técnica de muestreo se basó en la norma peruana de muestreo de suelos contaminados (108)

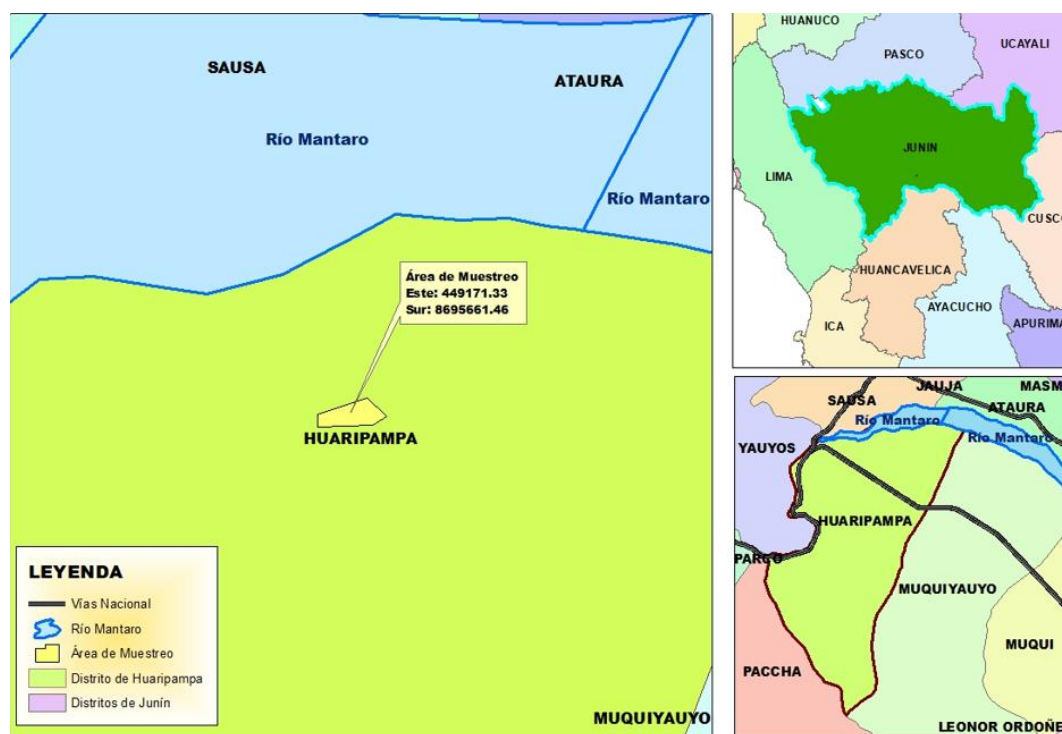


Figura 5. Mapa de ubicación del suelo del experimento.

Fuente: Elaboración propia

3.4 Técnicas e instrumentos de recolección de datos

3.4.1 Evaluaciones realizadas

3.4.1.1 Altura de planta

A los 102 días posteriormente de la siembra se evaluó la altura de las plantas con una regla graduada desde la base del cuello de cada planta en cada maceta hasta la parte apical, obteniendo un total de 10 plantas por maceta.

3.4.1.2 Longitud de raíz

La longitud de raíz se evaluó al final del experimento, midiendo después de haber extraído la planta desde el cuello hasta el ápice de la raíz, obteniendo un promedio de 10 plantas por maceta.

3.4.1.3 Materia seca aérea

Al finalizar el experimento (102 días después de la siembra), se cortó la parte aérea de cada planta en cada maceta desde el ras del suelo y se colocó en una bolsa de papel Kraft, debidamente identificada para ser llevada al laboratorio y colocar en la estufa a una temperatura de 60 °C por 24 horas para finalmente pesar cada unidad experimental y determinar la materia seca aérea.

3.4.1.4 Materia seca radicular

Las raíces de las plantas de cada maceta (10 plantas), se lavaron cuidadosamente y se orearon para después ser colocadas en una bolsa de papel kraft debidamente etiquetada, para luego ser llevada al laboratorio y obtener la materia seca de cada unidad experimental.

3.4.1.5 Análisis de cadmio total en la parte aérea

Las muestras secas de la parte aérea de cada maceta debidamente identificadas fueron enviadas al laboratorio de Análisis de Suelos, Plantas, Aguas y Fertilizantes de la Facultad de Agronomía de la UNALM para el análisis total de Cd.

3.4.1.6 Análisis de cadmio total en la parte radicular

Las muestras secas de la parte radicular de cada maceta debidamente identificadas fueron enviadas al laboratorio de Análisis de Suelos, Plantas, Aguas y Fertilizantes de la Facultad de Agronomía de la UNALM, para el análisis de Cd total.

3.4.1.7 Factor de traslocación (FT)

Para calcular el factor de traslocación de Cd, se relacionó el contenido de este metal pesado en la parte aérea y raíz utilizando la siguiente expresión:

$$FT = \frac{\text{Concentración de Cd en la parte aérea de Medicago sativa L.}}{\text{Concentración de Cd en la raíz de Medicago sativa L.}}$$

3.4.1.8 Factor de bioconcentración (FBC)

Para calcular el FBC de Cd, se relacionó el contenido de metal en la parte aérea, radicular y total, respecto al contenido del metal en el suelo utilizando las siguientes expresiones:

$$FBC \text{ parte aérea} = \frac{\text{Concentración de Cd en la parte aérea de Medicago sativa L.}}{\text{Concentración de Cd en el suelo}}$$

$$FBC \text{ parte radicular} = \frac{\text{Concentración de Cd en la parte radicular de Medicago sativa L.}}{\text{Concentración de Cd en el suelo}}$$

$$FBC \text{ total} = \frac{\text{Concentración de Cd en la parte aérea y radicular de Medicago sativa L.}}{\text{Concentración de Cd en el suelo}}$$

3.4.1.9 Contenido final de Cd en el suelo

Al finalizar el experimento y después de haber extraído las plantas de alfalfa, se mezcló el suelo uniformemente para luego extraer una muestra de 500 g de cada maceta utilizando el método del cuarteo; se colocó en una bolsa de polietileno transparente debidamente identificada y se envió al Laboratorio de Análisis de Suelos, Plantas, Aguas y Fertilizantes de la Facultad de Agronomía de la UNALM, para el análisis de Cd total.

3.4.2 Procesamiento de datos

Al finalizar la obtención de datos lo cuales fueron sistematizados, se demuestra la distribución normal de todas las variables utilizando la prueba Shapiro-Wilks, si la variable evaluada tenía distribución normal se realizó el análisis de variancia y la prueba de significación de Duncan; si la variable evaluada no tenía distribución normal se realizó la prueba paramétrica de Kruskal-Wallis. Se uso el software INFOSTAT (109) y la hoja de cálculo de EXCEL

Tabla 6. Esquema del análisis de variancia del Diseño Completamente al Azar (DCA)

FUENTES DE VARIACIÓN	GRADOS DE LIBERTAD (GL)	SUMA DE CUADRADOS (SC)	CUADRADO MEDIO (CM)	Fc
Tratamientos (T)	$(t-1) = (6-1) = 5$	$\frac{Y_1^2 + \dots + Y_6^2}{r} - \frac{Y_{..}^2}{rt}$	SC_T/GL_T	CM_T/CM_{EE}
Error Experimental (EE)	$t(r-1) = 6(3-1) = 12$	$SC_{TT} - SC_T$	SC_{EE}/GL_{EE}	
Total (TT)	$rt-1 = (3)(6) - 1 = 17$	$\sum_{ij} y_{ij}^2 - \frac{Y_{..}^2}{rt}$	SC_{TT}/GL_{TT}	

Fuente: *Elaboración propia*

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Resultados del tratamiento y análisis de la información

Los resultados de los análisis de la planta y suelo fueron procesados y se presentan a continuación.

4.1.1 Efecto de la dosis de vermicompost en el crecimiento del cultivo de alfalfa

4.1.1.1 Altura de planta

Tabla 7. *Resultados de la altura de planta de alfalfa (cm) en un suelo de Huaripampa contaminado con Cd con diferentes dosis de vermicompost - 2022.*

Tratamiento	Dosis de vermicompost (%)	Repeticiones			Promedio
		I	II	III	
1	0	17.86	18.3	14.77	16.98
2	2	21.85	20.76	18.87	20.49
3	4	18.35	15.57	21.5	18.47
4	6	17.86	20.37	21.6	19.94
5	8	17.94	13.3	18.6	16.61
6	10	17.54	17.5	17.2	17.41

Fuente: *Elaboración propia*

La altura de planta varió en cada tratamiento, siendo el promedio más alto logrado por el tratamiento con 2 % de vermicompost (T2), evidenciando el efecto de la enmienda orgánica en el crecimiento de la planta en un suelo contaminado con Cd. Los datos se pueden observar en la Tabla 7.

4.1.1.2 Longitud de raíz

Tabla 8. *Resultados de la longitud de raíz de alfalfa (cm) en un suelo de Huaripampa contaminado con Cd con diferentes dosis de vermicompost - 2022.*

Tratamiento	Dosis de vermicompost (%)	Repeticiones			Promedio
		I	II	III	
1	0	12.72	11.01	12.44	12.06
2	2	15.38	14.59	14.97	14.98
3	4	13.43	11.16	15.31	13.30
4	6	12.96	11.45	11.73	12.05
5	8	15.15	14.97	15.69	15.27
6	10	13.2	13.25	12.45	12.97

Fuente: *Elaboración propia*

La longitud de la raíz tuvo el más alto valor en el tratamiento 5 (8 % de vermicompost), posiblemente debido al mejor acondicionamiento del suelo contaminado originado por la materia orgánica aplicada. Los datos se pueden observar en la Tabla 8.

4.1.1.3 Materia seca aérea

Tabla 9. Resultados de la materia seca de la parte aérea de alfalfa (g) en un suelo de Huaripampa contaminado con Cd con diferentes dosis de vermicompost - 2022.

Tratamiento	Dosis de vermicompost (%)	Repeticiones			Promedio
		I	II	III	
1	0	4.89	4.66	4.43	4.66
2	2	5.2	5.07	4.15	4.81
3	4	3.94	3.84	4.82	4.20
4	6	4.28	4.01	4.7	4.33
5	8	4.24	4.19	4.26	4.23
6	10	4.68	4.58	4.37	4.54

Fuente: *Elaboración propia*

El peso de materia seca formada tuvo en el tratamiento 2 (2 % de vermicompost), de alto promedio por consecuencia de la aplicación de materia orgánica al suelo contaminado. Los datos se pueden observar en la Tabla 9.

4.1.1.4 Materia seca radicular

Tabla 10. Resultados de la materia seca de la parte radicular de alfalfa (g) en un suelo de Huaripampa contaminado con Cd con diferentes dosis de vermicompost. 2022.

Tratamiento	Dosis de vermicompost (%)	Repeticiones			Promedio
		I	II	III	
1	0	2.84	2.54	2.59	2.66
2	2	2.88	2.64	2.65	2.72
3	4	2.41	2.47	2.66	2.51
4	6	2.58	2.29	2.39	2.42
5	8	2.34	2.55	2.47	2.45
6	10	2.44	2.7	2.6	2.58

Fuente: *Elaboración propia*

Respecto a la Tabla 10, el peso de materia seca de la parte radicular tuvo su mayor promedio en el tratamiento 2 (2 % de vermicompost), atribuible al mejoramiento de las propiedades del suelo con esa dosis de materia orgánica.

4.1.2 Contenido de cadmio (Cd) del cultivo de alfalfa

4.1.2.1 Contenido de Cd en la parte aérea

Tabla 11. Resultados del contenido de cadmio en la parte aérea de alfalfa (mg/kg) en un suelo de Huaripampa contaminado con Cd, con diferentes dosis de vermicompost - 2022.

Tratamiento	Dosis de vermicompost (%)	Repeticiones			Promedio
		I	II	III	
1	0	0.43	0.46	0.67	0.52
2	2	0.35	0.7	0.63	0.56
3	4	0.65	0.56	0.7	0.64
4	6	0.58	0.56	0.63	0.59
5	8	0.74	0.84	0.38	0.65
6	10	0.53	0.56	0.25	0.45

Fuente: *Elaboración propia*

El contenido de cadmio se incrementó en el cultivo de alfalfa debido a la aplicación de dosis crecientes de vermicompost, siendo el tratamiento 5 (8 % de vermicompost) el que tuvo mayor valor, atribuible al incremento de la disponibilidad de este metal pesado por efecto de la materia orgánica. Los datos se presentan en la Tabla 11.

4.1.2.2 Contenido de Cd en la parte radicular

Tabla 12. Resultados del contenido de cadmio en la parte radicular de la alfalfa (mg/kg) en un suelo de Huaripampa contaminado con Cd con diferentes dosis de vermicompost - 2022.

