

FACULTAD DE INGENIERÍA

Escuela Académico Profesional de Ingeniería Ambiental

Tesis

**Efecto de dos enmiendas orgánicas en la
fitorremediación de cadmio por dos plantas
cultivadas en suelo contaminado.
Sincos. 2022**

Susan Judith Castañeda Ferrer
Shalmery Carolina Canchan Torpoco

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 NÉSTOR 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 : 6 de Julio 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 de dos enmiendas orgánicas en la fitorremediación de cadmio por dos plantas cultivadas en suelo contaminado. Sincos. 2022 ", perteneciente al/la/los/las estudiante(s) Canchan Torpoco Shalmerly Carolina, Castañeda Ferrer Susan Judith, 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 20 % 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:) 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, **Canchan Torpoco Shalmery Carolina**, identificado(a) con Documento Nacional de Identidad No. 71316313, 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 de dos enmiendas orgánicas en la fitorremediación de cadmio por dos plantas cultivadas en suelo contaminado. Sincos. 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.

06 de Julio de 2023.



Canchan Torpoco Shalmery Carolina

DNI. No. 71316313

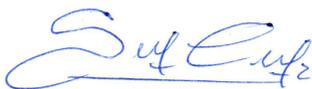
DECLARACIÓN JURADA DE AUTENTICIDAD

Yo, **Castañeda Ferrer Susan Judith**, identificado(a) con Documento Nacional de Identidad No. 74053755, de la E.A.P. de Ingeniería Ambiental de la Facultad de Ingeniería la Universidad Continental, declaro bajo juramento lo siguiente:

5. La tesis titulada: "Efecto de dos enmiendas orgánicas en la fitorremediación de cadmio por dos plantas cultivadas en suelo contaminado. Sincos. 2022", es de mi autoría, la misma que presento para optar el Título Profesional de Ingeniero Ambiental.
6. 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.
7. 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.
8. 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.

06 de Julio de 2023.



Castañeda Ferrer Susan Judith

DNI. No. 74053755

Tesis

INFORME DE ORIGINALIDAD

20%

INDICE DE SIMILITUD

18%

FUENTES DE INTERNET

3%

PUBLICACIONES

9%

TRABAJOS DEL
ESTUDIANTE

ENCONTRAR COINCIDENCIAS CON TODAS LAS FUENTES (SOLO SE IMPRIMIRÁ LA FUENTE SELECCIONADA)

1%

★ www.sabiia.cnptia.embrapa.br

Fuente de Internet

Excluir citas

Activo

Excluir coincidencias < 20 words

Excluir bibliografía

Activo

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, agradecemos al Dr. Andrés Alberto Azabache Leyton, por su orientación y tenaz apoyo que fueron necesarios para culminar el trabajo de investigación.

De igual manera agradecemos a la Universidad Continental, por la educación brindada durante los 5 años de etapa universitaria, inculcándonos no solo conocimientos, sino también valores que nos permitieron solucionar las distintas problemáticas con criterios éticos.

LAS AUTORAS

DEDICATORIA

A nuestros padres, por ser nuestro ejemplo de lucha de seguir adelante en todo momento, por su apoyo incondicional, por ser nuestro báculo y sostén, y por siempre creer en nosotras.

LAS AUTORAS

INDICE GENERAL

AGRADECIMIENTOS.....	ii
DEDICATORIA	iii
INDICE GENERAL.....	iv
INDICE DE FIGURAS	ix
RESUMEN	x
ABSTRACT.....	xi
INTRODUCCIÓN.....	xii
CAPÍTULO I:	1
PLANTEAMIENTO DEL ESTUDIO	1
1.1 Planteamiento y formulación del problema	1
1.1.1 Planteamiento del problema	1
1.1.2 Formulación del problema	2
1.2 Objetivos	2
1.2.1 General	2
1.3 Justificación e importancia	2
1.3.1 Justificación	2
1.3.2 Importancia	3
1.4 Hipótesis y descripción de variables	3
1.4.1 Hipótesis.....	3
1.4.2 Descripción de variables.....	4
CAPÍTULO II:	6
MARCO TEÓRICO.....	6
2.1 Antecedentes del problema	6
2.1.1 Nacionales	6
2.1.1 Internacionales.....	8
2.2 Bases teóricas	11
2.2.2 La fitorremediación	15
2.2.4 El biochar.....	22
2.2.5 El girasol	24
2.3 Definición de términos básicos	27
CAPITULO III:	30
METODOLOGÍA.....	30

3.1	Método y alcance de la investigación	30
3.1.1	Método de la investigación	30
3.1.2	Alcance de la investigación.....	32
3.2	Diseño de la investigación	33
3.2.1	Diseño experimental	33
3.2.2	Tratamientos	33
3.2.3	Procedimiento experimental	34
3.3	Población y muestra	38
3.3.1	Población	38
3.3.1	Muestra	38
3.4	Técnicas e instrumentos de recolección de datos	38
3.4.1	Altura de planta.....	38
3.4.2	Longitud de raíz.....	38
3.4.3	Materia seca aérea.....	38
3.4.4	Materia seca radicular.....	38
3.4.5	Análisis de cadmio en la parte aérea	39
3.4.6	Análisis de cadmio en la parte radicular	39
3.4.7	Contenido final de cadmio en el suelo.....	39
3.4.8	Factor de bioconcentración (FB)	39
3.4.9	Factor de traslocación (FT).....	39
3.4.10	Procesamiento de datos.....	40
CAPITULO VI: RESULTADOS Y DISCUSION		42
4.1	Resultados del tratamiento y análisis de la información	42
4.1.1	Concentración de cadmio y factores de bioconcentración y traslocación	42
4.1.1.1	Concentración de Cd en la parte aérea.....	42
4.1.1.2	Concentración de Cd en la parte radicular.....	43
4.1.1.3	Factor de bioconcentración en la parte aérea (FBa).....	43
4.1.1.4	Factor de bioconcentración en la parte radicular (FBr).....	44
4.1.1.5	Factor de bioconcentración total (FBt).....	45
4.1.1.6	Factor de traslocación (FT) de cadmio.....	46
4.1.2	Parámetros de crecimiento	46
4.1.2.1	Altura de planta.....	46
4.1.2.2	Longitud de raíz.....	47

4.1.2.3	Materia seca aérea.....	48
4.1.2.4	Materia seca radicular.....	48
4.1.3	Contenido final de cadmio en el suelo.....	49
4.2	Prueba de hipótesis.....	50
4.2.1	Hipótesis específica 1:.....	50
4.2.2	Hipótesis específica 2:.....	61
4.2.3	Hipótesis específica 3.....	68
4.3	Discusión de resultados.....	70
	CONCLUSIONES.....	74
	RECOMENDACIONES.....	75
	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	76
	ANEXOS.....	85

INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Operacionalización de variables	5
Tabla 2. Contenido de Cd en suelos afectados por actividades industriales (31).....	13
Tabla 3. Tratamientos en estudio.	34
Tabla 4. Resultados del análisis físico – químico del suelo del experimento.....	35
Tabla 5. Resultados del análisis inicial de Cadmio del suelo.....	36
Tabla 6. Preparación y disposición de los tratamientos y repeticiones.....	36
Tabla 7. Esquema del análisis de variancia del Diseño Completamente al Azar (DCA) con arreglo factorial 2 x 3	40
Tabla 8. Resultados de la concentración de cadmio (Cd) en la parte aérea. Sincos. 2022.....	42
Tabla 9. Resultados de la concentración de cadmio (Cd) en la raíz. Sincos. 2022.....	43
Tabla 10. Resultados del FBa. Sincos. 2022.....	43
Tabla 11. Resultados del FBr de Cd. Sincos. 2022.....	44
Tabla 12. Resultados del FBt de Cd en maíz y girasol. Sincos. 2022.	45
Tabla 13. Resultados del FT de Cd. Sincos. 2022.....	46
Tabla 14. Resultados de la altura de planta. Sincos. 2022.....	46
Tabla 15. Resultados de la longitud de raíz. Sincos. 2022.....	47
Tabla 16. Resultados de la materia seca aérea. Sincos. 2022.....	48
Tabla 17. Resultados de la materia seca radicular. Sincos. 2022.....	48
Tabla 18. Resultados del contenido final de Cd en el suelo. Sincos. 2022.....	49
Tabla 19. Prueba de normalidad de Shapiro-Wilks para la concentración de Cd en la parte aérea. 50	
Tabla 20. Análisis de variancia para la concentración de Cd en la parte aérea (mg/kg).	51
Tabla 21. Prueba de Duncan para la interacción A x B.	51
Tabla 22. Prueba de normalidad de Shapiro-Wilks para la concentración de Cd en la parte radicular.	52
Tabla 23. Análisis de variancia para la concentración de Cd en la parte radicular (mg/kg).	53
Tabla 24. Prueba de Duncan para los niveles del factor B.....	53
Tabla 25. Prueba de normalidad de Shapiro-Wilks para el FBa.....	54
Tabla 26. Análisis de variancia para el FBa.....	55
Tabla 27. Prueba de Duncan para la interacción A x B para FBa	55
Tabla 28. Prueba de normalidad de Shapiro-Wilks para el FBr.....	56
Tabla 29. Análisis de variancia para el FBr.	57
Tabla 30. Prueba de Duncan para la interacción A x B para FBr.....	57

Tabla 31. Prueba de normalidad de Shapiro-Wilks para el FBt.....	58
Tabla 32. Análisis de variancia para el FBt.	59
Tabla 33. Prueba de Duncan para la interacción A x B para FBt	59
Tabla 34. Prueba de normalidad de Shapiro-Wilks para el FBt.....	60
Tabla 35. Análisis de variancia para el FT.....	61
Tabla 36. Prueba de normalidad de Shapiro-Wilks para la altura de planta.	62
Tabla 37. Análisis de variancia para la altura de planta.	62
Tabla 38. Prueba de Duncan para los niveles del factor B.	63
Tabla 39. Prueba de normalidad de Shapiro-Wilks para la longitud de raíz.....	63
Tabla 40. Análisis de variancia para longitud de raíz.	64
Tabla 41. Prueba de normalidad de Shapiro-Wilks para la materia seca aérea.	65
Tabla 42. Análisis de variancia para la materia seca aérea.....	65
Tabla 43. Prueba de Duncan para los niveles del factor A.....	66
Tabla 44. Prueba de Duncan para los niveles del factor B.	66
Tabla 45. Prueba de normalidad de Shapiro-Wilks para la materia seca radicular.	67
Tabla 46. Análisis de variancia para la materia seca radicular.....	67
Tabla 47. Prueba de Duncan para los niveles del factor A.....	68
Tabla 48. Prueba de normalidad de Shapiro-Wilks para el contenido final de Cd en el suelo (mg/kg)	69
Tabla 49. Análisis de variancia para el contenido final de Cd en el suelo (mg/kg).	69
Tabla 50. Prueba de Duncan para la interacción A x B para contenido final de Cd en el suelo (mg/kg).....	70

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Representación esquemática del daño causado por el cadmio en las plantas (40)	15
Figura 2. Esquema que muestra la naturaleza interdisciplinarian de la fitorremediación (44).....	17
Figura 3. Principales rutas de tratamientos post cosecha de plantas fitorremediadoras (44).....	20
Figura 4. Disminución del cadmio disponible mediante enmiendas orgánicas (3).....	22
Figura 5. Mecanismos de interacciones del biochar con contaminantes inorgánicos (71)	24
Figura 6. Ubicación de los puntos de muestreo de suelos.....	34
Figura 7. Diagrama metodológico del proceso experimental.....	41

RESUMEN

Objetivo: Determinar el efecto de dos enmiendas orgánicas en la fitorremediación de cadmio por dos especies cultivadas en suelo contaminado de Sincos. Se muestreó un suelo agrícola de Sincos en su capa arable y se aplicó 6 tratamientos, en un experimento bajo cobertor con macetas de PVC, constituidos por dos factores, el factor A: especies de plantas: maíz (*Zea mays* L.) y girasol (*Helianthus annuus* L.) y el factor B: enmiendas orgánicas: sin enmiendas (SE), biochar (BC) y vermicompost (VC), a una dosis de 10%, distribuidos en un Diseño Completamente al Azar (DCA) con arreglo factorial 2 x 3. Los tratamientos de maíz sin enmienda, maíz con VC y girasol con BC acumularon más Cd en la parte aérea. La concentración de Cd en la parte aérea fue mayor que en la raíz de ambas especies. El factor de bioconcentración total fue significativamente mayor para maíz con VC, maíz SE y girasol SE. La altura de planta de ambas especies fue favorecida significativamente por el biochar. La materia seca aérea y radicular fue significativamente mayor en maíz con VC, respecto al girasol. El contenido de Cd al final del experimento disminuyó en 53.154% con el tratamiento de girasol y biochar. Se concluye que el maíz y girasol son especies exclusoras y fitoestabilizadoras.

Palabras clave: fitorremediación, vermicompost, biochar, *Zea mays* L., *Helianthus annuus* L.

ABSTRACT

Objective: To determine the effect of two organic amendments on cadmium phytoremediation by two species cultivated in contaminated soil from Sincos. An agricultural soil from Sincos was sampled in its arable layer and 6 treatments were applied, in an experiment under cover with PVC pots, consisting of two factors, factor A: plant species: corn (*Zea mays* L.) and sunflower (*Helianthus annuus* L.) and factor B: organic amendments: without amendments (SE), biochar (BC) and vermicompost (VC), at a dose of 10%, distributed in a Completely Random Design (DCA) with factorial arrangement 2 x 3. The treatments of maize without amendment, maize with VC and sunflower with BC accumulated more Cd in the aerial part. The concentration of Cd in the aerial part was higher than in the root of both species. The total bioconcentration factor was significantly higher for corn with VC, corn SE and sunflower SE. The plant height of both species was significantly favored by the biochar. Aerial and root dry matter was significantly higher in corn with VC than in sunflower. The Cd content at the end of the experiment decreased by 53.154% with the sunflower and biochar treatment. It is concluded that corn and sunflower are excluding and phytostabilizing species.

Keywords: phytoremediation, vermicompost, biochar, Zea mays L., Helianthus annuus L.

INTRODUCCIÓN

En la actualidad el rápido incremento de la industrialización incrementa la producción de residuos y el aumento de las actividades agrícolas, minería, agua de riego contaminada y efluentes industriales contribuyen a la contaminación del suelo debido a la acumulación de contaminantes (1).

Los seres humanos empleamos los recursos contaminados con metales pesados para producir alimentos, que eventualmente se acumulan en los canales alimenticios. La descontaminación de estos recursos no renovables, como el suelo, permitirá evitar los impactos negativos en la salud.

La fitorremediación es una estrategia promisoriosa, y real, de remoción de metales pesados de áreas contaminadas, basado en el empleo de especies acumuladoras que son tolerantes a los metales pesados en el sistema suelo.

En esta técnica, las especies vegetales, cultivadas y no cultivadas son utilizadas para remover, descomponer y descontaminar metales peligrosos. Para la descontaminación, cinco técnicas de remediación han sido utilizadas: fitoestabilización, fitodegradación, rizofiltración, fitoextracción y fitovolatilización.

Por lo tanto, la utilización de plantas fitorremediadoras pueden ser asistidas con enmiendas que mejoran las propiedades del suelo, especialmente la actividad microbial para descontaminar los suelos.

El presente trabajo consta de cuatro capítulos, el Capítulo I, sobre Planteamiento del Estudio, incluye planteamiento y formulación del problema, objetivos, justificación e importancia, hipótesis y descripción de variables. El Capítulo II, del Marco Teórico, incluye los antecedentes del problema, nacionales e internacionales, las bases teóricas y la definición de términos básicos. El Capítulo III, sobre la Metodología, incluye el método y alcance de la investigación, tipo y nivel de investigación, diseño de la investigación, población y muestra, técnicas e instrumentos de recolección de datos. El Capítulo IV, de los Resultados y Discusión, incluye 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. Se incluye en el documento las Conclusiones, Recomendaciones y Referencias Bibliográficas.

CAPÍTULO I:

PLANTEAMIENTO DEL ESTUDIO

1.1 Planteamiento y formulación del problema

1.1.1 Planteamiento del problema

En los suelos del valle del Mantaro, la contaminación es un problema que se incrementa cada vez más, debido principalmente al uso de aguas del río del mismo nombre en el riego de este recurso natural, lo cual incrementa la concentración de metales pesados, entre otros contaminantes, y afecta a las plantas cultivadas, así como a los organismos del suelo e indirectamente a los consumidores de las cosechas de los cultivos.

Esto genera la necesidad de mitigar la contaminación del suelo, y permitir seguir cultivando las especies alimenticias en estos suelos. Entre las técnicas utilizadas para este efecto, está la fitorremediación, que es un enfoque eco amigable para la remediación de suelos y aguas, usando plantas. La fitorremediación comprende dos componentes, uno, los microbios colonizadores de la raíz y el otro las propias plantas, que absorben o degradan los compuestos tóxicos a otros metabolitos no tóxicos (2)

El maíz es el segundo cultivo en importancia en el valle del Mantaro, después del cultivo de papa, y junto con el girasol, han sido reportados como especies vegetales que absorben contaminantes, cuando crecen en suelos con alta concentración de metales pesados.

En suelos agrícolas contaminados con cadmio (Cd), la técnica de inmovilización química denominada también como estabilización implica la aplicación de enmiendas para inmovilizar metales a través de diversas reacciones biológicas y químicas, representando una solución realista, rentable, simple, de rápida implementación y sostenibilidad ambiental (3) .

Dado que rutinariamente se generan grandes volúmenes de desechos orgánicos de la agricultura y de las actividades pecuarias, estos materiales pueden proporcionar grandes volúmenes para tratar extensas tierras agrícolas contaminadas (4) .

En este contexto, es de interés utilizar enmiendas orgánicas, para evaluar su influencia en la fitorremediación de suelos contaminados con metales pesados, debido a que las técnicas de remediación de suelos deben ser sostenibles y que no alteren el ambiente, y generar información que pueda ser utilizada en otros suelos contaminados.

1.1.2 Formulación del problema

1.1.2.1 Problema general

¿Cuál es el efecto de dos enmiendas orgánicas en la fitorremediación de cadmio por dos plantas cultivadas en suelo contaminado de Sincos?

1.1.2.2 Problemas específicos

- ¿En qué medida el biochar y el vermicompost influyen en la fitorremediación de cadmio por maíz y girasol?
- ¿Cuál es el efecto del biochar y el vermicompost en los parámetros de altura de la planta, longitud de raíz, materia seca aérea y materia seca radicular, de girasol y maíz en un suelo contaminado de Sincos?
- ¿Cómo influye la fitorremediación de girasol y maíz en la concentración de cadmio en el suelo contaminado de Sincos?

1.2 Objetivos

1.2.1 General

Determinar el efecto de dos enmiendas orgánicas en la fitorremediación de cadmio por dos plantas cultivadas en suelo contaminado de Sincos

1.2.2 Específicos

- Determinar la concentración de cadmio en maíz y girasol, así como los factores de bioconcentración y traslocación.
- Determinar el efecto del biochar y el vermicompost en altura de la planta, longitud de raíz, materia seca aérea y materia seca radicular de maíz y girasol.
- Determinar la concentración de cadmio en un suelo contaminado de Sincos, después de la fitorremediación.

1.3 Justificación e importancia

1.3.1 Justificación

La evaluación del efecto de materiales orgánicos en la fitorremediación de metales pesados, con el uso de plantas cultivadas, permitirá cuantificar la cantidad de cadmio que absorben y los indicadores hallados permitirá utilizar esta técnica en diferentes suelos contaminados, no solo con contaminantes inorgánicos sino también con contaminantes orgánicos.

1.3.2 Importancia

Los datos de fitorremediación de suelos contaminados con cadmio, utilizando como coadyuvantes materiales orgánicos, tienen utilidad como información académica en la descontaminación de suelos, y a la vez la validan una técnica de bajo costo, que estaría al alcance de las personas interesadas en descontaminar los suelos, y es amigable con el ambiente, con la condición que es a largo plazo.

1.4 Hipótesis y descripción de variables

1.4.1 Hipótesis

1.4.1.1 General

Las enmiendas orgánicas afectan significativamente la fitorremediación de cadmio por dos plantas cultivadas en un suelo contaminado de Sincos

1.4.1.2 Específicas

Hipótesis específica 1

Ho₁: El biochar y el vermicompost no influyen significativamente en la fitorremediación de cadmio por maíz y girasol.

Ha₁: El biochar y el vermicompost influyen significativamente en la fitorremediación de cadmio por maíz y girasol.

Hipótesis específica 2

Ho₂: El biochar y el vermicompost no influyen significativamente los parámetros de crecimiento de maíz y girasol: altura de planta, longitud de raíz, materia seca aérea y materia seca radicular.

Ha₂: El biochar y el vermicompost influyen significativamente los parámetros de crecimiento de maíz y girasol: altura de planta, longitud de raíz, materia seca aérea y materia seca radicular.

Hipótesis específica 3

Ho₃: La fitorremediación no influye significativamente en la concentración de cadmio en un suelo contaminado de Sincos

Ha₃: La fitorremediación influye significativamente en la concentración de cadmio en un suelo contaminado de Sincos.

1.4.2 Descripción de variables

1.4.2.1 Variables independientes

X1 = Biochar

X2 = Vermicompost

Indicador:

% en peso

1.4.2.2 Variables dependientes

Y1 = Fitorremediación

Indicadores:

mg Cd/kg materia seca

Factor de bioconcentración (FB)

Factor de traslocación (FT)

Y2 = crecimiento de maíz y girasol

Indicadores:

Altura de planta

Longitud de raíz

Materia seca aérea

Materia seca radicular

Y3 = concentración de cadmio en el suelo

Indicador:

mg Cd total/kg suelo

Tabla 1. Operacionalización de variables

Variables	Definición conceptual	Dimensiones	Indicadores
Independiente (X1): Biochar	Sub producto rico en carbono que se produce cuando la biomasa (residuos agrícolas, madera, estiércol, u otros materiales orgánicos) son calentados a través del proceso de pirolisis en un ambiente sin oxígeno (2)	Dosis de biochar	% en peso
Independiente (X2): Vermicompost	Excremento de lombrices dedicadas especialmente a transformar los residuos orgánicos, que generan un abono orgánico de buena calidad, y que mejora propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo y favorece el crecimiento de las plantas (5)	Dosis de vermicompost	% en peso
Dependiente (Y ₁): Fitorremediación	La fitorremediación es el proceso que introduce plantas dentro de un ambiente, como el suelo, y permite asimilar los contaminantes en raíces y hojas (6).	Concentración Cd	mg Cd/kg material seca
		Factor de BC	Cd planta/Cd suelo
		Factor de traslocación	Cd hojas/Cd raíz
Dependiente (Y ₂): Crecimiento de maíz y girasol	Acumulación de biomasa y puede ser medido por área foliar, peso de tallos, raíces y total, o altura de planta, y pueden ser usados para comparar entre cultivares (2)	Altura de planta	cm
		Longitud de la raíz	cm
		Materia seca aérea	g
		Materia seca radicular	g
Dependiente (Y ₃): Cd en el suelo	Metal pesado no esencial naturalmente presente en todos los suelos. Se presenta como catión divalente en un rango de concentración de 0.1 a 1.0 mg/kg (7)	Concentración de Cd total en el suelo	mg Cd total/kg suelo.

CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO

2.1 Antecedentes del problema

2.1.1 Nacionales

En el trabajo de investigación titulado “Fitorremediación con enmiendas orgánicas en suelos contaminados con metales pesados por el complejo metalúrgico La Oroya, Junín”, se desarrolló un experimento en base a una población de 105 m² de suelo contaminado con metales pesados y 900 plantas de *Phalaris aquatica*. La muestra fue de 270 plantas y 72 muestras de suelo. Se empleó el muestreo probabilístico. La concentración inicial fue de 811.16 mg Pb/kg, 78.41 mg As/kg y 2.13 mg Cd/kg. Los resultados finales mostraron una concentración de 1.51 mg Cd/kg en el tratamiento con aserrín, 1.08 mg Cd/kg en el tratamiento con guano de cuy y 0.43 mg Cd/kg en el tratamiento con guano de isla. Para As las concentraciones fueron 57.85 mg/kg en el tratamiento con aserrín, 34.25 mg As/kg en el tratamiento con guano de cuy y 8.95 mg As/kg en el tratamiento con guano de isla. Para Pb la concentración final fue de 597.86 mg/kg en el tratamiento con aserrín, 496.95 mg/kg en el tratamiento con guano de cuy y 153.44 mg/kg en el tratamiento con guano de isla. Se concluyó que la especie *P. aquatica* con enmiendas orgánicas influye significativamente en la disminución de la concentración de metales pesados del suelo (8)

En el trabajo de investigación titulado “Fitoextracción de cadmio y zinc en suelos contaminados utilizando *Lactuca sativa* var. White Boston, en la Estación Agropecuaria Experimental El Mantaro – Junín 2019”, se trabajó con muestras de tres áreas de terreno. El suelo A tuvo 20.92 mg Cd/kg y 36.7 mg Zn/kg. El suelo B tuvo 6.75 mg Cd/kg y 299.21 mg Zn/kg. El suelo C tuvo 12.30 mg Cd/kg y 202.39 mg/kg. Al final del periodo experimental el suelo A tuvo: 3.519 mg Cd/kg y 227.86 Zn/kg; en el suelo B 3.39 mg Cd/kg y 221.01 mg Zn/kg; en el suelo C 2.67 mg Cd/kg y 149.18 mg Zn/kg. Los contenidos en hoja y raíz fueron: en el suelo A: 1.14 y 2.47 ppm de Cd, 98.95 y 68.93 ppm de Zn; en el suelo B: 1.57 y 3.25 ppm Cd, 170.36 y 90.93 ppm Zn; en el suelo C: 0.63 y 3.92 ppm de Cd y 92.64 y 80.07 ppm de Zn (9) .

En el trabajo de investigación titulado “Uso de enmiendas para la reducción del contenido de cadmio en los granos de cacao orgánico en la parcela de la Cooperativa Agraria

Industrial Naranjillo”, se tuvo como objetivo determinar el efecto de la dolomita, bocashi, roca fosfórica y zeolita en la disminución de Cd en granos de cacao. Se seleccionó dos parcelas de Uchiza y Nuevo Progreso con contenidos de 2.157 ppm y 3.235 ppm. Los resultados mostraron que las aplicaciones de enmiendas mejoraron las propiedades químicas: pH, materia orgánica, fósforo, potasio y CIC. El tratamiento de materia orgánica + zeolita en dosis de 4.50 kg + 0.45 kg disminuyó en 0.55% el Cd en almendras. Las correlaciones de cadmio en las almendras de cacao, presentaron alta significancia con pH, materia orgánica y CIC (10).

En el trabajo de investigación titulado: “Eficiencia del compostaje y vermicompostaje en la biorremediación de suelos contaminados con cadmio y plomo por pasivos ambientales mineros de Huamantanga – Canta” se desarrollo cuatro tratamientos de compost y cuatro tratamientos con vermicompostaje. Las concentraciones iniciales de metales pesados en el suelo fueron 8.8 mg Cd/kg y 11134.13 mg Pb/kg. En los tratamientos con vermicompostaje el tratamiento T1V (2.5 kg estiércol de cuy, 250 g de *Eisenia foetida*, 5 kg de residuos orgánicos y 10 kg de suelo contaminado) presentó 76.99% de biorremediación para Pb y 75.14 % para Cd. En los tratamientos con compostaje fue más eficiente el tratamiento T3C (7.5 kg de estiércol de cuy, 5 kg de residuos orgánicos y 10 kg de suelo contaminado) presentó una eficiencia de 47.10 % de biorremediación de Cd y 52.75% de biorremediación para Pb. En el presente estudio el tratamiento con vermicompostaje fue más eficiente (11)

En el trabajo de investigación titulado: “Remoción de cadmio y plomo en suelos a orillas del río Mantaro, Junín, mediante fitorremediación con girasol (*Helianthus annuus*) y maíz (*Zea mays*) usando enmiendas” se utilizó 50 kg de muestra de suelo contaminado con Cd y Pb, distrito de Huaripampa, con cuatro tratamientos: compost, humus, compost + humus y testigo. Los tratamientos fueron dispuestos en un diseño factorial. Se condujo el experimento durante 64 días. El girasol absorbió más Pb y Cd. El maíz absorbió más Cd. Se logró 11% de remoción de Cd y 9.951% de remoción de Pb. La mayor concentración de metales se tuvo en la raíz. Los mejores resultados de este estudio se dieron con el maíz usando compost + humus (12).

En el trabajo de investigación titulado: “Eficiencia del biochar en la inmovilización del cadmio, en el suelo agrícola Cupiche, Ricardo Palma, 2019”, se utilizó residuos de quelite (*Amaranthus hybridus* L.) para elaborar el biochar. Se aplicó 10% y 15% de biochar a 6 muestras de suelo. El experimento se desarrolló durante 60 días. Los resultados mostraron

que el tratamiento de biochar al 10% logró un 59.89% de disminución de Cd en el suelo, y con 15% de biochar se logró disminuir 60% del cadmio en el suelo (13)

En el trabajo de investigación titulado: “Fitorremediación en suelos contaminados con Cd usando girasol (*Helianthus annuus* L. var. Sunbright)” se realizaron dos experimentos en macetas bajo condiciones de invernadero. En el primero se probaron concentraciones de 0, 10, 15, 20 y 25 mg Cd/kg suelo y se evaluó la altura, producción de materia seca y concentración de Cd en raíz, tallo, hoja e inflorescencia a los 84 días. Para el segundo, la concentración fue de 20 mg Cd/kg suelo y se evaluó a los 35, 49, 63, 75 y 84 días la concentración de Cd en los mismos órganos. Las dosis de Cd no tuvieron efecto en la altura de planta ni en la producción de materia seca, siendo el índice de tolerancia (IT) equivalente a 1, lo que demostró su alta tolerancia por este metal. Se encontró que al incrementar la dosis de Cd también se aumentó la concentración de Cd en la planta. La raíz concentró más Cd que la parte aérea, al margen de la época de evaluación. El factor de bioconcentración fue mayor que 1 y el factor de traslocación menor que 1, por lo que se concluyó que el girasol se comportaría como un fitoestabilizador de Cd (14)

En el trabajo de investigación titulado: “Efecto del biocarbon obtenido a partir de biomasa residual agrícola en la inmovilización de cadmio en el suelo en fase de laboratorio”, se elaboró biocarbon a partir de cascara de *Theobroma cacao* L., cascarilla de *Oriza sativa* y cascarilla de *Coffea arabica*. Se prepararon bolsas con suelo agrícola mezclado con biocarbon en proporciones de 6%, 8% y 10% y se sembraron plantas de *Theobroma cacao*, dispuestas en un diseño complete al azar con arreglo factorial 3 x 3 con 5 repeticiones más un tratamiento sin biocarbón como testigo. El biocarbon de *C. arabica* y *O. sativa* presentó efectos significativos en número de hojas, diámetro de tallo y peso fresco de plantas. El biocarbon disminuyó el contenido de Cd en plantas, con efectos significativos en cascarilla de *T. cacao* en proporciones de 6%, 8% y 10%. La mayor eficiencia de inmovilización de Cd se observó con biocarbon de cascarilla de *O. sativa* en dosis de 8% con una inmovilización de 88.22%. Se concluyó que la aplicación de biocarbon fue efectiva en la inmovilización de Cd en el suelo al reducir la disponibilidad en las plantas de *T. cacao* (15)

2.1.1 Internacionales

En el trabajo de investigación titulado: “Effects of swine manure biochar on sorption equilibrium of cadmium and zinc in Sandy soils” se realizaron pruebas de sorción agregando soluciones de Zn ($ZnCl_2$) o Cd ($CdCl_2$) en diferentes concentraciones (0, 2.5, 5, 10, 50 y 100 mg.L⁻¹) a muestras de suelo mezcladas con diversas dosis de biocarbón de estiércol de

porcino (0, 0.25, 0.75, 1.5 y 3 %, w/w). Los datos fueron modelados según las isothermas de Freundlich y Langmuir para describir los procesos de adsorción. El modelo de Langmuir representó mejor los datos ($r^2 > 0.97$), lo que indica una adsorción en monocapa a la superficie del suelo. Los resultados mostraron que la capacidad de sorción de Zn y Cd aumentó con la dosis de biocarbón, mejorando la retención de metales. Estos resultados sugieren que el biocarbón de estiércol de porcino tiene el potencial de mitigar la contaminación por Zn y Cd en suelos arenosos (16)

En el trabajo de investigación titulado: “Efectos de la aplicación del biochar en un suelo contaminado por elementos traza” se estudio los efectos de la aplicación de dos tipos de biochar, el de cascarilla de arroz y de hueso de aceituna en suelos contaminados con elementos traza, con distinto grado de acidez: ácido y moderadamente ácido. Esta zona fue afectada por vertido de lodos con metales pesados de Aznalcóllar (España) en 1998. Después de 20 meses de aplicación de biochar se midió su efecto en las propiedades físicas y químicas de los suelos. Los resultados obtenidos mostraron un incremento del pH del suelo, incrementa la retención de agua y por tanto la humedad del suelo, así como aumentó el carbono orgánico y materia orgánica del suelo. Estos resultados sugieren una mejora parcial de algunas propiedades físicas y químicas del suelo contaminado por elementos traza al ser enmendados con biochar, facilitando su recuperación y el desarrollo de la vegetación (17)

En el trabajo de investigación titulado: “Tratamiento de suelos contaminados por metales mediante combinación de técnicas de fitorremediación con adición de biochar”, se preparó y caracterizó biochar procedente de tres residuos ganaderos. Los resultados mostraron que la temperatura de pirolisis y el tipo de residuos afecta las propiedades físicas y químicas del biochar. Al aplicar el biochar (10% en masa) a 10 suelos mineros, afectó en forma variable la movilidad de los metales pesados debido al tipo de suelo, además aumentó el pH y la conductividad eléctrica de los suelos. Al evaluar el potencial de mineralización del carbono por parte de los microorganismos de los 10 suelos mineros se incrementó el coeficiente metabólico (qCO_2). Finalmente, al evaluar la combinación de fitorremediación de colza (*Brassica napus*) con 10% de biochar, se disminuyó la biomasa microbiana y la concentración de Co, Cu, Cr, Se, As y Pb. La colza disminuyó su factor de traslocación y su factor de bioacumulación en sus tejidos (18)

En el trabajo de investigación titulado: “Evaluación de la efectividad del biocarbón para mejorar la estrategia de fitoestabilización asistida de residuos mineros” se propuso la

utilización de técnicas de fitorremediación asistida para la rehabilitación ambiental del depósito minero Cabezo Rajao de Cartagena-La Unión (Colombia) que se encuentran contaminados por metales pesados. Se evaluó la efectividad del biocarbón junto con compost y residuos de caliza (carbonato de calcio) mediante la construcción de parcelas. Los resultados mostraron un incremento significativo del pH del suelo, que pasa de ser ácido a valores de 7.6. Esta neutralización condujo a una reducción de la movilidad del cadmio. Todas las combinaciones de enmiendas mejoraron las propiedades del suelo, principalmente la salinidad. Después de 120 días de la siembra *Piptatherum miliaceum* acumuló cadmio en la parte aérea por debajo de los niveles de toxicidad y un factor de traslocación inferior a 1 en todas las combinaciones de enmiendas. *Coronilla juncea* mostró factores de traslocación y bioacumulación mayores que *P. miliaceum*, pero sin sobrepasar el nivel máximo de toxicidad en plantas (19)

En el trabajo de investigación titulado: “Fitoestabilización de metales pesados provenientes de jales mineros utilizando biocarbón como enmienda orgánica”, el objetivo fue evaluar la fitoestabilización de jales (residuos mineros) contaminados con Cd, Cu, Fe, Pb y Zn utilizando biocarbón incorporado con las especies *Sarvitalia procumbens* y *Crotalaria pumila* en condiciones de invernadero. El biocarbón se obtuvo de cáscara de coco. Los tratamientos fueron cuatro, con proporciones de 12.5% a 50% de biocarbón para *S. procumbens* y de 6.25% a 25% de biocarbón para *C. pumila*. Los tratamientos con mayor biomasa fueron con 12.5% y 25% de biocarbón con *C. pumila*. Para *S. procumbens* la aplicación de 12.5% de biocarbón tuvo la mayor biomasa aérea y radicular. *C. pumila* acumuló cuatro metales pesados: Fe>Pb>Zn>Cd durante 120 días de experimentación. *S. procumbens* acumuló 5 metales pesados: Fe>Zn>Pb>Cu>Cd en 150 días de exposición. Se observó que a mayor porcentaje de biocarbón, menor acumulación de metales pesados en raíz y tallo para las dos especies. Se propone utilizar biocarbón incorporado al sustrato jale para reducir la biodisponibilidad de metales pesados en el suelo y evitar que entren a las cadenas tróficas (20)

En el trabajo de investigación titulado: “Vermicompost Assisted Phytoremediation of Heavy Metal Contaminated Soil in Madaka District, Nigeria Using *Melissa officinalis* L. (Lemon balm) and *Sida acuta* (Stubborn weed)”, se utilizó técnicas ambientalmente amigables para aplicarlas a dos suelos contaminados de Shikira. Se obtuvo vermicompost de estiércol de gallina y de estiércol de cabra para asistir el proceso de fitorremediación con bacterias promotoras de crecimiento. Para el suelo de Angwan Kawo (AK) las concentraciones de *M.*

officinalis fueron: 0.007 a 0.33 mg Cd/kg, 0.09 a 4.39 mg As/kg y 0.07 a 10.35 mg Pb/kg, mientras que para *S. acuta* fueron: 0.002 a 0.43 mg Cd/kg, 0.27 a 3.79 mg/kg y 1.68 a 10.7 mg Pb/kg. Para el suelo de Angwan Magiro (AM) las concentraciones en *M. officinalis* fueron: 0.03 a 0.41 mg Cd/kg, 0.65 a 4.65 mg As/kg y 1.93 a 11.49 mg Pb/kg; mientras que para *S. acuta* fueron: 0.06 a 0.66 mg Cd/kg, 0.68 a 4.64 mg As/kg y 1.53 a 11.53 mg Pb/kg. Las especies de plantas nativas tuvieron factor de bioconcentración, factor de traslocación y coeficiente de acumulación biológica mayores que 1 y se consideraron adecuadas para fitoextracción de suelos contaminados con Cd, As y Pb (21)

En el trabajo de investigación titulado: “Phytoremediation of Heavy Metal-Contaminated Soil by Switchgrass: A Comparative Study Utilizing Different Composts and Coir Fiber on Pollution Remediation, Plant Productivity, and Nutrient Leaching”, se evaluó los efectos de tres enmiendas orgánicas: compost termofílico, vermicompost, y fibra de coco, sobre la biodisponibilidad de metales pesados traza de Zn, Cd, Pb, Co y Ni en suelos contaminados con metales bajo condiciones de laboratorio. Se ensayó *Panicum virgatum* como un cultivo potencial para fitorremediación de metales del suelo con adición de enmiendas orgánicas. Se evaluó el potencial de lixiviación de nutrientes de las enmiendas. Los resultados mostraron que las enmiendas disminuyeron la cantidad de metales biodisponibles en los suelos. Las enmiendas incrementaron el pH, conductividad eléctrica y contenido de nutrientes del suelo. La biomasa de raíz y tallo de *P. virgatum* fue significativamente mayor en el suelo con enmiendas comparado al control. Los tratamientos con enmiendas mostraron niveles detectables en los tallos mientras que el tratamiento control no produjo suficiente biomasa para su medida. Considerando la mejora de propiedades del suelo y la productividad de la planta, así como la disminución de la solubilidad de metales pesados, las enmiendas orgánicas pueden favorecer la fitorremediación en suelos contaminados con metales pesados (22)

2.2 Bases teóricas

2.2.1 Contaminación del suelo por cadmio

2.2.1.1 Fuentes de contaminación

El cadmio (Cd) es liberado al ambiente en cantidades variables desde fuentes naturales y actividades antropogénicas. Las erupciones volcánicas, los incendios forestales, el polvo arrastrado por el viento, y la brisa marina están entre las fuentes naturales de Cd a la atmósfera. La meteorización de las rocas parentales también contribuye a la liberación de Cd al ambiente (23).

La contaminación del suelo con Cd liberado de fuentes naturales es variable en diferentes partes del mundo. Sin embargo, la contribución total de fuentes naturales a la contaminación del suelo es aproximadamente el 10% comparada a la liberación de todas las fuentes. Más del 90% ($5.6 - 38 \times 10^6$ kg/año) de Cd es liberado al ambiente desde fuentes antropogénicas incluyendo el uso de fertilizantes fosfatados, quema de combustibles fósiles, actividad metalúrgica, residuos de la industria del cemento, lodos de aguas residuales, y procesamiento de minerales para la obtención de metales (24)

2.2.1.2 Contenido en el suelo

La concentración de Cd en un suelo dado está generalmente relacionada estrechamente a su abundancia en el material parental, así como a las entradas a través de la deposición atmosférica, actividades industriales y agrícolas, menos las salidas en forma de lixiviación, erosión y cosechas de los cultivos (25)

En suelos no contaminados del mundo, la abundancia promedio de Cd es de 0.36 mg/kg, aunque los valores varían entre continentes, países y tipos de suelo. Por ejemplo, las concentraciones promedio son: 0.27 mg/kg en los Estados Unidos de América (n = 3045), 0.01 mg/kg en Australia, 0.18 mg/kg en Brasil, 0.3 mg/kg en Japón, 0.2 mg/kg en Europa. En Europa, las concentraciones de Cd son 0.3 a 1 mg/kg en Alemania (n = 2947), 0.6 a 0.7 mg/kg en el Reino Unido (n = 5692), y 0.5 mg/kg en los Países Bajos (n = 708) (26).

Los contenidos elevados de Cd en los suelos y sedimentos están generalmente unidos a la abundancia de minerales de arcilla, materia orgánica, y óxidos hidratados, así como ciertas condiciones fisicoquímicas, tales como pH elevado y condiciones anóxicas (27). Generalmente el Cd está frecuentemente enlazado a las formas intercambiables menos estables, lo cual es una probable explicación al comportamiento hidroquímico peculiar y fácil movilización de Cd, cuando es comparado a otros metales pesados (28)

El rango de contribución de fuentes de contaminación a la cantidad de Cd presente en los suelos que está disponible para lixiviarse en la napa freática, es 10 a 25% de estiércol de ganado, 15 a 50% de la deposición atmosférica, 30 a 55% de los fertilizantes minerales y 2 a 5% de lodos y compost (29)

Además de las actividades antropogénicas, la variabilidad natural en rocas y minerales puede ser una razón por el elevado Cd en suelos asociados (30).

Tabla 2. Contenido de Cd en suelos afectados por actividades industriales (31)

Fuente	Contenido de Cd	
	Promedio (mg/kg)	Máximo (mg/kg)
Industrias minera y metálica	37.6	289
Producción de petróleo, fertilizantes y productos químicos	0.51	2.13
Textiles	42.0	83.6
Cuero	0.63	1.26
Productos minerales no metálicos	25.8	72.0

2.2.1.3 Reacciones en el suelo

En solución el Cd generalmente se presenta como catión divalente (Cd^{+2}) (32). El pH de la solución influye en la movilidad del Cd debido a la hidrólisis del metal, formación de par iónico, solubilidad de la materia orgánica, carga superficial de oxihidróxidos, bordes de arcilla y materia orgánica. Con el incremento del pH, la retención del metal a superficies minerales se incrementa vía adsorción y precipitación (27).

El Cd preferencialmente permanece en solución a pH menor de 6.5 y en condiciones de oxidación. Este metal pesado por si mismo no es sensitivo a la condición redox, pero está indirectamente unido a condiciones redox debido a la formación de complejos acuosos sensitivos al estado redox, tales como $CdHS^+$, que se presenta en condiciones sulfídicas y anóxicas, y precipitados estables, tales como la esfalerita (ZnS), galena (PbS), y calcopirita ($CeFeS_2$), que puede contener Cd como un elemento traza (33).

La fracción de Cd ambientalmente móvil consiste de Cd soluble en agua, Cd adsorbido no específicamente, y complejos órganos metálicos. La fase adsorbida consiste de Cd enlazado a superficies minerales o débilmente enlazado como complejos órgano metálicos insolubles. La fracción estable de Cd está asociada con la matrix del suelo o enlazado como complejos superficiales en oxihidróxidos, materia orgánica, silicatos, sulfuros, u otros minerales estables (34).

2.2.2 Absorción de Cd por las plantas

La absorción de Cd del suelo por las plantas depende de su concentración y disponibilidad, mientras que una pequeña cantidad es directamente absorbida de la atmósfera a través de la deposición seca de polvo contaminado. La entrada de metales pesados a las células de la planta ocurre a través del mismo sistema de transporte usado para absorber macro y micronutrientes. La absorción de Cd se presenta a través de transportadores transmembrana involucrados en la absorción de magnesio, calcio, hierro, zinc, y cobre (35)

El Cd del suelo contaminado puede ser fácilmente absorbido por las raíces de las plantas y luego ser transportado a la parte aérea donde interactúa con procesos fisiológicos y bioquímicos, que afectan la morfología y tasa de crecimiento de la planta (36)

La transferencia de Cd a las plantas desde los suelos contaminados con Cd ha sido reportada en varios estudios. Sin embargo, poca atención se ha dado a los mecanismos involucrados en la bioacumulación de Cd en diferentes especies de plantas y ambientes suelo, lo que conduce a un sesgo en la interpretación de datos. Por ejemplo, la mayoría de los estudios ha enfocado la bioacumulación de Cd del suelo a la planta, pero no se mostró ningún mecanismo (37).

La acumulación de metales pesados en los cultivos alimenticios y su subsecuente transferencia a los canales alimenticios es un principal problema ambiental en todo el mundo. La absorción de los metales pesados por las plantas depende no solo de los factores del suelo, tales como temperatura, contenido de humedad, materia orgánica, pH, y disponibilidad de nutrientes, sino también de las especies de plantas. La eficiencia de la habilidad absorbente de las plantas para los metales pesados está determinada por índices, tales como cantidad absorbida o transferencia del suelo a la planta. El entendimiento de estos factores es crucial para ayudarnos a generar estrategias eficientes para minimizar la contaminación de metales pesados en las plantas alimenticias (38).

Las plantas absorben metales pesados desde la solución suelo a través de sus raíces. Después que entran a sus raíces, los iones de los metales pesados pueden ser almacenados en las raíces o traslocados a los tallos primariamente a través de los vasos de la xilema donde mayormente son depositados en las vacuolas. Las vacuolas son los organelos celulares con baja actividad metabólica. El secuestro de metales pesados en la vacuola es una de las formas para remover el exceso de iones metálicos del citosol y puede reducir su interacción con procesos metabólicos celulares (39).

