

FACULTAD DE INGENIERÍA

Escuela Académico Profesional de Ingeniería Ambiental

Tesis

**Efecto de vermicompost y biochar en la
fitorremediación de un suelo agrícola
contaminado con cadmio, utilizando Brassica
rapa l. var. rapa. Huancaní - Jauja. 2022**

Yazmin Cely Puente Medina
Aracely Limaylla Jaime
Maria Isabel Yrrazabal Ñahui

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" .

TESIS

INFORME DE ORIGINALIDAD

24%

INDICE DE SIMILITUD

21%

FUENTES DE INTERNET

14%

PUBLICACIONES

12%

TRABAJOS DEL
ESTUDIANTE

FUENTES PRIMARIAS

1	www.sabiia.cnptia.embrapa.br Fuente de Internet	1%
2	renatiqa.sunedu.gob.pe Fuente de Internet	1%
3	www.sanidad.gob.es Fuente de Internet	1%
4	Submitted to Universidad Catolica de Trujillo Trabajo del estudiante	1%
5	tesis.pucp.edu.pe Fuente de Internet	1%
6	repositorio.xoc.uam.mx Fuente de Internet	1%
7	Submitted to Abraham Baldwin Agriculture College Trabajo del estudiante	<1%
8	polodelconocimiento.com Fuente de Internet	<1%

9	Submitted to Universidad Autónoma Metropolitana-Xochimilco Trabajo del estudiante	<1 %
10	rraae.cedia.edu.ec Fuente de Internet	<1 %
11	Submitted to Universidad Alas Peruanas Trabajo del estudiante	<1 %
12	vsip.info Fuente de Internet	<1 %
13	www.oftalmo.com Fuente de Internet	<1 %
14	rstudio-pubs-static.s3.amazonaws.com Fuente de Internet	<1 %
15	dokumen.site Fuente de Internet	<1 %
16	www.universidad.continental.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
17	xa.yimg.com Fuente de Internet	<1 %
18	Lopez Sanchez Jose Fernando. "Demografia y productividad de los modulos de thalassia testudinum banks ex koenig, en dos localidades de la costa oriental de la peninsula de yucatan", TESIUNAM, 2012 Publicación	<1 %

19

Claudia Bonomelli, Carlos Bonilla, Adriana Valenzuela. "Efecto de la fertilización fosforada sobre el contenido de cadmio en cuatro suelos de Chile", Pesquisa Agropecuária Brasileira, 2003

Publicación

<1 %

20

purl.org

Fuente de Internet

<1 %

21

bibliotecadigital.udea.edu.co

Fuente de Internet

<1 %

22

López Miguel Edith Alicia. "Remediación de suelos impactados por cadmio", TESIUNAM, 2023

Publicación

<1 %

23

Saloni Sachdeva, Rakesh Kumar, Prafulla Kumar Sahoo, Ashok Kumar Nadda. "Recent advances in biochar amendments for immobilization of heavy metals in an agricultural ecosystem: A systematic review", Environmental Pollution, 2023

Publicación

<1 %

24

KLOHN CRIPPEN BERGER S.A.. "MEIA del Proyecto Minero Antamina por Incremento de Reservas y Optimización del Plan de Minado.- IGA0013037", R.D. N° 054-2011-MEM-AAM , 2021

Publicación

<1 %

25	ebin.pub Fuente de Internet	<1 %
26	www.tandfonline.com Fuente de Internet	<1 %
27	zdocs.pub Fuente de Internet	<1 %
28	repositorio.concytec.gob.pe Fuente de Internet	<1 %
29	María Palacios Guillem. "Propuesta de un nuevo procedimiento basado en la norma ISO 9001 para la gestión conjunta de la norma ISO 31000, la filosofía Kaizen y la herramienta Lean Manufacturing en pymes industriales de la Comunidad Valenciana.", Universitat Politecnica de Valencia, 2021 Publicación	<1 %
30	vdocumento.com Fuente de Internet	<1 %
31	pt.scribd.com Fuente de Internet	<1 %
32	scielo.conicyt.cl Fuente de Internet	<1 %
33	www2.mdpi.com Fuente de Internet	<1 %
34	cdn.www.gob.pe	

Fuente de Internet

<1 %

35

kb.psu.ac.th

Fuente de Internet

<1 %

36

repositorio.upct.es

Fuente de Internet

<1 %

37

Submitted to University of Reading

Trabajo del estudiante

<1 %

38

www.scribd.com

Fuente de Internet

<1 %

39

Navarrete Cisneros María Flor Soledad.
"Acumulación de AS, CD, PB y FE en planta de
maíz (zea mays) originada por suelos
contaminados por jales en Taxco, Guerrero",
TESIUNAM, 2012

Publicación

<1 %

40

acikbilim.yok.gov.tr

Fuente de Internet

<1 %

41

doczz.cz

Fuente de Internet

<1 %

42

encyclopedia.pub

Fuente de Internet

<1 %

43

patents.google.com

Fuente de Internet

<1 %

Submitted to Sabanci Universitesi

44

Trabajo del estudiante

<1 %

45

Submitted to Universidad Tecnologica del Peru

Trabajo del estudiante

<1 %

46

bdigital.unal.edu.co

Fuente de Internet

<1 %

47

Submitted to University of Wollongong

Trabajo del estudiante

<1 %

48

smcsmx.org

Fuente de Internet

<1 %

49

repositorio.upse.edu.ec

Fuente de Internet

<1 %

50

Adnan Mustafa, Usman Zulfiqar, Muhammad Zahid Mumtaz, Maja Radziemska et al. "Nickel (Ni) phytotoxicity and detoxification mechanisms: A review", Chemosphere, 2023

Publicación

<1 %

51

Submitted to UNIV DE LAS AMERICAS

Trabajo del estudiante

<1 %

52

Xiong Li, Danni Yang, Yunqiang Yang, Guihua Jin, Xin Yin, Yan Zheng, Jianchu Xu, Yongping Yang. "Quantitative Succinyl-Proteome Profiling of Turnip (*Brassica rapa* var. *rapa*) in Response to Cadmium Stress", Cells, 2022

Publicación

<1 %

53

Espinosa Cortés Pedro. "Cuantificación de metales pesados en esporomas de ectomicorrizas en el Parque Nacional Izta-Popo", TESIUNAM, 2013

Publicación

<1 %

54

dergipark.org.tr

Fuente de Internet

<1 %

55

cybertesis.uni.edu.pe

Fuente de Internet

<1 %

56

tede.ufrrj.br

Fuente de Internet

<1 %

57

Submitted to Universidad Privada Antenor Orrego

Trabajo del estudiante

<1 %

58

Usman Zulfiqar, Wenting Jiang, Wang Xiukang, Saddam Hussain et al. "Cadmium Phytotoxicity, Tolerance, and Advanced Remediation Approaches in Agricultural Soils; A Comprehensive Review", Frontiers in Plant Science, 2022

Publicación

<1 %

59

creativecommons.org

Fuente de Internet

<1 %

60

doaj.org

Fuente de Internet

<1 %

61

webserver.rcub.bg.ac.rs

Fuente de Internet

<1 %

62

zlxz.zafu.edu.cn

Fuente de Internet

<1 %

63

bibdigital.epn.edu.ec

Fuente de Internet

<1 %

64

ctscafe.pe

Fuente de Internet

<1 %

65

dspace.ucuenca.edu.ec

Fuente de Internet

<1 %

66

koreascience.kr

Fuente de Internet

<1 %

67

repositorio.unsm.edu.pe

Fuente de Internet

<1 %

68

Éloïse Lenormand, Coralie Kustner, Isabelle Combroux, Paul Bois, Adrien Wanko.

"Diagnosing trace metals contamination in ageing stormwater constructed wetlands by portable X-ray Fluorescence Analyzer (pXRF)",
Science of The Total Environment, 2022

Publicación

<1 %

69

ciep.ing.uaslp.mx

Fuente de Internet

<1 %

70

hrcak.srce.hr

Fuente de Internet

<1 %

71	ir.knust.edu.gh Fuente de Internet	<1 %
72	repositorio.utelesup.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
73	www.scielo.org.mx Fuente de Internet	<1 %
74	Submitted to Bath Spa University College Trabajo del estudiante	<1 %
75	Submitted to Universidad Privada del Norte Trabajo del estudiante	<1 %
76	Submitted to UNILIBRE Trabajo del estudiante	<1 %
77	Submitted to Universidad Catolica De Cuenca Trabajo del estudiante	<1 %
78	repositorio.usil.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
79	www.ijstr.org Fuente de Internet	<1 %
80	zagan.unizar.es Fuente de Internet	<1 %
81	Jing Liu, Kyle Wolfe, Phillip M. Potter, George P. Cobb. " Distribution and Speciation of Copper and Arsenic in Rice Plants ('Koshihikari') Treated with Copper Oxide	<1 %

Nanoparticles and Arsenic during a Life Cycle", Environmental Science & Technology, 2019

Publicación

82

Vázquez Villalba Viridiana Monserrat.
"Fitoextracción de plomo, cadmio y cromo con rábano (*Raphanus sativus* L.) y cilantro (*Coriandrum sativum* L.)", TESIUNAM, 2021

Publicación

<1 %

83

www.springerprofessional.de

Fuente de Internet

<1 %

84

CONSULCONT SAC. "Plan de Cierre de Minas de la Unidad Minera María Teresa-IGA0003633", R.D. N° 388-2009-MEM-AAM, 2020

Publicación

<1 %

85

Carina Sá, Diana Matos, Paulo Cardoso, Etelvina Figueira. "Do Volatiles Affect Bacteria and Plants in the Same Way? Growth and Biochemical Response of Non-Stressed and Cd-Stressed *Arabidopsis thaliana* and *Rhizobium* E20-8", Antioxidants, 2022