Tratamiento	Dosis de vermicompost (%)	Repeticiones			Promedio
		I	II	III	
1	0	3.03	2.76	3.50	3.10
2	2	1.77	1.90	1.56	1.74
3	4	2.10	2.11	2.34	2.18
4	6	2.84	2.44	3.05	2.78
5	8	2.26	2.14	2.38	2.26
6	10	3.53	5.32	6.10	4.98

Fuente: *Elaboración propia*

El contenido de Cd en la parte radicular tuvo en el tratamiento 6 (10 % de vermicompost), su mayor valor, atribuible a la mejora de propiedades del suelo por parte de la materia orgánica que incrementó la disponibilidad de Cd y su absorción por la raíz de alfalfa. Los datos se presentan en la Tabla 12.

4.1.3 Factores de bioconcentración (FB) y de traslocación (FT) del cultivo de alfalfa

4.1.3.1 Factor de bioconcentración aérea (FBA)

Tabla 13. Resultados del factor de bioconcentración aéreo (FBA) en alfalfa en un suelo de Huaripampa contaminado con Cd con diferentes dosis de vermicompost - 2022.

Tratamiento	Dosis de vermicompost (%)	Repeticiones			Promedio
		I	II	III	
1	0	0.02	0.03	0.04	0.03
2	2	0.02	0.04	0.04	0.03
3	4	0.04	0.03	0.04	0.04
4	6	0.03	0.03	0.04	0.03
5	8	0.04	0.05	0.02	0.04
6	10	0.03	0.03	0.02	0.03

Fuente: *Elaboración propia*

El factor de bioconcentración aérea que relaciona el Cd presente en la parte aérea de alfalfa y el contenido en el suelo, tuvo en el tratamiento 3 (4 % de vermicompost) y tratamiento 5 (8 % de cadmio), sus mayores valores, comparados con los demás tratamientos. Los valores menores que 1 indican una baja fitoextracción de Cd por este cultivo. Los datos se presentan en la Tabla 13.

4.1.3.2 Factor de bioconcentración radicular (FBR)

Tabla 14. Resultados del factor de bioconcentración radicular (FBR) en alfalfa en un suelo de Huaripampa contaminado con Cd con diferentes dosis de vermicompost - 2022.

Tratamiento	Dosis de vermicompost (%)	Repeticiones			Promedio
		I	II	III	
1	0	0.16	0.15	0.19	0.17
2	2	0.10	0.11	0.09	0.10
3	4	0.12	0.12	0.13	0.12
4	6	0.17	0.13	0.17	0.16
5	8	0.12	0.13	0.14	0.13
6	10	0.22	0.32	0.36	0.30

Fuente: *Elaboración propia*

El factor de bioconcentración radicular que relaciona el Cd presente en la parte radicular de alfalfa y el contenido en el suelo tuvo en el tratamiento 6 (10 % de vermicompost), su mayor valor, comparado a los demás tratamientos. Los valores menores que 1 indican una baja fitoextracción de Cd por este cultivo. Los datos se presentan en la Tabla 14.

4.1.3.3 Factor de bioconcentración total (FBT)

Tabla 15. Resultados del factor de bioconcentración total (FBT) en alfalfa en un suelo de Huaripampa contaminado con Cd con diferentes dosis de vermicompost - 2022.

Tratamiento	Dosis de vermicompost (%)	Repeticiones			Promedio
		I	II	III	
1	0	0.18	0.17	0.22	0.19
2	2	0.11	0.14	0.12	0.12
3	4	0.16	0.15	0.17	0.16
4	6	0.20	0.16	0.21	0.19
5	8	0.17	0.17	0.16	0.17
6	10	0.25	0.36	0.37	0.33

Fuente: *Elaboración propia*

El factor de bioconcentración total que relaciona el Cd presente en la parte aérea más el Cd presente en la parte radicular de alfalfa y el contenido en el suelo, tuvo en el tratamiento 6 (10 % de vermicompost), su mayor valor, comparado con los demás tratamientos. Los valores menores que 1 indican una baja fitoextracción de Cd por este cultivo. Los datos se presentan en la Tabla 15.

4.1.3.4 Factor de traslocación

Tabla 16. Resultados del factor de traslocación (FT) en alfalfa en un suelo de Huaripampa contaminado con Cd con diferentes dosis de vermicompost - 2022.

Tratamiento	Dosis de vermicompost (%)	Repeticiones			Promedio
		I	II	III	
1	0	0.14	0.17	0.19	0.17
2	2	0.20	0.37	0.41	0.33
3	4	0.31	0.27	0.3	0.29
4	6	0.20	0.23	0.21	0.21
5	8	0.33	0.40	0.16	0.30
6	10	0.15	0.10	0.04	0.10

Fuente: *Elaboración propia*

El factor de traslocación tuvo en el tratamiento 2 (2 % de vermicompost) su mayor valor y en el tratamiento 6 (10 % de vermicompost) su valor más bajo. Todos los datos son inferiores a la unidad lo que indica que el Cd absorbido por alfalfa no se traslocó a la parte aérea sino se acumuló en la parte radicular. Los datos se presentan en la Tabla 16.

4.1.4 Contenido de cadmio total en el suelo

Tabla 17. Resultados del contenido final de cadmio (ppm) en el suelo de Huaripampa contaminado con Cd, cultivado con alfalfa con diferentes dosis de vermicompost - 2022.

Tratamiento	Dosis de vermicompost (%)	Repeticiones			Promedio
		I	II	III	
1	0	19.10	18.44	18.76	18.77
2	2	18.44	18.08	17.93	18.15
3	4	17.45	17.44	17.6	17.50
4	6	16.94	19.1	17.93	17.99
5	8	18.09	17.12	16.77	17.33
6	10	16.23	16.55	17.11	16.63

Fuente: *Elaboración propia*

El contenido de Cd total en el suelo al final del experimento fue mayor en el tratamiento 1 (control, 0 % de vermicompost) y menor en los demás, por lo que se atribuye principalmente al efecto fitorremediador del cultivo de alfalfa. El contenido inicial de Cd en el suelo fue de 16.85 ppm que sumado al contenido en el vermicompost aplicado fue de 1.91 ppm, haciendo un total de 18.76 que es un dato similar al tratamiento 1 (control o testigo). Los datos se presentan en la Tabla 17.

4.2 Prueba de hipótesis

4.2.1 Hipótesis específica 1:

Ho: Las dosis crecientes de vermicompost no influyen significativamente en el crecimiento y contenido de cadmio en alfalfa (*Medicago sativa* L.) en un suelo contaminado de Huaripampa.

Ha: Las dosis crecientes de vermicompost influyen significativamente en el crecimiento y contenido de cadmio en alfalfa (*Medicago sativa* L.) en un suelo contaminado de Huaripampa.

4.2.1.1 Altura de planta

Para comprobar la hipótesis planteada, primero se verificó la distribución normal de los datos de la población de donde provino la muestra, aplicando la prueba de Shapiro – Wilks.

Para la prueba de normalidad se planteó la siguiente hipótesis:

Ho: La población está distribuida normalmente.

Ha: La población no está distribuida normalmente.

Nivel de significación: $\alpha = 0.05$

Tabla 18. Prueba de normalidad de Shapiro-Wilks para la altura de planta de alfalfa.

Tratamiento	Dosis de vermicompost (%)	Promedio (cm)	p-valor
1	0	16.98	0.2168
2	2	20.49	0.7035
3	4	18.47	0.9303
4	6	19.94	0.6260
5	8	16.61	0.2167
6	10	17.41	0.2065

Fuente: elaboración propia

Como el p-valor en todos los tratamientos es mayor que 0.05, se acepta la hipótesis nula (Ho) y se rechaza la hipótesis alternativa (Ha), la población de donde proviene la muestra está distribuida normalmente. Los datos se presentan en la Tabla 18.

Posteriormente se desarrolló el análisis de variancia.

Tabla 19. *Análisis de variancia para la altura de planta de alfalfa (cm).*

F. de V.	SC	GL	CM	Fc	p-valor
Tratamientos	38.76	5	7.75	1.74	0.2008
Error	53.57	12	4.46		
Total	92.34	17			
S = 2.11	$\bar{x} = 18.32$				CV = 11.53 %

Fuente: *Elaboración propia*

Del análisis de variancia, se observa que el p-valor en la fuente de variación *Tratamientos* es mayor que 0.05, indicando que la altura de planta promedio de alfalfa debido a la aplicación de vermicompost (tratamientos), no tuvo significación estadística. Esto permite rechazar la hipótesis planteada. Los datos se presentan en la Tabla 19.

4.2.1.2 Longitud de raíz

Para comprobar la hipótesis planteada, primero se verificó la distribución normal de los datos de la población de dónde provino la muestra, para ello se aplicó la prueba de Shapiro – Wilks.

Para la prueba de normalidad se planteó la siguiente hipótesis:

Ho: La población está distribuida normalmente.

Ha: La población no está distribuida normalmente.

Nivel de significación: $\alpha = 0.05$

Tabla 20. Prueba de normalidad de Shapiro-Wilks para la longitud de raíz de alfalfa.

Tratamiento	Dosis de vermicompost (%)	Promedio (cm)	p-valor
1	0	12.06	0.2913
2	2	14.98	0.9563
3	4	13.30	0.8966
4	6	12.05	0.3334
5	8	15.27	0.4628
6	10	12.97	0.1075

Fuente: Elaboración propia

Como el p-valor en todos los tratamientos es mayor que 0.05, se acepta la hipótesis nula (H_0) y se rechaza la hipótesis alternativa (H_a), la población de donde proviene la muestra está distribuida normalmente. Los datos se presentan en la Tabla 20.

Posteriormente se desarrolló el análisis de variancia.

Tabla 21. Análisis de variancia para la longitud de raíz de alfalfa (cm).

F. de V.	SC	GL	CM	Fc	p-valor
Tratamientos	29.46	5	5.89	5.61	0.0068
Error	12.60	12	1.05		
Total	42.06	17			

S = 1.02

\bar{x} = 13.44

CV = 7.63 %

Fuente: Elaboración propia

Del análisis de variancia, se observa que el p-valor en la fuente de variación *Tratamientos* es menor que 0.05, indicando que la longitud de raíz promedio de alfalfa debido a la aplicación de vermicompost (tratamientos) tuvo diferencias

significativas. Esto permite aceptar la hipótesis planteada. Los datos se presentan en la Tabla 21.

Se procedió a realizar la prueba de Duncan para comparar los promedios de tratamientos.

La prueba de Duncan mostró al tratamiento 5 (T5 = 8 % de vermicompost) ocupando el primer lugar en el orden de mérito y siendo significativamente superior a los demás. Esto se atribuye a que el vermicompost mejoró las condiciones del suelo para el desarrollo de la raíz. Los datos se presentan en la Figura 6.

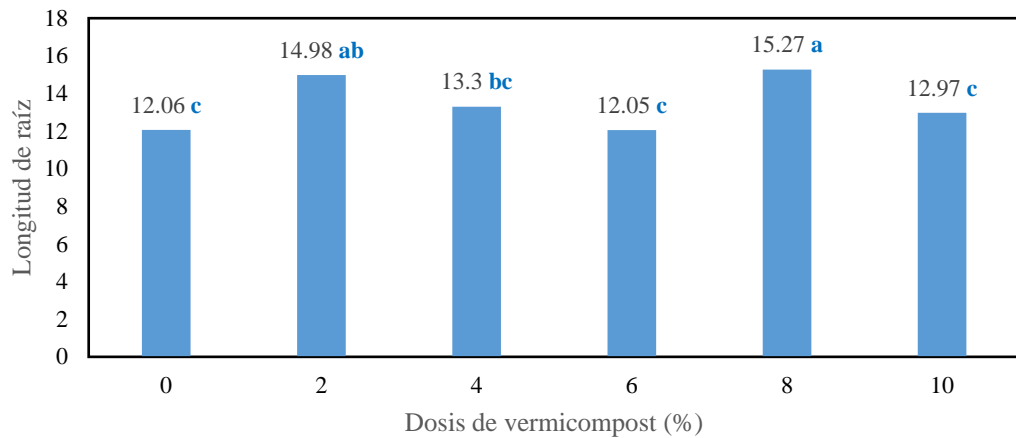


Figura 6. Prueba de Duncan para longitud de raíz.

Fuente: Elaboración propia

4.2.1.3 Materia seca aérea

Para comprobar la hipótesis planteada, primero se verificó la distribución normal de los datos de la población de dónde provino la muestra, para ello se aplicó la prueba de Shapiro – Wilks.

Para la prueba de normalidad se planteó la siguiente hipótesis:

Ho: La población está distribuida normalmente.

Ha: La población no está distribuida normalmente.

Nivel de significación: $\alpha = 0.05$

Tabla 22. Prueba de normalidad de Shapiro-Wilks para la materia seca aérea.