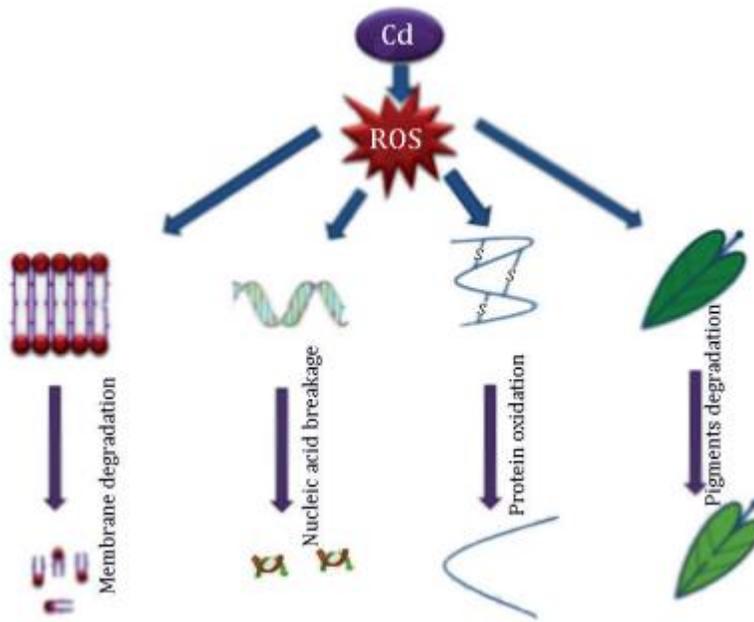


Figura 1. Representación esquemática del daño causado por el cadmio en las plantas (40)

2.2.2 La fitorremediación

2.2.2.1 Principios

En la fitorremediación, las plantas son utilizadas como bio-bombas que usan energía solar para remover agua y contaminantes del suelo hacia las porciones aéreas de la planta, y devuelven algunos de los productos de la fotosíntesis hacia la zona radicular. La transpiración es la piedra angular de la fitorremediación. Al remover agua del sustrato, las plantas ayudan a reducir la erosión, escorrentía y lixiviación, por lo tanto, limitan el movimiento de los contaminantes a otras partes. Algunos contaminantes del suelo son tomados por la corriente transpiratoria donde pueden ser metabolizados, volatilizados, o almacenados. Al disminuir la humedad del suelo, las raíces de las plantas también pueden crear un ambiente aeróbico donde la movilidad de los metales es reducida y se favorece la actividad biológica. Las plantas estimulan la actividad microbológica en la zona radicular al proporcionar una fuente de carbono de los exudados radiculares y descomposición del material radicular (41).

La fitorremediación usa plantas y sus microorganismos rizosféricos asociados para remover, degradar, o inmovilizar diferentes contaminantes de suelos contaminados, pero también de sedimentos, capa freática, o agua superficial. Las investigaciones indican que la fitorremediación es una solución promisorio de limpieza para una amplia variedad de

sitios contaminados, aunque tiene sus restricciones. Muchas de las limitaciones y ventajas de esta técnica son el resultado directo del aspecto biológico de este tipo de tratamiento (42).

En general, la tecnología de fitorremediación involucra el uso de los siguientes cinco mecanismos: (i) La absorción de nutrientes. Muchos recursos terrestres y superficiales en el mundo han desarrollado problemas debido a las altas concentraciones de nitrato y fósforo. Si el sistema radicular de una planta está en contacto con agua contaminada con nutrientes, las plantas removerán los nutrientes del agua, resultando en un crecimiento más rápido de las plantas y limpieza del agua. (ii) La absorción de metales no esenciales y compuestos orgánicos. Se ha reconocido por largo tiempo que las plantas pueden absorber metales no esenciales en sus tejidos y pueden ser usadas para remover metales y compuestos orgánicos de la capa freática y el suelo. (iii) Creando un ambiente de población microbial diversa. La siguiente área que se ha encontrado útil es el actual sistema radicular que las plantas desarrollan en el suelo. Se ha reportado que el sistema radicular es una excelente ubicación para el crecimiento de diversos grupos de microorganismos para la degradación microbial. (iv) La acción de bombeo de agua. La absorción de agua por árboles puede influenciar substancialmente la hidráulica local del acuífero superficial, controlando así la migración de una pluma contaminante. (v) Volatilización y estabilización. La absorción de compuestos orgánicos puede ser volatilizada por transpiración desde la superficie de las hojas a la atmósfera, y la absorción de metales puede ser estabilizada en formas persistentes no disponibles (43).

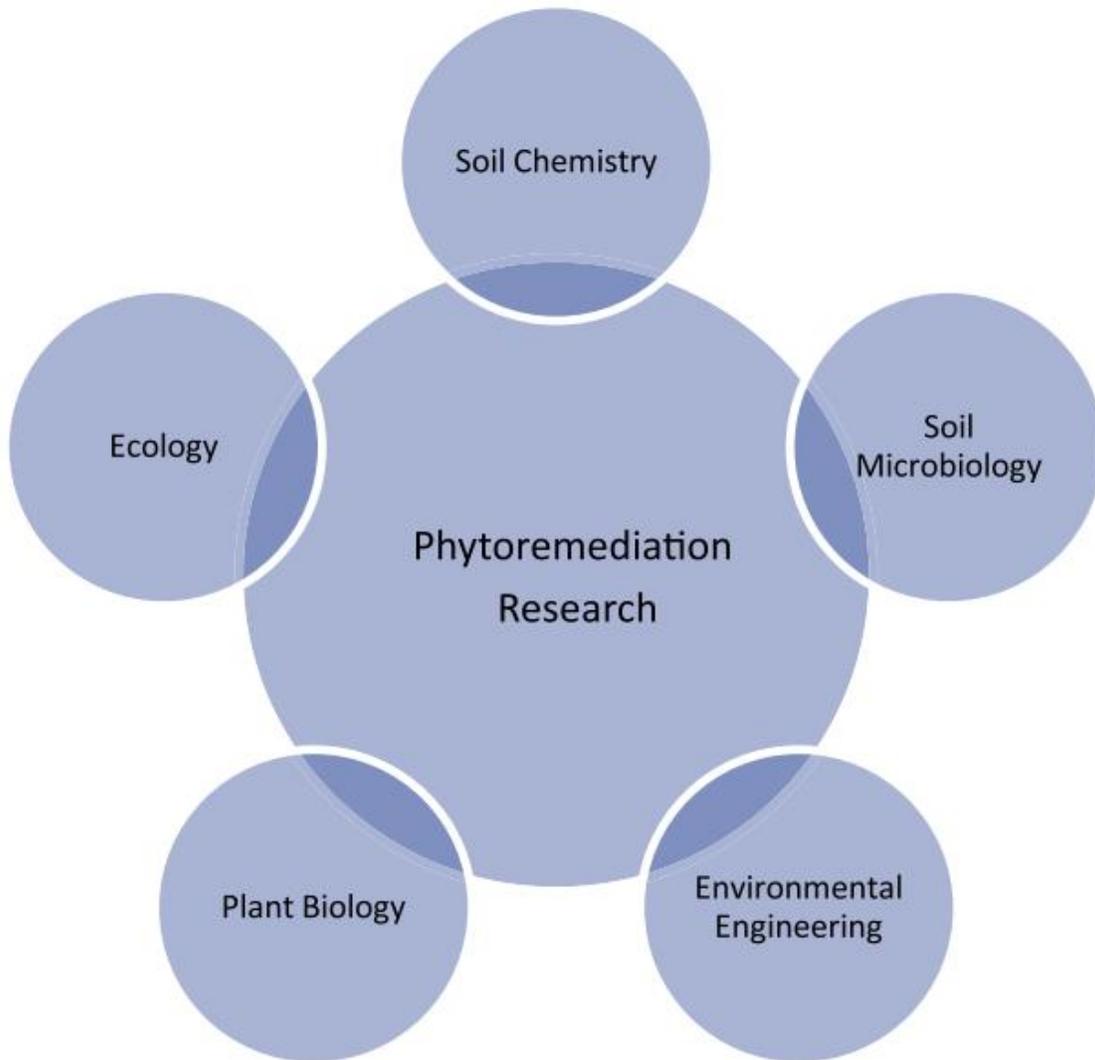


Figura 2. Esquema que muestra la naturaleza interdisciplinaria de la fitorremediación (44).

2.2.2.2 Técnicas

- Fitoextracción

La fitoextracción es un proceso común de fitorremediación, implica la absorción del contaminante por las raíces de las plantas con una subsecuente acumulación en las partes aéreas, seguido generalmente por la cosecha y disposición de la biomasa vegetal. Las plantas acumuladoras de metales son sembradas o trasplantadas en suelos contaminados con metales y luego cultivadas con prácticas agrícolas establecidas. Las raíces de estas

plantas absorben elementos metálicos del suelo, posteriormente los translocan a los tallos, donde se acumulan. Después de un suficiente crecimiento de la planta y acumulación de metales, la parte aérea de la planta es cosechada y removida, asegurando así una remoción permanente de metales, tales como Pb, Cd, Ni, Cu, Cr, y V, desde los suelos contaminados. Sin embargo, este mecanismo es aplicable solo a aquellos sitios que contienen niveles bajos o moderados de contaminación de metales, debido a que el crecimiento de la planta no se mantiene en sitios muy contaminados (45)

Las plantas a ser utilizadas para la fitoextracción deberían tener: (i) tolerancia a altas concentraciones de metales, (ii) alta capacidad de acumulación de metales, (iii) alta biomasa, (iv) habilidad de rápido crecimiento, y (v) sistema radicular profuso. El éxito de la fitoextracción depende especialmente de la habilidad de la planta para: (i) acumular biomasa rápidamente, y (ii) almacenar grandes cantidades de metales absorbidos en los tejidos aéreos (46).

- Fitoestabilización

En la técnica de fitoestabilización, las plantas son usadas para transformar metales tóxicos del suelo a formas menos tóxicas (47), los cuales no son removidos del suelo. Los residuos estabilizados, previenen las vías de exposición vía erosión del agua o del viento, proporcionando un control hidráulico que suprime la migración vertical de contaminantes a la capa freática e inmoviliza los contaminantes física y químicamente por adsorción de la raíz y fijación química con varias enmiendas del suelo (48).

Para la fitoestabilización, se requiere que las plantas sean capaces de desarrollarse en suelos contaminados con sus raíces creciendo en la zona de contaminación, y alterar la condición física, química o biológica en el suelo que convierta las formas tóxicas de metales a unas menos tóxicas. La inmovilización de metales tóxicos por las plantas puede ser mejorada por las enmiendas del suelo que incrementen la materia orgánica y el pH, o enlazando ciertos constituyentes con fosfato o carbonato sin usar enmiendas (49).

- Fitodegradación

Mediante el método de fitodegradación (fitotransformación), las plantas degradan contaminantes orgánicos por procesos metabólicos y usan las asociaciones rizosféricas entre plantas y microorganismos del suelo. Las enzimas de las plantas que metabolizan contaminantes pueden ser liberadas en la rizosfera, donde juegan un rol activo en la transformación de contaminantes. Las enzimas, como la dehalogenasa, nitroreductasa,

peroxidasa, lactasa y nitrilasa, han sido encontradas en suelos y sedimentos. Los compuestos orgánicos tales como municiones, solventes clorinados, herbicidas e insecticidas y los nutrientes inorgánicos pueden ser degradados por esta tecnología (50)

- Fitovolatilización

El uso de plantas para absorber metales pesados contaminantes y convertirlos en especies volátiles, químicamente menos tóxicas a través de la transpiración se denomina fitovolatilización. Algunos metales, como el As, Hg y Se, pueden existir en formas gaseosas en el ambiente. Algunas plantas que se presentan naturalmente o son genéticamente modificadas, como *Chara canescens*, *Brassica juncea* y *Arabidopsis thaliana*, poseen la capacidad de absorber metales y convertirlos a especies gaseosas dentro de la planta y subsecuentemente liberarlos a la atmósfera (51)

- Rizofiltración

La rizofiltración es la adsorción o precipitación sobre las raíces de las plantas o la absorción y secuestro en las raíces, de contaminantes que están en la solución que rodea la zona radicular por humedales construidos para limpiar aguas residuales (52)

La rizofiltración es un proceso de remoción de contaminantes en que el contaminante se remueve del lugar mediante la cosecha de raíces y, si es necesario, también se cosecha la porción de la planta sobre el agua, seguido por la apropiada disposición de la masa de planta contaminada. De tal manera que la rizofiltración difiere de la fitoestabilización que se presenta en el suelo, en el cual el contaminante permanece en la zona radicular (53)

- Rizodegradación

La rizodegradación es la mejora de la biodegradación que se presenta naturalmente en el suelo a través de la influencia de las raíces de las plantas e idealmente conducente a la destrucción o detoxificación de un contaminante orgánico. También se ha usado como sinónimo al término biodegradación rizosférica. Los contaminantes orgánicos en el suelo pueden frecuentemente ser descompuestos en subproductos o productos inorgánicos completamente mineralizados tales como dióxido de carbono y agua, por bacterias, hongos y actinomicetos que se presentan naturalmente. La presencia de raíces de plantas frecuentemente incrementará el tamaño y variedad de las poblaciones microbiales en el suelo alrededor de las raíces (la rizosfera) o en micorrizas (asociaciones de hongos y raíces de plantas) (53).

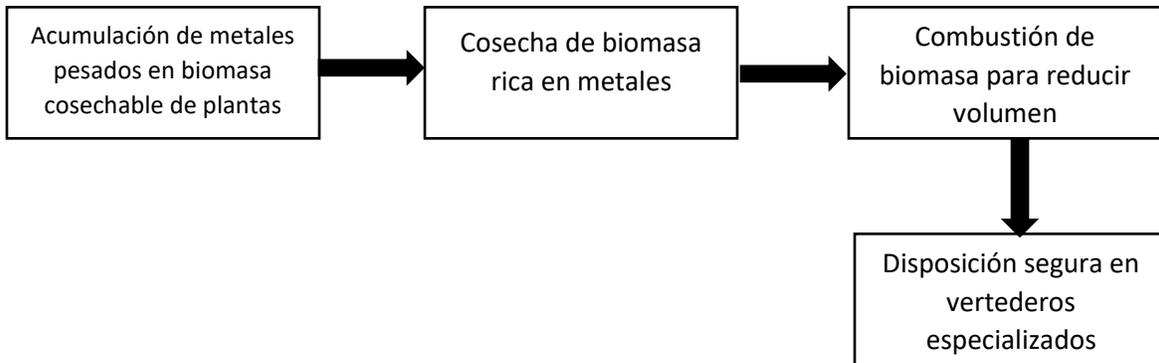


Figura 3. Principales rutas de tratamientos post cosecha de plantas fitorremedadoras (44).

2.2.2.3 Indicadores

- Factor de bioconcentración (FBC)

El factor de bioconcentración es también conocido como índice de bioconcentración, coeficiente de absorción biológica, coeficiente de transferencia, factor de concentración o coeficiente de bioacumulación. Se utiliza para medir la capacidad de absorción de un metal por la planta (raíz y parte aérea) con relación a su concentración en el suelo. Para las plantas, el FBC se utiliza como una medida de eficiencia de acumulación de metales en biomasa, donde los valores > 1 indican que las especies son potencialmente hiperacumuladoras y aquellas especies con valores de FBC < 1 son especies exclusoras (54).

El factor de bioconcentración en la raíz de la planta, también conocido como factor de concentración biológica, se calcula como la relación entre la concentración de metales en la raíz de la planta respecto a la concentración de metales en el suelo (55).

El factor de bioconcentración en la parte aérea de la planta, también conocido como factor de bioacumulación, coeficiente de acumulación biológica, o factor de remediación, es la proporción del elemento contaminante contenido en la parte aérea de la planta con respecto al contenido del mismo elemento en el suelo (56).

- Factor de traslocación (FT)

El factor de traslocación es el cociente entre la concentración del metal en los órganos aéreos en relación a la raíz (57). Cuando el FT es mayor que 1, la planta tiene gran capacidad para transportar metales desde las raíces a los vástagos, explicada mayormente

por eficientes sistemas de transporte de metales (58), y probablemente, por el secuestro de metales en las vacuolas de las hojas y en el apoplasto (59).

Un valor de Factor de Traslocación mayor a 1 indica una eficiente traslocación de metales a puntos de crecimiento, por lo que la planta puede usarse con fines de fitoextracción. Si, por el contrario, el FT es menor que 1, la traslocación del metal es baja, por lo que este es retenido principalmente en las raíces y puede usarse como fitoestabilizadora (60).

2.2.3 El vermicompost

2.2.3.1 Características

El vermicompost es el producto resultante del proceso de compostar residuos orgánicos utilizando lombrices con la ayuda de microorganismos. Es un proceso aeróbico que termina en la estabilización de la materia orgánica (61) Durante este proceso, minerales insolubles son solubilizados, quedando disponibles para las plantas cuando el vermicompost es aplicado al suelo. Asimismo, otros compuestos orgánicos complejos, como la celulosa, son parcialmente degradados a compuestos más simples por las bacterias presentes en el tracto digestivo de la lombriz, aumentando la disponibilidad de nitrógeno. Para la obtención del vermicompost, la especie de lombriz que comercialmente se emplea es *Eisenia foetida* conocida comúnmente como la lombriz roja californiana, a pesar de ser originaria de Europa. El nombre de foetida se debe al olor de los exudados que produce (62)

Al igual que el compost, el vermicompost mejora la estructura del suelo, aumenta la retención de agua, aporta microorganismos benéficos, además de enzimas y otros metabolitos que participan en la transformación de la materia orgánica (62) De la misma manera la ciencia de utilizar las lombrices de tierra para mejorar la producción de alimentos, desafíos ambientales y otros desafíos humanos está referida como vermitecnología (63) . 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 (64).

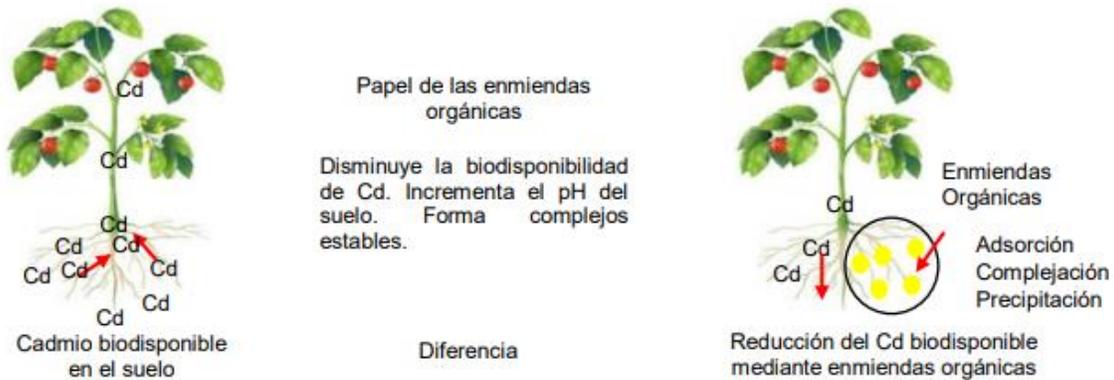


Figura 4. Disminución del cadmio disponible mediante enmiendas orgánicas (3).

2.2.4 El biochar

El interés por el biocarbón o biochar está creciendo entre los científicos particularmente por la forma en que las propiedades químicas y físicas de las partículas del biochar afectan al agua que se desplaza a través del suelo, eliminan los contaminantes, alteran las comunidades microbiales y reducen las emisiones de gases de efecto invernadero. La esperanza es que el biocarbón pueda ayudar a los agricultores en todo el mundo, particularmente los que se encuentran en regiones en desarrollo que a menudo se enfrentan a suelos pobres. Los científicos inicialmente mostraron interés en el material hace aproximadamente una década, cuando las crecientes preocupaciones por el calentamiento global llevaron a algunos a ofrecer biocarbón como forma de almacenar enormes cantidades de C en el subsuelo. La esperanza de esa aplicación se ha desvanecido en cierta forma debido al alto costo del biocarbón, pero investigadores del suelo exploran actualmente su uso en la agricultura y para remediar la contaminación del suelo (65).

El biochar es un material sólido rico en carbón, insoluble, estable y altamente aromático, producido por biomasa abandonada en condiciones de hipoxia y pirolisis lenta a alta temperatura (66). La biomasa abandonada usualmente consiste de residuos de madera, residuos agrícolas, residuos de animales y tejidos de plantas. El biochar, como nuevo tipo de material funcionalmente ambiental, muestra gran potencial en el mejoramiento del suelo, remediador de la contaminación y en la utilización de recursos de biomasa residuales, habiéndose convertido en un tema candente en la ciencia agrícola y ambiental (67).

Actualmente, los investigadores se enfocan principalmente en la remediación de metales pesados tales como As, Pb, Cd, Zn, Cr, Cu y Hg. A diferencia de los contaminantes orgánicos, los metales pesados son duros para la biodegradación, lo cual incrementa la

dificultad de recuperación de suelos contaminados. Mientras que el nuevo material, el biochar, tiene amplias fuentes, estructura porosa, gran área superficial y abundantes grupos funcionales, los cuales pueden reparar efectivamente una cierta cantidad de metales pesados contaminantes (68).

Los principales mecanismos de adsorción del biochar son los siguientes:

- intercambio iónico y adsorción de cationes

La adsorción de intercambio de superficies de biochar es una de las razones importantes para la reducción de actividad de los metales pesados. El número de cationes cambiabiles es mayor, y es más fuerte la retención de metales pesados (69). La naturaleza del intercambio iónico es interacción electrostática entre grupos cargados negativamente sobre la superficie del biochar y cargas positivas en el suelo. Esta clase de reacción, con baja energía de adsorción, pertenece a la adsorción no específica y tiene obvia reversibilidad. La función catiónica depende de la aromatización del biochar. Cuando mayor es la estructura aromática conjugada, mayor será el intercambio orbital de carga negativa, y de esa manera la habilidad de pérdida de electrones de grupos funcionales se incrementa y el efecto en la adsorción se hace más significativo (70).

- Co-precipitación

El biochar puede efectivamente reducir las actividades de metales pesados por adsorción y disolución – precipitación de constituyentes minerales. La aplicación de biochar puede incrementar el pH del suelo (69), y la reacción de iones de metales pesados con hidroxilos, fosfatos y carbonatos puede formar precipitados de hidróxidos, carbonatos o fosfatos, lo cual efectivamente solidifica los metales pesados contaminantes (67).

- Complejación

La complejación es significativa para la fijación de iones de metales pesados con fuerte afinidad. Un gran número de estudios han demostrado que las reacciones de iones de metales pesados con grupos funcionales de oxígeno similares a los grupos hidroxil (-OH), carboxil (-COOH), y amino (-NH₂) sobre la superficie de biochar hace una gran contribución a la adsorción de iones de metales pesados (70).

- Adsorción electrostática

La gran área superficial y la alta energía superficial son caracteres del biochar para adsorber fuertemente los metales pesados contaminantes y removerlos del suelo (67).

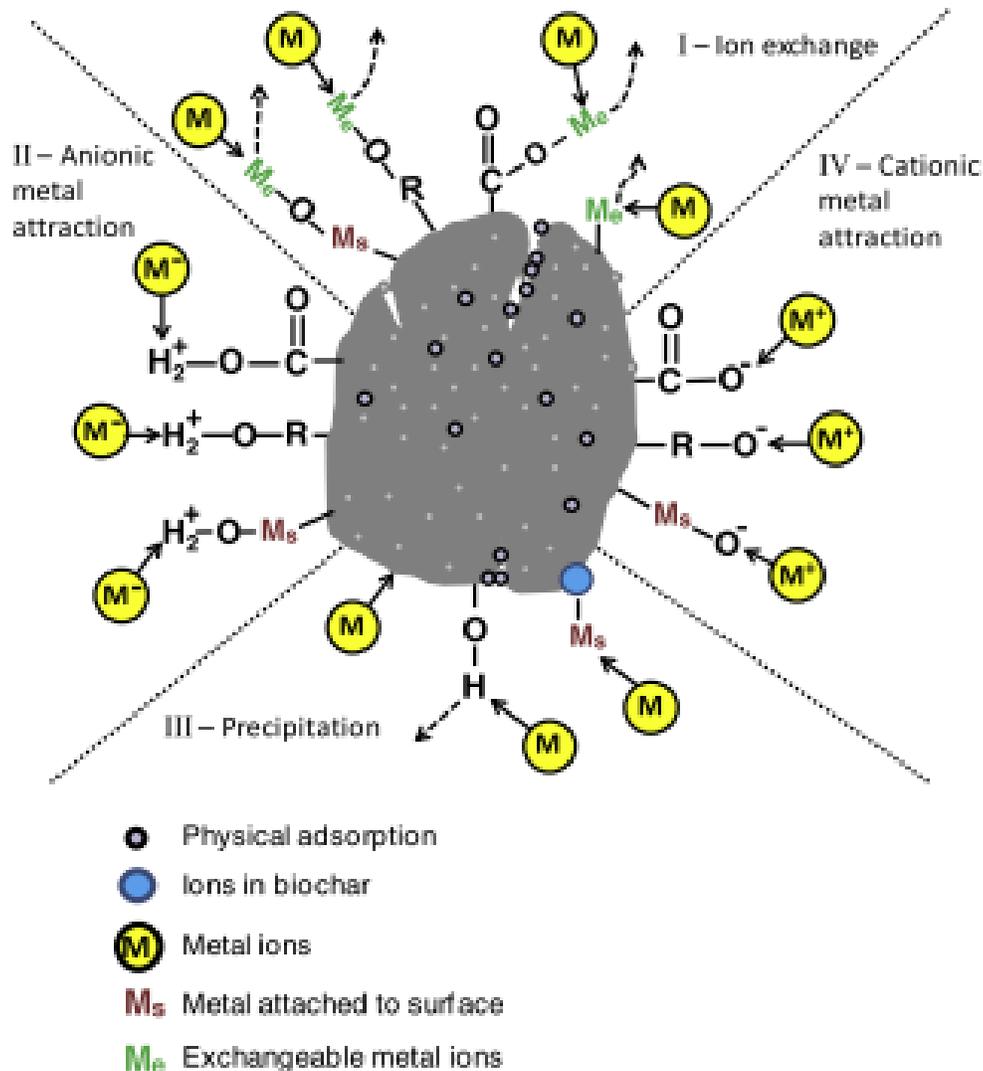


Figura 5. Mecanismos de interacciones del biochar con contaminantes inorgánicos (71)

2.2.5 El girasol

El girasol (*Helianthus annuus* L.), se utiliza para la alimentación humana y animal. Por esto, los organismos gubernamentales se interesan en esta oleaginosa debido a la posibilidad de utilizarlo para producir aceite. El girasol puede usarse también para producir biocombustible, que es una alternativa para generar divisas en la agricultura de las regiones semiáridas, ya que el girasol muestra cierta tolerancia a la sequía y al calor (72).