Publicación

<1 %

86

Kuangjia Li, Zijian Lun, Lin Zhao, Qilong Zhu, Yansheng Gu, Manzhou Li. "Screening for Autochthonous Phytoextractors in a Heavy Metal Contaminated Coal Mining Area", International Journal of Environmental Research and Public Health, 2017

<1 %

87 Mahendra Kumar, Anamika Kushwaha, Lalit Goswami, Alak Kumar Singh, Mohammad Sikandar. "A review on advances and mechanism for the phycoremediation of cadmium contaminated wastewater", Cleaner Engineering and Technology, 2021

Publicación

88 Submitted to Universidad de Salamanca

Trabajo del estudiante

89 Submitted to University of Newcastle upon Tyne

Trabajo del estudiante

90 repositorio.udes.edu.co

Fuente de Internet

91 revistas.unitru.edu.pe

Fuente de Internet

92 www.irta.es

Fuente de Internet

93 Joshua O. Ighalo, Selvasembian Rangabhashiyam, Kanika Dulta, Chisom T. Umeh et al. "Recent advances in hydrochar application for the adsorptive removal of wastewater pollutants", Chemical Engineering Research and Design, 2022

Publicación

94	www.revista-agroproductividad.org Fuente de Internet	<1 %
95	cenida.una.edu.ni Fuente de Internet	<1 %
96	dspace.otalca.cl Fuente de Internet	<1 %
97	xdocs.net Fuente de Internet	<1 %
98	Flores Rodríguez Raisa. "Respuesta fisiológica de <i>Fagopyrum esculentum</i> (Polygonaceae) al cobre", TESIUNAM, 2018 Publicación	<1 %
99	Submitted to Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga Trabajo del estudiante	<1 %
100	ogma.newcastle.edu.au Fuente de Internet	<1 %
101	Dominguez, Jorge, and Manuel Aira. "New Developments and Insights on Vermicomposting in Spain", Vermiculture Technology Earthworms Organic Wastes and Environmental Management, 2010. Publicación	<1 %
102	Morquecho Contreras Alina. "Determinacion de metales pesados en perfiles de suelos"	<1 %

aluviales de la Cuenca Alta del Rio Lerma",
TESIUNAM, 2005

Publicación

103

Submitted to Universidad Nacional Jose
Faustino Sanchez Carrion

Trabajo del estudiante

<1 %

Excluir citas

Activo

Excluir coincidencias < 20 words

Excluir bibliografía

Activo

ASESOR

Dr. ANDRES ALBERTO AZABACHE LEYTON

AGRADECIMIENTOS

A Dios, por permitirnos estar con vida, salud y fuerzas para cumplir esta meta, lograr este gran sueño y no desistir en el camino.

A nuestros padres, que fueron el motivo de salir adelante con este proyecto, por darnos el aliento de superación y estar a nuestro lado brindándonos su apoyo incondicional.

A nuestro asesor, por su dedicación y paciencia, ya que sin sus palabras y correcciones precisas no hubiésemos podido llegar a esta meta tan anhelada.

DEDICATORIA

A Dios, por habernos darnos la vida y permitirnos llegar a esta etapa, a nuestros padres, que con sus sabios consejos no nos dejaron solas, a nuestros hermanos, que nos dieron aliento para ser mejores día a día, a nuestro asesor, por su gran paciencia, sabiduría y por guiarnos en este proyecto, por último, a nosotras mismas, por el esfuerzo y firmeza de nuestras metas.

ÍNDICE GENERAL

Agradecimientos	iii
Dedicatoria	iv
Índice general	v
Índice de tablas	viii
Índice de figuras	x
Resumen	xi
Abstract	xii
Introducción	xiii
CAPÍTULO I	15
PLANTEAMIENTO DEL ESTUDIO	15
1.1. Planteamiento y formulación del problema	15
1.1.1. Planteamiento del problema	15
1.1.2. Formulación del problema.....	16
1.1.2.1. Problema general	16
1.1.2.2. Problemas específicos.....	16
1.2. Objetivos	17
1.2.1. General	17
1.2.2. Específicos	17
1.3. Justificación e importancia	17
1.3.1. Justificación	17
1.3.2. Importancia	18
1.4. Hipótesis y descripción de variables.....	18
1.4.1. Hipótesis	18
1.4.1.1. General	18
1.4.1.2. Específicas.....	18
1.4.2. Descripción de variables	19
CAPÍTULO II	21
MARCO TEÓRICO	21
2.1. Antecedentes del problema.....	21
2.1.1. Nacionales	21
2.1.2. Internacionales	24
2.2. Bases teóricas	28
2.2.1. El cadmio como contaminante del suelo	28
2.2.2. La fitorremediación	29
2.2.3. El vermicompost	31

2.2.4. El biochar	32
2.2.5. El cultivo de nabo (Brassica rapa L. var. rapa).....	35
2.3. Definición de términos básicos.....	35
CAPÍTULO III.....	37
METODOLOGÍA	37
3.1. Método y alcance de la investigación	37
3.3.1. Método de investigación	37
3.3.1.1. General	37
3.3.1.2. Específico	37
3.3.2. Alcance de la investigación	38
3.3.2.1. Tipo de investigación.....	38
3.3.2.2. Nivel de investigación	38
3.2. Diseño de la investigación	38
3.3. Población y muestra	41
3.3.1. Población.....	41
3.3.2. Muestra	42
3.4. Técnicas e instrumentos de recolección de datos.....	42
3.4.1. Evaluaciones realizadas.....	42
3.4.1.1. Materia seca aérea	42
3.4.1.2. Materia seca radicular.....	42
3.4.1.3. Análisis de cadmio total en la parte aérea.....	42
3.4.1.4. Análisis de cadmio total en la parte raíz	42
3.4.1.5. Factor de traslocación (FT).....	42
3.4.1.6. Factor de bioconcentración (FBC).....	43
3.4.1.7. Contenido final de Cd en el suelo	43
3.4.2. Procesamiento de datos	43
CAPÍTULO IV	45
RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	45
4.1. Resultados del tratamiento y análisis de la información	45
4.1.1. Efecto del vermicompost y biochar en la acumulación de Cd en los órganos vegetativos de Brassica rapa L. var. rapa.....	45
4.1.1.1. Cadmio en la parte aérea.....	45
4.1.1.2. Cadmio en la raíz.....	46
4.1.2. Factores de bioconcentración (FBC) y de traslocación (FT) del cultivo de nabo .	46
4.1.2.1. Factor de bioconcentración	46
4.1.2.2. Factor de traslocación	47
4.1.2.3. Materia seca de la parte aérea	47

4.1.2.4. Materia seca de raíz	47
4.1.3. Contenido de cadmio en el suelo	48
4.1.3.1. Contenido inicial de cadmio en los tratamientos.....	48
4.1.3.2. Contenido final de cadmio en los tratamientos	48
4.2. Prueba de hipótesis	49
4.2.1. Hipótesis específica 1	49
4.2.1.1. Contenido de Cd en la parte aérea	49
4.2.1.2. Contenido de Cd en la raíz.....	50
4.2.2. Hipótesis específica 2	52
4.2.2.1. Factor de bioacumulación (FBC).....	52
4.2.2.2. Factor de traslocación (FT).....	53
4.2.3. Hipótesis específica 3	55
4.2.3.1. Biomasa seca aérea.....	55
4.2.3.2. Biomasa seca radicular	57
4.2.4. Hipótesis específica 4	58
4.2.4.1. Contenido de Cd en el suelo	59
4.3. Discusión de resultados	61
Conclusiones	64
Recomendaciones	65
Lista de referencias	66
Anexos.....	75

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Operacionalización de variables.....	20
Tabla 2. Tratamientos en estudio	39
Tabla 3. Caracterización fisicoquímica del suelo del experimento.....	39
Tabla 4. Esquema del análisis de variancia del diseño completamente al azar (DCA)	44
Tabla 5. Resultados del contenido de Cd en la parte aérea de nabo (cm) en un suelo de Huancaní contaminado con Cd con diferentes dosis de vermicompost y biochar	45
Tabla 6. Resultados del contenido de cadmio en la raíz de nabo (mg.kg^{-1}) en un suelo de Huancaní contaminado con Cd con diferentes dosis de vermicompost y biochar ...	46
Tabla 7. Resultados del factor de bioconcentración (FBC) en nabo en un suelo de Huancaní contaminado con Cd con diferentes dosis de vermicompost y biochar	46
Tabla 8. Resultados del factor de traslocación (FT) en nabo en un suelo de Huancaní contaminado con Cd con diferentes dosis de vermicompost y biochar	47
Tabla 9. Resultados de la materia seca de la parte aérea de nabo (g) en un suelo de Huancaní contaminado con Cd con diferentes dosis de vermicompost, 2022	47
Tabla 10. Resultados de la materia seca de la raíz de nabo (g) en un suelo de Huancaní contaminado con Cd con diferentes dosis de vermicompost y biochar	47
Tabla 11. Resultados del contenido inicial de cadmio (ppm) en el suelo de Huancaní contaminado con Cd, cultivado con nabo, con diferentes dosis de vermicompost y biochar.....	48
Tabla 12. Resultados del contenido final de cadmio (ppm) en el suelo de Huancaní contaminado con Cd, cultivado con nabo, con diferentes dosis de vermicompost y biochar.....	48
Tabla 13. Prueba de normalidad de Shapiro-Wilk para el contenido de Cd en la parte aérea.	49
Tabla 14. Análisis de variancia para el contenido de Cd (mg.kg^{-1}) en la parte aérea.....	50
Tabla 15. Prueba de normalidad de Shapiro-Wilk para el contenido de Cd en la raíz	50
Tabla 16. Prueba de Kruskal-Wallis para el contenido de Cd en la raíz.....	51
Tabla 17. Prueba de normalidad de Shapiro-Wilk para el FBC.....	52
Tabla 18. Prueba de Kruskal-Wallis para el FBC.....	52
Tabla 19. Prueba de normalidad de Shapiro-Wilk para el FT	53
Tabla 20. Análisis de variancia para el FT	53
Tabla 21. Prueba de normalidad de Shapiro-Wilk para la biomasa seca aérea (g)	56
Tabla 22. Prueba de Kruskal-Wallis para la biomasa seca aérea (g)	56
Tabla 23. Prueba de normalidad de Shapiro-Wilk para la biomasa seca radicular (g).....	57
Tabla 24. Prueba de Kruskal-Wallis para la biomasa seca aérea (g)	57
Tabla 25. Prueba de normalidad de Shapiro-Wilk para el contenido de Cd final en el suelo (mg.kg^{-1}).....	59