Tratamiento	Dosis de vermicompost (%)	Promedio (g)	p-valor
1	0	4.66	0.9640
2	2	4.81	0.2147
3	4	4.20	0.1782
4	6	4.33	0.7634
5	8	4.23	0.5638
6	10	4.54	0.6466

Fuente: *Elaboración propia*

Como el p-valor en todos los tratamientos es mayor que 0.05, se acepta la hipótesis nula (H_0) y se rechaza la hipótesis alternativa (H_a), la población de donde proviene la muestra está distribuida normalmente. Los datos se presentan en la Tabla 22.

Posteriormente se desarrolló el análisis de variancia.

Tabla 23. Análisis de variancia para la materia seca aérea de la alfalfa (g).

F. de V.	SC	GL	CM	Fc	p-valor
Tratamientos	0.92	5	0.18	1.35	0.3097
Error	1.64	12	0.14		
Total	2.56	17			

$$S = 0.37$$

$$\bar{x} = 4.46$$

$$CV = 8.28 \%$$

Fuente: *Elaboración propia*

Del análisis de variancia, se observa que el p-valor en la fuente de variación *Tratamientos* es mayor que 0.05, indicando que la materia seca aérea promedio de alfalfa debido a la aplicación de vermicompost (tratamientos), no tuvo

diferencias significativas, esto permite rechazar la hipótesis planteada. Los datos se presentan en la Tabla 23.

4.2.1.4 Materia seca radicular

Para comprobar la hipótesis planteada, primero se verificó la distribución normal de los datos de la población de dónde provino la muestra, para ello se aplicó la prueba de Shapiro – Wilks.

Para la prueba de normalidad se planteó la siguiente hipótesis:

Ho: La población está distribuida normalmente.

Ha: La población no está distribuida normalmente.

Nivel de significación: $\alpha = 0.05$

Tabla 24. Prueba de normalidad de Shapiro-Wilks para la materia seca radicular.

Tratamiento	Dosis de vermicompost (%)	Promedio (g)	p-valor
1	0	2.66	0.2962
2	2	2.72	0.0706
3	4	2.51	0.4513
4	6	2.42	0.6394
5	8	2.45	0.7283
6	10	2.58	0.7417

Fuente: elaboración propia

Como el p-valor en todos los tratamientos es mayor que 0.05, se acepta la hipótesis nula (Ho) y se rechaza la hipótesis alternativa (Ha), la población de donde proviene la muestra está distribuida normalmente. Los datos se presentan en la Tabla 24.

Posteriormente se desarrolló el análisis de variancia.

Tabla 25. *Análisis de variancia para la materia seca radicular de la alfalfa (g).*

F. de V.	SC	GL	CM	Fc	p-valor
Tratamientos	0.21	5	0.04	2.24	0.1175
Error	0.22	12	0.02		
Total	0.43	17			

S = 0.14 $\bar{x} = 2.56$ CV = 5.35 %

Fuente: *Elaboración propia*

Del análisis de variancia, se observa que el p-valor en la fuente de variación tratamientos es mayor que 0.05, indicando que la materia seca radicular promedio de alfalfa debido a la aplicación de vermicompost (tratamientos) no tuvo diferencias significativas, esto permite rechazar la hipótesis planteada. Los datos se presentan en la Tabla 25.

4.2.1.5 Contenido de Cd en la parte aérea

Para comprobar la hipótesis planteada, primero se verificó la distribución normal de los datos de la población de dónde provino la muestra, para lo cual se aplicó la prueba de Shapiro – Wilks.

Para la prueba de normalidad se planteó la siguiente hipótesis:

Ho: La población está distribuida normalmente.

Ha: La población no está distribuida normalmente.

Nivel de significación: $\alpha = 0.05$

Tabla 26. Prueba de normalidad de Shapiro-Wilks para el contenido de Cd en la parte aérea.

Tratamiento	Dosis de vermicompost (%)	Promedio (mg/kg)	p-valor
1	0	0.52	0.2190
2	2	0.56	0.3614
3	4	0.64	0.6852
4	6	0.59	0.5351
5	8	0.65	0.3962
6	10	0.45	0.1678

Fuente: Elaboración propia

Como el p-valor en todos los tratamientos es mayor que 0.05, se acepta la hipótesis nula (H_0) y se rechaza la hipótesis alternativa (H_a), la población de donde proviene la muestra está distribuida normalmente. Los datos se presentan en la Tabla 26.

Posteriormente se desarrolló el análisis de variancia.

Tabla 27. Análisis de variancia para el contenido de Cd en la parte aérea (mg/kg).

F. de V.	SC	GL	CM	Fc	p-valor
Tratamientos	0.09	5	0.02	0.73	0.6134
Error	0.29	12	0.02		
Total	0.38	17			

$$S = 0.14$$

$$\bar{x} = 0.57$$

$$CV = 27.43 \%$$

Fuente: Elaboración propia

Del análisis de variancia, se observa que el p-valor en la fuente de variación *Tratamientos* es mayor que 0.05, indicando que el contenido de Cd en la parte aérea debido a la aplicación de vermicompost (tratamientos) no tuvo diferencias

significativas. Esto permite rechazar la hipótesis planteada. Los datos se presentan en la Tabla 27.

4.2.1.6 Contenido de Cd en la parte radicular

Para comprobar la hipótesis planteada, primero se verificó la distribución normal de los datos de la población de dónde provino la muestra, para ello se aplicó la prueba de Shapiro – Wilks.

Para la prueba de normalidad se planteó la siguiente hipótesis:

Ho: La población está distribuida normalmente.

Ha: La población no está distribuida normalmente.

Nivel de significación: $\alpha = 0.05$

Tabla 28. Prueba de normalidad de Shapiro-Wilks para el contenido de Cd en la parte radicular.

Tratamiento	Dosis de vermicompost (%)	Promedio (mg/kg)	p-valor
1	0	3.10	0.7019
2	2	1.74	0.7394
3	4	2.18	0.0706
4	6	2.78	0.6574
5	8	2.26	>0.9999
6	10	4.98	0.5723

Fuente: *Elaboración propia*

Como el p-valor en todos los tratamientos es mayor que 0.05, se acepta la hipótesis nula (Ho) y se rechaza la hipótesis alternativa (Ha), la población de donde proviene la muestra está distribuida normalmente. Los datos se presentan en la Tabla 28.

Posteriormente se desarrolló el análisis de variancia.

Tabla 29. Análisis de variancia para el contenido de Cd en la parte radicular (mg/kg).

F. de V.	SC	GL	CM	Fc	p-valor
Tratamientos	19.90	5	3.98	11.74	0.0003
Error	4.07	12	0.34		
Total	23.97	17			

S = 0.58 $\bar{x} = 2.84$ CV = 20.50 %

Fuente: *Elaboración propia*

Del análisis de variancia, se observa que el p-valor en la fuente de variación tratamientos es menor que 0.05, indicando que el contenido de Cd en el parte radicular promedio de alfalfa debido a la aplicación de vermicompost (tratamientos), tuvo diferencias significativas. Esto permite aceptar la hipótesis planteada. Los datos se presentan en la Tabla 29.

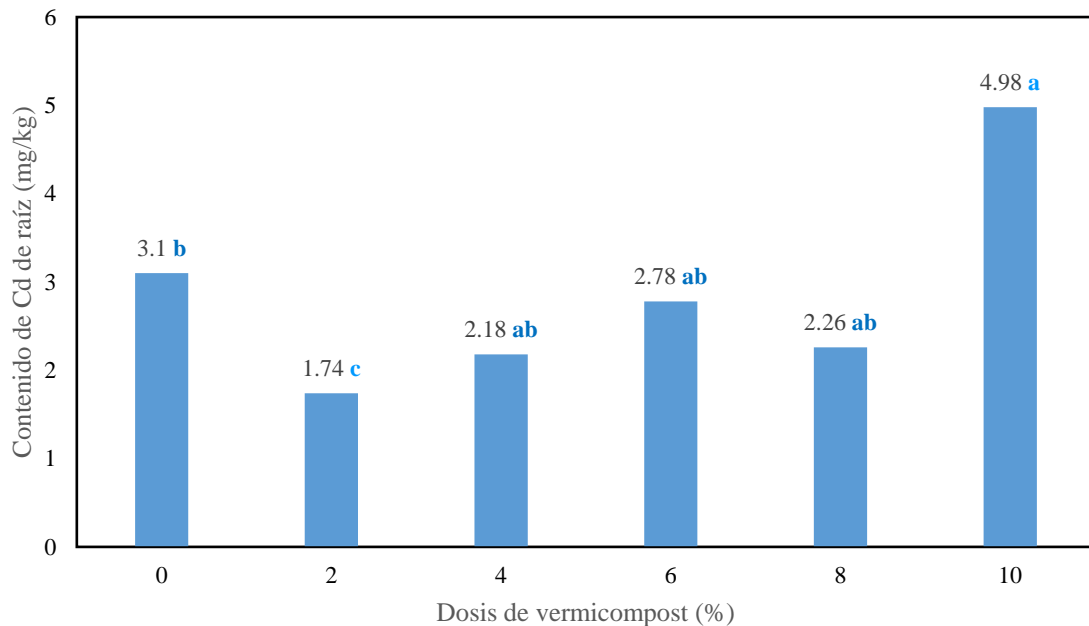


Figura 7. Prueba de Duncan para el contenido de Cd en la parte radicular de la alfalfa.

Fuente: *Elaboración propia*

El contenido de Cd en la parte radicular fue significativamente superior en el tratamiento 6 (T6), donde se aplicó 10 % de vermicompost, atribuible al mayor crecimiento de la parte radicular, favorecido por las mejores condiciones del suelo (mayor porosidad, aireación, retención de agua, entre otros factores) para la absorción de Cd. Esto valida la hipótesis alternativa. Los datos se presentan en la figura 7.

4.3 Prueba de hipótesis

4.3.1 Hipótesis específica 2:

Ho: Las dosis crecientes de vermicompost incrementan los factores de bioacumulación y translocación de Cd en la planta de alfalfa (*Medicago sativa* L.).

Ha: Las dosis crecientes de vermicompost incrementan los factores de bioacumulación y translocación de Cd en la planta de alfalfa (*Medicago sativa* L.).

4.3.1.1 Factor de bioacumulación aérea (FBA)

Para comprobar la hipótesis planteada, primero se verificó la distribución normal de los datos de la población de donde provino la muestra, para lo cual se aplicó la prueba de Shapiro – Wilks.

Para la prueba de normalidad se planteó la siguiente hipótesis:

Ho: La población está distribuida normalmente.

Ha: La población no está distribuida normalmente.

Nivel de significación: $\alpha = 0.05$

Tabla 30. Prueba de normalidad de Shapiro-Wilks para el FBA.

Tratamiento	Dosis de vermicompost (%)	Promedio	p-valor
1	0	0.03	0.3877
2	2	0.03	0.3614
3	4	0.04	0.7232
4	6	0.03	0.2962
5	8	0.04	0.5813
6	10	0.03	0.0896

Fuente: *Elaboración propia*

Como el p-valor en todos los tratamientos es mayor que 0.05, se acepta la hipótesis nula (Ho) y se rechaza la hipótesis alternativa (Ha), la población de donde proviene la muestra está distribuida normalmente. Los datos se presentan en la Tabla 30.

Posteriormente se desarrolló el análisis de variancia.

Tabla 31. Análisis de variancia para el FBA.

F. de V.	SC	GL	CM	Fc	p-valor
Tratamientos	2.8E-04	5	5.6E-05	0.69	0.6409
Error	9.7E-04	12	8.1E-05		
Total	1.2E-03	17			

$$S = 7.48 \times 10^{-3}$$

$$\bar{x} = 0.03$$

$$CV = 27.99 \%$$

Fuente: *Elaboración propia*

Del análisis de variancia se observa que el p-valor en la fuente de variación *Tratamientos* es mayor que 0.05, indicando que el FBA promedio de alfalfa debido a la aplicación de vermicompost (tratamientos) no tuvo significación

estadística. Esto permite rechazar la hipótesis planteada. Los datos se presentan en la Tabla 31.

4.3.1.2 Factor de bioacumulación radicular (FBR)

Para comprobar la hipótesis planteada, primero se verificó la distribución normal de los datos de la población de dónde provino la muestra, para ello se aplicó la prueba de Shapiro – Wilks.

Para la prueba de normalidad se planteó la siguiente hipótesis:

Ho: La población eestá distribuida normalmente.

Ha: La población no está distribuida normalmente.

Nivel de significación: $\alpha = 0.05$

Tabla 32. Prueba de normalidad de Shapiro-Wilks para el FBR.

Tratamiento	Dosis de vermicompost (%)	Promedio	p-valor
1	0	0.17	0.4628
2	2	0.10	> 0.9999
3	4	0.12	< 0.0001
4	6	0.16	< 0.0001
5	8	0.13	> 0.9999
6	10	0.30	0.5351

Fuente: *Elaboración propia*

Como el p-valor en los tratamientos 3 y 4 es menor que 0.05, se rechaza la hipótesis nula (Ho) y se acepta la hipótesis alternativa (Ha), la población de donde proviene la muestra no está distribuida normalmente. Los datos se presentan en la Tabla 32.