La clasificación taxonómica del girasol es la siguiente (73):

Reino : Plantae
 División : Magnoliophyta

Clase : Magnoliopsida

Orden : Asterales

Género : Helianthus L.

Especie : annuus L.

El sistema radicular está formado por una raíz principal pivotante, que se extiende (dependiendo de las condiciones físicas y de humedad del suelo) hasta cuatro metros de profundidad. Sobre esta raíz principal se desarrollan otras raíces de primer y segundo orden. Las de primer orden se caracterizan por extenderse superficialmente (paralelas hasta el suelo), hasta una distancia de 10 a 40 cm, para luego hundirse. Así forma una red de raíces que exploran el suelo vertical y horizontalmente en busca de humedad y nutrientes (74).

El tallo es de consistencia semileñosa y maciza en su interior, siendo cilíndrico y con un diámetro de 2 a 6 cm y una altura hasta el capítulo de 0.4 m a 2 m. La parte exterior del tallo es rugosa, asurcada y vellosa; excepto en su base. En la madurez el tallo se inclina en la parte terminal debido al peso del capítulo (75)

Las hojas son alternas, pecioladas, grandes, trinervadas, acuminadas, dentadas y de áspera vellosidad tanto en el haz como en el envés. El número de hojas varía entre 12 y 40, según las condiciones de cultivo y la variedad. Las hojas miden de 7 a 20 cm de largo por 4 a 20 cm de ancho, con el ápice acuminado y bordes aserrados (75)

La inflorescencia es una cabezuela o capítulo rodeado de un grupo de brácteas de color verde. Flores de la periferia unisexuales pistiladas, corola ligulada de color amarillo o naranja que van de 3 a 6 cm de largo. Las flores del disco son bisexuales con corolas tubulares de 8 mm de largo y de color amarillo además presenta el cáliz modificado en una estructura bracteode que persiste en la semilla (75).

2.2.6 El maíz

El maíz presenta dos estados fenológicos: vegetativo y reproductivo. El estado vegetativo se inicia con la emergencia (VE), primera hoja desarrollada (V1), segunda hoja desarrollada (V2) y hasta la floración masculina (VT). El Estado reproductivo se inicia con la floración femenina (R1), grano ampolla (R2), grano lechoso (R3), grano pastoso (R4), grano dentado (R5) y madurez fisiológica (R6) (76).

En la cuenca media del Mantaro (regiones Yunga y límite con Quechua) los meses de junio y julio son periodos apropiados para la siembra de maíz destinado a su venta en grano fresco (choclo) y todo octubre para la siembra de maíz destinado a producción de grano seco. En climas templados y con menor riesgo de heladas se puede sembrar todo el año, considerando la disponibilidad de agua para el riego y la oportunidad comercial (76)

La clasificación taxonómica del maíz se reporta de la siguiente manera (77):

Reino : Vegetal
División : Espermatofitas
Sub división : Angyospermas
Clase : Monocotiledónea
Orden : Gluniflorales
Familia : Gramineae
Sub familia : panicoideas
Tribu : Maydeae
Género : Zea
Especie : *Zea mays* L.

Las raíces del maíz son fasciculadas, formadas por tres tipos: (1) las raíces primarias o seminales que se desarrollan a partir de la radícula de la semilla a la profundidad que ha sido sembrada; (2) las raíces principales o secundarias que comienzan a formarse a partir de la corona, por encima de las raíces primarias y (3) las raíces aéreas o adventicias que nacen en los nudos de la base del tallo por encima de la corona, constituyen el principal sistema de fijación de la planta y además absorbe agua y nutrientes (78).

El tallo está constituido por un eje vertical sólido, alargado y cilíndrico-cónico, terminando en un penacho que constituye la inflorescencia masculina o panoja; también presenta nudos y entrenudos, siendo más cortos en la base y más largos a medida que se alejan de ella. En la parte inferior de los nudos se encuentran localizados los primordios radiculares, las que dan origen a las raíces adventicias, especialmente en los nudos que se encuentran más próximos al suelo. En la parte superior de los nudos del tallo nacen las hojas, las cuales son envoltentes, lanceoladas y liguladas, formadas por vainas que cubren completamente el entrenudo con nervaduras paralelas (78).

La semilla de maíz está contenida dentro de un fruto denominado cariósipide; la capa externa que rodea este fruto corresponde al pericarpio, estructura que se sitúa por sobre la testa de la semilla. Esta última está conformada internamente por el endospermo y el embrión, el cual a su vez está constituido por la coleorriza, la radícula, la plúmula u hojas embrionarias, el coleóptilo y el escutelo o cotiledón (79).

Las fases fenológicas del maíz son (79):

- Emergencia o nacencia: Esta fase comprende el periodo que transcurre desde la siembra hasta la aparición del coleóptilo cuya duración aproximada es de 6 a 8 días, en la sierra esto varía de 10 a 15 días en condiciones óptimas.
- Crecimiento: Una vez emergido el maíz aparece una nueva hoja cada tres días si las condiciones son normales. A los 15 a 20 días siguientes a la emergencia, la planta debe tener 5 o 6 hojas, y en las primeras 4 o 5 semanas la planta deberá tener formadas todas sus hojas.
- Floración: A los 25-30 días después del crecimiento vegetativo, se inicia la panoja en el interior del tallo y en la base de este. Después de 4 a 6 semanas desde este momento se inicia la liberación del polen y el alargamiento de los estilos.
- Fructificación: Con la fecundación de los óvulos por el polen se inicia el fructificación. Una vez realizada la fecundación. Los estilos de la mazorca cambian de color, un color castaño. Después de la tercera semana de polinización, la mazorca toma el tamaño definitivo, se forman los granos y aparece el embrión. Los granos se llenan de una sustancia lechosa, rica en azúcares, los cuales se transforma al final de la quinta semana.
- Maduración y secado: Al final de la octava semana después de la polinización, el grano alcanza su máximo de materia seca, llegando a su madurez fisiológica. Entonces suele tener alrededor del 35% de humedad.

2.3 Definición de términos básicos

Bioacumulación: Concentración resultante acumulada en el ambiente o en los tejidos de organismos a partir de la incorporación, distribución y eliminación de contaminantes obtenidos por todas las rutas de exposición por ejemplo por aire, agua, suelo, sedimento y alimento (80)

Biodisponibilidad: Característica de las sustancias tóxicas que indica la facilidad de incorporarse a los seres vivos mediante procesos o mecanismos, inhalación, ingesta o absorción, y que están influenciados por diferentes parámetros como, las rutas de

exposición, las características fisiológicas del receptor y las características químicas del xenobiótico (80).

Contaminación: Distribución de una sustancia química o una mezcla de sustancias en un lugar no deseable (aire, agua, suelo), donde puede ocasionar efectos adversos al ambiente o sobre la salud (80).

Estándar de calidad Ambiental: Es la medida que establece el nivel de concentración o del grado de elementos, sustancias o parámetros físicos, químicos y biológicos, presentes en el aire, agua o suelo, en su condición de cuerpo receptor, que no representa riesgo significativo para la salud de las personas ni al ambiente. Según el parámetro en particular a que se refiera, la concentración o grado podrá ser expresada en máximos, mínimos o rangos (80).

Fuente de contaminación: Punto o área de contaminación y dispersión de materiales peligrosos y residuos peligrosos al ambiente, fuente que emite contaminantes al ambiente en un sitio contaminado (80)

Muestra compuesta: Es aquella constituida por un conjunto de muestras simples (sub muestras), convenientemente mezcladas, y llevadas al laboratorio para su correspondiente análisis, siendo el resultado un valor analítico medio de la propiedad o compuesto analizado. El número de sub muestras dependerá de la variabilidad de la sustancia o propiedad a analizar en el área de estudio y tiene la ventaja de permitir un muestreo mayor sin aumentar el número de muestras a analizar (80).

Muestra simple: Las muestras colectadas en un tiempo y en un lugar particular son llamadas muestras simples. Este tipo de muestras representa las condiciones puntuales de una muestra de la población en el tiempo que fue colectado (80)

Muestreo dirigido: Es la actividad por medio de la cual se toman muestras representativas sobre puntos específicamente determinados, cuando se cuenta con información previa del sitio, se conoce el producto derramado y/o es evidente la extensión de la afectación (80).

Remediación: Tarea o conjunto de tareas a desarrollarse en un sitio contaminado con la finalidad de eliminar o reducir contaminantes, a fin de asegurar la protección de la salud humana y la integridad de los ecosistemas (80).

Suelo contaminado: Suelo cuyas características químicas, han sido alteradas negativamente por la presencia de sustancias contaminantes depositadas por la actividad humana (80).

Suelo agrícola: Suelo dedicado a la producción de cultivos, forrajes y pastos cultivados. Es también aquel suelo con aptitud para el crecimiento de cultivos y el desarrollo de la ganadería. Esto incluye tierras clasificadas como agrícolas, que mantienen un hábitat para especies permanentes y transitorias, además de flora y fauna nativa, como es el caso de las áreas naturales protegidas (80).

Adsorción: El proceso por el cual los átomos, moléculas, o iones son tomados de la solución suelo o atmósfera del suelo y retenidos sobre las superficies de los sólidos por enlace físico o químico (81).

Suelo: (i) El material no consolidado mineral u orgánico sobre la superficie inmediata de la tierra que sirve como medio natural para el crecimiento de las plantas. (ii) El material no consolidado inorgánico u orgánico sobre la superficie de la tierra que ha estado sujeto y muestra los efectos de factores ambientales y genéticos (incluyendo efectos de la temperatura y el agua), y macro y microorganismos, condicionados por el relieve, acción sobre el material parental en un periodo de tiempo. El suelo difiere del material del cual le dio origen en muchas propiedades y características físicas, químicas, biológicas y morfológicas (81).

Enmienda del suelo: Cualquier material como: cal, yeso, ceniza, compost, estiércol animal, residuos de cultivo o condicionadores sintéticos del suelo que es trabajado dentro del suelo o es aplicado sobre la superficie para favorecer el crecimiento de la planta. Las enmiendas pueden contener nutrientes, pero el término se refiere a materiales agregados diferentes a los que se usan como fertilizantes (81).

Muestra de suelo: Una muestra representativa obtenida de un área, un campo, o porción de un campo del cual se determinarán propiedades físicas, químicas y biológicas (81).

Compost: Residuos orgánicos, o una mezcla de residuos orgánicos y suelo, que ha sido bien mezclado, apilado y humedecido, sin o con adición de fertilizantes y cal, y generalmente después de una descomposición termofílica hasta que el material orgánico original haya sido sustancialmente alterado o descompuesto (81).

Biorremediación: El uso de agentes biológicos para recuperar suelos y aguas contaminadas por sustancias peligrosas al ambiente o salud humana (81).

CAPITULO III:

METODOLOGÍA

3.1 Método y alcance de la investigación

3.1.1 Método de la investigación

3.1.1.1 Método general de investigación

El método general de investigación fue hipotético deductivo, basado en la hipótesis que las enmiendas orgánicas biochar y vermicompost afectan significativamente la fitorremediación de cadmio por dos plantas cultivadas: maíz (*Zea mays* L.) y girasol (*Helianthus annuus* L.).

El método hipotético – deductivo consiste en un procedimiento que parte de unas aseveraciones en calidad de hipótesis y busca refutar o falsear tales hipótesis, deduciendo de ellas conclusiones generales que deben confrontarse con los hechos antes de constituirse en teorías (82).

3.1.1.2 Método específico de investigación

El método específico de la investigación fue el análisis; la muestra compuesta de la parcela agrícola de Sincos fue analizada en sus propiedades físico – químicas (pH, conductividad eléctrica, contenido de carbonato de calcio, materia orgánica, textura, fósforo, potasio, capacidad de intercambio catiónico y cationes cambiables); así como el contenido de cadmio (Cd). Al final del periodo experimental se analizó el contenido de Cd en raíces y hojas de *Zea mays* L. y *Helianthus annuus* L., y en el suelo de cada unidad experimental.

Los análisis realizados fueron los siguientes:

- **pH**

El pH o reacción del suelo se determinó mediante el método del potenciómetro, en una relación suelo: agua de 1: 1 (masa: volumen). La medición del pH revela mucho más las características del suelo que la de solo decir si es suelo ácido, neutro o alcalino. Así, por ejemplo, el pH se relaciona estrechamente con la disponibilidad de nutrientes o con la toxicidad que pueden producir otros elementos (83).

- **Conductividad eléctrica**

La conductividad eléctrica se midió con el método del conductómetro, que expresa la concentración de sales en un extracto acuoso (extracto de saturación) del suelo, expresado en $\text{dS}\cdot\text{m}^{-1}$ (83).

- **Carbonato de calcio**

Para la determinación del contenido de CaCO_3 se utilizó el método del calcímetro. Ese compuesto se presenta en el suelo como resultado de la meteorización y reacciona con el ácido clorhídrico. El CO_2 generado puede ser medido en el calcímetro a temperatura y presión atmosférica (83).

- **Materia orgánica**

El contenido de materia orgánica del suelo se determinó por el método de Walkley – Black, cuyo principio es la oxidación húmeda. Los resultados expresan el contenido de carbono orgánico, que multiplicado por el factor 1.724 expresa la cantidad de materia orgánica del suelo en porcentaje (83).

- **Fósforo disponible**

Para la determinación de fósforo disponible se utilizó el método de Olsen modificado, cuyo extractante es el bicarbonato de sodio a pH 8.5. La cantidad de fósforo extraído se lee en el espectrofotómetro, usando una longitud de onda de 660 nm y se registra el dato de transmitancia. El resultado se expresa en ppm (83).

- **Potasio disponible**

Para medir el potasio disponible se utilizó como extractante el acetato de amonio. Esta fracción de potasio es la suma del potasio soluble en agua más el potasio cambiante, extraído mediante una solución de una sal neutra que reemplaza a los cationes cambiantes en el complejo de cambio, por lo tanto, la concentración del catión determinado por este método es referido como cambiante para suelos no calcáreos. Para suelos calcáreos el catión es referido como cambiante más soluble. El resultado se expresa en ppm (83).

- **Textura**

Para el análisis de la textura del suelo se utilizó el método del hidrómetro, cuyo principio es la diferente velocidad de sedimentación de las partículas del suelo (arena, limo y arcilla), según la ley de Stoke. De este análisis se obtienen porcentajes de cada partícula y se utiliza el triángulo americano (USDA) para determinar la clase textural del suelo (83)

- **Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC)**

Para determinar la CIC del suelo se utilizó el método del acetato de amonio. El complejo de cambio del suelo es saturado con el catión amonio, luego el exceso de acción es lavado con

alcohol etílico. El amonio adsorbido es determinado cuantitativamente por destilación, y expresado en cmol/kg (83).

- **Cationes cambiables**

El extracto obtenido durante el proceso de saturación con acetato de amonio para el análisis de la CIC contiene los cationes cambiables del suelo, consistiendo principalmente de calcio, magnesio, potasio y sodio; en el caso de suelos ácidos están presentes el hidrógeno y el aluminio. Este extracto se usa normalmente para cuantificar los cationes cambiables (83).

- **Contenido de cadmio (Cd)**

Se analizó el Cd total en el suelo mediante digestión de la muestra y medición con Estetoscopía de absorción atómica llama. Este método tiene como requisito que la muestra sea introducida en disolución. En este trabajo de investigación se utilizó la digestión húmeda por medio de ácido nítrico, obteniendo extractos acuosos de cada muestra y analizada por flama siguiendo el método de la USEPA 3051 A (84).

3.1.2 Alcance de la investigación

3.1.2.1 Tipo de investigación

El tipo de investigación fue aplicada, pues el presente estudio aplica los principios de la ciencia del suelo para determinar el efecto de dos enmiendas orgánicas, el biochar y el vermicompost en la fitorremediación de suelos contaminados con Cd, utilizando *Zea mays* L. y *Helianthus annuus* L.

La investigación aplicada, consiste en realizar trabajos aplicados con la finalidad de adquirir nuevos conocimientos; sin embargo, está dirigido fundamentalmente a un objetivo práctico específico. Se emprende para determinar los posibles usos de los resultados de la investigación básica o para determinar nuevos métodos o formas de alcanzar objetivos específicos predeterminados (85).

3.1.2.2 Nivel de investigación

La investigación, según su profundidad u objetivo es experimental, pues estudia las relaciones de causalidad utilizando la metodología experimental con la finalidad del control de los fenómenos (85).

Según el tratamiento de datos, la investigación es cuantitativa, pues se centra fundamentalmente en los aspectos observables y susceptibles de cuantificación de los

fenómenos. Es coherente con la metodología empírica y se sirve de pruebas estadísticas (85).

3.2 Diseño de la investigación

3.2.1 Diseño experimental

El diseño experimental fue Completamente Aleatorizado (DCA) con arreglo factorial 2 x 3, con tres repeticiones, haciendo un total de 18 unidades experimentales.

El modelo aditivo lineal del diseño experimental es el siguiente (86):

$$\gamma_{ij} = \mu + \tau_i + \beta_j + \tau\beta_{jk} + \varepsilon_{ij}$$

Donde:

γ_{ij} = Cualquier observación del experimento

μ = Media poblacional

τ_i = Efecto del i-ésimo nivel del factor A

β_j = Efecto del j-ésimo nivel del factor B

$\tau\beta_{jk}$ = Efecto de la interacción AB

ε_{ij} = Error experimental

3.2.2 Tratamientos

Los tratamientos en estudio se plantearon de la siguiente manera:

Factor A : Especies

Niveles : A1 maíz (*Zea mays* L.)

: A2 girasol (*Helianthus annuus* L.)

Factor B : Enmiendas orgánicas

Niveles : B1 Sin enmienda (SE)

: B2 Biochar (BC)

: B3 Vermicompost (VC)

El arreglo de tratamientos se presenta a continuación.

Tabla 3. Tratamientos en estudio.

Nº	Factor A: Especies	Factor B: Enmiendas	Tratamiento
1		B1 = Sin enmienda (SE)	A1B1
2	A1 = Maíz (<i>Zea mays</i> L.)	B2 = Biochar (BC)	A1B2
3		B3 = Vermicompost (VC)	A1B3
4		B1 = Sin enmienda (SE)	A2B1
5	A2 = Girasol (<i>Helianthus annuus</i> L.)	B2 = Biochar (BC)	A2B2
6		B3 = Vermicompost (VC)	A2B3

Fuente: Elaboración propia

3.2.3 Procedimiento experimental

- Se eligió una parcela agrícola en el distrito de Sincos, parte baja, mediante un muestreo dirigido, y se obtuvo aproximadamente 100 kg de suelo de la capa arable, utilizando una cuadrícula imaginaria con un total de 27 puntos, de donde se obtuvo una muestra simple y después se mezcló todas las muestras simples, para conformar una muestra compuesta.

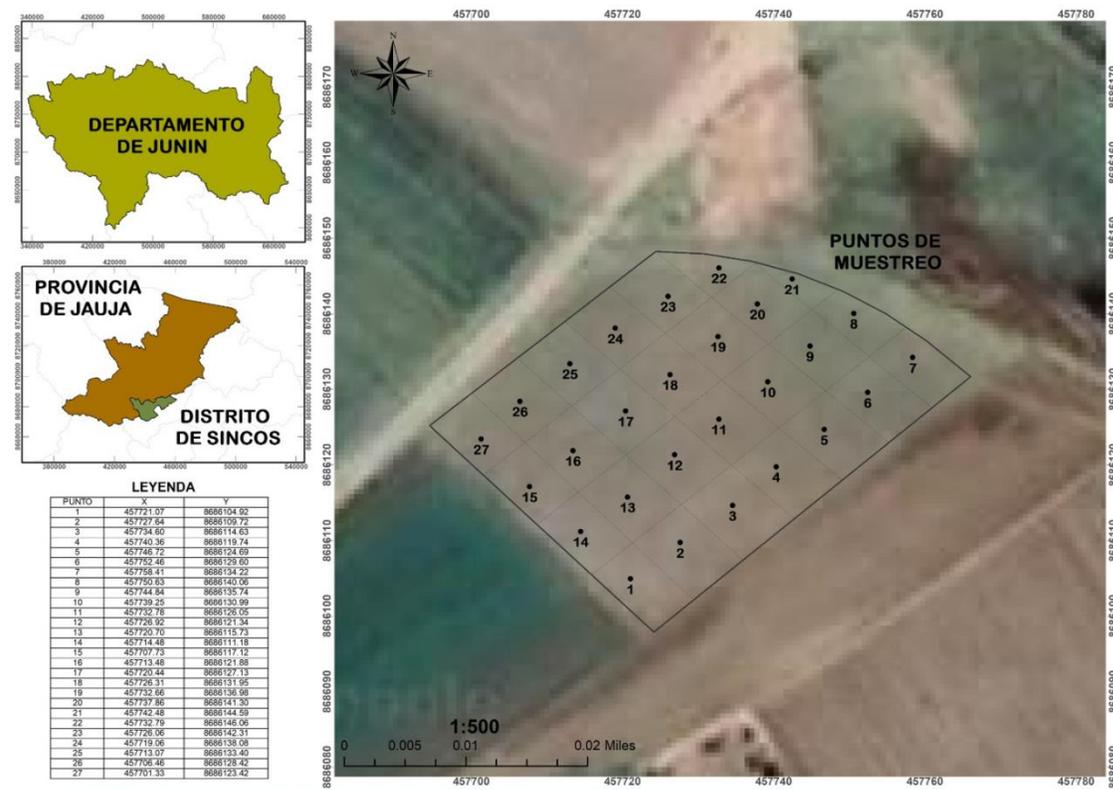


Figura 6. Ubicación de los puntos de muestreo de suelos.

- De la muestra compuesta se separó 1 kg aproximadamente, se colocó en una bolsa plástica transparente de 0.5 mm de espesor, se etiquetó para ser analizada en sus propiedades físico-químicas en el laboratorio de Análisis de Suelos, Plantas, Aguas y Fertilizantes de la Universidad Nacional Agraria La Molina (LASPAF), Lima. Asimismo, se analizó el contenido de Cadmio.

Tabla 4. Resultados del análisis físico – químico del suelo del experimento.