Tabla 26. Análisis de variancia para el contenido de Cd (mg.kg^{-1}) en el suelo.....	59
Tabla 27. Variación porcentual del contenido de Cd en el suelo de Huancaní	60

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Diagrama de flujo del proceso experimental.....	41
Figura 2. Prueba de Kruskal-Wallis para el contenido de Cd en la raíz, entre tratamientos. Las líneas verticales en la parte superior central de las barras representan el error estándar (n = 3).....	51
Figura 3. Prueba de Duncan para el FT entre el testigo y las combinaciones de tratamientos. Las líneas verticales al centro superior de las barras representan el error estándar (n = 3).....	54
Figura 4. Prueba de Duncan para el FT entre los tipos de enmienda. Las líneas verticales al centro superior de las barras representan el error estándar (n = 3).....	55
Figura 5. Prueba de Kruskal-Wallis para la biomasa seca aérea, entre tratamientos. Las líneas verticales en la parte superior central de las barras representan el error estándar (n = 3).....	56
Figura 6. Prueba de Kruskal-Wallis para la biomasa seca radicular, entre tratamientos. Las líneas verticales en la parte superior central de las barras representan el error estándar (n = 3).....	58
Figura 7. Prueba de Duncan para el contenido de Cd en el suelo al final e inicio del experimento para los tipos de enmiendas. Las líneas verticales al centro superior de las barras representan el error estándar (n = 3).....	60
Figura 8. Parcela agrícola de Huancaní, muestreada para el presente experimento.....	83
Figura 9. Vermicompost utilizado en el presente experimento.....	83
Figura 10. Biochar utilizado en el presente experimento.....	84
Figura 11. Ficha técnica del biochar (hoja 1).....	84
Figura 12. Ficha técnica del biochar (hoja 2).....	85
Figura 13. Tamizado del suelo antes de instalar el experimento.....	85
Figura 14. Pesado del lombricompost antes de la instalación del experimento.....	86
Figura 15. Tamizado del biochar antes de la instalación del experimento.....	86
Figura 16. Preparación y mezcla de los tratamientos con lombricompost y biochar.....	87
Figura 17. Preparación y mezcla de los tratamientos con lombricompost y biochar.....	87
Figura 18. Pesado del suelo para cada tratamiento.....	88
Figura 19. Experimento instalado.....	88
Figura 20. Emergencia de nabo, Brassica rapa L. var. rapa.....	89
Figura 21. Brassica rapa L. var. rapa en pleno crecimiento.....	89
Figura 22. Brassica rapa L. var. rapa a la finalización del experimento.....	90
Figura 23. Evaluación de tratamientos.....	90

RESUMEN

Objetivo: Determinar el efecto del vermicompost y biochar en la fitorremediación de Cd por *Brassica rapa* L. var. *rapa* en un suelo agrícola contaminado de Huancaní, Jauja.

Metodología: se ensayó tres dosis de vermicompost (VC): cinco, diez y quince por ciento; tres dosis de biochar (BC): cinco, diez y quince por ciento, más un testigo absoluto, dispuestos en un diseño completamente al azar con arreglo factorial 3 x 3 más un tratamiento adicional, con tres repeticiones. Se utilizó como especie el nabo, *Brassica rapa* L. var. *rapa*, sembrado en macetas de 5 kg de capacidad, con suelo contaminado de Huancaní, por un periodo de 72 días. Se evaluó contenido de Cd en la parte aérea y radicular, factor de bioconcentración (FBC), factor de traslocación (FT), materia seca aérea y radicular de la planta, así como contenido final de Cd en el suelo.

Conclusiones: el Cd en la parte aérea fue mayor con 10 % de VC, mientras que en la raíz los tratamientos con 10 % y 15 % de BC fue significativamente superior. El FBC fue mayor con 10 % de biochar y el FT fue significativamente mayor con 10 % de VC. La materia seca aérea y radicular fue significativamente mayor con 10 % y 15 % de VC. El biochar fue superior significativamente al VC, en disminuir la concentración de Cd en el suelo.

Palabras claves: biochar, cadmio, contaminación, fitorremediación, vermicompost

ABSTRACT

Objective: To determine the effect of vermicompost and biochar on the phytoremediation of Cd by *Brassica rapa* L. var. *rapa* in a contaminated agricultural soil in Huancaní, Jauja.

Methodology: three doses of vermicompost (VC) were evaluated: five, ten and fifteen percent; three doses of biochar (BC): five, ten and fifteen percent, plus an absolute control, arranged in a Completely Random Design with a 2 x 3 factorial arrangement plus one additional treatment, with three repetitions. The turnip, *Brassica rapa* L. var. *rapa*, planted in pots of 5 kg capacity, with contaminated soil from Huancaní, for a period of 72 days. Cd content in the aerial and root part, bioconcentration factor (BCF), translocation factor (FT), aerial and root dry matter of the plant, as well as final Cd content in the soil were evaluated.

Conclusions: the Cd in the aerial part was higher with 10 % VC, while in the root the treatments with 10% and 15% BC were significantly higher. The FBC was higher with 10% biochar and the FT was significantly higher with 10% VC. Aerial and root dry matter was significantly higher with 10% and 15% VC. The biochar was significantly superior, with respect to the VC, in reducing the concentration of Cd in the soil.

Keywords: biochar, cadmium, contamination, phytoremediation, vermicompost

INTRODUCCIÓN

El cadmio (Cd) es un contaminante global que proviene de fuentes antropogénicas como residuos industriales, deposición atmosférica, aguas residuales y fertilizantes químicos; así como de fuentes naturales, como el material parental, los volcanes y los combustibles fósiles. Es uno de los metales pesados más tóxicos para los organismos vivos (1).

En general, los metales pesados, entre ellos el cadmio, no son biodegradables, persisten en el ambiente y tienen el potencial de ingresar a la cadena alimentaria a través de las plantas cultivadas, y eventualmente pueden acumularse en el cuerpo humano a través de la biomagnificación. Debido a su naturaleza tóxica, la contaminación de metales pesados ha planteado una grave amenaza para la salud humana y el ecosistema. Por lo tanto, la remediación de la contaminación del suelo es de suma importancia (2).

A través de la fitorremediación, el Cd puede ser extraído del suelo, mientras que a través de los microorganismos este metal pesado se puede secuestrar en sus cuerpos. Aumentando la absorción de Cd en plantas hiperacumuladoras se puede favorecer la remediación del suelo; mientras que la aplicación de enmiendas el Cd se puede lavar, inmovilizar y estabilizar en el suelo. En este sentido la biorremediación de suelos contaminados se considera eficaz y confiable debido a sus características ecológicas (3).

Para minimizar los efectos tóxicos del Cd en las plantas, el uso de enmiendas orgánicas es un método promisorio para retener este metal pesado en el suelo, debido a presencia *in situ*, bajo costo y bajas necesidades energéticas (4).

Diferentes mecanismos fisicoquímicos están involucrados en las reacciones de las enmiendas orgánicas, cuando son aplicadas al suelo contaminado; es por lo que se ensayó la aplicación de biochar y vermicompost, los cuales están saturados con carbono, hidrógeno y oxígeno, en la fitorremediación de Cd en un suelo de Huancaní.

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, referencias y anexos.

CAPÍTULO I

PLANTEAMIENTO DEL ESTUDIO

1.1. Planteamiento y formulación del problema

1.1.1. Planteamiento del problema

La contaminación ambiental por metales pesados es un serio problema mundial. La movilización de metales pesados a través de la extracción de minerales y el subsecuente procesamiento para diferentes aplicaciones ha conducido a la liberación de estos elementos al ambiente. El problema de la contaminación de metales pesados se hace cada vez más significativo con el incremento de la industrialización y la alteración de los ciclos biogeoquímicos naturales. Los metales pesados no son biodegradables y, por lo tanto, se acumulan en el ambiente. La acumulación de metales pesados en los suelos posee un riesgo ambiental y para la salud humana. Estos elementos se acumulan en los tejidos de los cuerpos de organismos vivos (bioacumulación) (5).

En las últimas décadas, la contaminación del suelo por metales pesados, causada principalmente por las actividades antropogénicas, como el incremento de residuos sólidos, industriales y residuos accidentales, es evidente (6).

Dentro de los metales pesados, el cadmio atrae la atención debido a su toxicidad, alta movilidad y persistencia, representando una gran amenaza para el suelo y la salud humana (7).

La fitorremediación es una alternativa a la contaminación de metales pesados, y se refiere básicamente al uso de plantas para reducir las concentraciones o efectos tóxicos de contaminantes en el ambiente (8). Se constituye en una estrategia de remediación novedosa, rentable, eficiente, respetuosa del ambiente, aplicable *in situ*, e impulsada por la energía solar (9).