Posteriormente se desarrolló la prueba de Kruskal Wallis para datos no paramétricos.

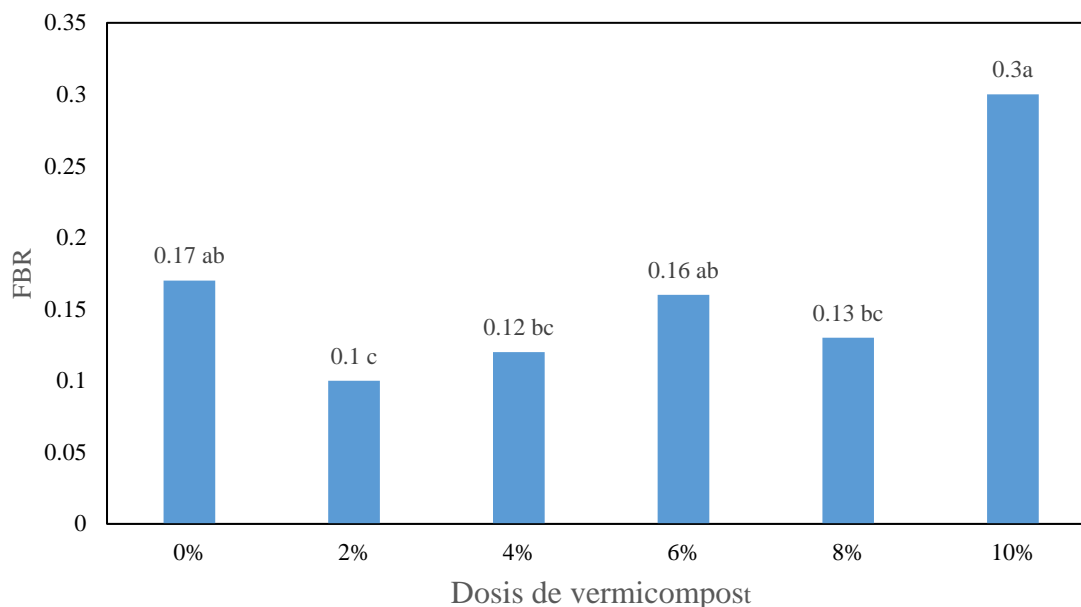


Figura 8. Prueba de Kruskal Wallis para el FBR de alfalfa.

Fuente: Elaboración propia

El FBR (factor de bioacumulación radicular) fue significativamente mayor en el tratamiento con 10 % de vermicompost debido su efecto para mejorar las propiedades del suelo como: aireación, actividad de microorganismos y retención de agua, entre otros e incrementar la acumulación de Cd en la parte radicular de alfalfa, permitiendo aceptar la hipótesis alternativa. Los datos se presentan en la Figura 8.

4.3.1.3 Factor de bioacumulación total (FBT)

Para comprobar la hipótesis planteada, primero se verificó la distribución normal de los datos de la población de dónde provino la muestra, para lo cual se aplicó la prueba de Shapiro – Wilks.

Para la prueba de normalidad se planteó la siguiente hipótesis:

H₀: La población está distribuida normalmente.

H_a: La población no está distribuida normalmente.

Nivel de significación: $\alpha = 0.05$

Tabla 33. Prueba de normalidad de Shapiro-Wilks para el FBT.

Tratamiento	Dosis de vermicompost (%)	Promedio	p-valor
1	0	0.19	0.3614
2	2	0.12	0.6394
3	4	0.16	> 0.9999
4	6	0.19	0.3614
5	8	0.17	< 0.0001
6	10	0.33	0.1438

Fuente: Elaboración propia

Como el p-valor en el tratamiento 5 es menor que 0.05, se rechaza la hipótesis nula (H_0) y se acepta la hipótesis alternativa (H_a), la población de donde proviene la muestra no está distribuida normalmente. Los datos se presentan en la Tabla 33.

Posteriormente se desarrolló la prueba no paramétrica de Kruskal Wallis.

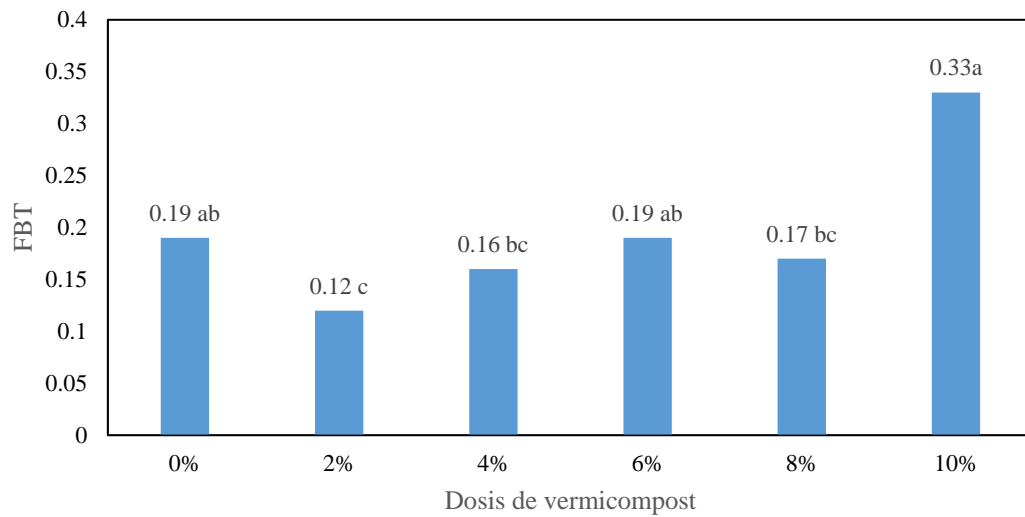


Figura 9. Prueba de Kruskal Wallis para el FBT de alfalfa.

Fuente: Elaboración propia

El FBT (factor de bioacumulación total) fue significativamente mayor en el tratamiento con 10 % de vermicompost, debido su efecto para mejorar las propiedades del suelo como: aireación, actividad de microorganismos y retención de agua, entre otros y así incrementar la acumulación de Cd en la planta de alfalfa, permitiendo aceptar la hipótesis alternativa. Los datos se presentan en la Figura 9.

4.3.1.4 Factor de traslocación (FT)

Para comprobar la hipótesis planteada, primero se verificó la distribución normal de los datos de la población de dónde provino la muestra, para ello se aplicó la prueba de Shapiro – Wilks.

Para la prueba de normalidad se planteó la siguiente hipótesis:

Ho: La población está distribuida normalmente.

Ha: La población no está distribuida normalmente.

Nivel de significación: $\alpha = 0.05$

Tabla 34. Prueba de normalidad de Shapiro-Wilks para el FT.

Tratamiento	Dosis de vermicompost (%)	Promedio	p-valor
1	0	0.17	>0.9999
2	2	0.32	0.3137
3	4	0.29	0.4748
4	6	0.21	0.0617
5	8	0.29	0.5553
6	10	0.10	0.8278

Fuente: *Elaboración propia*

Como el p-valor en todos los tratamientos es mayor que 0.05, se acepta la hipótesis nula (Ho) y se rechaza la hipótesis alternativa (Ha), la población de donde proviene la muestra está distribuida normalmente. Los datos se presentan

La prueba de Duncan mostró diferencias significativas en el factor de traslocación, siendo el tratamiento 2 (2 % de vermicompost) el que tuvo mayor valor, demostrando que el Cd absorbido por la raíz en este tratamiento se transportó a la parte aérea y el tratamiento 6 (T6 = 10 % vermicompost) tuvo el más bajo valor, indicando una mayor concentración de Cd en la raíz y menor traslocación hacia la parte aérea. Los datos se presentan en la Figura 10.

4.4 Prueba de hipótesis

4.4.1 Hipótesis específica 3:

Ho: Las dosis crecientes de vermicompost no influyen significativamente en la concentración de Cd en un suelo de Huaripampa cultivado con alfalfa (*Medicago sativa* L.) con dosis crecientes de vermicompost.

Ha: Las dosis crecientes de vermicompost influyen significativamente en la concentración de Cd en un suelo de Huaripampa cultivado con alfalfa (*Medicago sativa* L.) con dosis crecientes de vermicompost.

4.4.1.1 Contenido de Cd en el suelo

Para comprobar la hipótesis planteada, primero se verificó la distribución normal de los datos de la población de dónde provino la muestra, para ello se aplicó la prueba de Shapiro – Wilks.

Para la prueba de normalidad se planteó la siguiente hipótesis:

Ho: La población está distribuida normalmente.

Ha: La población no está distribuida normalmente.

Nivel de significación: $\alpha = 0.05$

Tabla 36. Prueba de normalidad de Shapiro-Wilks para el contenido de Cd en el suelo.

Tratamiento	Dosis de vermicompost (%)	Promedio (mg/kg)	p-valor
1	0	18.77	0.9658
2	2	18.15	0.5538
3	4	17.50	0.1075
4	6	17.99	0.9085
5	8	17.33	0.4937
6	10	16.63	0.6993

Fuente: elaboración propia

Como el p-valor en todos los tratamientos es mayor que 0.05, se acepta la hipótesis nula (H_0) y se rechaza la hipótesis alternativa (H_a), la población de donde proviene la muestra está distribuida normalmente. Los datos se presentan en la Tabla 36.

Posteriormente se desarrolló el análisis de variancia.

Tabla 37. Análisis de variancia para el contenido de Cd en el suelo.

F. de V.	SC	GL	CM	Fc	p-valor
Tratamientos	8.24	5	1.65	4.89	0.0114
Error	4.04	12	0.34		
Total	12.28	17			

S = 0.58

\bar{x} = 17.73

CV = 3.27 %

Fuente: Elaboración propia

Del análisis de variancia, se observa que el p-valor en la fuente de variación tratamientos es menor que 0.05, indicando que el contenido de Cd en el suelo tuvo significación estadística debido a la aplicación de vermicompost

(tratamientos). Esto permite aceptar la hipótesis planteada. Los datos se presentan en la Tabla 37.

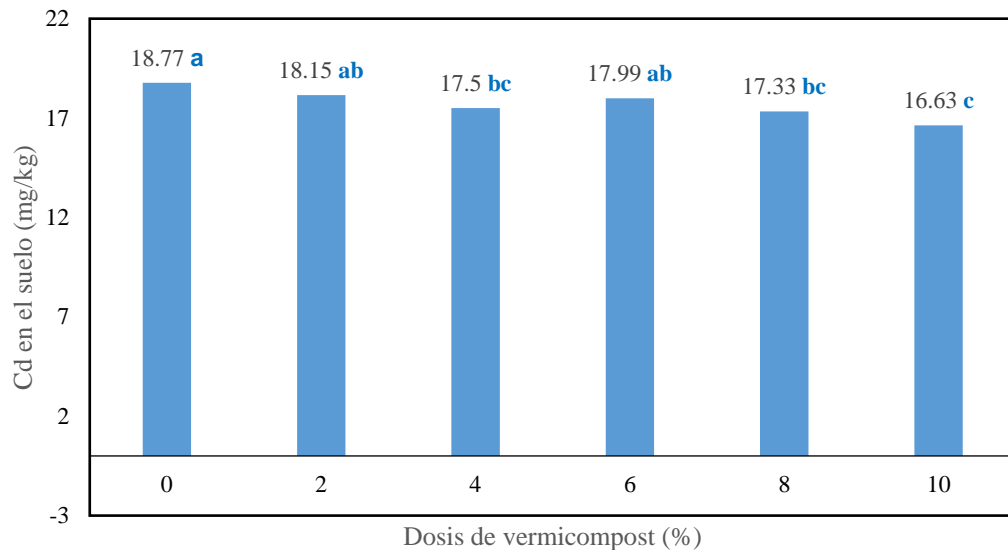


Figura 11. Prueba de Duncan para el contenido promedio de Cd en el suelo.

Fuente: Elaboración propia

De los resultados de la prueba de Duncan, se observa que el tratamiento 1 (T1 = 0 % VC) tuvo el mayor contenido de Cd en el suelo y el tratamiento 6 (T6 = 10 % VC) el más bajo valor, debido al efecto del vermicompost en la fitorremediación de alfalfa y en la adsorción de cadmio en el suelo, lo que disminuyó su disponibilidad, permitiendo aceptar la hipótesis alternativa. Los datos se presentan en la Figura 11.

4.5 Discusión de resultados

La aplicación de vermicompost al suelo de Huaripampa contaminado con cadmio, incrementó la altura de planta de *M. sativa* L. y en el tratamiento sin vermicompost la altura fue menor, pero estos efectos no fueron estadísticamente diferentes. Estos resultados fueron similares al trabajo realizado en un sustrato de arena con aplicación de 0, 5 y 25 mg Cd/kg, donde la alfalfa mostró menor clorofila ante una mayor dosis de Cd que limitó la fotosíntesis y afectó negativamente en el crecimiento vegetal (7).