PARÁMETRO	CONTENIDO	CALIFICACIÓN*
pH	8.03	Moderadamente alcalino
Conductividad eléctrica (dS/m)	1.79	No salino
CaCO ₃ (%)	11.18	Alto
Materia Orgánica (%)	3.09	Medio
Arena (%)	56	-
Limo (%)	32	-
Arcilla (%)	12	-
Clase textural	Franco Arenoso	Moderadamente gruesa
Fósforo (ppm)	11.8	Medio
Potasio (ppm)	145	Medio
Capacidad de Intercambio Catiónico (meq/100g)	13.12	Moderadamente alta
Calcio cambiante (meq/100g)	8.89	-
Magnesio cambiante (meq/100g)	3.46	-
Potasio cambiante (meq/100g)	0.34	-
Sodio cambiante (meq/100g)	0.44	-
Hidrógeno + aluminio (meq/100 g)	0.00	
Saturación de bases (%)	100.00	Alto

Fuente: Laboratorio de Análisis de Suelos, Plantas, Aguas y Fertilizantes (LASPAF). Universidad Nacional Agraria La Molina, Lima, Perú.

Tabla 5. Resultados del análisis inicial de Cadmio del suelo.

Parámetro	Contenido (mg/kg)	Calificación	ECA Suelos (mg/kg)
Cd total	13.00	Suelo contaminado	1.4

Fuente: LABS Universal. Huancayo, Perú

- El volumen de suelo restante fue trasladado al lugar experimental en el distrito de San Jerónimo y se tamizó con el tamiz N° 10 (ASTM) de 2 mm de malla.
- Seguidamente se adquirió 18 macetas de PVC de una capacidad aproximada de 4 kg, etiquetando cada una de ellas con los códigos de cada tratamiento.
- El suelo tamizado fue pesado y colocado en las macetas, agregando las enmiendas en una dosis de 10% (400 g), según los tratamientos y repeticiones en estudio, bajo un cobertor rústico, para evitar el exceso de lluvia o sol.

Tabla 6. Preparación y disposición de los tratamientos y repeticiones.

Trat	Repet	Descripción	Suelo (g)	Vermicompost (10%)	Biochar (10%)
1	I	A1B1R1	4000	0	0
1	II	A1B1R2	4000	0	0
1	III	A1B1R3	4000	0	0
2	I	A1B2R1	3600	0	400
2	II	A1B2R2	3600	0	400
2	III	A1B2R3	3600	0	400
3	I	A1B3R1	3600	400	0
3	II	A1B3R2	3600	400	0
3	III	A1B3R3	3600	400	0
4	I	A2B1R1	4000	0	0
4	II	A2B1R2	4000	0	0
4	III	A2B1R3	4000	0	0
5	I	A2B2R1	3600	0	400

5	II	A2B2R2	3600	0	400
5	III	A2B2R3	3600	0	400
6	I	A2B3R1	3600	400	0
6	II	A2B3R2	3600	400	0
6	III	A2B3R3	3600	400	0
Total			67 200	2 400	2 400

Fuente: Elaboración propia

- Posteriormente se saturó cada maceta agregando agua y se dejó reposar por 72 horas.
- Cuando el suelo estaba a capacidad de campo, se sembró el maíz y girasol, dejando cuatro semillas pre - germinadas, de cada especie por maceta. En ese momento se registró el inicio del experimento.
- Cuando las plantas tenían aproximadamente 15 cm de altura, se realizó un movimiento del suelo para evitar la compactación y se realizó el desahije dejando por cada maceta tres mejores plantas.
- Se condujo el experimento manteniendo el suelo a humedad de capacidad de campo y evitando el daño de insectos o enfermedades, así como eliminando las malezas.
- A los 103 días después de iniciado el experimento, se realizó el corte de las plantas de cada maceta, para medir su altura de planta, longitud de raíz y colocarlas en forma separada en bolsas de papel Kratff, debidamente identificadas para ser llevadas a la estufa y determinar la materia seca a una temperatura de 60°C durante 48 horas.
- Posteriormente, la muestra seca fue enviada al laboratorio de suelos de la Universidad Agraria (Lima), para el análisis de Cadmio.
- El suelo que quedó en cada maceta (18 en total), fue homogenizado y se obtuvo una muestra de 500 g, que fue colocada en una bolsa plástica transparente, debidamente etiquetada para ser enviada al laboratorio de análisis de suelos de la Universidad Agraria para el análisis de cadmio.

3.3 Población y muestra

3.3.1 Población

La población estuvo constituida por todas las plantas de maíz (*Zea mays* L.) y girasol (*Helianthus annuus* L.) del experimento, en cada una de las dieciocho (18) unidades experimentales

3.3.1 Muestra

La muestra estuvo conformada por tres plantas por cada maceta (unidad experimental) utilizadas para las evaluaciones y análisis que se realizaron.

3.4 Técnicas e instrumentos de recolección de datos

3.4.1 Altura de planta

A los 103 días después de sembrado la semilla de maíz y girasol y habiendo observado un amarillamiento prematuro de las plantas, por limitaciones de volumen de suelo para su desarrollo, se procedió a cortar la parte aérea de cada planta y medir su altura en cada unidad experimental (tres plantas), utilizando una regla graduada.

3.4.2 Longitud de raíz

A las plantas de maíz y girasol se les midió la longitud de la raíz de cada una de las plantas de cada maceta (3 plantas), para después obtener un promedio por cada unidad experimental.

3.4.3 Materia seca aérea

La parte aérea de las plantas de cada maceta fueron colocadas en una bolsa de papel Kraft, debidamente etiquetadas y se secó en una estufa a 60 °C por un periodo de 48 horas (hasta peso constante). Después se procedió a pesar en una balanza analítica, descontando el peso de la bolsa.

3.4.4 Materia seca radicular

Las raíces de las plantas de cada maceta fueron colocadas en una bolsa de papel Kraft, debidamente etiquetadas y secadas en una estufa a 60 °C por un periodo de 48 horas (hasta peso constante). Después se procedió a pesar en una balanza analítica, descontando el peso de la bolsa.

3.4.5 Análisis de cadmio en la parte aérea

Las muestras secas de la parte aérea de cada maceta 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.

3.4.6 Análisis de cadmio en la parte radicular

Las muestras secas de la parte radicular de cada maceta 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.

3.4.7 Contenido final de cadmio en el suelo

La muestra de suelo (500 g) de cada maceta después que fueron extraídas las plantas, se colocó en una bolsa plástica, debidamente etiquetada y fue enviada al Laboratorio de Análisis de Suelos, Plantas, Aguas y Fertilizantes de la Facultad de Agronomía de la UNALM, para el análisis de Cd total.

3.4.8 Factor de bioconcentración (FB)

El factor de bioconcentración se calculó relacionando el contenido de Cd en la parte aérea, radicular y total, respecto al contenido de Cd en el suelo, utilizando las siguientes expresiones.

$$FB \text{ parte aérea} = \frac{\text{Concentración de Cd en la parte aérea de maíz o girasol}}{\text{Concentración de Cd en el suelo}}$$

$$FB \text{ radicular} = \frac{\text{Concentración de Cd en la parte radicular de maíz o girasol}}{\text{Concentración de Cd en el suelo}}$$

$$FB \text{ total} = \frac{\text{Concentración de Cd en la parte aérea + raíz de maíz y girasol}}{\text{Concentración de Pb en el suelo}}$$

3.4.9 Factor de traslocación (FT)

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

$$FT = \frac{\text{Concentración de Cd en la parte aérea de maíz o girasol}}{\text{Concentración de Cd en la parte radicular de maíz o girasol}}$$

3.4.10 Procesamiento de datos

Al finalizar la obtención de datos estos fueron sistematizados, se verificó la distribución normal de cada variable 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 utilizó el software INFOSTAT (87).

Tabla 7. Esquema del análisis de variancia del Diseño Completamente al Azar (DCA) con arreglo factorial 2 x 3

FUENTES DE VARIACIÓN	GRADOS DE LIBERTAD (GL)	SUMA DE CUADRADOS (SC)	CUADRADO MEDIO (CM)	F _c
Factor A (Especies)	(a-1) = (2-1) = 1	$\sum_i \frac{(a_i)^2}{r} - FC$	SC _A /GL _A	CM _A /CM _{EE}
Factor B (Enmiendas)	(b-1) = (3-1) = 2	$\sum_i \frac{(b_i)^2}{r} - FC$	SC _B /GL _B	CM _B /CM _{EE}
Interacción AxB	(a-1)(b-1) = (1)(2) = 2	$\left(\frac{\sum_i C^2}{r_c} - FC \right) - SC_A - SC_B$	SC _{AB} /GL _{AB}	CM _{AB} /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: (86)

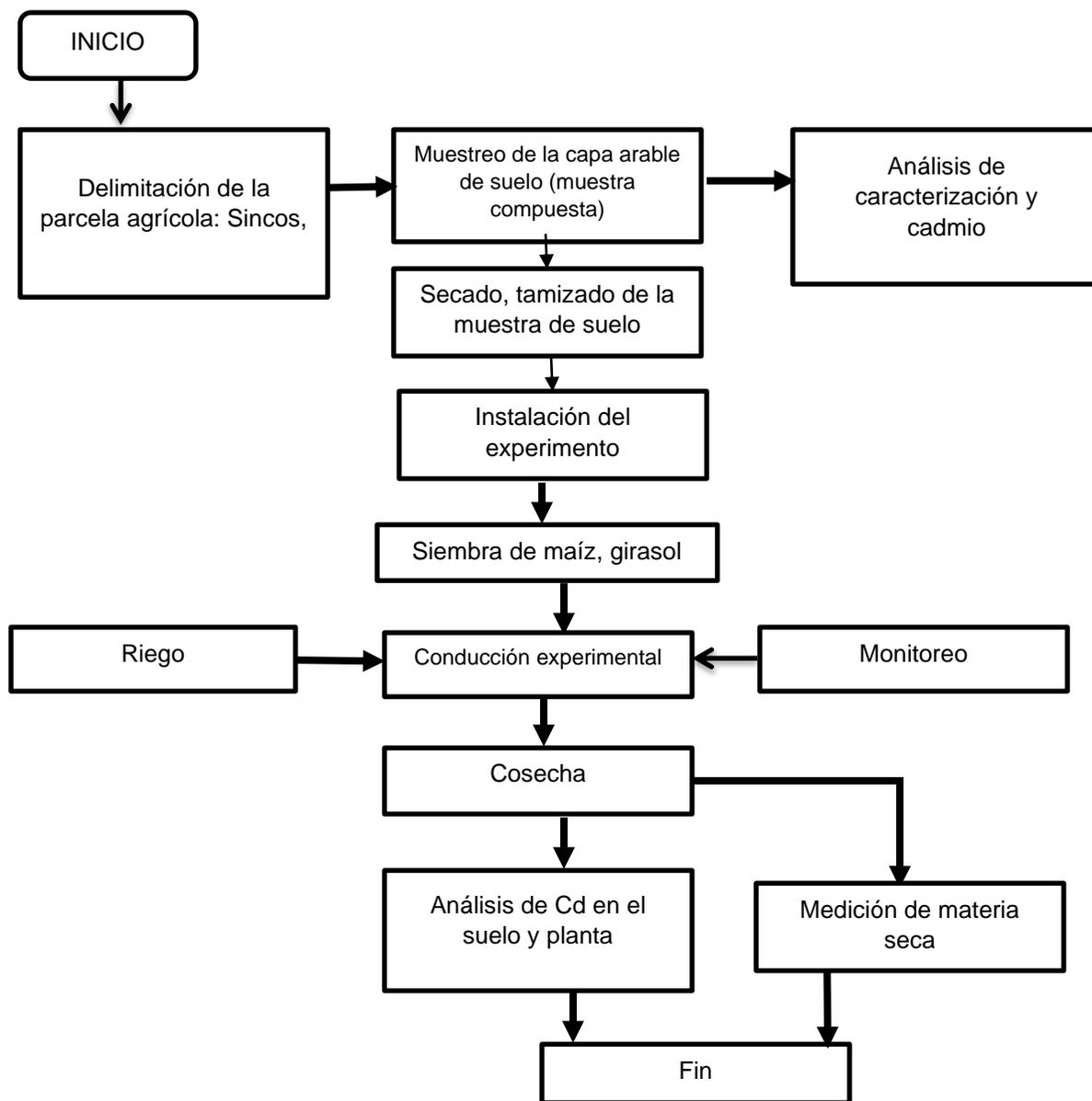


Figura 7. Diagrama metodológico del proceso experimental.

CAPITULO VI: RESULTADOS Y DISCUSION

4.1 Resultados del tratamiento y análisis de la información

Los resultados de los análisis de planta y suelo fueron procesados y se presentan a continuación. Primero presentamos los resultados obtenidos de cada evaluación, según los objetivos planteados.

4.1.1 Concentración de cadmio y factores de bioconcentración y traslocación

4.1.1.1 Concentración de Cd en la parte aérea

Tabla 8. Resultados de la concentración de cadmio (Cd) en la parte aérea. Sincos. 2022.

Nº Trat	Factor A (Especies)	Factor B (Enmien das	Trat	Repeticiones (mg/kg)			Prom (mg/kg)
				I	II	III	
1	A1 = MAIZ	B1 = SE	A1B1	1.60	1.20	1.80	1.53
2		B2 = BC	A1B2	0.68	0.53	0.58	0.60
3		B3 = VC	A1B3	1.33	1.55	1.65	1.51
4	A2 = GIRASOL	B1 = SE	A2B1	0.83	0.85	0.73	0.80
5		B2 = BC	A2B2	1.33	1.60	1.58	1.50
6		B3 = VC	A2B3	1.03	0.83	1.05	0.97
Promedio factor A			A1 = 1.21	A2 = 1.09		1.15	
Promedio factor B			B1 = 1.17	B2 = 1.05	B3 = 1.24	1.15	
Promedio general						1.15	

Fuente: Elaboración propia

La concentración de Cd fue mayor en el tratamiento A1B1, es decir el maíz sin enmiendas tuvo la mayor concentración de este metal pesado en hojas. Esta especie tuvo mayor Cd en hojas que el girasol y el vermicompost favoreció la concentración de Cd en hojas. El promedio de concentración de Cd en el experimento fue de 1.15 mg/kg. Los datos se presentan en la tabla 8.

4.1.1.2 Concentración de Cd en la parte radicular

Tabla 9. Resultados de la concentración de cadmio (Cd) en la raíz. Sincos. 2022.

Nº Trat	Factor A (Especies)	Factor B (Enmiendas)	Trat	Repeticiones			Prom
				I	II	III	
1	A1 = MAIZ	B1 = SE	A1B1	4.05	3.3	6.3	4.55
2		B2 = BC	A1B2	2.63	2.42	1.61	2.22
3		B3 = VC	A1B3	5.3	4.78	3.2	4.43
4	A2 = GIRASOL	B1 = SE	A2B1	5.38	4.8	2.49	4.22
5		B2 = BC	A2B2	3.6	1.65	3.18	2.81
6		B3 = VC	A2B3	1.5	1.59	2.79	1.96
Promedio factor A			A1 = 3.73	A2 = 3.00		3.37	
Promedio factor B			B1 = 4.39	B2 = 2.52	B3 = 3.19	3.37	
Promedio general							3.37

Fuente: Elaboración propia

La concentración de Cd fue mayor en el tratamiento A1B1, es decir el maíz sin enmiendas tuvo la mayor concentración de este metal pesado en raíz. Esta especie tuvo mayor Cd en raíz que el girasol y el tratamiento sin enmiendas (B1) favoreció la concentración de Cd en raíz. Los datos se presentan en la tabla 9.

4.1.1.3 Factor de bioconcentración en la parte aérea (FBa).

Tabla 10. Resultados del FBa. Sincos. 2022.

Nº Trat	Factor A (Especies)	Factor B (Enmiendas)	Trat	Repeticiones			Prom
				I	II	III	
1		B1 = SE	A1B1	0.21	0.15	0.23	0.20

2	A1 = MAIZ	B2 = BC	A1B2	0.09	0.07	0.08	0.08
3		B3 = VC	A1B3	0.2	0.23	0.23	0.22
4		B1 = SE	A2B1	0.12	0.13	0.11	0.12
5	A2 = GIRASOL	B2 = BC	A2B2	0.22	0.26	0.26	0.25
6		B3 = VC	A2B3	0.15	0.12	0.15	0.14
Promedio factor A			A1 = 0.17	A2 = 0.17		0.17	
Promedio factor B			B1 = 0.16	B2 = 0.16	B3 = 0.18	0.17	
Promedio general							0.17

Fuente: Elaboración propia

El FB de Cd en la parte aérea (FBa) fue mayor en el tratamiento A2B2, es decir con girasol y biochar. Ambas especies tuvieron igual FB. Fue el VC el tratamiento que tuvo mayor FB de Cd en la parte aérea de ambas especies. Los datos se presentan en la tabla 10.

4.1.1.4 Factor de bioconcentración en la parte radicular (FBr).

Tabla 11. Resultados del FBr de Cd. Sincos. 2022.

Nº Trat	Factor A (Especies)	Factor B (Enmien das	Trat	Repeticiones			Prom
				I	II	III	
1	A1 = MAIZ	B1 = SE	A1B1	0.53	0.42	0.79	0.58
2		B2 = BC	A1B2	0.36	0.3	0.22	0.29
3		B3 = VC	A1B3	0.78	0.69	0.45	0.64
4	A2 = GIRASOL	B1 = SE	A2B1	0.81	0.72	0.39	0.64
5		B2 = BC	A2B2	0.58	0.27	0.53	0.46
6		B3 = VC	A2B3	0.22	0.23	0.40	0.28
Promedio factor A			A1 = 0.50	A2 = 0.46		0.48	
Promedio factor B			B1 = 0.61	B2 = 0.38	B3 = 0.46	0.48	
Promedio general							0.48

Fuente: Elaboración propia

El FB de Cd en la raíz (FBr) fue mayor en los tratamientos A1B3 y A2B1, es decir con maíz y vermicompost, así como girasol sin enmiendas. El maíz tuvo mayor FB que el girasol. El tratamiento sin enmiendas tuvo mayor FBr. Los datos se presentan en la tabla 11.

4.1.1.5 Factor de bioconcentración total (FBt).

Tabla 12. Resultados del FBt de Cd en maíz y girasol. Sincos. 2022.

Nº Trat	Factor A (Especies)	Factor B (Enmiendas)	Trat	Repeticiones			Prom
				I	II	III	
1	A1 = MAIZ	B1 = SE	A1B1	0.73	0.57	1.01	0.77
2		B2 = BC	A1B2	0.45	0.36	0.3	0.37
3		B3 = VC	A1B3	0.98	0.92	0.69	0.86
4	A2 = GIRASOL	B1 = SE	A2B1	0.93	0.84	0.5	0.76
5		B2 = BC	A2B2	0.8	0.54	0.79	0.71
6		B3 = VC	A2B3	0.37	0.34	0.54	0.42
Promedio factor A			A1 = 0.67	A2 = 0.63		0.65	
Promedio factor B			B1 = 0.76	B2 = 0.54	B3 = 0.64	0.65	
Promedio general							0.65

Fuente: Elaboración propia

El FB total Cd (FBt) fue mayor en el tratamiento A1B3, es decir con maíz y vermicompost. El maíz tuvo mayor FBt que el girasol. El tratamiento sin enmiendas tuvo mayor FBt. Los datos se presentan en la tabla 12.

4.1.1.6 Factor de traslocación (FT) de cadmio.

Tabla 13. Resultados del FT de Cd. Sincos. 2022.

Nº Trat	Factor A (Especies)	Factor B (Enmien das	Trat	Repeticiones			Prom
				I	II	III	
1	A1 = MAIZ	B1 = SE	A1B1	0.4	0.36	0.29	0.35
2		B2 = BC	A1B2	0.26	0.22	0.36	0.28
3		B3 = VC	A1B3	0.25	0.33	0.52	0.37
4	A2 = GIRASOL	B1 = SE	A2B1	0.15	0.18	0.29	0.21
5		B2 = BC	A2B2	0.37	0.97	0.5	0.61
6		B3 = VC	A2B3	0.69	0.52	0.38	0.53
Promedio factor A			A1 = 0.33	A2 = 0.45			0.39
Promedio factor B			B1 = 0.28	B2 = 0.45	B3 = 0.45		0.39
Promedio general							0.39

Fuente: Elaboración propia

El FT Cd fue mayor en el tratamiento A2B2, es decir con girasol y biochar. El girasol tuvo mayor FT que el maíz. Los tratamientos con biochar y vermicompost tuvieron similar FT. Los datos se presentan en la tabla 13.

4.1.2 Parámetros de crecimiento

4.1.2.1 Altura de planta

Tabla 14. Resultados de la altura de planta. Sincos. 2022.

Nº Trat	Factor A (Especies)	Factor B (Enmien das	Trat	Repeticiones			Prom
				I	II	III	
1	A1 = MAIZ	B1 = SE	A1B1	24.00	38.00	25.70	29.23
2		B2 = BC	A1B2	24.00	27.70	30.30	27.33
3		B3 = VC	A1B3	35.00	41.00	34.40	36.80
4		B1 = SE	A2B1	34.70	39.70	18.30	30.90

5	A2 = GIRASOL	B2 = BC	A2B2	32.70	34.00	31.30	32.67
6		B3 = VC	A2B3	46.60	42.00	50.30	46.30
Promedio factor A			A1 = 31.12	A2 = 36.62		33.87	
Promedio factor B			B1 = 30.07	B2 = 30.00	B3 = 41.55	33.87	
Promedio general							33.87

Fuente: Elaboración propia

La altura de planta fue mayor en el tratamiento A2B3, es decir con girasol y vermicompost. El maíz tuvo mayor altura que el girasol. Los tratamientos con vermicompost tuvieron mayor altura de planta. Los datos se presentan en la tabla 14.

4.1.2.2 Longitud de raíz

Tabla 15. Resultados de la longitud de raíz. Sincos. 2022.

Nº Trat	Factor A (Especies)	Factor B (Enmien das	Trat	Repeticiones			Prom
				I	II	III	
1		B1 = SE	A1B1	8.30	10.00	9.50	9.27
2	A1 = MAIZ	B2 = BC	A1B2	10.70	9.30	14.00	11.33
3		B3 = VC	A1B3	12.00	13.00	11.00	12.00
4		B1 = SE	A2B1	10.00	11.00	5.00	8.67
5	A2 = GIRASOL	B2 = BC	A2B2	10.70	8.30	9.70	9.57
6		B3 = VC	A2B3	10.60	9.70	10.70	10.33
Promedio factor A			A1 = 10.87	A2 = 9.52		10.19	
Promedio factor B			B1 = 8.97	B2 = 10.45	B3 = 11.17	10.19	
Promedio general							10.19

Fuente: Elaboración propia

La longitud de raíz fue mayor en el tratamiento A1B3, es decir con maíz y vermicompost. El maíz tuvo mayor longitud de raíz que el girasol. Los tratamientos con vermicompost favorecieron la mayor longitud de raíz. Los datos se presentan en la tabla 15.

4.1.2.3 Materia seca aérea

Tabla 16. Resultados de la materia seca aérea. Sincos. 2022.

Nº Trat	Factor A (Especies)	Factor B (Enmien das	Trat	Repeticiones			Prom
				I	II	III	
1	A1 = MAIZ	B1 = SE	A1B1	14.95	17.41	13.93	15.43
2		B2 = BC	A1B2	14.56	14.18	15.08	14.61
3		B3 = VC	A1B3	17.59	25.43	21.37	21.46
4	A2 = GIRASOL	B1 = SE	A2B1	12.41	12.18	12.9	12.50
5		B2 = BC	A2B2	14.06	15.87	13.92	14.62
6		B3 = VC	A2B3	16.38	20.54	14.82	17.25
Promedio factor A			A1 = 17.17	A2 = 14.79		15.98	
Promedio factor B			B1 = 13.96	B2 = 14.61	B3 = 19.36	15.98	
Promedio general							15.98

Fuente: Elaboración propia

La materia seca aérea fue mayor en el tratamiento A1B3, es decir con maíz y vermicompost. El maíz tuvo mayor materia seca aérea que el girasol. Los tratamientos con vermicompost favorecieron la mayor materia seca aérea. Los datos se presentan en la tabla 16.