En un suelo contaminado, las enmiendas son necesarias para mejorar las condiciones del suelo, una de las cuales es el biochar, que es un producto de pirolisis de biomasa, que ha mostrado reducir la acidez del suelo, incrementar la materia orgánica, contenido de nutrientes e inmovilizar metales, por lo tanto, mejora el crecimiento de la planta (10).

Asimismo, el compost, cuando es aplicado al suelo contaminado, no solo favorece su fertilidad, sino también disminuye la biodisponibilidad y movilidad de elementos potencialmente tóxicos promoviendo procesos como la adsorción y complejación, mejorando la fitorremediación (11).

En el valle del Mantaro, los suelos están contaminados por metales pesados, debido principalmente al uso de agua de riego del río Mantaro, que contiene metales pesados, provenientes de los relaves mineros, en la cuenca alta; por lo que se hace necesario remediar estos suelos, utilizando técnicas económicas, que no alteren el ambiente, y ayudados por materiales orgánicos que el productor normalmente usa en sus suelos para incrementar su producción agrícola, como son los materiales orgánicos procesados.

1.1.2. Formulación del problema

1.1.2.1. Problema general

¿Cuál es el efecto del vermicompost y el biochar en la fitorremediación de un suelo agrícola contaminado con cadmio, utilizando *Brassica rapa L. var. rapa* en Huancaní, Jauja?

1.1.2.2. Problemas específicos

¿Cuál es el efecto de dosis crecientes de vermicompost y biochar en la acumulación de Cd en los órganos vegetativos de *Brassica rapa L. var. rapa*, creciendo en un suelo contaminado de Huancaní, Jauja?

¿Cómo son afectados los factores de bioacumulación y translocación de Cd en *Brassica rapa L. var. rapa*, por la aplicación de vermicompost y biochar en un suelo contaminado de Huancaní, Jauja?

¿Cuál es el efecto del vermicompost y biochar en la materia seca aérea y radicular de *Brassica rapa L. var. rapa* en un suelo contaminado de Huancaní, contaminado con Cd?

¿Cómo varía la concentración final de Cd en un suelo contaminado de Huancaní, con *Brassica rapa L. var. rapa*?

1.2. Objetivos

1.2.1. General

Determinar el efecto del vermicompost y biochar en la fitorremediación de Cd por *Brassica rapa L. var. rapa* en un suelo agrícola contaminado de Huancaní, Jauja.

1.2.2. Específicos

- Determinar el efecto de dosis crecientes de vermicompost y biochar en la acumulación de Cd en los órganos vegetativos de *Brassica rapa L. var. rapa*.
- Calcular los factores de bioacumulación y translocación de Cd en *Brassica rapa L. var. rapa*, creciendo en un suelo contaminado de Huancaní, Jauja, con tratamientos de vermicompost y biochar.
- Determinar la materia seca aérea y radicular de *Brassica rapa L. var. rapa* creciendo en un suelo contaminado de Huancaní, Jauja, con tratamientos de vermicompost y biochar.
- Determinar la concentración de Cd en el suelo agrícola contaminado de Huancaní, Jauja, al final del periodo de crecimiento de *Brassica rapa L. var. rapa*, con diferentes tratamientos de vermicompost y biochar.

1.3. Justificación e importancia

1.3.1. Justificación

La fitorremediación como técnica para descontaminar suelos tiene muchas ventajas en comparación a otras tecnologías, y la aplicación de fuentes orgánicas

favorece este proceso, especialmente en metales pesados poco móviles y deben considerarse procesos de recuperación a largo plazo, considerando que las especies vegetales absorben una fracción de los contaminantes del suelo en función de su disponibilidad, y la aplicación de materiales orgánicos es una práctica de manejo de cultivos que lo realiza normalmente el agricultor con fines de mejora del suelo, y no incrementa los costos de la fitorremediación de suelos.

1.3.2. Importancia

La contaminación del suelo por Cd es un problema que adquiere cada vez más relevancia, debido a su poca movilidad en el suelo, su toxicidad y fácil absorción por las plantas cultivadas o no cultivadas. Una de las alternativas para remediar estos suelos contaminados es utilizar organismos, como las plantas, para disminuir la concentración de estos metales pesados en el suelo, con la ayuda de enmiendas orgánicas que disminuyan la disponibilidad de metales pesados en el suelo, mejoren las propiedades físicas, químicas y biológicas del recurso suelo y favorezcan la absorción de Cd, sin alterar el ambiente, para un posterior procesamiento de las plantas que absorbieron Cd.

1.4. Hipótesis y descripción de variables

1.4.1. Hipótesis

1.4.1.1. General

H₀: El vermicompost y el biochar no influyen significativamente en la fitorremediación de Cd por *Brassica rapa L. var. rapa* en un suelo agrícola contaminado de Huancaní, Jauja.

H₁: El vermicompost y el biochar sí influyen significativamente en la fitorremediación de Cd por *Brassica rapa L. var. rapa* en un suelo agrícola contaminado de Huancaní, Jauja.

1.4.1.2. Específicas

A. Hipótesis específica

H₀: El vermicompost y el biochar, en dosis crecientes, no incrementan la acumulación de Cd en los órganos vegetativos de *Brassica rapa L. var. rapa*.

H₁: El vermicompost y el biochar, en dosis crecientes, incrementan significativamente la acumulación de Cd en los órganos vegetativos de *Brassica rapa L. var. rapa*.

B. Hipótesis específica

H₀: Los factores de bioacumulación y translocación de Cd en *Brassica rapa L. var.* no se incrementan significativamente por la aplicación de vermicompost y biochar.

H₂: Los factores de bioacumulación y translocación de Cd en *Brassica rapa L. var. rapa*, se incrementan significativamente por la aplicación de vermicompost y biochar.

C. Hipótesis específica

H₀: La biomasa aérea y radicular de *Brassica rapa L. var. rapa* no se incrementan por la adición de vermicompost y biochar.

H₃: La biomasa aérea y radicular de *Brassica rapa L. var. rapa* se incrementan significativamente por la adición de vermicompost y biochar.

D. Hipótesis específica

H₀: El vermicompost y el biochar no disminuyen la concentración de Cd en el suelo agrícola contaminado de Huancaní

H₄: El vermicompost y el biochar disminuyen significativamente la concentración de Cd en el suelo agrícola contaminado de Huancaní, con *Brassica rapa L. var. rapa*.

1.4.2. Descripción de variables

Variable independiente

X₁: vermicompost

X₂: biochar

Variable dependiente

Y₁: fitorremediación con *Brassica rapa L. var. rapa*

Y₂: biomasa de *Brassica rapa L. var. rapa*

Y₃: concentración de cadmio en el suelo

Tabla 1. Operacionalización de variables

Variables	Definición conceptual	Dimensiones	Indicadores
Independiente (X1): Vermicompost (VC)	El vermicompost es una enmienda orgánica, que se presenta como producto no fermentable, suave, liviano, desmenuzable, limpio y sin olor, rico en materia orgánica y nutrientes (12).	- Dosis de VC	- 5 % - 10 % - 15 %
Independiente (X2): Biochar (BC)	El biochar es un residuo biológico quemado en bajas condiciones de oxígeno, resultando en un material poroso, rico en carbón de baja densidad (13).	- Dosis de BC	- 5 % - 10 % - 15 %
Dependiente (Y ₁): Fitorremediación de Cd	La fitorremediación es la captación/absorción y la translocación de contaminantes por las raíces de las plantas a las porciones aérea y radicular que pueden cosecharse y quemarse para obtener energía y reciclar el metal de las cenizas (14).	Contenido de Cd en <i>Brassica rapa</i> L. var. <i>rapa</i>	- mg Cd en parte aérea/kg MS - mg Cd en raíz/kg MS - Factor de bioconcentración (FBC) - Factor de translocación (FT)
Dependiente (Y ₂): Biomasa de <i>Brassica rapa</i> L. var. <i>rapa</i>	Materia seca orgánica que es producida desde las actividades esenciales de fotosíntesis y actividades de proteínas (15).	Materia seca	- g de materia seca aérea - g de materia seca radicular
Dependiente (Y ₃): Cd en el suelo	Es un metal pesado muy tóxico y se encuentra naturalmente en la corteza terrestre. Su movilidad en el suelo es afectada por el pH, materia orgánica, potencial redox y la cantidad de arcillas (16).	Concentración de Cd en el suelo	- mg Cd/kg suelo

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes del problema

2.1.1. Nacionales

En el trabajo de investigación «Eficiencia del compostaje y vermicompostaje en la biorremediación de suelos contaminados con cadmio y plomo por pasivos ambientales mineros de Huamantanga – Canta», se tuvo como objetivo evaluar el tratamiento más eficiente entre el compostaje y vermicompostaje para la biorremediación de suelos. Para este trabajo se plantearon tres tratamientos, consistentes de diferentes proporciones de residuos vegetales, estiércol de cuy y suelo contaminado, más un testigo absoluto, tanto para compostaje como vermicompostaje. Cada tratamiento tuvo tres réplicas. Las concentraciones iniciales fueron de 8.8 mg Cd/kg y 11134.13 mg Pb/kg. Los resultados determinaron que en los tratamientos de vermicompostaje fue el tratamiento T1 el que tuvo mayor eficiencia para plomo y cadmio, con 76.99 % y 75.14 % respectivamente. Para los tratamientos con compostaje el tratamiento T3 tuvo una eficiencia de 52.75 % para Pb y 47.10 % para Cd. Se concluyó que el vermicompostaje fue el más eficiente en la biorremediación del suelo contaminado de Canta (17).