En la longitud de raíz, la aplicación de la dosis de 8 % de vermicompost (VC) fue significativamente superior respecto al testigo, corroborando el efecto favorable del vermicompost en incrementar la retención de agua del suelo, del contenido y disponibilidad de nutrientes y sustancias húmicas y aumentar la comunidad microbiana (85) favoreciendo el crecimiento radicular.

En la formación de materia seca aérea y radicular no se observó significación estadística entre los tratamientos de VC aplicados al suelo contaminado. Estos resultados tienen relación con el trabajo reportado con la aplicación de 0, 5, 10, 20, 40 y 60 ppm de Cd en un experimento de macetas con una relación suelo: vermicompost de 3:1, donde se observó que el crecimiento de raíz y tallo de alfalfa solo fueron afectados cuando el Cd tuvo concentraciones de 40 y 50 ppm; las dosis bajas de Cd (5 y 10 ppm) estimularon el crecimiento de tallo y raíz e incrementaron la biomasa (23).

En general, la aplicación de VC al suelo contaminado, incrementó la absorción de Cd en la parte aérea de *M. sativa* L., pero esas diferencias no fueron estadísticamente significativas. Los resultados obtenidos entre 0.45 a 0.65 mg/kg fueron superiores a los obtenidos en una cuantificación de absorción de Cd por *M. sativa* L. var. California, donde se obtuvo 0.06 mg Cd/kg, pero sin diferencias significativas en los diferentes periodos de crecimiento (18).

En la absorción de Cd por la raíz se presentaron diferencias significativas entre tratamientos, siendo el tratamiento con 10 % de VC que tuvo mayor concentración de este metal pesado. Estos datos son comparativamente similares con los obtenidos en un estudio hidropónico con *M. sativa* var. Col, donde la raíz tuvo mayor concentración de Cd que la parte aérea, a diferencia que en nuestro trabajo de investigación se aplicó Cd en dosis de 0 a 50 mg/L (24). El efecto del VC explica que la absorción y concentración de Cd en las plantas depende no solo de su concentración en el medio de crecimiento sino también de su disponibilidad (40).

El factor de Bioacumulación no presentó diferencias significativas en alfalfa debido a la aplicación de vermicompost, mostrando que este cultivo no se comporta como fitoextractor; pues una planta ideal como fitoextractora debería tener un factor de bioacumulación mayor que la unidad (70). En relación al factor de traslocación se presentaron diferencias: el tratamiento con menor cantidad de VC (T2 = 2 % VC) fue el

que tuvo mayor valor; el tratamiento con la mayor dosis de vermicompost (T6 = 10 % VC), tuvo menor FT. Lo que indica que este cultivo acumula más Cd en la raíz, como efecto de la presencia de mayor cantidad de vermicompost. Este elemento tiende a acumularse en la raíz de alfalfa (24).

El contenido de Cd en el suelo al final del periodo experimental mostró al tratamiento 6 (10 % VC) con menor cantidad de Cd, significativamente diferente de los demás tratamientos, demostrando el efecto positivo del VC en favorecer la retención de Cd en el suelo, disminuyendo su disponibilidad y de la alfalfa en absorber Cd. Estos datos son similares al trabajo donde se evaluó la fitotoxicidad y remediación de Cd y otros metales pesados en alfalfa en un medio suelo-vermicompost con aplicación de Cd en dosis de 0 a 50 ppm, concluyéndose que el uso de vermicompost en el suelo fue efectivo para remediar metales pesados (23).

CONCLUSIONES

- Las dosis crecientes de vermicompost incrementaron el crecimiento de alfalfa a través de la altura, pero sin diferencias significativas; la longitud de la raíz con la dosis de 8 % de vermicompost fue significativamente superior al tratamiento control. No hubo efecto en la formación de materia seca aérea y radicular.
- El contenido de Cd en la parte aérea de alfalfa fue superior con los tratamientos de vermicompost, pero estas diferencias no fueron significativas. La raíz tuvo en el tratamiento con 10 % de VC la mayor concentración significativa de este metal pesado.
- El factor de bioacumulación aéreo no presentó diferencias significativas por efecto de la aplicación de vermicompost. En el factor de bioconcentración radicular y total, el tratamiento con 10 % de vermicompost fue significativamente superior a los demás tratamientos.
- El factor de traslocación tuvo en el tratamiento con 2 % de vermicompost, superioridad significativa respecto a los demás tratamientos.
- El suelo, al final del periodo experimental, mostró diferencias significativas en la cantidad de Cd total, siendo el tratamiento con 10 % de VC el que tuvo menor contenido de este metal pesado.

RECOMENDACIONES

- Evaluar el efecto del vermicompost en otros cultivos forrajeros similares a *M. sativa* L. para corroborar su efecto en suelos contaminados con diferentes concentraciones de Cd.
- Realizar ensayos con dosis de vermicompost para evaluar su efecto en la remediación de suelos contaminados con otros metales pesados.
- Combinar aplicaciones de vermicompost y microorganismos para mejorar la eficiencia de remediación de suelos mediante el incremento de la actividad microbial.
- Realizar aplicaciones de vermicompost y nutrientes que mejoren el crecimiento de los cultivos que crecen en suelos contaminados y hacer más eficiente la remediación de los mismos.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. KHAN, A, KHAN, S, KHAN, M, QAMAR, Z and WAQAS, M. The uptake and bioaccumulation of heavy metals by food plants, their effects on plants nutrients, and associated health risk: a review. *Review. Environ. Sci. Pollut. Res.* [en línea]. 2015, 22, (18),1356-015-4881-0. [consulta: 29 de noviembre 2022]. Disponible en: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/26194234/>
2. CLARK, G. J., DODGSHUN, N., SALE, P. W. G. and TANG, C. Changes in chemical and biological properties of a sodic clay subsoil with addition of organic amendments. *Soil Biology and Biochemistry.* [en línea]. 2007. 39 (11), 2806–2817. [consulta:29 de noviembre 2022]. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038071707002507>
3. LABRADOR, J., GUIBERTEAU, A., LOPEZ, L. and REYES, J. La Materia Orgánica en los Sistemas Agrícolas Manejo y Utilizacion. Hoja Divulgadora Núm. 3/93 HD. Ministerio de Agricultura Pesca y Alimentación. España. 1933
4. KHAN, M., KHAN, S., KHAN, A., and ALAM, M. Soil contamination with cadmium, consequences and remediation using organic amendments. *Science of The Total Environment.* [en línea]. 2017. 601–602 (1591–1605). [consulta: 29 de noviembre 2022]. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969717314341>
5. ROMÁN, P., MARTÍNEZ, M., and PANTOJA, A. Manual de compostaje del agricultor. Experiencias en América Latina. [en línea]. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. Chile, 2013. [consulta: 29 de noviembre 2022]. ISBN 978-92-5-307845-5. Disponible en: <https://www.fao.org/3/i3388s/I3388S.pdf>
6. LAZCANO, C., GÓMEZ-BRANDÓN, M., and DOMÍNGUEZ, J. Comparison of the effectiveness of composting and vermicomposting for the biological stabilization of cattle manure. *Chemosphere.* [en línea]. 2008. 72: 1013–1019. [consulta: 29 de noviembre 2022]. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0045653508004797>
7. REVEN, k. Efectos del cadmio sobre el crecimiento y la composición elemental de la alfalfa en cultivo de arena | *Anales Científicos.* [en línea]. 2018. 79 (2): 406-414.

- [consulta: 29 de noviembre 2022]. Disponible en: <https://revistas.lamolina.edu.pe/index.php/acu/article/view/912>
8. MIRSAL, I. Soil Pollution: Origin, Monitoring & Remediation. 2nd. edition. Springer Science & Business Media, 2010. ISBN 978-3-450707776. Google-Books-ID: 19Z9BwAAQBAJ
 9. PAN, L., MA, J., WANG, X., and HOU, H. Heavy metals in soils from a typical county in Shanxi Province, China: Levels, sources and spatial distribution. *Chemosphere*. 148, 248–254. 2016.
 10. KABATA, A., and PENDIAS, H., Trace Elements in Soils and Plants. Third ed. Press, Boca Raton, ISBN 978-0-429-19203-6. CRC USA, 2001.
 11. PROYECTO MANTARO REVIVE. Avances de resultados de la evaluación de calidad ambiental y de los recursos agua y suelos. Data Mayo- octubre 2007. caritas. Huancayo-Perú: Fondo Italo Peruano, 2006. 333.7153-C26
 12. URAGUCHI, S., MORI, S., KURAMATA, M., KAWASAKI, A., ARAO, T., and ISHIKAWA, S. Root-to-shoot Cd translocation via the xylem is the major process determining shoot and grain cadmium accumulation in rice. *Journal of Experimental Botany*. [en línea]. 2009. 60, (9): 2677–2688. [consulta: 2 Diciembre 2022]. Disponible en: <https://doi.org/10.1093/jxb/erp119>
 13. SOTO, G. and MELÉNDEZ, G. Taller de abonos orgánicos: Memoria CATIE. 2003.
 14. AZCÓN BIETO, J. and TALÓN, M. Fundamentos de fisiología vegetal 2da edición. Online. Barcelona - Eespaña, [en línea]. [consultado 11 de octubre 2022]. ISBN ISBN: 978-84-475-3230-8. Disponible en: <http://www.edicions.ub.edu/ficha.aspx?cod=06985>
 15. PEIXOTO, Enzo Franco. Rizofiltración de alfalfa (*Medicago sativa* L.) y coliflor (*Brassica oleracea* var. *Botrytis*), para tratamiento de suelos contaminados con cadmio y plomo en San José de Parác (Huarochiri – Lima). Tesis para optar el título profesional de Ingeniero Ambiental. Universidad Cesar Vallejo. Lima, Perú. 2018.
 16. GIRALDEZ, L. Evaluación de la capacidad fitoextractora de la alfalfa (*Medicago sativa*) en la remediación de suelos degradados por fertilización sintética en la E.E.A El Mantaro. Tesis para optar el Grado Académico de Maestría en Ingeniería Ambiental. Universidad Nacional del Centro del Perú - Unidad de Posgrado Facultad de Ingeniería Química. Huancayo-Perú. 2019.

17. PALACIOS, G. Evaluación de la capacidad fitoextractora de la alfalfa (*Medicago sativa*) y perejil (*Petroselinum crispum*) en la remediación de suelos contaminados por Plomo en el distrito de Anta – Carhuaz, 2016. Tesis para optar el título profesional de Ingeniero Ambiental. Universidad César Vallejo, Carhuaz - Perú. 2016. Disponible en: <https://hdl.handle.net/20.500.12692/925>
18. NUÑEZ, M. Cuantificación de metales pesados cobre (Cu), cadmio (Cd) y cromo (Cr) en alfalfa (*Medicago sativa*) variedad California en el pueblo tradicional de Congata, 2018. Tesis para optar el Grado de Maestro en Ciencias con mención en Seguridad y Medio Ambiente. Universidad Nacional San Agustín de Arequipa, 2016.
19. SILVIA, K. Utilización de las especies *Medicago sativa* y *Taraxacum officinale* en la fitorremediación de plomo, mercurio y cadmio del botadero Yacucatina. Tesis de grado Tarapoto. Perú: Universidad Nacional de San Martín, 2022. [consulta 25 de noviembre]. Disponible en: <https://repositorio.unsm.edu.pe/handle/11458/4463>
20. MENDOZA, M. Capacidad fitorremediadora de la “alfalfa” *Medicago sativa* L. en suelos contaminados con plomo evaluada en dos etapas de crecimiento, Végueta, Huaura. Tesis de grado. Universidad Católica Sedes Sapientiae, 2020. [consulta 25 de noviembre]. Disponible en: https://repositorio.ucss.edu.pe/bitstream/handle/20.500.14095/1072/Mendoza_Maria_tesis_2020.pdf
21. POMARI, L. and SABRANO, N. Evaluación de la capacidad fitoextractora de la alfalfa (*Medicago sativa*) y rábano (*Raphanus sativus*) sobre la remoción de Hg en suelos contaminados por actividad minera. Tesis de Grado. Juliaca - Perú. Universidad Peruana Unión, 2019. [consulta 25 de noviembre]. Disponible en: https://repositorio.upeu.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12840/4848/Lizabeth_Tesis_Licenciatura_2019.pdf?sequence=1
22. PUENTES, Juan. Determinación de Cadmio en Alfalfa *Medicago sativa*, irrigada con aguas residuales. Tesis para optar el título de Ingeniero en Procesos Ambientales. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. Torreón, Coahuila, México. 2014.
23. JADIA, Ch. and FULEKAR, M. Phytotoxicity and remediation of heavy metals by Alfalfa (*Medicago sativa*) in soil-vermicompost media. The Free Library by Farlex. [en línea]. 2008. 2 (3), 141. [consulta 25 de noviembre]. Disponible en:

[https://www.thefreelibrary.com/Phytotoxicity+and+remediation+of+heavy+metals+by+Alfalfa+\(Medicago...-a0215515477](https://www.thefreelibrary.com/Phytotoxicity+and+remediation+of+heavy+metals+by+Alfalfa+(Medicago...-a0215515477)

24. SINGH, A., EAPEN, S. and FULEKAR, M. Potential of *Medicago sativa* for uptake of cadmium from contaminated environment. *Rom. Biotechnol. Lett.* [en línea]. 2009. 14(1), 4164-4169. [consulta 25 de noviembre]. Disponible en: <http://www.rombio.eu/rbl1vol14/1-5/lucr-11-Singh-Fulekar-bt.pdf>
25. FAN, J., CAI, Ch., CHI, H., REID, B., COULON, F., ZHANG, Y. and HOU, Y. Remediation of cadmium and lead polluted soil using thiol-modified biochar. *Journal of Hazardous Materials.* [en línea]. 2020, 388, 122037. [consulta 25 de noviembre]. DOI 10.1016/j.jhazmat.2020.122037. Disponible en:
26. ZHANG, Ch., ZANG, X, DAI, Z., ZHANG, X. and MA, Z. Remediation Techniques for Cadmium-Contaminated Dredged River Sediments after Land Disposal. *Sustainability.* [en línea]. January 2021, 13(11), 6093. [consulta 25 de noviembre]. Disponible en: <https://www.mdpi.com/2071-1050/13/11/6093>
27. ZENG, x., XU, H., LU, J., CHEN, Q., LI, W., WU, L., TANG, J. and MA, L. The immobilization of Soil cadmium by the combined Amendment of Bacteria and Hydroxyapatite. *Scientific Reports.* [en línea]. 2020, 10(2189). [consulta 25 de noviembre]. Disponible en: <https://www.nature.com/articles/s41598-020-58259->
28. XIONG, P., HE, Ch., OH, K., CHEN, X., LIANG, X., LIU, X, CHENG, X., WU, Ch and SHI, Z. *Medicago sativa* L. enhances the phytoextraction of cadmium and zinc by *Ricinus communis* L. on contaminated land in situ. *Ecological Engineering.* [en línea]. 2018, 116, 61–66. [consulta 25 de noviembre]. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0925857418300235>
29. BAUDDH, K. and SINGH, R. Effects of organic and inorganic amendments on bioaccumulation and partitioning of Cd in *Brassica juncea* and *Ricinus communis*. *Ecological Engineering.* [en línea]. 2015, 74, 93–100. [consulta 25 de noviembre]. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0925857414005588>
30. LIU, Y., XIAO, T., NING, Z., LI, H., TANG, J. and ZHOU, G. High cadmium concentration in soil in the Three Gorges region: Geogenic source and potential bioavailability. *Applied Geochemistry.* [en línea]. 2013, 37, 149–156. [consulta 25 de

- noviembre]. Disponible en:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0883292713002023>
31. SHAH, M., BEGUM, S. and KHAN, S. Pedo and biogeochemical studies of mafic and ultramafic rocks in the Mingora and Kabal areas, Swat, Pakistan. *Environmental Earth Sciences*. [en línea]. 2010, 60(5), 1091–1102. [consulta 25 de noviembre]. Disponible en:
<https://doi.org/10.1007/s12665-009-0253-8>
 32. HE, Z., YANG, X. and STOFFELLA, P. Trace elements in agroecosystems and impacts on the environment. *Journal of Trace Elements in Medicine and Biology*. [en línea]. 2005, 19(2), 125–140. [consulta 25 de noviembre]. Disponible en:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0946672X05000969>
 33. BI, X., FENG, X., YANG, Y., QIU, G., LI, G., LI, F., LUI, T., FU, Z. and JIN, Z. Environmental contamination of heavy metals from zinc smelting areas in Hezhang County, western Guizhou, China. *Environment International*. [en línea]. 2006, 32(7), 883–890. [consulta 25 de noviembre]. Disponible en:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0160412006000754>
 34. TAMADDON, F. and HOGLAND, W. Review of Cadmium In Plastic Waste in Sweden. *Waste Management & Research*. [en línea]. 1993, 11(4), 287–295. [consulta 25 de noviembre]. Disponible en:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0734242X83710311>
 35. IDOINE, N., RAYCRAFT, E., SHAW, R, ROBBS, S., DEADY, E., EVERETT, P., EVANS, E. and MILLS, A. *World Mineral Production 2016-20*. [en línea]. 2022. ISBN: 978-0-85272-795-9. [consulta 25 de noviembre]. Disponible en:
https://www2.bgs.ac.uk/mineralsuk/download/world_statistics/2010s/WMP_2016_2020.pdf
 36. U.S. GEOLOGICAL SURVEY. *Mineral Commodity Summaries 2017* [en línea]. 2017. [consulta 25 de noviembre]. Disponible en: <https://doi.org/10.3133/70180197>
 37. ROY, M. and MCDONALD, L. Metal Uptake in Plants and Health Risk Assessments in Metal-Contaminated Smelter Soils. *Land Deg. Develop.* [en línea]. 2015, 26(8), 785-792. [consulta 25 de noviembre]. Disponible en:
https://hero.epa.gov/hero/index.cfm/reference/details/reference_id/4663576

38. KHAN, S., MUNIR, S., SAJJAD, M. and LI, G. Urban park soil contamination by potentially harmful elements and human health risk in Peshawar City, Khyber Pakhtunkhwa, Pakistan. *Journal of Geochemical Exploration*. [en línea]. 2016, 165, 102–110. [consulta 25 de noviembre]. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0375674216300668>
39. ALLOWAY, B. (ed.). *Heavy Metals in Soils: Trace Metals and Metalloids in Soils and their Bioavailability*. [en línea]. Dordrecht: Springer Netherlands, 2013, 22. [consulta 25 de noviembre]. *Environmental Pollution*. ISBN 978-94-007-4469-1. Disponible en: <https://link.springer.com/10.1007/978-94-007-4470-7>
40. CLEMENS, S. Toxic metal accumulation, responses to exposure and mechanisms of tolerance in plants. *Biochimie*. [en línea]. 2006, 88(11), 1707–1719. [consulta 25 de noviembre]. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0300908406001428>
41. ROTH, U., VON ROEPENACJK - LAHUAYE, E. and CLEMENS, S. Proteome changes in *Arabidopsis thaliana* roots upon exposure to Cd²⁺. *Journal of Experimental Botany | Oxford Academic*. [en línea]. 2006, 15(4003–4013), 57. [consulta 25 de noviembre]. Disponible en: <https://academic.oup.com/jxb/article/57/15/4003/547136?login=false>
42. YANG, Y., NAN, Z., ZHAO, Z., WANG, Z., WANG, S., WANG, Xia, JIN, Wangqiang and ZHAO, Cuicui. Bioaccumulation and translocation of cadmium in cole (*Brassica campestris* L.) and celery (*Apium graveolens*) grown in the polluted oasis soil, Northwest of China. *Journal of Environmental Sciences*. [en línea]. 2011, 23(8), 1368–1374. [consulta 25 de noviembre]. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1001074210605803>
43. KHAN, S., REHMAN, S., KHAN, A. and SHAH, M. Soil and vegetables enrichment with heavy metals from geological sources in Gilgit, northern Pakistan. *Ecotoxicology and Environmental Safety*. [en línea]. 2010, 73(7), 1820–1827. [consulta 25 de noviembre 2022]. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0147651310002137>
44. PIOTROWSKA, M and KABATA, P. Impact of soils amended with Zn and Pb smelter dust on Cd concentrations in potatoes. *Journal of Geochemical Exploration*. [en línea].

- 1997, 58(2), 319–322. [consulta 25 de noviembre 2022]. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0375674296000763>
45. MEERS, E., RUTTENS, A., GEEBELEN, W., VANGRONVELD, J., SAMSON, R., VANBROEKHOVEN, K., VANDEGEHUCHTE, M., DIELS, L. and TACK, F. Potential Use of the Plant Antioxidant Network For Environmental Exposure Assessment of Heavy Metals in Soils. *Environmental monitoring and assessment*. [en línea]. 2006, 120, 243–67. [consulta 25 de noviembre 2022]. Disponible en: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/16897526/> 45
46. YU, Li., WANG, Y., XIN, G., SU, Y., and GANG, W. Risk assessment of heavy metals in soils and vegetables around non-ferrous metals mining and smelting sites, Baiyin, China. *J. Environ. Sci.* [en línea]. 2006. 18(6), 1124-1134. [consulta 25 de noviembre 2022]. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1001074206600508>
47. GICHNER, T., PATKOVÁ, Z., SZÁKOVÁ, J. and DEMNEROVÁ, K. Toxicity and DNA damage in tobacco and potato plants growing on soil polluted with heavy metals. *Ecotoxicology and Environmental Safety*. [en línea]. 2006, 65(3), 420–426. [consulta 25 de noviembre 2022]. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0147651305002174>
48. KACHENKO, A. and SINGH, B. Heavy Metals Contamination in Vegetables Grown in Urban and Metal Smelter Contaminated Sites in Australia. *Water, Air, and Soil Pollution*. [en línea]. 2006, 169(1–4), 10, 123. [consulta 25 de noviembre 2022]. Disponible en: <https://d3pcsg2wj9izr.cloudfront.net/files/0/articles/9337/HeavyMetalsContaminationinVegetablesGrowninUrbanandMetalSmelterContaminatedSitesinAustralia.pdf>
49. KHAN, S., AIJUN, L., ZHANG, S., HU, Q. and ZHU, Y. Accumulation of polycyclic aromatic hydrocarbons and heavy metals in lettuce grown in the soils contaminated with long-term wastewater irrigation. *Journal of Hazardous Materials*. [en línea]. 2008, 152(2), 506–515. [consulta 25 de noviembre 2022]. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0304389407010072>
50. KHAN, S., CAO, Q., ZHENG, Y., HUANG, Y. Z. and ZHU, Y. Health risks of heavy metals in contaminated soils and food crops irrigated with wastewater in Beijing, China. *Environmental Pollution*. [en línea]. 2008, 152, (3), 686–692. [consulta 25 de noviembre

- 2022]. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0269749107003351>
51. BIGDELI, M. and SEILSEPOUR, M. Investigation of Metals Accumulation in Some Vegetables Irrigated with Waste Water in Shahre Rey-Iran and Toxicological Implications. *J. Agric. Environ. Sci.* [en línea]. 2008, 4, 86–91. [consulta 25 de noviembre 2022]. Disponible en: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/23332794/>
52. ZHUANG, P., MCBRIDE, M., XIA, H., LI, N. and LI, Z. Health risk from heavy metals via consumption of food crops in the vicinity of Dabaoshan mine, South China. *Science of The Total Environment.* [en línea]. 2009, 407(5), 1551–1561. [consulta 25 de noviembre 2022]. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969708011121>
53. KIM, H., SONG, B., KIM, H. and PARK, J. Distribution of trace metals at two abandoned mine sites in Korea and arsenic-associated health risk for the residents | SpringerLink. *Toxicol. Environ. Heal. Sci.* [en línea]. 2009, 1(2), 83–90. [consulta 25 de noviembre 2022]. Disponible en: <https://link.springer.com/article/10.1007/BF03216468>
54. MISHRA, V., UPADHYAY, A. and TRIPATHI, B. Bioaccumulation of heavy metals and two organochlorine pesticides (DDT and BHC) in crops irrigated with secondary treated waste water. *Environmental Monitoring and Assessment.* [en línea]. 2009, 156(1–4), Disponible en: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/18654831/>
55. SINGH, A., AGRAWAL, M. and MARSHALL, F. The role of organic vs. inorganic fertilizers in reducing phytoavailability of heavy metals in a wastewater-irrigated area. *Ecological Engineering.* [en línea]. 2010, 36(12), 1733–1740. [consulta 25 de noviembre 2022]. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0925857410002296>
56. LIU, J., ZHANG, X., TRAN, H., WANG, d. and ZHU, Y. Heavy metal contamination and risk assessment in water, paddy soil, and rice around an electroplating plant. *Environ. Sci. Pollut. Res.* [en línea]. 2011, 8(9), 1623–1632. [consulta 25 de noviembre 2022]. Disponible en: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11356-011-0523-3>
57. LUO, Ch., LIU, Ch., WANG, Y., LIU, X., LI, F., ZHANG, G. and LI, X. Heavy metal contamination in soils and vegetables near an e-waste processing site, south China. *Journal of Hazardous Materials.* [en línea]. 2011, 186(1), 481–490. [consulta 25 de noviembre