4.1.2.4 Materia seca radicular

Tabla 17. Resultados de la materia seca radicular. Sincos. 2022.

Nº Trat	Factor A (Especies)	Factor B (Enmien das	Trat	Repeticiones			Prom
				I	II	III	
1	A1 = MAIZ	B1 = SE	A1B1	6.55	5.57	6.93	6.35
2		B2 = BC	A1B2	9.09	6.72	5.6	7.14
3		B3 = VC	A1B3	6.42	6.59	8.08	7.03
4	A2 = GIRASOL	B1 = SE	A2B1	4.29	3.71	3.89	3.96
5		B2 = BC	A2B2	6.27	6.13	4.05	5.48

6	B3 = VC	A2B3	4.36	4.33	4.53	4.41
Promedio factor A		A1 = 6.84	A2 = 4.62		5.73	
Promedio factor B		B1 = 5.16	B2 = 6.31	B3 = 5.72	5.73	
Promedio general						5.73

Fuente: Elaboración propia

La materia seca radicular fue mayor en el tratamiento A1B2, es decir con maíz y biochar. El maíz tuvo mayor materia seca radicular que el girasol. Los tratamientos con biochar favorecieron la mayor materia seca radicular. Los datos se presentan en la tabla 17.

4.1.3 Contenido final de cadmio en el suelo

Tabla 18. Resultados del contenido final de Cd en el suelo. Sincos. 2022.

Nº Trat	Factor A (Especies)	Factor B (Enmiendas)	Trat	Repeticiones			Prom
				I	II	III	
1	A1 = MAIZ	B1 = SE	A1B1	7.72	7.83	8.00	7.85
2		B2 = BC	A1B2	7.35	8.08	7.28	7.57
3		B3 = VC	A1B3	6.78	6.90	7.05	6.91
4	A2 = GIRASOL	B1 = SE	A2B1	6.65	6.7	6.38	6.58
5		B2 = BC	A2B2	6.17	6.07	6.03	6.09
6		B3 = VC	A2B3	6.73	7.02	7.07	6.94
Promedio factor A			A1 = 7.44	A2 = 6.54		6.99	
Promedio factor B			B1 = 7.21	B2 = 6.83	B3 = 6.93	6.99	
Promedio general						6.99	

Fuente: Elaboración propia

El contenido final de Cd en el suelo fue menor en el tratamiento A2B2, es decir con girasol y biochar. El girasol tuvo menor contenido de Cd en el suelo que el maíz. Los tratamientos con vermicompost influyeron en la menor cantidad de Cd en el suelo. Los datos se presentan en la tabla 18.

4.2 Prueba de hipótesis

4.2.1 Hipótesis específica 1:

Ho: El biochar y el vermicompost no influyen en la fitorremediación de cadmio por maíz y girasol.

Ha: El biochar y el vermicompost influyen significativamente en la fitorremediación de cadmio por maíz y girasol.

4.2.1.1 Concentración de Cd en la parte aérea

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 19. Prueba de normalidad de Shapiro-Wilks para la concentración de Cd en la parte aérea.

Tratamiento	Factor A (especies)	Factor B (enmiendas)	Tratamiento	Promedio (mg/kg)	p-valor
1	A1 = maíz	B1 = SE	A1B1	1.53	0.6394
2		B2 = BC	A1B2	0.60	0.6394
3		B3 = VC	A1B3	1.51	0.5918
4	A2 = girasol	B1 = SE	A2B1	0.80	0.2962
5		B2 = BC	A2B2	1.50	0.1277
6		B3 = VC	A2B3	0.97	0.1575

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 19. Posteriormente se desarrolló el análisis de variancia.

Tabla 20. Análisis de variancia para la concentración de Cd en la parte aérea (mg/kg).

F. de V.	SC	GL	CM	Fc	p-valor
Factor A	0.066	1	0.066	2.364	0.1501
Factor B	0.110	2	0.055	1.978	0.1809
A x B	2.404	2	1.202	43.045	<0.0001
Error	0.335	12	0.028		
Total	2.915	17			

S = 0.167

$\bar{x} = 1.15$

CV = 14.52 %

Del análisis de variancia, se observa que el p-valor en las fuentes de variación Factor A y Factor B es mayor que 0.05, indicando los niveles de cada factor no son diferentes estadísticamente; en cambio en la interacción A x B se observa un p-valor menor que 0.01, indicando alta significación estadística, es decir los niveles de cada factor interaccionan entre sí. Los datos se presentan en la tabla 20. Se procedió a realizar la prueba de Duncan.

Tabla 21. Prueba de Duncan para la interacción A x B.

O.M.	Interacción	Descripción	Promedio (mg/kg)	Significación
1	A1B1	Maíz x SE	1.533	a
2	A1B3	Maíz x VC	1.510	a
3	A2B2	Girasol x BC	1.503	a
4	A2B3	Girasol x VC	0.970	b
5	A2B1	Girasol x SE	0.803	b c
6	A1B2	Maíz x BCr	0.597	c

De la prueba de Duncan, se observa que ocupan los tres primeros lugares en orden de mérito los tratamientos A1B1 (maíz sin enmiendas), A1B3 (maíz con vermicompost) y A2B2 (girasol con biochar), sin diferencias estadísticas entre sí, superando estadísticamente a los

demás tratamientos. Estos resultados validan la hipótesis planteada. Los datos se presentan en la tabla 21.

4.2.1.2 Concentración de Cd en la parte radicular

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 22. Prueba de normalidad de Shapiro-Wilks para la concentración de Cd en la parte radicular.

Tratamiento	Factor A (especies)	Factor B (enmiendas)	Tratamiento	Promedio (mg/kg)	p-valor
1		B1 = SE	A1B1	4.550	0.4628
2	A1 = maíz	B2 = BC	A1B2	2.220	0.3708
3		B3 = VC	A1B3	4.427	0.4558
4		B1 = SE	A2B1	4.223	0.3625
5	A2 = girasol	B2 = BC	A2B2	2.810	0.3929
6		B3 = VC	A2B3	1.960	0.12.14

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 22. Posteriormente se desarrolló el análisis de variancia.

Tabla 23. Análisis de variancia para la concentración de Cd en la parte radicular (mg/kg).

F. de V.	SC	GL	CM	Fc	p-valor
Factor A	2.427	1	2.427	1.859	0.1977
Factor B	10.775	2	5.387	4.127	0.0433
A x B	7.382	2	3.691	2.827	0.0986
Error	15.666	12	1.306		
Total	36.250	17			

S = 1.143

$\bar{x} = 3.37$

CV = 33.911 %

Del análisis de variancia, se observa que el p-valor en las fuentes de variación Factor A y la interacción A x B tienen un p-valor mayor 0.05, indicando que los niveles del factor A no son diferentes estadísticamente; así mismo se observa que el factor B presenta un p-valor inferior a 0.05, indicando que los niveles del factor B presentan diferencias estadísticas significativas. Los datos se presentan en la tabla 23. Se procedió a realizar la prueba de Duncan.

Tabla 24. Prueba de Duncan para los niveles del factor B

O.M.	Factor B	Descripción	Promedio (mg/kg)	Significación
1	SE	Sin Enmienda	4.387	a
2	VC	Vermicompost	3.193	a b
3	BC	Biochar	2.515	b

De la prueba de Duncan, se observa que sobresale el tratamiento sin enmienda, sin diferencias significativas con el tratamiento con vermicompost. El tratamiento con biochar ocupó el último lugar en orden de mérito. Estos resultados validan la hipótesis planteada. Los datos se presentan en la tabla 24.

4.2.1.3 Factor de bioconcentración en la parte aérea (FBa)

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 25. Prueba de normalidad de Shapiro-Wilks para el FBa.

Tratamiento	Factor A (especies)	Factor B (enmiendas)	Tratamiento	Promedio (mg/kg)	p-valor
1	A1 = maíz	B1 = SE	A1B1	0.195	0.4628
2		B2 = BC	A1B2	0.079	0.9578
3		B3 = VC	A1B3	0.218	0.4213
4	A2 = girasol	B1 = SE	A2B1	0.122	0.4213
5		B2 = BC	A2B2	0.247	0.1045
6		B3 = VC	A2B3	0.140	0.1501

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 25. Posteriormente se desarrolló el análisis de variancia.

Tabla 26. Análisis de variancia para el FBa.

F. de V.	SC	GL	CM	Fc	p-valor
Factor A	0.0001	1	0.0001	0.2534	0.6238
Factor B	0.0014	2	0.0007	1.13306	0.3007
A x B	0.0595	2	0.0297	56.4919	<0.0001
Error	0.0063	12	0.0005		
Total	0.0673	17			

S = 0.022

\bar{x} = 0.167

CV = 13.174 %

Del análisis de variancia, se observa que el p-valor en las fuentes de variación Factor A y factor B tienen un valor mayor 0.05, indicando que los niveles del factor A y del factor B no son diferentes estadísticamente; así mismo se observa que la interacción A x B presenta un p-valor inferior a 0.05, indicando que los niveles de cada factor interaccionan significativamente. Los datos se presentan en la tabla 26. Se procedió a realizar la prueba de Duncan.

Tabla 27. Prueba de Duncan para la interacción A x B para FBa

O.M.	Factor A (especies)	Factor B (enmiendas)	Tratamiento	Promedio	Significación
1	A2 = G	B2 = BC	A2B2	0.247	a
2	A1 = M	B3 = VC	A1B3	0.218	a b
3	A1 = M	B1 = SE	A1B1	0.195	b
4	A2 = G	B3 = VC	A2B3	0.140	c
5	A2 = G	B1 = SE	A2B1	0.122	c
6	A1 = M	B2 = BC	A1B2	0.089	d

De la prueba de Duncan, se observa que sobresale el tratamiento con girasol y biochar (A2B2) sin diferencias significativas con el tratamiento A1B3. Estos resultados validan la hipótesis planteada. Los datos se presentan en la tabla 27.

4.2.1.4 Factor de bioconcentración en la parte 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 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 28. Prueba de normalidad de Shapiro-Wilks para el FBr.

Tratamiento	Factor A (especies)	Factor B (enmiendas)	Tratamiento	Promedio	p-valor
1	A1 = maíz	B1 = SE	A1B1	0.578	0.5308
2		B2 = BC	A1B2	0.292	0.8308
3		B3 = VC	A1B3	0.642	0.5077
4	A2 = girasol	B1 = SE	A2B1	0.638	0.4002
5		B2 = BC	A2B2	0.461	0.3325
6		B3 = VC	A2B3	0.281	0.0384

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 FBr.

F. de V.	SC	GL	CM	Fc	p-valor
Factor A	0.009	1	0.009	0.340	0.5704
Factor B	0.165	2	0.082	3.206	0.0766
A x B	0.235	2	0.118	4.571	0.0334
Error	0.309	12	0.026		
Total	0.718	17			

S = 0.161

$\bar{x} = 0.482$

CV = 33.453 %

Del análisis de variancia, se observa que el p-valor en las fuentes de variación Factor A y factor B tienen un valor mayor 0.05, indicando que los niveles del factor A y del factor B no son diferentes estadísticamente; así mismo se observa que la interacción A x B presenta un p-valor inferior a 0.05, indicando que los niveles de cada factor interactúan significativamente. Los datos se presentan en la tabla 29. Se procedió a realizar la prueba de Duncan.

Tabla 30. Prueba de Duncan para la interacción A x B para FBr

O.M.	Factor A (especies)	Factor B (enmiendas)	Tratamiento	Promedio	Significación
1	A1 = M	B3 = VC	A1B3	0.642	a
2	A2 = G	B1 = SE	A2B1	0.638	a
3	A1 = M	B1 = SE	A1B1	0.578	a b
4	A2 = G	B2 = BC	A2B2	0.461	a b
5	A1 = M	B2 = BC	A1B2	0.292	b
6	A2 = G	B3 = VC	A2B3	0.281	b

De la prueba de Duncan, se observa que sobresalen los tratamientos A1B3 y A2B1, sin diferencias significativas con los tratamientos A1B1 y A2B2. Estos resultados validan la hipótesis planteada. Los datos se presentan en la tabla 30.

4.2.1.5 Factor de bioconcentración 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:

Ho: La población está distribuida normalmente.

Ha: La población no está distribuida normalmente.

Nivel de significación: $\alpha = 0.05$

Tabla 31. Prueba de normalidad de Shapiro-Wilks para el FBt.

Tratamiento	Factor A (especies)	Factor B (enmiendas)	Tratamiento	Promedio	p-valor
1	A1 = maíz	B1 = SE	A1B1	0.773	0.6910
2		B2 = BC	A1B2	0.371	0.8550
3		B3 = VC	A1B3	0.861	0.3760
4	A2 = girasol	B1 = SE	A2B1	0.760	0.3753
5		B2 = BC	A2B2	0.707	0.0771
6		B3 = VC	A2B3	0.420	0.2677

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 31. Posteriormente se desarrolló el análisis de variancia.

Tabla 32. Análisis de variancia para el FBt.

F. de V.	SC	GL	CM	Fc	p-valor
Factor A	0.007	1	0.007	0.252	0.6247
Factor B	0.156	2	0.078	2.866	0.0961
A x B	0.454	2	0.227	8.365	0.0053
Error	0.326	12	0.027		
Total	0.943	17			

S = 0.164

\bar{x} = 0.649

CV = 25.318 %

Del análisis de variancia, se observa que el p-valor en las fuentes de variación Factor A y factor B tienen un valor mayor 0.05, indicando que los niveles del factor A y del factor B no son diferentes estadísticamente; así mismo se observa que la interacción A x B presenta un p-valor inferior a 0.05, indicando que los niveles de cada factor interaccionan significativamente. Los datos se presentan en la tabla 32. Se procedió a realizar la prueba de Duncan.

Tabla 33. Prueba de Duncan para la interacción A x B para FBt

O.M.	Factor A (especies)	Factor B (enmiendas)	Tratamiento	Promedio	Significación
1	A1 = M	B3 = VC	A1B3	0.861	a
2	A1 = M	B1 = SE	A1B1	0.773	a
3	A2 = G	B1 = SE	A2B1	0.760	a
4	A2 = G	B2 = BC	A2B2	0.707	a b
5	A2 = G	B3 = VC	A2B3	0.420	b c
6	A1 = M	B2 = BC	A1B2	0.371	c

De la prueba de Duncan, se observa que sobresalen los tratamientos que ocupan los tres primeros lugares en orden de mérito, sin diferencias significativas con el tratamiento A2B3. Estos resultados validan la hipótesis planteada. Los datos se presentan en la tabla 33.

4.2.1.6 Factor de traslocación

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

Tratamiento	Factor A (especies)	Factor B (enmiendas)	Tratamiento	Promedio	p-valor
1	A1 = maíz	B1 = SE	A1B1	0.348	0.5319
2		B2 = BC	A1B2	0.277	0.5299
3		B3 = VC	A1B3	0.364	0.5279
4	A2 = girasol	B1 = SE	A2B1	0.207	0.3137
5		B2 = BC	A2B2	0.611	0.3845
6		B3 = VC	A2B3	0.527	0.9208

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 34. Posteriormente se desarrolló el análisis de variancia.

Tabla 35. Análisis de variancia para el FT.

F. de V.	SC	GL	CM	Fc	p-valor
Factor A	0.063	1	0.063	2.426	0.1453
Factor B	0.112	2	0.056	2.138	0.1606
A x B	0.174	2	0.087	3.324	0.0710
Error	0.314	12	0.026		
Total	0.663	17			

S = 0.161

$\bar{x} = 0.389$

CV = 41.451 %

Del análisis de variancia, se observa que el p-valor en las fuentes de variación Factor A, factor B y la interacción A x B es mayor que 0.05, indicando que los niveles del factor A, del factor B y de la interacción A x B, no son diferentes estadísticamente. No hubo efecto de las enmiendas orgánicas en el factor de traslocación de Cd en ambas especies estudiadas. Los datos se presentan en la tabla 35.

4.2.2 Hipótesis específica 2:

Ho: El biochar y el vermicompost no influyen los parámetros de crecimiento de maíz y girasol: altura de planta, longitud de raíz, materia seca aérea y materia seca radicular

Ha: El biochar y el vermicompost influyen significativamente los parámetros de crecimiento de maíz y girasol: altura de planta, longitud de raíz, materia seca aérea y materia seca radicular

4.2.2.1 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, 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 36. Prueba de normalidad de Shapiro-Wilks para la altura de planta.

Tratamiento	Factor A (especies)	Factor B (enmiendas)	Tratamiento	Promedio (cm)	p-valor
1		B1 = SE	A1B1	29.233	0.2134
2	A1 = maíz	B2 = BC	A1B2	27.333	0.8078
3		B3 = VC	A1B3	36.767	0.1829
4		B1 = SE	A2B1	30.900	0.4307
5	A2 = girasol	B2 = BC	A2B2	32.667	0.9578
6		B3 = VC	A2B3	46.300	0.8811

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 36. Posteriormente se desarrolló el análisis de variancia.

Tabla 37. Análisis de variancia para la altura de planta.

F. de V.	SC	GL	CM	Fc	p-valor
Factor A	136.676	1	136.676	3.622	0.0813
Factor B	529.013	2	264.507	7.010	0.0096
A x B	46.484	2	23.242	0.616	0.5563
Error	452.767	12	37.731		
Total	1164.940	17			

S = 6.142

$\bar{x} = 33.867$

CV = 18.137 %

Del análisis de variancia, se observa que el p-valor en las fuentes de variación Factor B presenta un p-valor inferior a 0.05, indicando que los niveles de B son diferentes estadísticamente; en cambio el p-valor para el Factor A y la interacción A x B es mayor que 0.05 indicando que los niveles de estos factores de variación no son diferentes estadísticamente. Los datos se presentan en la tabla 37. Se procedió a realizar la prueba de Duncan.

Tabla 38. Prueba de Duncan para los niveles del factor B.

O.M.	Nivel de B	Tratamiento	Promedio (cm)	Significación
1	B3	VC	41.533	a
2	B1	SE	30.067	b
3	B2	BC	30.000	b

De la prueba de Duncan para los tipos de enmiendas, se observa que el vermicompost (VC) ocupa el primer lugar en orden de mérito, superando estadísticamente al nivel sin enmiendas (SE) y biochar (BC). Estos resultados validan la hipótesis planteada. Los datos se presentan en la tabla 38.

4.2.2.2 Longitud de raíz

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 39. Prueba de normalidad de Shapiro-Wilks para la longitud de raíz.

Tratamiento	Factor A (especies)	Factor B (enmiendas)	Tratamiento	Promedio (cm)	p-valor
1		B1 = SE	A1B1	9.267	0.5538
2	A1 = maíz	B2 = BC	A1B2	11.333	0.5618
3		B3 = VC	A1B3	12.000	>0.999
4		B1 = SE	A2B1	8.667	0.2962

5	A2 =	B2 = BC	A2B2	9.567	0.8231
6	girasol	B3 = VC	A2B3	10.333	0.1734

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 39. Posteriormente se desarrolló el análisis de variancia.

Tabla 40. Análisis de variancia para longitud de raíz.

F. de V.	SC	GL	CM	Fc	p-valor
Factor A	8.134	1	8.134	2.480	0.1413
Factor B	15.108	2	7.554	2.303	0.1424
A x B	1.254	2	0.627	0.191	0.8284
Error	39.353	12	3.279		
Total	63.849	17			

S = 1.811

\bar{x} = 10.194

CV = 17.763 %

Del análisis de variancia, se observa que el p-valor en todas las fuentes de variación tienen un p-valor superior a 0.05, indicando que los niveles de cada factor no son diferentes estadísticamente. No hubo variación significativa en longitud de raíz en maíz y girasol por efecto de las enmiendas. Los datos se presentan en la tabla 40.

4.2.2.3 Materia seca aérea

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: α = 0.05

Tabla 41. Prueba de normalidad de Shapiro-Wilks para la materia seca aérea.

Tratamiento	Factor A (especies)	Factor B (enmiendas)	Tratamiento	Promedio (g)	p-valor
1		B1 = SE	A1B1	15.428	0.5518
2	A1 = maíz	B2 = BC	A1B2	14.603	0.8393
3		B3 = VC	A1B3	21.466	0.9600
4		B1 = SE	A2B1	12.498	0.6003
5	A2 = girasol	B2 = BC	A2B2	14.614	0.1233
6		B3 = VC	A2B3	17.249	0.5102

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 41. Posteriormente se desarrolló el análisis de variancia.

Tabla 42. Análisis de variancia para la materia seca aérea.

F. de V.	SC	GL	CM	Fc	p-valor
Factor A	25.459	1	25.459	5.298	0.0401
Factor B	104.130	2	52.065	10.834	0.0021
A x B	14.093	2	7.047	1.466	0.2693
Error	57.669	12	4.806		
Total	201.351	17			

S = 2.192

\bar{x} = 15.977

CV = 13.721 %

Del análisis de variancia, se observa que el p-valor en las fuentes de variación Factor A y Factor B tienen un p-valor inferior a 0.05, indicando que los niveles de cada factor son diferentes estadísticamente. El p-valor en la interacción A x B fue mayor que 0.05, indicando que los niveles de cada factor de A no interaccionan significativamente. Los datos se presentan en la tabla 42. Se procedió a desarrollar la prueba de Duncan.

Tabla 43. Prueba de Duncan para los niveles del factor A.

O.M.	Nivel de A	Tratamiento	Promedio (g)	Significación
1	A1	MAIZ	17.166	a
2	A2	GIRASOL	14.787	b

De la prueba de Duncan para los niveles de del factor A, se observa que el maíz (A1) ocupa el primer lugar en orden de mérito, superando estadísticamente al girasol (A2). Estos resultados validan la hipótesis planteada. Los datos se presentan en la tabla 43.

Tabla 44. Prueba de Duncan para los niveles del factor B.

O.M.	Nivel de B	Tratamiento	Promedio (cm)	Significación
1	B3	VC	19.358	A
2	B2	BC	14.609	B
3	B1	SE	13.963	B

De la prueba de Duncan para los tipos de enmiendas, se observa que el vermicompost (VC) ocupa el primer lugar en orden de mérito, superando estadísticamente al biochar (BC) y el nivel sin enmiendas (SE). Estos resultados validan la hipótesis planteada. Los datos se presentan en la tabla 44.

4.2.2.4 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 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 45. Prueba de normalidad de Shapiro-Wilks para la materia seca radicular.

Tratamiento	Factor A (especies)	Factor B (enmiendas)	Tratamiento	Promedio (g)	p-valor
1	A1 = maíz	B1 = SE	A1B1	6.351	0.5145
2		B2 = BC	A1B2	7.135	0.6073
3		B3 = VC	A1B3	7.031	0.1870
4	A2 = girasol	B1 = SE	A2B1	3.962	0.5835
5		B2 = BC	A2B2	5.482	0.1087
6		B3 = VC	A2B3	4.405	0.2329

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 45. Posteriormente se desarrolló el análisis de variancia.

Tabla 46. Análisis de variancia para la materia seca radicular.

F. de V.	SC	GL	CM	Fc	p-valor
Factor A	22.224	1	22.224	21.614	0.0006
Factor B	3.983	2	1.992	1.937	0.1866
A x B	0.773	2	0.387	0.376	0.6944
Error	12.339	12	1.028		
Total	39.320	17			

S = 1.014

$\bar{x} = 5.728$

CV = 17.701 %

Del análisis de variancia, se observa que el p-valor en la fuente de variación Factor A tienen un valor inferior a 0.05, indicando que los niveles de este factor (Especies) tienen diferencias

estadísticas. El p-valor del factor B y de la interacción A x B fue mayor que 0.05, indicando que los niveles del factor B no son diferentes estadísticamente, así como los niveles de A no interaccionan con los niveles de B. Los datos se presentan en la tabla 46. Se procedió a desarrollar la prueba de Duncan.