En el trabajo de investigación «*Potential Phytoremediator of Native Species in Soils Contaminated by Heavy Metals in the Garbage Dump Quitasol-Imponeda Abancay*», se tuvo como objetivo evaluar los niveles de contaminación de los metales pesados: plomo, cadmio, cromo y zinc en raíz, tallos y hojas de tres especies nativas. Se aplicó un diseño factorial: tres especies y cinco tratamientos con metales pesados, cada uno con dos repeticiones aplicados en tres parcelas seleccionadas (A, B y C). Los

resultados mostraron que la alta acumulación de Zn, Pb y Cd fue obtenida en *Amaranthus hybridus*, con 23.03 ppm en la raíz, 5.87 ppm en el tallo y 8.83 ppm en las hojas, en las parcelas B y C. En *Brassica rapa*, los más altos valores de acumulación fueron registrados para Zb, Pb y Cd en las raíces y mostraron una disminución en crecimiento de hoja y espesor de tallo. *Amaranthus spinosus* obtuvo altos valores de acumulación de Zn de 24.28 ppm y 0.55 ppm de Cd y 1.74 ppm de Pb. Se concluyó que las tres especies nativas presentan rápido crecimiento, no requieren control químico, con altos niveles de absorción de metales pesados, siendo una alternativa para la restauración de basureros, debido a su alto potencial de fitorremediación (18).

En el trabajo de investigación «Fitorremediación en suelos contaminados con Cd usando girasol (*Helianthus annuus* L. var. Sunbright)», se tuvo como objetivo determinar la acumulación, distribución y tolerancia de cadmio (Cd) en girasol en suelos contaminados con dicho metal. La investigación consistió en dos experimentos conducidos en macetas bajo condiciones de invernadero. En el primero se probaron concentraciones de 0, 10, 15, 20 y 25 mg Cd kg⁻¹ 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⁻¹ 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. En general, se encontró que al incrementar las dosis de Cd en suelo aumentó la concentración de Cd en planta. Independiente a la época de evaluación, la raíz concentró más Cd debido a una baja translocación hacia la zona aérea. El factor de bioconcentración (FBC) fue mayor a 1 bajo las diferentes dosis de Cd. En tanto al factor de translocación (FT), este resultó menor a 1 en ambos experimentos. Según los valores del FT y FBC encontrados, el girasol se comportaría como un fitoestabilizador por debajo de 25 mg Cd kg⁻¹ suelo (19).

En el trabajo de investigación «Efecto de enmiendas orgánicas en la fitorremediación con *Zea mays* L. en un suelo contaminado con cadmio. Leonor Ordóñez, Jauja – 2021», se tuvo como objetivo determinar el efecto del vermicompost y compost en la fitorremediación de Cd con maíz en un suelo contaminado. El estudio se realizó con un diseño completamente al azar, en macetas, con 7 tratamientos; en cada maceta se colocó 2 kg de sustrato (suelo + % de enmienda orgánica), se utilizó 2 enmiendas orgánicas (vermicompost y compost) en 3 diferentes dosis (5 %, 10 % y 20 %) más un testigo. Las semillas del maíz de variedad San Gerónimo fueron

previamente germinadas durante 5 días y trasplantadas con 7 semillas por maceta, se dejó que las plantas se desarrollen por un período de 60 días; terminado el proceso experimental se analizaron las muestras de suelo, la parte foliar y radicular del *Zea mays L.* Los resultados mostraron que la aplicación de enmiendas orgánicas incrementó la concentración de cadmio total en el *Zea mays L.* en el rango de 6.94 mg/kg a 13.79 mg/kg, siendo los tratamientos con vermicompost a una dosis de 5 %, 10 % y 20 % los que tuvieron los mejores resultados. La concentración de cadmio total en el suelo se incrementó en un rango de 7.38 mg/kg a 8.77 mg/kg con respecto al tratamiento control, siendo el tratamiento: control, compost a una dosis de 10 % y 20 %, vermicompost a una dosis de 20 % los que tuvieron la menor concentración de cadmio en el suelo. El uso de enmiendas orgánicas incrementó el factor de bioconcentración (FBC) en la raíz del *Zea mays L.* de un rango de 0.59 a 1.23, siendo los tratamientos con vermicompost a una dosis de 5 %, 10 % y 20 % los que tuvieron mejores resultados; también, el factor de traslocación (FT) incrementó en un rango de 0.08 a 0.1 con respecto al tratamiento control, siendo los tratamientos con compost a una dosis de 5 %, 10 % y 20 % los que tuvieron mejores resultados. En conclusión, la aplicación de enmiendas orgánicas no favorece la fitorremediación con *Zea mays L.* en un suelo contaminado con cadmio (20).

En el trabajo de investigación «Estudio del potencial de acumulación de metales pesados de plantas nativas peruanas para la fitorremediación de pasivos mineros», se tuvo como objetivo analizar el potencial del *ichu* y cortadera, para la absorción de metales pesados de pasivos ambientales mineros. Se recolectaron muestras de estas especies y de suelos de zonas específicas de la provincia de Hualgayoc, Cajamarca. Posteriormente se construyeron celdas a escala de laboratorio, en donde se sembraron las plantas sobre las muestras de suelo. Después de ocho meses se procedió a retirar las especies y determinar las concentraciones finales de los metales pesados en la raíz y en las partes aéreas de la planta. En base a los resultados procesados, se concluyó que las plantas presentaron diferentes capacidades de acumulación de metales, siendo el Fe el que presenta la mayor absorción, seguido por el Cu y Zn, y en menor cantidad el Cd, Pb y Cr. De igual manera, se determinó que la eficiencia de la remoción se incrementó cuando las plantas se expusieron a suelos con pH menores a 7, a pesar de que la capacidad de absorción en las partes aéreas disminuyó. En general, se apreció que las plantas nativas son propicias para continuar con más investigaciones y con un proceso de fitorremediación de PAM a mayor escala (21).

En el trabajo de investigación «Fitoestabilización de cadmio por *Lupinus mutabilis* en un suelo contaminado del distrito El Mantaro, Jauja 2016», se tuvo como objetivo determinar la cantidad de Cd fitoestabilizado por *Lupinus mutabilis* en un suelo contaminado utilizando diferentes dosis de estiércol de lombriz. El suelo del experimento tuvo 31.98 mg Cd/kg suelo. Se aplicaron cinco tratamientos de estiércol de lombriz: 0, 3, 6, 9 y 12 % dispuestos en un diseño experimental completamente al azar. Se evaluó el contenido de Cd y materia seca en raíz y parte aérea, altura de planta y factor de bioconcentración. Se concluyó que la cantidad de cadmio fitoestabilizado en las raíces de lupino fue de 13.33 mg/kg con el tratamiento de 9 % de estiércol de lombriz, con un factor de bioconcentración en raíz de 0.492. El tratamiento con 12 % de estiércol de lombriz favoreció la formación de materia seca, altura de planta y longitud de raíz (22).

En el trabajo de investigación «Fitorremediación de un suelo contaminado con cadmio, utilizando *Lupinus mutabilis* y estiércol de lombriz. Huancaní, Jauja. 2019», tuvo como objetivo determinar la acumulación de cadmio en *Lupinus mutabilis*, en un suelo contaminado donde se aplicó estiércol de lombriz, y la variación de este metal pesado en el suelo. Se realizó un ensayo en un suelo contaminado con 2.29 mg Cd/kg, del distrito de Huancaní. Se muestreó un suelo agrícola en su capa arable, y la muestra compuesta se colocó en macetas de 2 kg de capacidad, donde se aplicó cinco dosis de estiércol de lombriz: 0, 5, 10, 15 y 20 %, y posteriormente se sembró *Lupinus mutabilis*. Los tratamientos fueron dispuestos en un diseño completamente al azar bajo condiciones controladas. Se analizó el contenido de Cd en planta y suelo, así como el factor de bioconcentración. La acumulación de Cd en la parte aérea de la planta tuvo un promedio de 0.375 mg/kg, disminuyendo con el incremento de la dosis de estiércol. La concentración de Cd en el suelo varió de 2.870 a 2.410 mg/kg para los tratamientos con 0 % de estiércol y 20 % de estiércol, respectivamente. El factor de bioconcentración tuvo valores inferiores a 1, sin diferencias significativas entre tratamientos, indicando que esta especie podría ser considerada fitoestabilizadora, pero se requiere posteriores evaluaciones (23).

2.1.2. Internacionales

En el trabajo de investigación «*Tolerance to cadmium toxicity and phytoremediation potential of three Brassica rapa CAX1a TILLING mutants*», se tuvo como objetivo evaluar la tolerancia de estos mutantes a la toxicidad de Cd y su potencial para fitorremediación de este metal pesado. Los mutantes y el parental R-o-18 crecieron en condiciones de toxicidad de Cd (100 μ M CdCl₂) y un control; después se analizó

tasa de crecimiento, acumulación de Cd y parámetros fisiológicos. Los resultados mostraron que la mutación *BraA.cax1a* proporcionó la mayor capacidad de absorción de Cd, aunque *BraA.cax1a-12* podría ser útil para la fitorremediación debido a que registró más de tres veces el contenido de Cd de R-o-18 y presentó la mayor tolerancia al Cd. Esta tolerancia podría deberse a las altas acumulaciones de Cd y Mg, el mantenimiento de rendimiento de fotosíntesis, la desintoxicación mejorada de especies de oxígeno reactivos (EOR), peroxidasa ascorbato, y ciclos de ácidos tricarboxílicos, las más altas concentraciones de malato y giberelinas, así como bajos niveles de etileno. En resumen, este estudio identificó al mutante *BraA.cax1a-12* como un mutante potencial para fitorremediación de suelos contaminados con Cd e identificó posibles elementos fisiológicos que contribuyen a esta capacidad (24).