- 2022]. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0304389410014482>
58. WATERLOT, C., BIDAR, G., PELFRÊNE, A., ROUSSEL, H., FOURRIER, H. and DOUAY, F. Contamination, Fractionation and Availability of Metals in Urban Soils in the Vicinity of Former Lead and Zinc Smelters, France. *Pedosphere*. [en línea]. 2013, 23(2), 143–159. [consulta 25 de noviembre 2022]. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1002016013600028>
59. XU, D., ZHOU, P., ZHAN, J., GAO, Y., DOU, Ch. and SUN, Q. Assessment of trace metal bioavailability in garden soils and health risks via consumption of vegetables in the vicinity of Tongling mining area, China. *Ecotoxicology and Environmental Safety*. [en línea]. 2013, 90, 103–111. [consulta 25 de noviembre 2022]. Disponible en: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/23332794/>
60. GEBREKIDAN, A., WELDEGEBRIEL, Y., HADERA, A. and VAN DER BRUGGEN, B. Toxicological assessment of heavy metals accumulated in vegetables and fruits grown in Ginfel river near Sheba Tannery, Tigray, Northern Ethiopia. *Ecotoxicology and Environmental Safety*. [en línea]. 2013, 95, 171–178. [consulta 25 de noviembre]. Disponible en: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/23790523/>
61. KHAN, S., CHAO, C., WAQAS, M., ARP, H. and ZHU, Y. Sewage Sludge Biochar Influence upon Rice (*Oryza sativa* L) Yield, Metal Bioaccumulation and Greenhouse Gas Emissions from Acidic Paddy Soil. *Environmental Science & Technology*. [en línea]. 2013, 47(15), 8624–8632. [consulta 25 de noviembre]. Disponible en: <https://doi.org/10.1021/es400554x>
62. CHANG, C., YU, H., CHEN, J., LI, F., ZHANG, H. and LIU, C. Accumulation of heavy metals in leaf vegetables from agricultural soils and associated potential health risks in the Pearl River Delta, South China. *Environmental Monitoring and Assessment*. [en línea]. 2014, 186(3), 1547–1560. [consulta 25 de noviembre]. Disponible en: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/24185814/>
63. AUGUSTSSON, A., UDDH-SÖDERBERG, T, HOGMALM, K. and FILIPSSON, M. Metal uptake by homegrown vegetables - the relative importance in human health risk assessments at contaminated sites. *Environmental Research*. [en línea]. 2015, 138, 181–

190. [consulta 25 de noviembre]. Disponible en: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/25723126/>.
64. LIU, K., LV, J., HE, W., ZHANG, H., CAO, Y. and DAI, Y. Major factors influencing cadmium uptake from the soil into wheat plants. *Ecotoxicology and Environmental Safety*. [en línea]. 2015, 113, 207–213. [consulta 25 de noviembre]. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0147651314005600>
65. VERBRUGGEN, N., HERMANS, C. and SCHAT, H. Mechanisms to cope with arsenic or cadmium excess in plants. *Current Opinion in Plant Biology*. [en línea]. 2009, 12(3), 364–372. [consulta 25 de noviembre]. Disponible en: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/19501016/>
66. WHITE, P. and BROWN, P. Plant nutrition for sustainable development and global health. *Annals of Botany*. [en línea]. 2010, 105(7), 1073–1080. [consulta 25 de noviembre]. Disponible en: <https://www.mdpi.com/2071-1050/14/20/13223>
67. STREET, R., KULKARNI, M., STIRK, W. A., SOUTHWAY, C. and VAN STADEN, J. Effect of cadmium on growth and micronutrient distribution in wild garlic (*Tulbaghia violacea*). *South African Journal of Botany*. [en línea]. 2010, 76(2), 332–336. [consulta 25 de noviembre]. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0254629909003561>
68. HÉDIJI, H., DJEBALI, W., CABASSON, C., MAUCOURT, M., BALDET, P., BERTRAND, A., ZOGHLAMI, L., DEBORDE, Deborde, MOING, A., BROUQUISSE, R., CHAÏBI, W. and GALLUSCI, P. Effects of long-term cadmium exposure on growth and metabolomic profile of tomato plants. *Ecotoxicology and environmental safety*. [en línea]. 2010. 73, 8. [consulta 25 de noviembre]. Disponible en: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/20846723/>
69. DONG, J., WU, F and ZHANG, G. Effect of cadmium on growth and photosynthesis of tomato seedlings. *Journal of Zhejiang University. Science. B*. [en línea]. 2005, 6(10), 974–980. [consulta 25 de noviembre]. Disponible en: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC1390439/>
70. SABIR, M., BALTRÉNAITĖ-GEDIENĖ, E., DITTA, A., ULLAH, H., KANWAL, A., ULLAH, S. and FARAJ, T. Bioaccumulation of Heavy Metals in a Soil–Plant System from an Open Dumpsite and the Associated Health Risks through Multiple Routes.

- Sustainability. [en línea]. 2022, 14(20), 13223. [consulta 25 de noviembre]. Disponible en: <https://www.mdpi.com/2071-1050/14/20/13223>
71. MOUSAVI, S. and MOUDI, M. Assessment of phytoremediation potential of native plant species naturally growing in a heavy metal-polluted saline–sodic soil. *Environmental Science and Pollution Research*. [en línea]. 2020, 27(9), 10027–10038. [consulta 25 de noviembre]. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s11356-019-07578-6>
72. KANWAL, A., FARHAN, M., SHARIF, F., HAYYAT, M., SHAHZAD, L. and GHAFOR, G. Effect of industrial wastewater on wheat germination, growth, yield, nutrients and bioaccumulation of lead. *Scientific reports*. [en línea]. 2020, 10, 1. [consulta 25 de noviembre]. Disponible en: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/32647263/>
73. DRAZIC, G., MIHAILOVIC, N. and LOJIC, M. Cadmium accumulation in *Medicago sativa* seedlings treated with salicylic acid. *Biologia Plantarum*. [en línea]. 2006, 50(2), 239–244. [consulta 25 de noviembre]. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s10535-006-0013-5>
74. IBEKWE, A., ANGLE, J., CHANEY, R., VAN BERKUM, P. Zinc and Cadmium Toxicity to Alfalfa and Its Microsymbiont. *Journal of Environmental Quality*. [en línea]. 1996, 25, 1032–1040. [consulta 25 de noviembre]. Disponible en: <https://access.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.2134/jeq1996.00472425002500050015>
x
75. ANDRESEN, E. and KÜPPER, H. Cadmium Toxicity in Plants. In: SIGEL, R. (ed.), *Cadmium: From Toxicity to Essentiality*. [en línea]. Dordrecht: Springer Netherlands, 2013. p. 395–413. *Metal Ions in Life Sciences*. [consulta 25 de noviembre]. ISBN 978-94-007-5179-8. Disponible en: https://doi.org/10.1007/978-94-007-5179-8_13
76. KABIR, A., HOSSAIN, M., KHATUN, M., MANDAL, A. and HAIDER, S. Role of Silicon Counteracting Cadmium Toxicity in Alfalfa (*Medicago sativa* L.). *Frontiers in Plant Science*. [en línea]. 2016, 7, 1117. [consulta 25 de noviembre]. Disponible en: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2016.01117>
77. GARCÍA DE LA TORRE, V., COBA DE LA PEÑA, T., COBA DE LA PEÑA, J. and LUCAS, M. Cadmium-Tolerant and -Sensitive Cultivars Identified by Screening of *Medicago truncatula* Germplasm Display Contrasting Responses to Cadmium Stress.

- Frontiers in plant science. [en línea]. 2021, 12, 595001. [consulta 25 de noviembre].
Disponibile en: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/33777061/>
78. JÓCSÁK, I., KNOLMAJER, B., SZARVAS, M., RABNECZ, G. and PÁL-FÁM, F. Literature Review on the Effects of Heavy Metal Stress and Alleviating Possibilities through Exogenously Applied Agents in Alfalfa (*Medicago sativa* L.). *Plants*. [en línea]. 2022, 11(16), 2161. [consulta 25 de noviembre]. Disponible en: <https://www.mdpi.com/2223-7747/11/16/2161>
79. MCINTYRE, Terry. Phytoremediation of Heavy Metals from Soils. In: TSAO, David T. (ed.), *Phytoremediation*. Berlin, Heidelberg: Springer. [en línea]. 2003. 97–123. *Advances in Biochemical Engineering/Biotechnology*. [consulta 25 de noviembre]. ISBN 978-3-540-45991-0. Disponible en: https://doi.org/10.1007/3-540-45991-X_4
80. SAXENA, P., KRISHNARAJ, S., DAN, T., PERRAS, M. and VETTAKKORUMAKANKAV, N. Phytoremediation of Heavy Metal Contaminated and Polluted Soils. In: PRASAD, M. and HAGEMEYER, J., *Heavy Metal Stress in Plants*. [en línea]. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 1999. p. 305–329. [consulta 25 de noviembre]. ISBN 978-3-662-07747-4. Disponible en: http://link.springer.com/10.1007/978-3-662-07745-0_14
81. LAZCANO, C., GÓMEZ-BRANDÓN, M. and DOMÍNGUEZ, J. Comparison of the effectiveness of composting and vermicomposting for the biological stabilization of cattle manure. *Chemosphere*. [en línea]. 2008, 72(7), 1013–1019. [consulta 25 de noviembre]. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0045653508004797>
82. ROMAN, P., MARTINEZ, M and PÁTOJA, A. *Manual del compostaje del agricultor. Experiencias en América Latina*. [en línea]. Santiago de Chile., 2013. [consulta 25 de noviembre]. ISBN 978-92-5-307845-5. Disponible en: <https://www.fao.org/3/i3388s/i3388s.pdf>
83. DADA, E., NJOKU, K., OSUNTOKI, A. and AKINOLA, M. Heavy Metal Remediation Potential of a Tropical Wetland Earthworm, *Libyodrilus violaceus* (Beddard). *Iranica Journal of Energy and Environment*. [en línea]. 2016, 7(3), 247–254. [consulta 25 de noviembre]. Disponible en: <http://www.ijee.net/Journal/ijee/vol7/no3/6.pdf>
84. SHI, Z., LIU, J., TANG, Z., ZHAO, Y. and WANG, C. Vermiremediation of organically contaminated soils: Concepts, current status, and future perspectives. *Applied Soil*

- Ecology. [en línea]. 2020, 147,103377. [consulta 25 de noviembre]. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0929139319302379>
85. SANCHEZ-HERNANDEZ, J. Bioremediation of Agricultural Soils. CRC Press, Taylor&Francis Group, Boca Ratón. [en línea]. 2019. [consulta 25 de noviembre]. ISBN 978-1-138-65191-3. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/329482252_Bioremediation_of_Agricultural_Soils
86. PUTTEN, W., BARDGETT, R., BEVER, J., BEZEMER, M., CASPER, B., FUKAMI, T., KARDOL, P., KLIRONOMOS, J., KULMATISKI, A., SCHWEITZER, J., SUDING, K., VOORDE, T and WARDLE, D. Plant–soil feedbacks: the past, the present and future challenges. *Journal of Ecology*. [en línea]. 2013, 101(2), 265–276. [consulta 25 de noviembre]. Disponible en: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/1365-2745.12054>
87. AIRA, M., MONROY, F. and DOMÍNGUEZ, J. Earthworms strongly modify microbial biomass and activity triggering enzymatic activities during vermicomposting independently of the application rates of pig slurry. *The Science of the Total Environment*. [en línea]. 2007, 385(1–3), 252–261. [consulta 25 de noviembre]. Disponible en: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/16944346/>
88. ZHU, W., DU, W., SHEN, X., ZHANG, H. and DING, Y. Comparative adsorption of Pb²⁺ and Cd²⁺ by cow manure and its vermicompost. *Environmental Pollution (Barking, Essex: 1987)*. [en línea]. 2017, 227, 89–97. [consulta 25 de noviembre]. Disponible en: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/28458250/>
89. EDWARDS, C., ARANCON, N. and SHERMAN, R. *Vermiculture Technology: Earthworms, Organic Wastes, and Environmental Management*. [en línea]. USA: CRC Press, Taylor & Francis Group, Boca Ratón, Fl, 2010. [consulta 25 de noviembre]. ISBN 978-1-4398-0988-4.
90. LLOVERAS, J., DELGADO, I. and CHOCARRO, C. *La alfalfa. Agronomía y utilización*. [en línea]. España: Universitat de Lleida, 2020. [consulta 25 de noviembre]. ISBN 978-84-9144-234-9.
91. DOPAZO, H. and NAVARRO, Arcadi. *Evolución y Adaptación 150 Años después del Origen de la Especies*. [en línea]. Sociedad Española de Biología Evolutiva. España:

- Obrapropia S.L., 2009. [consulta 25 de noviembre]. ISBN 978-84-92910-05-2. Disponible en: <http://jdguez.webs.uvigo.es/wp-content/uploads/2012/01/darwin-y-las-lombrices-2009.pdf>
92. DADA, E., AKINOLA, M., OWA, S., DEDEKE, G., ALADESIDA, A., OWAGBORIAYE, F. and OLUDIPE, E. Efficacy of Vermiremediation to Remove Contaminants from Soil. *Journal of Health & Pollution*. [en línea]. 2021, 11(29), 210302. [consulta 25 de noviembre]. DOI 10.5696/2156-9614-11.29.210302. Disponible en: www.ncbi.nlm.nih.gov
93. DADA, E., NJOKU, K., OSUNTOKI, A. and AKINOLA, M. A review of current techniques of Physico-chemical and biological remediation of heavy metals polluted soil. *Ethiopian Journal of Environmental Studies and Management*. [en línea]. 2015, 8(5), 606–615. [consulta 25 de noviembre]. Disponible en: <https://www.ajol.info/index.php/ejesm/article/view/120489>
94. JANSSENS, T., ROELOFS, D. and VAN STRAALLEN, N. Molecular mechanisms of heavy metal tolerance and evolution in invertebrates. *Insect Science*. [en línea]. 2009, 16(1), 3–18. [consulta 25 de noviembre]. Disponible en: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/j.1744-7917.2009.00249.x>
95. MORGAN, J. and MORGAN, A. The distribution and intracellular compartmentation of metals in the endogeic earthworm *Aporrectodea caliginosa* sampled from an unpolluted and a metal-contaminated site. *Environmental pollution* (Barking, Essex: 1987). [en línea]. 1998, 99(2), 167–175. [consulta 25 de noviembre]. Disponible en: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/15093311/>
96. ODORIZZI, A. Parámetros genéticos, rendimiento y calidad forrajera en alfalfas (*Medicago sativa* L.) extremadamente sin reposo con expresión variable del carácter multifoliado obtenidas por selección fenotípica recurrente. [en línea]. Tesis de grado. Argentina: Universidad Nacional de Córdoba, 2015.
97. NUÑEZ, F. Manejo Integral del Cultivo de Alfalfa. [en línea]. Universidad Autónoma de Baja California, 2018, 1. [consulta 25 de noviembre]. ISBN 978-607-607-450-3. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/325733455_Manejo_Integral_del_Cultivo_de_Alfalfa/related#fullTextFileContent

98. MINAM. Glosario de Términos para la Gestión Ambiental Peruana. Dirección General de Políticas, Normas e Instrumentos de Gestión ambiental. Lima, Perú, 2012. Disponible en: https://drive.google.com/file/d/0B5KoyvhtT3cabUNKa0Vkn3BJQVk/view?usp=sharing&usp=embed_facebook
99. BLACKBURN, R. Biodegradable and Sustainable Fibres. [en línea]. Woodhead Publishing in Textiles. CRC. Press Boca Raton Boston New York Washinton DC., 2005. [consulta 25 de noviembre]. ISBN 978-1-84569-099-1. Disponible en: https://www.google.com.pe/books/edition/Biodegradable_and_Sustainable_Fibres/SkkAgAAQBAJ?hl=es-419&gbpv=1
100. CAMACHO BARREIRO, A. and ARIOS, L. Diccionario de términos ambientales. Publicaciones Acuario. La Habana: Centro Félix Varela, 2000. [consulta 25 de noviembre]. ISBN 978-959-7071-16-7.
101. RODRIGUEZ, N., MCLAUGHLIN, M. and PENNOCK, D. La contaminación del suelo: una realidad oculta. [en línea]. Leadell Pennock, Universidad de Saskatchewan. Roma, España: FAO, 2019. [consulta 25 de noviembre]. ISBN 978-92-5-131639-9. Disponible en: https://www.google.com.pe/books/edition/La_contaminaci%C3%B3n_del_suelo_una_realidad/EjumDwAAQBAJ?hl=es-419&gbpv=1&dq=LA+CONTAMINACION&printsec=frontcover
102. ALMOROX, J., LÓPEZ, F. and RAFAELLI, S. La degradación de los suelos por erosión hídrica. métodos de estimación. [en línea]. España: EDITUM, 2011. [consulta 25 de noviembre]. ISBN 978-84-8371-626-7. Disponible en: https://www.google.com.pe/books/edition/La_degradaci%C3%B3n_de_los_suelos_por_erosi/bSpiNY_nwOIC?hl=es-419&gbpv=1&dq=Degradaci%C3%B3n+de+suelos&printsec=frontcover Google-Books-ID: bSpiNY_nwOIC
103. ALFARO, M. Lombricultura: La Guia Completa Para Principiantes Para Comenzar Una Granja de Lombrices. CreateSpace Independent Publishing Platform, 2014. [consulta 25 de noviembre]. ISBN 978-1-5052-9996-0. Disponible en: Google-Books-ID: DjLVrQEACAAJ

104. MINAM. Estándra de calidad Ambiental (ECA) para suelo. Decreto Supremo No 011-2017-MINAM. Lima. Perú
105. BERNAL, C. Metodología de la Investigación 3era. Edición. [en línea]. Person Educación. Colombia, 2010. [consulta 25 de noviembre]. ISBN 978-958-699-128-5. Disponible en: www.pearsoneducacion.net
106. SÁNCHEZ, J. Metodología de la investigación científica y tecnológica. Madrid, España: Ediciones Díaz de Santos, 2012. [consulta 25 de noviembre]. ISBN 978-84-7978-624-3. Disponible en: Google-Books-ID: 8SA8KZyurk4C
107. STEEL, ROBERT, G. and ORLANDO, C. Bioestadística Principios Y Procedimientos 2ed. [en línea]. 1985. [consulta 25 de noviembre]. Disponible en: https://www.academia.edu/35066774/Steel_Robert_G_Bioestadistica_Principios_Y_Procedimientos_2ed
108. MINAM. Guía para Muestreo de Suelos. Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para suelo. Lima, Perú, 2013. Disponible en: <https://www.gob.pe/institucion/minam/informes-publicaciones/2702-guia-para-muestreo-de-suelos>
109. DI RIENZO, J., CASANOVES, F., BALZARINI, M., GONZALES, L., TABLADA, M. and ROBLEDO, C. Infostat - Software estadístico. [consulta 25 de noviembre]. InfoStat versión 2020. Centro de Transferencia InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina. Disponible en: <https://www.infostat.com.ar/>

ANEXOS

Anexo 1. Resultados del análisis de la caracterización del suelo del experimento



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 : SHEYLA MAYLI UNOCC VEGA

Departamento : JUNIN
Distrito : PILCOMAYO
Referencia : H.R. 76901-074C-22

Boit.: 5154

Provincia : HUANCAYO
Predio :
Fecha : 06/06/2022

Número de Muestra Lab	Claves	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
								Arena %	Limo %	Arcilla %			Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺	Al ³⁺ + H ⁺			
5763	W-30-1(SH-01)	7.59	2.78	14.41	2.42	21.2	95	80	31	9	Fr. A.	7.52	5.67	1.49	0.20	0.16	0.00	7.52	7.52	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 Lab.	Claves	Cd ppm
5763	W-30-1(SH-01)	16.85



Dr. Constantino Calderón Mendoza
Jefe del Laboratorio

Anexo 2. Resultados del análisis de Cd. en el vermicompost



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



**INFORME DE ANALISIS ESPECIAL DE
MATERIA ORGANICA**

SOLICITANTE : SHEYLA MAYLI UNOCC VEGA
PROCEDENCIA : JUNIN/ HUANCAYO/ TAMBO
REFERENCIA : H.R. 76902
BOLETA : 5154
FECHA : 08/06/2022

Nº LAB	CLAVES	Cd ppm
241	V-01	1.91



Dr. Constantino Calderon Mendoza
Jefe de Laboratorio

Anexo 3. Resultados del análisis de Cd en la parte aérea de alfalfa



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



INFORME DE ANALISIS ESPECIAL EN FOLIAR

SOLICITANTE : SHEYLA MAYLI UNOCC VEGA
PROCEDENCIA : JUNIN/ HUANCAYO/ PILCOMAYO
MUESTRA : PARTE AEREA
REFERENCIA : H.R. 78138
BOLETA : 5427
FECHA : 23/11/2022

N. Lab.	CLAVE DE CAMPO	Cd ppm
3396	T1.1 0g vermicompost parte aérea	0.43
3397	T1.2 0g vermicompost parte aérea	0.46
3398	T1.3 0g vermicompost parte aérea	0.67
3399	T2.1 60% vermi parte aérea	0.35
3400	T2.2 60g vermi parte aérea	0.70
3401	T2.3 60g vermi parte aérea	0.63
3402	T3.1 120g vermi parte aérea	0.65
3403	T3.2 120g vermi parte aérea	0.56
3404	T3.3 120g vermi parte aérea	0.70
3405	T4.1 180g vermi parte aérea	0.58
3406	T4.2 180g vermi parte aérea	0.56
3407	T4.3 180g vermi parte aérea	0.63
3408	T5.1 240g vermi parte aérea	0.74
3409	T5.2 240g vermi parte aérea	0.84
3410	T5.3 240g vermi parte aérea	0.38
3411	T6.1 300g vermi parte aérea	0.53
3412	T6.2 300g vermi parte aérea	0.56
3413	T6.3 300g vermi parte aérea	0.25



Dr. Constantino Calderón Mendoza
Jefe de 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

Anexo 4. Resultados del análisis de Cd en la raíz de alfalfa



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



INFORME DE ANALISIS ESPECIAL EN FOLIAR

SOLICITANTE : SHEYLA MAYLI UNOCC VEGA
PROCEDENCIA : JUNIN/ HUANCAYO/ PILCOMAYO
MUESTRA : RAIZ
REFERENCIA : H.R. 78137
BOLETA : 5427
FECHA : 23/11/2022

N. Lab.	CLAVE DE CAMPO	Cd ppm
3378	T1.1 0g vermicompost radicular	3.03
3379	T1.2 0g vermicompost radicular	2.76
3380	T1.3 0g vermicompost radicular	3.50
3381	T2.1 60% vermi radicular	1.77
3382	T2.2 60g vermi radicular	1.90
3383	T2.3 60g vermi radicular	1.56
3384	T3.1 120g vermi radicular	2.10
3385	T3.2 120g vermi radicular	2.11
3386	T3.3 120g vermi radicular	2.34
3387	T4.1 180g vermi radicular	2.84
3388	T4.2 180g vermi radicular	2.44
3389	T4.3 180g vermi radicular	3.05
3390	T5.1 240g vermi radicular	2.26
3391	T5.2 240g vermi radicular	2.14
3392	T5.3 240g vermi radicular	2.38
3393	T6.1 300g vermi radicular	3.53
3394	T6.2 300g vermi radicular	5.32
3395	T6.3 300g vermi radicular	6.10



Dr. Constantino Calderón Mendoza
Jefe de 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

Anexo 5. Resultados del análisis de Cd en el suelo al final del experimento



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



INFORME DE ANALISIS ESPECIAL EN SUELO

SOLICITANTE : SHEYLA MAYLI UNOCC VEGA
PROCEDENCIA : JUNIN/ HUANCAYO/ PILCOMAYO
REFERENCIA : H.R. 78128
BOLETA : 5427
FECHA : 23/11/2022

Lab	Número Muestra	Cd ppm
	Claves	
2647	W-24 TRATAMIENTO, T1.1 0g	19.10
2648	W-24 TRATAMIENTO, T1.2 0g	18.44
2649	W-24 TRATAMIENTO, T1.3 0g	18.76
2650	W-24 TRATAMIENTO, T2.1 60g	18.44
2651	W-24 TRATAMIENTO, T2.2 60 %	18.08
2652	W-24 TRATAMIENTO, T2.3 60g	17.93
2653	W-24 TRATAMIENTO, T3.1 120g	17.45
2654	W-24 TRATAMIENTO, T3.2 120g	17.44
2655	W-24 TRATAMIENTO, T3.3 120g	17.60
2656	W-24 TRATAMIENTO, T4.1 180g	16.94
2657	W-24 TRATAMIENTO, T4.2 180g	19.10
2658	W-24 TRATAMIENTO, T4.3 180g	17.93
2659	W-24 TRATAMIENTO, T5.1 240g	18.09
2660	W-24 TRATAMIENTO, T5.2 240g	17.12
2661	W-24 TRATAMIENTO, T5.3 240g	16.77
2662	W-24 TRATAMIENTO, T6.1 300g	16.23
2663	W-24 TRATAMIENTO, T6.2 300g	16.55
2664	W-24 TRATAMIENTO, T6.3 300g	17.11



Dr. Constantino Calderón Mendoza
Jefe del Laboratorio

Anexo 6
PANEL FOTOGRÁFICO



Figura 12. Lugar de muestreo



Figura 13. Instalación de las macetas



Figura 14. Peso de la maceta



Figura 15. Crecimiento final de las alfalfas



Figura 16. Preparación para el envío a ser analizado



Figura 17. Obtención de la parte radicular



Figura 18. Medición de la longitud de la parte aérea