Tabla 47. Prueba de Duncan para los niveles del factor A.

O.M.	Nivel de A	Tratamiento	Promedio (g)	Significación
1	A1	MAIZ	6.839	a
2	A2	GIRASOL	4.616	b

De la prueba de Duncan para los niveles de del factor A, se observa que el maíz (A1) ocupa el primer lugar en orden de mérito, superando estadísticamente al girasol (A2). Estos resultados validan la hipótesis planteada. Los datos se presentan en la tabla 47.

4.2.3 Hipótesis específica 3

Ho: La fitorremediación no influye en la concentración de cadmio en un suelo contaminado de Sincos

Ha: La fitorremediación influye significativamente en la concentración de cadmio en un suelo contaminado de Sincos

4.2.3.1 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 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 48. Prueba de normalidad de Shapiro-Wilks para el contenido final de Cd en el suelo (mg/kg).

Tratamiento	Factor A (especies)	Factor B (enmiendas)	Tratamiento	Promedio (mg/kg)	p-valor
1	A1 = maíz	B1 = SE	A1B1	7.850	0.7627
2		B2 = BC	A1B2	7.570	0.1490
3		B3 = VC	A1B3	6.910	0.8773
4	A2 = girasol	B1 = SE	A2B1	6.577	0.2773
5		B2 = BC	A2B2	6.090	0.5351
6		B3 = VC	A2B3	6.940	0.2586

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 48. Posteriormente se desarrolló el análisis de variancia.

Tabla 49. Análisis de variancia para el contenido final de Cd en el suelo (mg/kg).

F. de V.	SC	GL	CM	Fc	p-valor
Factor A	3.708	1	3.708	73.423	<0.0001
Factor B	0.478	2	0.239	6.734	0.0305
A x B	2.011	2	1.005	19.906	0.0002
Error	0.606	12	0.051		
Total	6.803	17			

S = 0.226

\bar{x} = 6.989

CV = 3.231 %

Del análisis de variancia, se observa que el p-valor en todas las fuentes de variación tienen un valor inferior a 0.05, indicando que los niveles de A, B y A x B son diferentes estadísticamente. Los datos se presentan en la tabla 49. Se procedió a desarrollar la prueba de Duncan para la interacción A x B.

Tabla 50. Prueba de Duncan para la interacción A x B para contenido final de Cd en el suelo (mg/kg)

O.M.	Factor A (especies)	Factor B (enmiendas)	Tratamiento	Promedio (mg/kg)	Disminución (%)	Significación
1	A2 = G	B2 = BC	A2B2	6.090	- 53.154	a
2	A2 = G	B1 = SE	A2B1	6.577	- 49.846	b
3	A1 = M	B3 = VC	A1B3	6.910	- 46.846	b
4	A2 = G	B3 = VC	A2B3	6.940	- 46.615	b
5	A1 = M	B2 = BC	A1B2	7.570	- 41.769	c
6	A1 = M	B1 = SE	A1B1	7.850	- 39.615	c

De la prueba de Duncan, se observa que el tratamiento A2B2 ocupa el primer lugar en orden de mérito, superando significativamente a los demás tratamientos, con el más bajo contenido de Cd en el suelo. La disminución del Cd en el suelo fue de 53.154% respecto al contenido inicial. Estos resultados validan la hipótesis planteada. Los datos se presentan en la tabla 50.

4.3 Discusión de resultados

El contenido de Cd en la parte aérea tuvo los más altos valores con maíz sin enmienda, maíz con vermicompost y girasol con biochar, en un rango de 0.597 a 1.533 mg/kg, significativamente superiores a los demás tratamientos, mostrando que el maíz con o sin vermicompost tiene mayor contenido de Cd en la parte aérea al igual que el girasol con biochar. El girasol si se ve favorecido en la concentración de Cd en la parte aérea por el biochar.

No se observa diferencias significativas entre maíz y girasol, como se observó en el trabajo de investigación con un suelo de Huaripampa contaminado con Cd y Pb, en ese suelo el maíz absorbió más Cd combinando con el compost y el vermicompost (12)

Se observa que las enmiendas utilizadas tienen diferente efecto en la absorción de Cd por las plantas, según el tipo de suelo y la concentración de contaminantes.

El contenido de Cd en la parte radicular no mostró diferencias significativas entre maíz y girasol y sobresalió el tratamiento sin enmiendas junto con el vermicompost, mostrando que el biochar reduce la disponibilidad de Cd en el suelo y mostró menor absorción por la raíz.

Los rangos de concentración de Cd en la raíz, variaron de 3.193 a 4.387 mg/kg, mostrando que la raíz de maíz y girasol mostraron mayor concentración de Cd en raíz que en hoja. Estos resultados fueron similares cuando se agregó Cd al suelo hasta dosis de 20 mg/kg, donde la raíz concentró más Cd que la parte aérea (14).

El factor de bioconcentración en la parte aérea (FBa), que es un indicador de fitorremediación, presentó al girasol con biochar y el maíz con vermicompost con los mayores valores, significativamente superiores a los demás tratamientos. Los valores fueron menores que la unidad, por lo que ambas especies se comportarían como especies excloras (54).

Estas especies de plantas, maíz y girasol no transfieren fácilmente el Cd del suelo a la parte aérea, es por eso el FBa menor que la unidad. En el caso de girasol, los resultados coinciden con el trabajo realizado en suelos agrícolas agregando cadmio en dosis crecientes hasta 20 mg/kg; la diferencia de utilizar un suelo contaminado naturalmente y otro artificialmente, donde ambos tienen un Fba menor de 1, corrobora que el girasol es una planta fitoestabilizadora (14).

El factor de bioconcentración en la raíz (FBr) tuvo a los tratamientos de maíz con vermicompost (VC) y girasol sin enmiendas en los dos primeros lugares en orden de mérito sin diferencias significativas entre sí y superando a los demás tratamientos. Los valores fluctuaron entre 0.28 y 0.64, superiores a los observado en FBa.

Estos resultados mostraron que el maíz fue favorecido por el VC en la concentración de Cd en la raíz, debido a la mejora de las condiciones del suelo por la enmienda orgánica. Estos resultados corroboran el efecto de la aplicación de VC a suelos contaminados, conocido como vermirremediación, es decir utilizar estiércol producido por lombrices de tierra para limpiar sitios contaminados (64).

Para el factor de bioconcentración total, que es la suma de la concentración de Cd en toda la planta, respecto al suelo, los tratamientos que sobresalieron significativamente fueron maíz con VC, maíz sin enmiendas y girasol sin enmiendas. Lo cual indica que cuando no se aplicó enmiendas al maíz y girasol o se aplicó VC al maíz, la planta tuvo mayor facilidad para transferir Cd desde el suelo, debido a una mayor disponibilidad. Los valores fueron

menores que la unidad, mostrando que el maíz y girasol no son plantas bioacumuladoras (54).

En la evaluación de las características morfológicas, para altura de planta sobresalió significativamente el vermicompost, debido al efecto favorable de mejorar las condiciones físicas y químicas del suelo para un mejor desarrollo de la planta (62). Entre especies no hubo diferencias significativas durante el periodo de evaluación.

La longitud de raíz de maíz y girasol no tuvo diferencias significativas, debido al tiempo de evaluación, relativamente corto y al poco volumen de suelo que tuvieron las raíces para explorar.

En materia seca aérea el maíz tuvo superioridad significativa respecto al girasol. Entre las enmiendas orgánicas el vermicompost tuvo los mayores valores significativamente superiores al biochar. El vermicompost al mejorar las propiedades físicas y químicas del suelo facilitan el desarrollo de la vegetación y la biomasa seca de la raíz, como también lo reportó el estudio de fitorremediación con *Panicum virgatum*, donde la biomasa fue superior al control (22).

El contenido final de cadmio en el suelo fue significativamente menor con girasol y biochar, indicando una superioridad en biorremediar el suelo de Sincos, respecto al maíz y vermicompost.

El biochar se constituye en una enmienda orgánica que puede incrementar la retención de Cd en el suelo, debido a su estructura porosa, gran área superficial y abundantes grupos funcionales (68).

Estos resultados son similares a lo evaluado en México para la fitoestabilización de metales pesados en jales (residuos mineros) utilizando biocarbón, donde se utilizó biocarbón de cáscara de coco a dosis entre 6 a 25%, concluyéndose que se utilice biocarbón (biochar) incorporado al sustrato para reducir la disponibilidad de metales pesados en el suelo y evitar que entren a la cadena trófica (a diferencia de nuestro experimento donde se uso biocarbon de residuos forestales en dosis de 10% (20). A diferencia de nuestro trabajo, donde se utilizó biocarbón de residuos forestales a dosis de 10%, se debe resaltar el efecto del biochar como material adsorbente y fitoestabilizador.

El efecto del biochar, al margen de la materia prima utilizada, es su efecto en la mejora de propiedades de los suelos contaminados, que facilita la biorremediación y el desarrollo de la vegetación (17).

El biochar al combinarse con el suelo contaminado le confiere un incremento de adsorción, debido a su mayor área superficial, disminuyendo la fracción disponible del cadmio. La naturaleza del intercambio iónico es la adsorción electrostática y reversible de los cationes presentes en el suelo sobre grupos cargados negativamente, lo cual depende de la aromatización del biochar. Cuanto mayor es la estructura aromática, mayor será el intercambio orbital de carga negativa, mayor la pérdida de grupos funcionales y el efecto en la adsorción es más significativo (70).

La disminución de Cd en el suelo, obtenida con girasol y biochar fue de 53.154% respecto al contenido inicial, mostrando una gran proporción de Cd inmovilizado en el suelo.

CONCLUSIONES

1. Los tratamientos del cultivo de maíz sin enmiendas, maíz con vermicompost y el girasol con vermicompost lograron la mayor acumulación de Cd en la parte aérea de ambas especies cultivadas.
2. No hubo diferencias en la concentración de Cd en la raíz de ambas especies, siendo mayor con el tratamiento sin enmiendas y con vermicompost.
3. La concentración de Cd fue mayor en la raíz de ambas especies que en la parte aérea.
4. El factor de bioconcentración (FB) en la parte aérea fue mayor con girasol y biochar, así como maíz con vermicompost. En la raíz el FB fue mayor con maíz y vermicompost, así como girasol sin enmiendas. El FB total fue mayor en maíz con vermicompost, maíz sin enmiendas y girasol sin enmiendas. Todos los valores fueron menores que la unidad.
5. Las especies de girasol y las fuentes de enmiendas no afectaron significativamente el factor de traslocación. Este valor fue menor que la unidad en todos los tratamientos.
6. En altura de planta, el vermicompost tuvo superioridad significativa respecto al biochar. Entre especies de plantas no hubo significación estadística. En longitud de raíz no hubo significación estadística entre tratamientos.
7. En materia seca aérea, el maíz superó significativamente al girasol y el vermicompost al biochar. Para materia seca radicular, el maíz superó estadísticamente al girasol.
8. El contenido de Cd al final del experimento fue significativamente menor en el tratamiento con girasol y biochar. La disminución de Cd respecto al suelo inicial fue de 53.154 %.
9. El maíz y el girasol se comportan como especies exclusoras y fitoestabilizadoras de Cd en el suelo contaminado de Sincos.

RECOMENDACIONES

1. Aplicar biochar al suelo contaminado con cadmio, del distrito de Sincos, junto con la siembra de girasol (*Helianthus annuus* L.) debido a la disminución lograda en el contenido de Cd en el suelo.
2. Utilizar el vermicompost junto con el girasol para favorecer la acumulación de Cd por la planta.
3. Para incrementar el crecimiento de maíz utilizar el vermicompost como enmienda orgánica y tener mayor absorción de Cd.
4. Seguir ensayando otras enmiendas orgánicas solas y en combinación para determinar el efecto fitorremediador de diferentes especies vegetales, en los suelos del valle del Mantaro.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. BHAT, S., BASHIR, O., UL HAU, S., AMIN, T., RAFIQ, A., ALI, M., AMERICO-PINHEIRO and SHER, F. Phytoremediation of heavy metals in soil and water: An eco-friendly, sustainable and multidisciplinary approach. *Chemosphere*. Online. 2022. Vol. 303. [Accessed 23 March 2023]. Available from: <https://reader.elsevier.com/reader/sd/pii/S0045653522012814?token=A5C31EC71BE4F3B31C95A11D69C45B34C86144CD555E59053AA2514B5E5D83F6B949031CDD5FCDAE3FD9923D8E994FDB&originRegion=us-east-1&originCreation=20230324140735>
2. SURESH, B. and RAVISHANKAR, G. A. Phytoremediation—A Novel and Promising Approach for Environmental Clean-up. *Critical Reviews in Biotechnology*. 19 January 2004. Vol. 24, no. 2–3, p. 97–124. DOI 10.1080/07388550490493627.
3. HUARACA-FERNANDEZ, Jhon N., PÉREZ-SOSA, Lourdes, BUSTINZA-CABALA, Leonor S. and PAMPA-QUISPE, Noé B. Enmiendas orgánicas en la inmovilización de cadmio en suelos agrícolas contaminados: una revisión. *Información tecnológica*. August 2020. Vol. 31, no. 4, p. 139–152. DOI 10.4067/S0718-07642020000400139.
4. CRUZ-PAREDES, C., WALLANDER, H., KJOLLER, R. and ROUSK, J. Using Community Trait-distributions to Assign Microbial Responses to pH Changes and Cd in Forest Soils Treated with Wood Ash. *Soil Biology and Biochemistry*. 2017. Vol. 112, p. 153–164.
5. KOOKANA, R.S., SARMAH, A.K., VAN ZWIETEN, L., KRULL, E. and SINGH, B. Biochar Application to Soil. In : *Advances in Agronomy*. Elsevier, 2011. p. 103–143.
6. GOMERO, L. *Manejo Ecológico de suelos*. . Lima: RAAA, 1999.
7. MCCAULEY, G. N. Sprinkler vs. Flood Irrigation in Traditional Rice Production Regions of Southeast Texas. *Agronomy Journal*. July 1990. Vol. 82, no. 4, p. 677–683. DOI 10.2134/agronj1990.00021962008200040006x.
8. FLORES, B. *Fitorremediación con enmiendas orgánicas en suelos contaminados con metales pesados por el complejo metalúrgico La Oroya, Junín*. Online. Pre Grado. Huancavelica: Universidad Nacional de Huancavelica, 2022. [Accessed 16 March 2023]. Available from: <http://repositorio.unh.edu.pe/handle/UNH/4622>
9. VILCAPOMA, D. *Fitoextracción de cadmio y zinc en suelos contaminados utilizando Lactuca sativa var. White Boston, en la Estación Agropecuaria Experimental El Mantaro - Junín 2019*. Online. Huancayo: Universidad Nacional del Centro del Perú, 2019. [Accessed 16 March 2023]. Available from: <http://hdl.handle.net/20.500.12894/5460>
10. SANTAMARIA, S. *Uso de enmiendas para la reducción del contenido de cadmio en los granos de cacao orgánico en la parcela de la Cooperativa Agraria Industrial Naranjillo*. Online. Tingo María: Universidad Nacional Agraria de la Selva, 2019. [Accessed 16 March 2023]. Available from: <http://repositorio.unas.edu.pe/handle/UNAS/1896>
11. CONTRERAS, M., CUBA, S. and ROJAS, A. *Eficiencia del compostaje y vermicompostaje en la biorremediación de suelos contaminados con cadmio y plomo por pasivos ambientales mineros de*

- Huamantanga - Canta*. Online. Callao: Universidad Nacional del Callao, 2021. [Accessed 16 March 2023]. Available from: <https://renati.sunedu.gob.pe/handle/sunedu/183/simple-search?filterquery=Contreras+Tapia%2C+Melissa+Karen&filtername=author&filtertype>equals>
12. GRANDEZ, M. *Remoción de cadmio y plomo en suelos a orillas del río Mantaro, Junín, mediante fitorremediación con girasol (*Helianthus annuus*) y maíz (*Zea mays*) usando enmiendas*. Online. Lima: Universidad César Vallejo, 2017. [Accessed 16 March 2023]. Available from: <https://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/3537>
13. ALDERETE, M. *Eficiencia del biochar en la inmovilización del cadmio, en el suelo agrícola Cupiche, Ricardo Palma, 2019*. Online. Lima: Universidad César Vallejo, 2019. [Accessed 16 March 2023]. Available from: <https://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/50125>
14. CLEMENTE, J., MEDINA, J., LAURA, J., PARIONA, L. and GUTIERREZ, P. Fitorremediación en suelos contaminados con Cd usando girasol (*Helianthus annuus* L. var. Sunbright). *Acta Agronómica*. Online. 2021. Vol. 70, no. 2, p. 163–170. [Accessed 17 March 2023]. Available from: <http://www.scielo.org.co/pdf/acag/v70n2/0120-2812-acag-70-02-163.pdf>
15. SILVA, CH. *Efecto del biocarbón obtenido a partir de biomasa residual agrícola en la inmovilización de cadmio en el suelo en fase de laboratorio*. Online. Tingo María: Universidad Nacional Agraria de la Selva, 2021. [Accessed 17 March 2023]. Available from: https://repositorio.unas.edu.pe/bitstream/handle/UNAS/2029/TS_CMSG_2021.pdf?sequence=1&isAllowed=y
16. SANTOS, W., CALDEIRA, E., D'ACUNHA, B., DOS SANTOS, O., GASPAR, E. and GUIMARAES, E. Effects of swine manure biochar on sorption equilibrium of cadmium and zinc in sandy soils. *Agronomía Colombiana*. 2021. Vol. 39, no. 1, p. 37–46. DOI <https://doi.org/10.15446/agron.colomb.v39n1.90918>.
17. SANTA-OLALLA, A. *Efectos de la aplicación del biochar en un suelo contaminado por elementos traza*. Online. Sevilla: Universidad de Sevilla, 2020. [Accessed 17 March 2023]. Available from: <http://hdl.handle.net/10261/239586>
18. ÁLVAREZ CALVO, M^a Luisa. *Tratamiento de suelos contaminados por metales mediante combinación de técnicas de fitorremediación con adición de biochar*. Online. Madrid: Universidad Politécnica de Madrid, 2019. [Accessed 17 March 2023].
19. SEGURA, W. *Evaluación de la efectividad del biocarbón para mejorar la estrategia de fitoestabilización asistida de residuos mineros*. Online. Murcia: Universidad Politécnica de Cartagena, 2019. [Accessed 17 March 2023]. Available from: <https://repositorio.upct.es/xmlui/bitstream/handle/10317/8166/tfm-seg-eva.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
20. ROSAS, M. *Fitoestabilización de metales pesados provenientes de jales mineros utilizando biocarbón como enmienda orgánica*. Online. Cuernavaca, Morelos: Universidad Autónoma del

Estado de Morelos, 2021. [Accessed 17 March 2023]. Available from: <http://riaa.uaem.mx/xmlui/bitstream/handle/20.500.12055/2532/RORMMR05T.pdf?sequence=1>

21. ABIODUN, S., IJAH, U., ABIYOE, O. and BALA, J. Vermicompost assisted Phytoremediation of heavy metal contaminated soil in Madaka district, Nigeria Using *Melissa officinalis* L. (Lemon balm) and *Sida acuta* (Stubborn weed). *Research Square*. Online. 2021. P. 1–20. [Accessed 17 March 2023]. Available from: https://www.researchgate.net/publication/349854669_Vermicompost_Assisted_Phytoremediation_of_Heavy_Metal_Contaminated_Soil_in_Madaka_District_Nigeria_Using_Melissa_officinalis_L_Lemon_balm_and_Sida_acuta_Stubborn_weed

22. SHRESTHA, P., BELLITURK, K. and GORRES, J. Phytoremediation of Heavy Metal-Contaminated Soil by Switchgrass: A Comparative Study Utilizing Different Composts and Coir Fiber on Pollution Remediation, Plant Productivity, and Nutrient Leaching. *Int. J. Environ. Res- Public Health*. Online. 2019. Vol. 16, no. 7. [Accessed 17 March 2023]. Available from: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC6479718/>

23. LIU, Y., XIAO, T., NING, Z., TANG, J. and ZHOU, G. High cadmium concentration in soil in the Three Gorges region: geogenic source and potential bioavailability. *Appl. Geochem*. Online. 2013. Vol. 37, p. 149–156. [Accessed 18 March 2023]. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0883292713002023>

24. CLOQUET, C., CARIGNAN, J., LIBOUREL, G., STERCKEMAN, T. and PERDRIX, E. Tracing source pollution in soil using cadmium and lead isotopes. *Environ. Sci. Technol.* Online. 2006. Vol. 40, p. 2525–2530. [Accessed 18 March 2023]. Available from: <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/es052232%2B>

25. SIX, L. and SMOLDERS, E. Future trends in soil cadmium concentration under current cadmium fluxes to European agricultural soils. *Sci. Total, Environ*. Online. 2014. Vol. 485, p. 319–328. [Accessed 18 March 2023]. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0048969714004495>

26. TAYLOR, M., KIM, N., SMIDT, G., BUSBY, C., MCNALLY, S., ROBINSON, B., KRATZ, S. and SCHNUG, E. Trace elements contaminants and radioactivity from phosphate fertiliser. In : SCHNUG, E. and DE KOK, L. (eds.), *Phosphorus in Agriculture: 100 % Zero*. Online. Dordrecht: Springer, 2016. p. 231–266. [Accessed 18 March 2023]. Available from: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-94-017-7612-7_12

27. HE, Z., XU, H., ZHU, Y., YANG, X. and CHEN, G. Adsorption-desorption characteristics of cadmium in variable charge soils. *J. Environ. Sci. Heal*. Online. 2005. Vol. 40, p. 805–822. [Accessed 19 March 2023]. Available from: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1081/ESE-200048273>

28. EGGLETON, J. and THOMAS, K. A review of factors affecting the release and bioavailability of contaminants during sediment disturbance events. *Environ. Int.* 30, 973-980. 2004. Vol. 30, p. 973–980.

29. BELON, E., BOISSON, M., DEPORTES, I., EGLIN, T., FEIX, I., BISPO, A., GALSOMIES, L., LEBLOND, S. and GUELIER, C. An inventory of trace elements inputs to French agricultural soils. *Sci. Total Environ.* Online. 2012. Vol. 439, p. 87–95. [Accessed 19 March 2023]. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0048969712012028>
30. BIRKE, M., REIMANN, C., RAUCH, U., LADENBERGER, A., DEMETRIADES, A., JAHNEKLINGBERG, F., OORTS, K., GOSAR, M., DINELLI, E. and HALAMIC, J. GEMAS: Cadmium distribution and its sources in agricultural and grazing land soil of Europe - original data versus clr-transformed data. *J. Gechem. Explor.* Online. 2017. Vol. 173, p. 13–30. [Accessed 19 March 2023]. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0375674216303090>
31. KABIR, E., RAY, S., KIM, K., YOON, H., JEON, E., KIM, Y., CHO, Y., YUN, S. and BROWN, R. Current status of trace metal pollution in soils affected by industrial activities. *The Scientific World Journal.* Online. 2012. Vol. 2012. [Accessed 19 March 2023]. Available from: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC3356731/>
32. SMOLDERS, E. and MERTENS, J. Cadmium. In : ALLOWAY, J. (ed.), *Heavy metals in soils - Trace Metals and Metalloids in Soils and Their Bioavailability*. 3. Dordrecht : Springer, 2013. p. 283–299.
33. TABELIN, C., IGARASHI, T., VILLACORTE-TABELIN, M., PARK, I., OPISO, E., ITO, M. and HIROYOSHI, N. Arsenic, selenium, boron, lead, cadmium, copper, and zinc in naturally contaminated rocks: a review of their sources, modes of enrichment, mechanisms of release, and mitigation strategies. *Sci. Total, Environ.* Online. 2018. Vol. 645, p. 1522–1553. [Accessed 19 March 2023]. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0048969718325476>
34. AHMED, I., CROUT, N. and YOUNG, S. Kinetics of Cd sorption, desorption and fixation by calcite: A long-term radiotracer study. *Geochem. Cosmochim.* Online. 2008. Vol. Acta 72, p. 1498–1512. [Accessed 19 March 2023]. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0016703708000203>
35. CLEMENS, S. Toxic metal accumulation, responses to exposure and mechanisms of tolerance in plants. *Biochimie.* Online. 2006. Vol. 88, p. 1707–1719. [Accessed 18 March 2023]. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0300908406001428>
36. 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. *J. Exp. Bot.* 2009. Vol. 60, no. 9, p. 2677–2688.
37. YANG, Y., NAN, Z., ZHAO, Z., WANG, Z., WANG, S., WANG, X., JIN, W. and ZHAO, C. Bioaccumulation and translocation of cadmium in cole (*Brassica campestris* L.) and celery (*Apium graveolens*) grown in the polluted oasis soil, Northwest of China. *J. Environ. Sci.* Online. 2011. Vol. 23, no. 8, p. 1368–1374. [Accessed 18 March 2023]. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1001074210605803>
38. EISSA, M. and NEGIM, O. Heavy metals uptake and translocation by lettuce and spinach grown on a metal-contaminated soil. *J. Soil Sci. Plant Nutr.* Online. 2018. Vol. 18, p. 1097–1107.