En el trabajo de investigación «*Effect of crop straw biochars on the remediation of Cd-contaminated farmland soil by hyperaccumulator Bidens pilosa L.*», se tuvo como objetivos comparar las características de dos clases de biochar en las propiedades fisicoquímicas, nutrición, actividad microbial y biodisponibilidad de Cd en un suelo contaminado con Cd, así como la acumulación de Cd en *Bidens pilosa L.* En un experimento de macetas, se aplicó como enmienda, biochar proveniente de dos fuentes: paja de trigo y paja de maíz, con dos tamaños de partícula. Los resultados mostraron que la aplicación al 5 % de biochar fino y grueso de trigo y maíz incrementaron la acumulación de Cd total en *B. pilosa* a 251.57 %, 217.41 %, 321.64 % y 349.66 %, respectivamente. Las enmiendas de biochar promovieron significativamente el crecimiento de *B. pilosa* e incrementaron la acumulación de Cd, al mejorar las propiedades físicas, nitrógeno, fósforo y potasio disponibles, materia orgánica, actividad microbial, y cambiando la distribución de nutrientes en los órganos de *B. pilosa*. Las partículas finas fueron superiores a las gruesas en incrementar la biomasa aérea de *B. pilosa*, materia orgánica y actividad microbial del suelo. Los cambios en las concentraciones de N, P y K en las raíces, tallos y hojas de *B. pilosa* estuvieron cercanamente relacionados a los cambios en N, P y K disponibles en el suelo, después de la aplicación de biochar (25).

En el trabajo de investigación «Evaluación de la capacidad fitorremediadora de dos especies vegetales *Raphanus sativus* y *Brassica rapa* en suelos contaminados con cadmio en laboratorio» se desarrolló un experimento en la ciudad de Coca, provincia de Orellana, Ecuador, manipulando una muestra representativa de suelo procedente de una finca cacaotera. El ensayo se efectuó en 4 jardineras con un volumen de 35700 cm³, empleando como fuente de Cd al cloruro de cadmio monohidratado en cuatro

concentraciones (0, 51.99, 99.56 y 199.73 ppm). La cuantificación de cadmio en la planta y el suelo se realizó al término de 60 días después de la siembra. Los resultados mostraron que la especie *Brassica rapa* no se desarrolló en las jardineras pasado el tiempo de experimentación, mientras que *Raphanus sativus* mostró tener eficiencia fitoextractora de cadmio. La especie *R. sativus* es clasificada como excluyente de Cd (26).

En el trabajo de investigación «*Phytoremediation based on canola (Brassica napus L.) and Indian mustard (Brassica juncea L.) planted on spiked soil by aliquot amount of Cd, Cu, Pb, and Zn*», tuvo como objetivo investigar el efecto de agregar diferentes dosis (0, 3, 6 y 12 mmol/kg) de etilen diaminotetraacético (EDTA) sobre la disponibilidad de metales en suelos contaminados con 50 mg Cd/kg (CdCl_2), 50 mg Cu/kg (CuSO_4), 50 mg Pb/kg [$\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$] y 50 mg Zn/kg (ZnSO_4), y sobre las plantas de canola (*Brassica napus L.*) y mostaza de la India (*Brassica juncea L.*) para absorber Cu, Cd, Pb y Zn en una cámara de crecimiento. Los resultados indicaron que la aplicación del EDTA incrementó la disponibilidad de metales pesados y absorción por las plantas. Se observó diferencias significativas entre especies y partes de la planta. La canola fue más efectiva en la absorción de Cu, Cd, Pb y Zn. La absorción de metales pesados por las raíces de ambas especies fue mayor que la absorción de metales por los tallos (27).

En el trabajo de investigación «*Phytoremediation a wastewater-Irrigated soil contaminated with toxic metals: comparing the efficacies of diferent crops*», se utilizó un diseño completamente randomizado, multivariado, en un invernadero, para comparar las capacidades de fitoextracción de *Brassica juncea*, *Eruca sativa*, *Brassica rapa*, y *Brassica napus*, todos creciendo sobre un suelo franco limoso irrigado con aguas residuales industriales. Las plantas de *Brassica* estudiadas fueron generalmente eficientes en remediar metales tóxicos hallados en suelos irrigados con aguas residuales. Se registró diferencias substanciales entre partes de la planta de *Brassica* y *Eruca*. Por ejemplo, *B. napus* tuvo extracción de metales significativamente más altas o acumulación comparada a *E. sativa* para Zn (71 %), Cu (69 %), Fe (78 %), Mn (79 %), Cd (101 %), Cr (57 %), Ni (92 %) y Pb (49 %). Las correlaciones significativas entre el coeficiente de acumulación biológica y coeficiente de transferencia biológica sustentan las eficiencias de extracción de metales como: *B. napus* > *B. juncea* > *B. rapa* > *E. sativa*. La correlación entre el índice de movilidad raíz-tallo con el índice de movilidad tallo-hoja indicó la translocación del metal a lo largo del sistema raíz-tallo-hoja. Por lo tanto, se sugirió que estos cultivos no pueden ser usados para consumo

humano o animal cuando crecen con aguas residuales industriales de concentraciones de metales tóxicos mayores que los límites permisibles. Mas bien estas plantas pueden servir como remediadoras efectivas de suelos contaminados con metales tóxicos (28).

En el trabajo de investigación «*Beneficial effects of biochar application to contaminated soils on the bioavailability of Cd, Pb and Zn and the biomass production of rapeseed (Brassica napus L)*», se ensayó la fitorremediación de suelos contaminados por metales pesados con cal (CaCO_3) o agregando biochar (1 % y 10 %, como fracción de masa) con *Brassica napus L*. La concentración de metales biodisponibles disminuyó con el incremento de biochar. La reducción alcanzó 71 %, 87 % y 92 % para Cd, Zn y Pb, respectivamente, en presencia de 10 % de biochar. Después de 20 semanas, todas las plantas cultivadas con el suelo no tratado y con el suelo con 1 % de biochar murieron, mientras que las plantas de los otros tratamientos crecieron normalmente. El tratamiento con 10 % de biochar proporcionó igual eficiencia en disminuir la concentración de metales, comparado al encalado, en los tallos, pero la producción de biomasa se triplicó como resultado de la mejora de la fertilidad del suelo. Además del secuestro de carbono, la incorporación de biochar en suelos contaminados con metales podría hacer posible el cultivo de plantas bioenergéticas sin invadir tierras agrícolas. Se sugiere que la biomasa cosechada podría ser usada como insumo para la pirólisis y producir bioenergía y nuevo biochar, que podría contribuir a reducir la emisión de CO_2 (29).

En el trabajo de investigación «*Immobilization of heavy metal ions (Cu^{+2} , Cd^{+2} , Ni^{+2} , and Pb^{+2}) by broiler litter-derived biochars in water and soil*», se investigó la inmovilización de iones de metales pesados (Cu^{+2} , Cd^{+2} , Ni^{+2} and Pb^{+2}) utilizando biochar en agua y suelo. Para tal efecto, se utilizaron adsorbentes de biomasa de origen común (estiércol de cama de pollos de engorde), que pasaron varios grados de carbonización (biochar formado por pirolisis a 350° y 700 °C y activados por vapor) para inmovilización de metales pesados en suelo y agua. Tanto en suelo como en agua el pH se incrementó por la aplicación de biochar alcalino, favoreciendo la inmovilización de metales pesados. La inmovilización de metales pesados resultó en la liberación no estequiométrica de protones, que es mayor en varias veces para la concentración de metales inmovilizados, comparado con los protones liberados (30).

2.2. Bases teóricas

2.2.1. El cadmio como contaminante del suelo

El suelo se constituye como un recurso natural que recibe en forma primaria gran cantidad de residuos, productos químicos y diversas sustancias, resultado de la actividad humana. Anualmente, millones de toneladas de productos de naturaleza agrícola, doméstica e industrial han ingresado al suelo, convirtiéndose así en un receptor natural, en diferentes partes del mundo. Estas sustancias ingresan a los ciclos geoquímicos de los elementos en la naturaleza y afectan las diversas formas de vida (31).

Las concentraciones naturales de metales pesados en los suelos dependen primariamente del tipo y naturaleza química de los materiales parentales que dan origen a los suelos. Sin embargo, las entradas antropogénicas pueden conducir a concentraciones mucho mayores que las concentraciones naturales. De los datos publicados, el cadmio, plomo, estaño y mercurio son los más abundantes contaminantes metálicos introducidos al suelo por actividades antropogénicas. La concentración promedio de Cd en los suelos es seis veces más que el promedio de la corteza terrestre. La concentración de Pb en los suelos es el doble del promedio en la corteza terrestre (32).

El cadmio en los suelos está casi invariablemente presente en estado de oxidación Cd (II), no es un metal de transición sino participa en enlaces covalentes con superficies adsorbentes, por lo tanto, es menos soluble que cationes como el Ca^{+2} (33).

El cadmio (Cd) es un metal no esencial para las plantas y animales, sin embargo, está naturalmente presente en todos los suelos. Las concentraciones comunes en los suelos son algunas veces mayores que los valores originales debido a la adición de las deposiciones atmosféricas y el uso de fertilizantes fosfatados. La concentración de Cd en el suelo representa solo una mínima fracción ($10^{-4} - 10^{-6}$) del total de cationes intercambiables o de la solución suelo. Por lo tanto, su presencia es improbable que afecte a las reacciones químicas del suelo, pero el Cd puede afectar la función del ecosistema en niveles traza debido a su pronunciada toxicidad y su permanencia a través del tiempo, ya que no solo se excede a décadas sino también porque su biodisponibilidad no disminuye a largo plazo (34).

La contaminación de suelos por Cd liberado de fuentes naturales es variable en diferentes países. Sin embargo, la contribución total de fuentes naturales hacia la

contaminación de Cd en el suelo representa el 10 % comparado a la liberación total de otras fuentes (35).

Aproximadamente, el 90 % ($5.6 - 38 \times 10^6$ kg/año) del Cd es liberado al ambiente de fuentes antropogénicas incluyendo el uso de fertilizantes fosfatados, quema de combustibles fósiles, actividades metalúrgicas, residuos de la industria del cemento, lodos de aguas residuales, residuos industriales y municipales, y el procesamiento de la actividad minera (36).

La fracción ambientalmente móvil de Cd consiste en Cd soluble en agua, Cd adsorbido no específicamente, y complejos órganos metálicos (37). La fase adsorbida consiste en Cd enlazado a superficies minerales o complejos órganos metálicos enlazados débilmente. La fracción estable de Cd está asociada con la matrix del suelo o enlazada a complejos superficiales en óxidos e hidróxidos, materia orgánica, silicatos, sulfuros y otros minerales estables (38).

Además, el Cd es el único metal pesado con afinidad por la fracción fácilmente solubilizada en los típicos protocolos de extracción secuencial de la fase sólida (39). La fracción incluye Cd soluble en agua, componentes solubles en ácido e intercambiables, y que constituye el contenido de Cd disponible. Usualmente este Cd es introducido artificialmente por deposición; mientras que el Cd originado de materiales geogénicos está típicamente presente en la fracción insoluble residual (40).

2.2.2. La fitorremediación

La fitorremediación utiliza plantas para remediar suelos contaminados. Es una técnica económica y ambientalmente favorable y utiliza plantas verdes para absorber, almacenar o detoxificar contaminantes del suelo contaminado (41).

La fitorremediación utiliza muchos mecanismos incluyendo rizodegradación, fitodegradación, fitoextracción, rizofiltración, fitovolatilización, y fitoestabilización para degradar, remover, o inmovilizar los contaminantes (42).

Las especies de plantas ideales para el propósito de fitorremediación deben ser naturalmente resistentes, productoras de gran cantidad de biomasa, tolerantes a efectos tóxicos de metales, fáciles de cultivar, alta capacidad de absorción, y no ser atractivas para los herbívoros (43).

Las plantas pueden remover contaminantes orgánicos e inorgánicos desde el suelo usando diferentes mecanismos, dependiendo de la especie de planta y las condiciones ambientales (44). Las interacciones suelo-planta-microorganismos juegan un rol importante en remover los contaminantes (45).

La efectividad de la remediación depende del contaminante, las especies de plantas y el suelo. La biomasa y el metabolismo de la planta juegan un rol crítico en la eficiencia de la remediación, lo cual es afectado por el pH del suelo, conductividad eléctrica, contenido de materia orgánica, procesos microbiales, y otras enmiendas del suelo (46).

La fitoextracción o fitoacumulación involucra la absorción de metales tóxicos por las raíces de las plantas, seguido de la traslocación de los metales absorbidos a los tallos y deposición en la vacuola, pared celular, membrana celular, y otras partes de los tejidos de las plantas, inactivos metabólicamente. Las plantas hiperacumuladoras, conocidas por remediar metales pesados acumulan una alta concentración de metales tóxicos en sus tallos y raíces. El mecanismo general durante la acumulación de metales tóxicos incluye la absorción de cationes metálicos seguido por la formación del complejo metal-fitoquelatina o complejo metal-ligante (47).

La remediación puede ser alcanzada a través de la inactivación o inmovilización de contaminantes dentro de las raíces o en la rizósfera. La actividad estabilizante de las raíces de las plantas limita la movilidad del contaminante y la biodisponibilidad resultante en el menor efecto tóxico. Algunas plantas forman residuos ligados de contaminantes que ya no están disponibles como tóxicos o no pueden ser liberados a la matriz sólida después de su acumulación (48).

Los contaminantes pueden ser inmovilizados en la rizósfera con la ayuda de exudados fitoquímicos, o atrapados en la superficie radicular con la ayuda de proteínas de transporte, o secuestrados dentro de la vacuola de las células radiculares a través de procesos celulares (49).

Los metales pesados y algunos contaminantes orgánicos pueden ser convertidos en compuestos no tóxicos a través de la conjugación con derivados de azúcares, proteínas, y aminoácidos o formando complejos en la rizósfera (50).

La rizofiltración involucra la remoción de sustancias tóxicas usando raíces de plantas en una zona saturada o remedia contaminantes acuosos de aguas residuales, napa freática o aguas superficiales a través de la adsorción, concentración y precipitación sobre las raíces u otros órganos sumergidos de plantas acuáticas tolerantes a metales (51). Este método es mayormente efectivo para remediación de suelo y agua altamente contaminada con nutrientes como el nitrógeno y fósforo (52).

La fitovolatilización comprende una serie de pasos. Primero, las plantas absorben contaminantes del suelo y transforman los productos químicos menos volátiles en formas más volátiles, y generan pérdida de contaminantes a la atmósfera a través del proceso de volatilización. Esta técnica trabaja bien cuando los contaminantes volatilizados tienen efectos menos tóxicos cuando se dividen del suelo a la atmósfera. La fitovolatilización trabaja bien mayormente para contaminantes orgánicos (53).

Mientras algunos compuestos pueden volatilizarse directamente del tallo y las hojas, algunos pueden volatilizarse debido a la interacción raíz-suelo. Los compuestos orgánicos hidrofóbicos salen del tallo y las hojas desde las barreras hidrofóbicas de la planta, como cortes, epidermis, suberina, y otras capas dermales. También, algunos compuestos se mueven ascendentemente en el sistema planta a través del flujo transpiratorio y pueden perderse en la atmósfera durante el proceso de transpiración (54).

Las plantas pueden metabolizar y destruir contaminantes dentro del tejido de las plantas a través del proceso conocido como fitodegradación. Los contaminantes orgánicos tales como pesticidas pueden ser remediados a través de la degradación o transformación por diferentes partes de la planta. En la fitodegradación, las partes de la planta pueden jugar un rol crucial directo o indirecto. En el proceso directo, la planta absorbe el contaminante y lo metaboliza o lo rompe en pequeños compuestos menos peligrosos y los distribuye dentro de los tejidos de la planta. Las plantas que no contienen transportadores activos, y que tienen contaminantes orgánicos, son absorbidos por mecanismos pasivos. Cuando la degradación de contaminantes se presenta en la rizosfera es llamado rizodegradación (55).

2.2.3. El vermicompost

El vermicompostaje consiste en la descomposición biooxidativa de materia orgánica muerta en un ambiente mesófilo (< 30 °C) creado por la acción cooperativa de especies de lombrices de tierra detritívoros (*Eisenia foetida*, *E. andrei*),

microorganismos y, en menor extensión, otros miembros de la comunidad de descomponedores de la fauna del suelo. Durante el proceso de vermicompostaje, las propiedades físicas, microbiológicas y bioquímicas de la materia orgánica son mayormente modificadas, y así estabilizadas (56).

Las lombrices de tierra son los conductores claves del proceso debido a la contribución significativa que hacen a la fragmentación de los residuos orgánicos y la dispersión de los microorganismos. Igualmente, las lombrices de tierra juegan un rol significativo en la actividad microbiana al triturar la materia orgánica y mejorar el área superficial disponible para el ataque microbiano (57).

Se ha enfatizado que uno de los principales impactos del proceso de vermicompostaje sobre la especiación química de metales es la reducida disponibilidad, probablemente debido a la formación de complejos metal-humus. Sin embargo, emerge la inmediata pregunta de que si el vermicompostaje tiene el mismo efecto sobre los metales presentes en un suelo cuando **son** usados como enmienda. Las características químicas del vermicompost sugieren que será un excelente sustrato adsorbente de metales, por lo tanto, reduce su biodisponibilidad y toxicidad en el suelo (58).

El vermicompost puede retener metales tóxicos eficientemente desde la solución suelo. Por ejemplo, en ensayos de adsorción y desorción cinética con diferentes soluciones de Pb^{+2} y Cd^{+2} para comparar la capacidad de enlace de metal de estiércol de vacuno y el vermicompost derivado de este material, se observó que el vermicompost retuvo mejor ambos metales. El uso de la espectroscopía infrarroja transformada de Fourier reveló que el vermicompost derivado de estiércol de vacuno mostró grupos funcionales tales como: -OH (alcohol alifático), -COOH (compuestos aromáticos), y enlaces como C=O y C-O (carbonatos y alcohol alifático) y P-O (fosfatos), esto explica la alta capacidad funcional del vermicompost para enlazar estos dos metales pesados (59).

2.2.4. El biochar

La atención por el biochar está creciendo entre los investigadores 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 microbianas 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 (60).

El biochar tiene mecanismos de adsorción:

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 (61). 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 (62).

- **Coprecipitación**

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 (61), 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 (63).

- **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 (62).

- **Adsorción electrostática**

El gran área superficial y la alta energía superficial son caracteres del biochar para adsorber fuertemente los metales pesados contaminantes y removerlos del suelo (63).

Recientes investigaciones sugieren que la enmienda biochar es una propuesta promisoría para mitigar la contaminación del suelo vía inmovilización de metales pesados y contaminantes orgánicos. Las características de calidad del biochar como una enmienda del suelo varía grandemente con los materiales utilizados y las condiciones de pirolisis. Los productos de biochar de diferentes fuentes han demostrado capacidades y eficiencias remarcables diversificadas para estabilizar contaminantes del suelo. El biochar agregado al suelo puede estabilizar Cd, Cu, Ni, Pb, y Zn y reduce su biodisponibilidad a través de la adsorción mejorada (basada en atracción electrostática, intercambio iónico, y complejación superficial) y precipitación química (debido a la elevación del pH del suelo y adición de cenizas de carbonatos y fosfatos) (64).