[Accessed 19 March 2023]. Available from: https://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-95162018000401097

39. SHEORAN, V., SHEORAN, A. and POONIA, P. Role of hyperaccumulators in phytoextraction of metals from contaminated mining sites: a review. *Crit. Rev. Environ. Sci. Technol.* Online. 2011. Vol. 41, p. 168–214. [Accessed 19 March 2023]. Available from: Role of hyperaccumulators in phytoextraction of metals from contaminated mining sites: a review

40. ALI, E., HUSSAIN, A., ULLAH, I., KHAN, F., KAUSAR, SH., RASHID, S., RABBANI, I., IMRAN, M., KAKAR, K., SHAH, J., CAI, M., HUSSAIN, N. and SUN, P. Cadmium phytotoxicity: issues, progress, environmental concerns and future perspectives. *Rev. FCA UNCUYO.* Online. 2020. Vol. 52, no. 1, p. 391–405. [Accessed 20 March 2023]. Available from: <https://revistas.uncu.edu.ar/ojs/index.php/RFCFA/article/view/3068>

41. ROBINSON, B., GREEN, S., MILLS, T., CLOTHIER, B., VAN DER VELDE, M., LAPLANE, R., FUNG, L., DEURER, M., HURST, S., THAYALAKUMARAN, T. and DIJSSEL, C. Phytoremediation: using plants as biopumps to improve degraded environments. *Australian Journal of Soil Research.* Online. 2003. Vol. 41, p. 599–611. [Accessed 19 March 2023]. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301479718309976>

42. SINGH, O., LABANA, S., PANDEY, G., BUDHIRAJA, R. and JAIN, R. Phytoremediation: an overview of metallic ion decontamination from soil. *Applied Microbiology and Biotechnology.* Online. 2003. Vol. 61, no. 5–6, p. 405–412. [Accessed 19 March 2023]. Available from: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/12764555/>

43. NYER, E. and GATLIFF, E. Phytoremediation. *Groundwater Monitoring & Remediation.* Online. 1996. Vol. 16, no. 1, p. 58–62. [Accessed 19 March 2023]. Available from: <https://ngwa.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/j.1745-6592.1996.tb00569.x>

44. ALI, H., KHAN, E. and SAJAD, M. Phytoremediation of heavy metals-concepts and applications. *Chemosphere.* Online. 2013. Vol. 91, p. 869–881. [Accessed 20 March 2023]. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0045653513001914>

45. PADMAVATHIAMMA, P. and LI, L. Phytoremediation Technology: Hiper-accumulation Metals in Plants. *Water, Air, and Soil Pollution.* Online. 2007. Vol. 184, p. 105–126. [Accessed 19 March 2023]. Available from: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11270-007-9401-5>

46. BLAYLOCK, M. and HUANG, J. Phytoextraction of metals. In: RASKIN, I. and ENSLEY, B. (eds.), *Phytoremediation of toxic metals: using plants to clean up the environment.* New York: Wiley, 2000. p. 53–69.

47. EAPEN, S. and D`SOUZA, S. Prospects of genetic engineering of plants for phytoremediation of toxic metals. *Biotechnology advances.* Online. 2005. Vol. 23, no. 2, p. 97–114. [Accessed 20 March 2023]. Available from: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/15694122/>

48. CUNNINGHAM, S. and BERTI, W. Phytostabilization of metals. In: RASKIN, I. and ENSLEY, B. (eds.), *Phytoremediation of toxic metalsd: using plants to clean up the environment.* New York: Wiley, 2000. p. 71–88.

49. SCHNOOR, J. Phytostabilization of metals using hybrid poplar trees. In : RASKIN, I. and ENSLEY, B. (eds.), *Phytoremediation of toxic metals: using plants to clean up the environment*. New York: Wiley, 2000. p. 133–150.
50. SCHNOOR, J., LICHT, L., MCCUTCHEON, S., WOLFE, N. and CARREIRA, L. Phytoremediation of organic and nutrient contaminants. *Environmental Science and Technology*. Online. 1995. Vol. 29, no. 7, p. 318–323. [Accessed 20 March 2023]. Available from: https://cfpub.epa.gov/ncer_abstracts/index.cfm/fuseaction/display.files/fileID/12778
51. GHOSH, M. and SINGH, S. A review on phytoremediation of heavy metals and utilization of its byproducts. *Applied Ecology and Environmental Research*. Online. 2005. Vol. 3, no. 1, p. 1–18. [Accessed 20 March 2023]. Available from: https://www.researchgate.net/publication/237240517_A_Review_on_Phytoremediation_of_Heavy_Metals_and_Utilization_of_Its_By-products
52. ERAKHUMEN, A. Phytoremediation: an environmentally sound technology for pollution prevention, control and remediation in developing countries. *Educational Research and Review*. Online. 2007. Vol. 2, no. 7, p. 151–156. [Accessed 20 March 2023]. Available from: https://academicjournals.org/article/article1379597261_Erakhumen.pdf
53. PIVETZ, B. Ground water Issue. *EPA*. Online. 2001. [Accessed 20 March 2023]. Available from: https://www.epa.gov/sites/default/files/2015-06/documents/epa_540_s01_500.pdf
54. AUDET, P. and CHAREST, CH. Heavy metal phytoremediation from a meta - analytical perspective. *Environmental Pollution*. Online. 2007. Vol. 147, no. 1, p. 231–237. [Accessed 20 March 2023]. Available from: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/17045709/>
55. YOON, Joonki, CAO, Xinde, ZHOU, Qixing and MA, Lena Q. Accumulation of Pb, Cu, and Zn in native plants growing on a contaminated Florida site. *Science of The Total Environment*. 15 September 2006. Vol. 368, no. 2–3, p. 456–464. DOI 10.1016/J.SCITOTENV.2006.01.016.
56. VYSLOUZILOVÁ, M., TLUSTOS, P., SZÁKOVÁ, J. and PAVLÍKOVÁ, D. As, Cd, Pb and Zn uptake by *Salix* spp. clones grown in soils enriched by high loads of these elements. *PLANT SOIL ENVIRON*. 2003. Vol. 49, no. 5, p. 191–196.
57. OLIVARES, ELIZABETH and PENA, EDER. Bioconcentración de elementos minerales en *Amaranthus Dubius* (bledo, pira), creciendo silvestre en cultivos del Estado Miranda, Venezuela, y utilizado en alimentación. *INCI*. 2009. Vol. 34, p. 604–611.
58. ZHAO, Fang Jie, HAMON, Rebecca E., LOMBI, Enzo, MCLAUGHLIN, Mike J. and MCGRATH, Steve P. Characteristics of cadmium uptake in two contrasting ecotypes of the hyperaccumulator *Thlaspi caerulescens*. *Journal of Experimental Botany*. 1 March 2002. Vol. 53, no. 368, p. 535–543. DOI 10.1093/JEXBOT/53.368.535.
59. LASAT, M. M., PENCE, N. S., GARVIN, D. F., EBBS, S. D. and KOCHIAN, L. V. Molecular physiology of zinc transport in the Zn hyperaccumulator *Thlaspi caerulescens* - PubMed. *J Exp Bot*. 2000. Vol. 51, no. 342, p. 9–71.

60. AUDET, Patrick and CHAREST, Christiane. Heavy metal phytoremediation from a meta-analytical perspective. *Environmental pollution (Barking, Essex: 1987)*. May 2007. Vol. 147, no. 1, p. 231–237. DOI 10.1016/J.ENVPOL.2006.08.011.
61. LAZCANO, C., GOMEZ-BRANDON, M. and DOMINGUEZ, J. Comparison of the effectiveness of composting and vermicomposting for the biological stabilization of cattle manure. *Chemosphere*. Online. 2008. Vol. 72, p. 1013–1019. [Accessed 20 March 2023]. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0045653508004797>
62. ROMAN, P., MARTINEZ, M. and PANTOJA, A. *Manual del compostaje del agricultor. Experiencias en América Latina*. Online. Santiago de Chile: FAO, 2013. [Accessed 20 March 2023]. Available from: <https://www.fao.org/3/i3388s/i3388s.pdf>
63. DADA, E., NJOKU, K., OSUNTOKI, A. and AKINOLA, M. Heavy metal remediation potential of a tropical wetland earthworm *Libyodrilus violaceus* (Beddard) Iranica. *J. Energy Environ*. 2016. Vol. 7, p. 247–254.
64. SHI, Z., LIU, J., TANG, Z., ZHAO, Y. and WNAG, C. Vermiremediation of organically contaminated soils: concepts, current status, and future perspectives. *Appl. Soil Ecol*. Online. 2020. Vol. 147. [Accessed 20 March 2023]. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0929139319302379>
65. CERNANSKY, Rachel. Agriculture: State-of-the-art soil. *Nature*. 15 January 2015. Vol. 517, no. 7534, p. 258–260. DOI 10.1038/517258A.
66. XU, C., LIN, X. and WU, Q. Impacts of biochar on availability of heavy metals and nutrient content of contaminated soil under waterlogged conditions. In: *Journal of Soil and Water Conservation*. 2012. p. 194–199.
67. WANG, Shuguang, XU, Yan, NORBU, Namkha and WANG, Zhan. Remediation of biochar on heavy metal polluted soils. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 1 January 2018. Vol. 108, no. 4, p. 042113. DOI 10.1088/1755-1315/108/4/042113.
68. PARK, Jin Hee, CHOPPALA, Girish Kumar, BOLAN, Nanthi Sirangie, CHUNG, Jae Woo and CHUASAVATHI, Thammared. Biochar reduces the bioavailability and phytotoxicity of heavy metals. *Plant and Soil* 2011 348:1. 19 August 2011. Vol. 348, no. 1, p. 439–451. DOI 10.1007/S11104-011-0948-Y.
69. REES, F., SIMONNOT, M. O. and MOREL, J. L. Short-term effects of biochar on soil heavy metal mobility are controlled by intra-particle diffusion and soil pH increase. *European Journal of Soil Science*. 1 January 2014. Vol. 65, no. 1, p. 149–161. DOI 10.1111/EJSS.12107.
70. LI, Hongbo, DONG, Xiaoling, DA SILVA, Evandro B., DE OLIVEIRA, Letuzia M., CHEN, Yanshan and MA, Lena Q. Mechanisms of metal sorption by biochars: Biochar characteristics and modifications. *Chemosphere*. 1 July 2017. Vol. 178, no. 9, p. 466–478. DOI 10.1016/J.CHEMOSPHERE.2017.03.072.
71. AHMAD, M., RAJAPAKSHA, A., LIM, J., ZHANG, M., BOLAN, N., MOHAN, D., VITHANAGE, M., LEE, S. and OK, Y. Biochar as a sorbent for contaminant management in soil and water: a review.

Chemosphere. Online. 2014. Vol. 99, p. 19–33. [Accessed 20 March 2023]. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0045653513015051>

72. SILVA, M., FARIAS, F., MORAIS, A., ANDRADE, G. and LIMA, E. Crescimento e produtividade do girassol cultivado na entressafra com diferentes laminas de agua. *Rev. Bras. Eng. Agric. Ambient.* Online. 2007. Vol. 11, p. 482–488. [Accessed 20 March 2023]. Available from: <https://www.scielo.org.mx/pdf/agro/v51n6/1405-3195-agro-51-06-00649-en.pdf>

73. CONABIO. *Sistema de Información de Organismos Vivos Modificados* Online. 2008. [Accessed 20 March 2023]. Available from: http://www.conabio.gob.mx/conocimiento/bioseguridad/pdf/21459_sg7.pdf

74. RODRIGUEZ, R., ECHEVARRÍA, M. and SALABERRY, M. Girasol ornamental. *Boletín de floricultura*. 2004.

75. SANCHEZ, L., BUENO, G. and PEREZ, B. *Evaluación agronómica de especies nativas con potencial forrajero en el departamento del Guaviare* Online. Villavicencio-Meta, 2002. [Accessed 20 March 2023]. Available from: https://repository.agrosavia.co/bitstream/handle/20.500.12324/1186/41345_27452.pdf?sequence=1&isAllowed=y

76. DIONISIO, A., RICSE, J., SANCHEZ, F., CHUNHUAY, Y. and CASAVILCA, M. *El cultivo de maíz blanco amiláceo en la cuenca media del Mantaro*. Online. 2019. Huancavelica: CESCO. [Accessed 20 March 2023]. Available from: https://www.desco.org.pe/recursos/site/files/CONTENIDO/1329/maizamilaceo_VF.pdf

77. SAENZ. *Clasificación taxonómica del maíz*. Segunda edición. México: Consejo Nacional para la Cultura, 1999.

78. MANRIQUE, A. *El maíz en el Perú*. Lima: Fondo de promoción de la cultura agraria, 1988.

79. RIMACHE, M. *Cultivo de maíz*. Primera edición. Lima: Empresa Editora Macro, 2008.

80. MINISTERIO DEL AMBIENTE. *Glosario de términos. Sitios Contaminados*. Online. 2012. Lima. [Accessed 20 March 2023]. Available from: <https://www.minam.gob.pe/calidadambiental/wp-content/uploads/sites/22/2015/02/2016-05-30-Conceptos-propuesta-Glosario.pdf>

81. SOIL SCIENCE SOCIETY OF AMERICA. *Glossary of Soil Science Terms*. Online. 2015. Madison. [Accessed 20 March 2023]. Available from: www.soils.org

82. BERNAL, C. *Metodología de la investigación. Administración, economía, humanidades y ciencias sociales*. Cuarta edición. Prentice Hall, 2016. ISBN 978-958-699-310-4.

83. BAZÁN, R. *Manual de procedimientos de los análisis de suelos y agua con fines de riego*. Online. Lima, 2017. [Accessed 22 March 2023]. Available from: https://repositorio.inia.gob.pe/bitstream/20.500.12955/504/1/Bazan-Manual_de_procedimientos_de_los.pdf

84. USEPA. *Microwave assisted acid digestion of sediments, sludges, and soils*. 1998.

85. ARROYO, J. *¿Cómo ejecutar un plan de investigación?* . Huancayo: Manual del Investigador, 2012.
86. STEEL, G. and TORRIE, J. *Bioestadística: Principios y Procedimientos* . Segunda Edición. 1985.
87. DI RIENZO, J., CASANOVES, F., BALZARINI, M., GONZALES, L., TABLADA, M., and ROBLEDO, C. *Infostat, versión 2020* . Online. Córdoba, 2020. [Accessed 22 March 2023]. Available from: <http://www.infostat.com.ar>

ANEXOS

Anexo 1. Resultados del análisis de caracterización del suelo de Sincos.



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 : SUSAN JUDITH CASTAÑEDA FERRER

Departamento : JUNIN
 Distrito : SINCOS
 Referencia : H.R. 77400-110C-22

Bolt.: 5293

Provincia : JAUJA
 Predio :
 Fecha : 09/08/2022

Lab	Número de Muestra 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 ⁺			
8372	MS-01	8.03	1.79	11.18	3.09	11.8	145	56	32	12	Fr. A.	13.12	8.89	3.46	0.34	0.44	0.00	13.12	13.12	100

A = Arena ; A.Fr. = Arena Franca ; Fr.A. = Franco Arenoso ; Ft. = 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



Constantino Calderón Mendoza
 Jefe del Laboratorio

Anexo 2. Resultado del análisis de Cd inicial en el suelo.



INFORME DE ENSAYO
RCJ-INFORME-23-MA-0007

REV. 2.1

Página 1 de 1

A solicitud de	: SHALMERY CANCHAN TORPOCO	Cantidad de Muestras	: 1
Por cuenta de	: SHALMERY CANCHAN TORPOCO	Fecha de Recepción	: 04/02/2023
Tipo de muestra	: Suelo Agrícola	Fecha de Ensayo	: Del 04/02/2023
Tipo de Análisis	: Reconocimiento		: Al 04/02/2023

Referencia	: Nota de Servicio N° 9503
-------------------	----------------------------

Métodos	: Absorción Atómica
----------------	---------------------

ID. Laboratorio	ID. Cliente	ELEMENTOS							
Elemento		Cd							
Método		AAS							
Unidad		g/Kg							
Límite de Cuantificación		0.001							
MA-23/00057	M-001-SINCOS	0.013							

Los resultados mencionados en este documento proceden de muestras proporcionadas por el cliente o por un tercero a nombre del cliente. Laboratorios RCJ Labs Universal no es responsable del origen o fuente de la cual las muestras han sido tomadas.
 El informe de ensayo solo es válido para la muestra del lote sometida a análisis, no pudiendo extenderse los resultados del informe a ningún otro lote que no haya sido analizado.
 Pasado el plazo de almacenamiento de 90 días para remanentes o pulpas y 30 días para Rechazos o gruesas, se procederá a descartar. Favor no considerar esta información si se presentan instrucciones al inicio del servicio.

Huancayo, 6 de Febrero de 2023





ING. MIGUEL G. CACERES ROMERO
 CIP N° 233781
 Responsable Lab. Químico

RCJ LABS UNIVERSAL - Carretera Central KM. 8.9 N° 525 San Agustín de Cajos - Teléfono: 984-547-829 - www.rcjlabuniversal.com

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



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



INFORME DE ANALISIS ESPECIAL EN FOLIAR

SOLICITANTE : SUSAN JUDITH CASTAÑEDA FERRER
PROCEDENCIA : JUNIN/ JAUJA/ SINCOS
MUESTRA : PARTE AEREA
REFERENCIA : H.R. 78396
BOLETA : 5501
FECHA : 14/12/2022

N. Lab.	CLAVE DE CAMPO	Cd ppm
3907	T1R1H	1.60
3908	T2R1H	1.20
3909	T3R1H	1.80
3910	T4R1H	0.68
3911	T5R1H	0.53
3912	T6R1H	0.58
3913	B1R1H	1.33
3914	B2R1H	1.55
3915	B3R1H	1.65
3916	B4R1H	0.83
3917	B5R1H	0.85
3918	B6R1H	0.73
3919	V1R1H	1.33
3920	V2R1H	1.60
3921	V3R1H	1.58
3922	V4R1H	1.03
3923	V5R1H	0.83
3924	V6R1H	1.05



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 parte radicular.



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



INFORME DE ANALISIS ESPECIAL EN FOLIAR

SOLICITANTE : SUSAN JUDITH CASTAÑEDA FERRER
PROCEDENCIA : JUNIN/ JAUJA/ SINCOS
MUESTRA : PARTE RADICULAR
REFERENCIA : H.R. 78395
BOLETA : 5501
FECHA : 14/12/2022

N. Lab.	CLAVE DE CAMPO	Cd ppm
3889	T1R1R	4.05
3890	T2R1R	3.30
3891	T3R1R	6.30
3892	T4R1R	2.63
3893	T5R1R	2.42
3894	T6R1R	1.61
3895	B1R1R	5.30
3896	B2R1R	4.78
3897	B3R1R	3.20
3898	B4R1R	5.38
3899	B5R1R	4.80
3900	B6R1R	2.49
3901	V1R1R	3.60
3902	V2R1R	1.65
3903	V3R1R	3.18
3904	V4R1R	1.50
3905	V5R1R	1.59
3906	V6R1R	2.79



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 : SUSAN JUDITH CASTAÑEDA FERRER
PROCEDENCIA : JUNIN/ JAUJA/ SINCOS
REFERENCIA : H.R. 78394
BOLETA : 5501
FECHA : 20/12/2022

Lab	Número Muestra		Cd ppm
	Claves		
3248	T1R1S		7.72
3249	T2R1S		7.83
3250	T3R1S		8.00
3251	T4R1S		7.35
3252	T5R1S		8.08
3253	T6R1S		7.28
3254	B1R1S		6.78
3255	B2R1S		6.90
3256	B3R1S		7.05
3257	B4R1S		6.65
3258	B5R1S		6.70
3259	B6R1S		6.38
3260	V1R1S		6.17
3261	V2R1S		6.07
3262	V3R1S		6.03
3263	V4R1S		6.73
3264	V5R1S		7.02
3265	V6R1S		7.07



Dr. Constantino Calderón Mendoza
Jefe del Laboratorio

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

Anexo 6. Galería fotográfica.



Fotografía 1. Excavación de calicatas para la obtención de muestras.



Fotografía 2. Profundidad de la calita.



Fotografía 3. Extracción de la muestra simple.



Fotografía 4. Pesado de la muestra simple.



Fotografía 5. Obtención de aproximadamente 100 kg de suelo de la capa arable.



Fotografía 6. Tamizaje de la muestra.



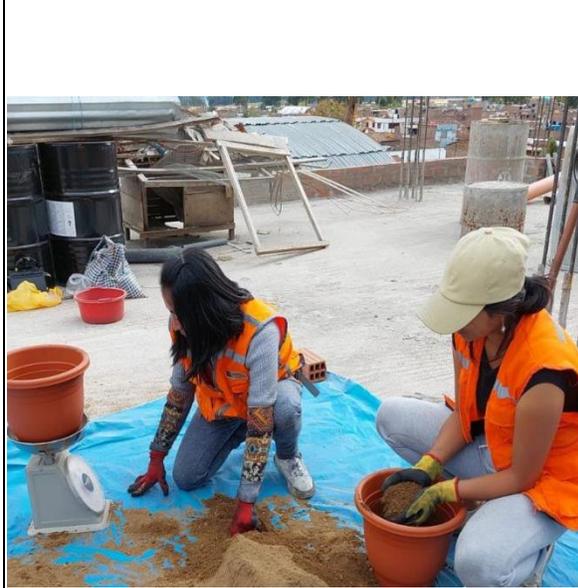
Fotografía 7. Mezcla de las 27 muestras simples.



Fotografía 8. Cuarteo de la muestra compuesta.



Fotografía 9. Obtención de la muestra representativa aproximadamente 1 kg.



Fotografía 10. Preparación de los maceteros.



Fotografía 11. Adición de las emmiendas orgánicas en los maceteros.



Fotografía 12. Codificación de los 18 maceteros.



Fotografía 13. Saturación con agua a cada macetero.



Fotografía 14. Siembra de las semillas.



Fotografía 15. Germinación de las semillas de maíz (derecha) y semillas de girasol (izquierda).



Fotografía 16. Semana 8 después de la siembra de las semillas de maíz (derecha) y semillas de girasol (izquierda).



Fotografía 17. Semana 14 después de la siembra de las semillas de maíz (derecha) y semillas de girasol (izquierda).



Fotografía 18. Extracción de las palntas y lavado de las raíces.



Fotografía 19. Medición de la altura de las plantas de maíz (izquierda) y girasol (derecha).



Fotografía 20. Medición de la longitud de la raíz de girasol.



Fotografía 21. Corte de la parte radicular del maíz.



Fotografía 22. Muestras de la parte aérea y radicular de las plantas sembradas en suelo sin enmiendas.



Fotografía 23. Muestras de la parte aérea y radicular de las plantas sembradas en suelo con vermicompost.



Fotografía 24. Muestras de la parte aérea y radicular de las plantas sembradas en suelo con biochar.



Fotografía 25. Extracción de 0.5 kg de cada macetero.