La incorporación de biochar a suelos contaminados con metales pesados es un concepto relativamente novedoso para la remediación, restauración y revegetación y aún no se ha evaluado a largo plazo. El biochar adsorbe un amplio rango de metales pesados contaminantes del suelo y puede proporcionar una solución ambientalmente respetuosa al ambiente para su remediación, con un bajo riesgo de causar peligros ecológicos a corto plazo. La aplicación de biochar a suelos contaminados tiene un gran impacto cuando no altera los caracteres inherentes del suelo, tales como el ambiente biótico y su estado de nutrientes. La información muestra la importancia de tomar en consideración un enfoque ecosistémico multifuncional cuando se evalúa el impacto de la remediación de metales pesados del suelo. Los beneficios del biochar a los suelos contaminados son dependientes del tipo de suelos, insumos que se utilizan para producir biochar, y el ambiente. El alcance de la remediación, combinado con los factores anteriores, implica la necesidad de un diseño inteligente para la producción, que aproveche el conocimiento existente sobre la materia prima, las condiciones de pirolisis y la tasa de aplicación (65).

Los biochars se consideran materiales ecológicos y multifuncionales con un potencial significativo para la remediación de aguas y suelos contaminados, mientras que los biochars diseñados con área superficial ampliada y abundantes grupos funcionales superficiales pueden funcionar incluso mejor en la remediación ambiental. Las propiedades físicas y químicas de los biochars, como contenido de cenizas o

minerales, aromaticidad, estructuras superficiales, pH y grupos funcionales superficiales (C = O, -COOH, -OH y -NH₂) dependen principalmente de sus fuentes de materia prima (planta, lodo o estiércol) y la temperatura de la pirolisis. Los principales impulsores de la adsorción de contaminantes son los enlaces de hidrógeno, el llenado de poros, la atracción electrostática, la interacción hidrofóbica y las fuerzas de van der Waals. A pesar de sus significativas características, se necesitan más investigaciones en campo para demostrar la aplicabilidad práctica y la viabilidad en la remediación de suelos (66).

2.2.5. El cultivo de nabo (*Brassica rapa L. var. rapa*)

El cultivo del nabo se realiza en climas templados, recomendando en el Perú sembrar en otoño, invierno o primavera. Las temperaturas bajas inferiores a 10 °C pueden dar origen a la emisión prematura de tallos florales (67).

Todos los suelos son buenos para el nabo, salvo en lugares muy sombreados; las mejores raíces se cosechan en las tierras con alto contenido de materia orgánica. El aporte de materia orgánica al suelo favorece el rápido crecimiento de raíces y, en consecuencia, favorece su calidad. En suelos de textura gruesa y con limitaciones de agua, los nabos son demasiado fibrosos y de un sabor fuerte (68).

Esta hortaliza necesita gran cantidad de nutrientes debido a su rápido desarrollo y a su corto periodo vegetativo. Los fertilizantes por usar y las cantidades necesarias dependen de la reserva y disponibilidad de nutrientes en el suelo y también de las necesidades del cultivo. Se recomienda realizar aplicaciones de nutrientes en base a los resultados de un análisis de suelo (69).

2.3. Definición de términos básicos

Estándar de calidad ambiental (ECA): estándar ambiental que regula el nivel de concentración o el 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 el ambiente (70).

Recurso suelo: es el conjunto de materiales sólidos, líquidos o gaseosos que conforma la capa superficial natural de la corteza terrestre o aún hechos por el hombre, y cuyos elementos son de naturaleza orgánica o inorgánica (minerales), ya sea aislados o mezclados cuyo límite superior es el aire o agua superficial (70).

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 (71).

Contaminante: cualquier sustancia química que no pertenece a la naturaleza del suelo o cuya concentración excede la del nivel de fondo susceptible de causar efectos nocivos para la salud de las personas o el ambiente (71).

Fuente de contaminación: punto o área de contaminación y dispersión de materiales peligrosos al ambiente, fuente que emite contaminantes al ambiente en un sitio contaminado (71).

Muestra compuesta: es aquella constituida por un conjunto de muestras simples (submuestras), 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 submuestras 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 (71).

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 (71).

Suelo contaminado: aquel suelo cuyas características químicas han sido alteradas negativamente por la presencia de sustancias químicas contaminantes depositados por la actividad humana, en concentraciones tal que en función del uso actual o previsto del sitio y sus alrededores represente un riesgo a la salud humana o el ambiente (71).

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 (71).

CAPÍTULO III

METODOLOGÍA

3.1. Método y alcance de la investigación

3.3.1. Método de investigación

3.3.1.1. General

El método general de la investigación fue hipotético-deductivo, basado en la hipótesis que el vermicompost y el biochar incrementan el crecimiento y la concentración de cadmio en nabo en un suelo contaminado.

El método de investigación hipotético-deductivo, es un procedimiento que parte de suposiciones debidamente sustentadas en calidad de hipótesis y busca refutarlas o falsearlas, deduciendo que las conclusiones deben confrontarse con los hechos (72).

Este método es ampliamente usado en la vida real como en la investigación científica. Consiste en generar hipótesis acerca de las posibles soluciones del planteamiento del problema y en la respectiva comprobación de estos a partir de los datos, si estos coinciden con ellos (73).

3.3.1.2. Específico

Se utilizó el método de análisis; la muestra tipo compuesta del suelo de una parcela agrícola del distrito de Huancaní fue analizada en sus propiedades fisicoquímicas: pH, carbonato de calcio, conductividad eléctrica, materia orgánica, fósforo, potasio, textura, capacidad de intercambio catiónico, cationes cambiabiles, saturación de bases y acidez cambiabiles. Instalado el

experimento con el suelo muestreado, y después de sembrar el cultivo de nabo, se analizó el contenido de cadmio en raíz, parte aérea y suelo. Los métodos de análisis utilizados fueron estándar para cada determinación. Estos datos fueron luego interpretados.

3.3.2. Alcance de la investigación

3.3.2.1. Tipo de investigación

La presente investigación es de tipo aplicado, pues su naturaleza eminentemente práctica aplica las bases teóricas del comportamiento del vermicompost y biochar en el suelo contaminado con cadmio, de Huancaní, mediante su aplicación en diferentes dosis, y evaluar el crecimiento de nabo, la absorción de cadmio por parte de esta hortaliza y el contenido final de cadmio en el suelo.

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

3.3.2.2. Nivel de investigación

La investigación es explicativa, pues el interés está en explicar de qué manera las dosis de vermicompost y biochar (variables independientes) influyen en el crecimiento de nabo, contenido de cadmio en nabo y suelo (variables dependientes).

3.2. Diseño de la investigación

Se aplicará el diseño experimental completamente aleatorizado (DCA) con arreglo **factorial 3 x 3**, con nueve tratamientos y tres repeticiones más un tratamiento adicional, cuyo modelo aditivo lineal es el siguiente (74):

$$\gamma_{ik} = \mu + \tau_i + \beta_j + (\Gamma_o)(\beta H_{ij}) + \beta H_{jk} + \varepsilon_{ij}$$

Donde

γ_{ik} = 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

$(\Gamma_o)(\tau\beta_{ij})$ = efecto del tratamiento adicional vs. la combinación AB

βH_{jk} = efecto de la interacción AB

ε_{ijo} = error experimental

Tabla 2. Tratamientos en estudio

N.º	Factor A	Factor B	Tratamiento
1	a ₁ = Vermicompost (VC)	b ₁ = 5 %	a ₁ b ₁ = VC (5 %: m/m)
2		b ₂ = 10 %	a ₁ b ₂ = VC (10 %: m/m)
3		b ₃ = 15 %	a ₁ b ₃ = VC (15 %: m/m)
4	a ₂ = Biochar (BC)	b ₁ = 5 %	a ₂ b ₁ = BC (5 %: m/m)
5		b ₂ = 10 %	a ₂ b ₂ = BC (10 %: m/m)
6		b ₃ = 15 %	a ₂ b ₃ = BC (15 %: m/m)
7	Testigo		Sin enmiendas

Tabla 3. Caracterización físicoquímica del suelo del experimento.

Parámetro	Contenido	Calificación
pH	7.80	Ligeramente alcalino
Conductividad eléctrica (dS/m)	0.63	No salino
CaCO ₃ (%)	14.31	Alto
Materia orgánica (%)	2.89	Medio
Arena (%)	40	-
Limo (%)	38	-
Arcilla (%)	22	-
Clase textural	Franco	Media
Fósforo (ppm)	33.6	Alto
Potasio (ppm)	341	Alto
Capacidad de intercambio catiónico (CIC) (meq/100 g)	11.20	Moderadamente alta
Calcio cambiabile (meq/100 g)	7.99	-
Magnesio cambiabile (meq/100 g)	2.32	-
Potasio cambiabile (meq/100 g)	0.72	-
Sodio cambiabile (meq/100 g)	0.17	-
Hidrógeno + aluminio (meq/100 g)	0.00	-
Saturación de bases (%)	100.00	Alto
Acidez cambiabile (%)	0.00	Bajo

Nota: tomada del Laboratorio de Análisis de Suelos, Plantas, Aguas y Fertilizantes de la Universidad Nacional Agraria La Molina, Lima (ver anexo 1)

El suelo de Huancaní tiene un pH mayor de 7, que favorece la disponibilidad de nutrientes para la planta de nabo, no presenta exceso de sales, debido a que la lluvia es suficiente para lavar la probable acumulación de sales. El alto contenido de carbonato de calcio es una evidencia de la presencia de material parental calcáreo. El contenido de materia orgánica es medio, lo cual limita la calidad del suelo. La textura tiene predominancia de arena y limo. La CIC del suelo es moderadamente alta debido al contenido de arcilla y materia orgánica. El contenido de K no es limitante para su aprovechamiento por las plantas. El P no limita el crecimiento de la planta por su alto contenido en el suelo. Predomina el calcio entre los cationes cambiables; estando ausente el hidrógeno y aluminio, debido al pH mayor de 7, y tiene una alta saturación de bases. Los datos se presentan en la tabla 3.

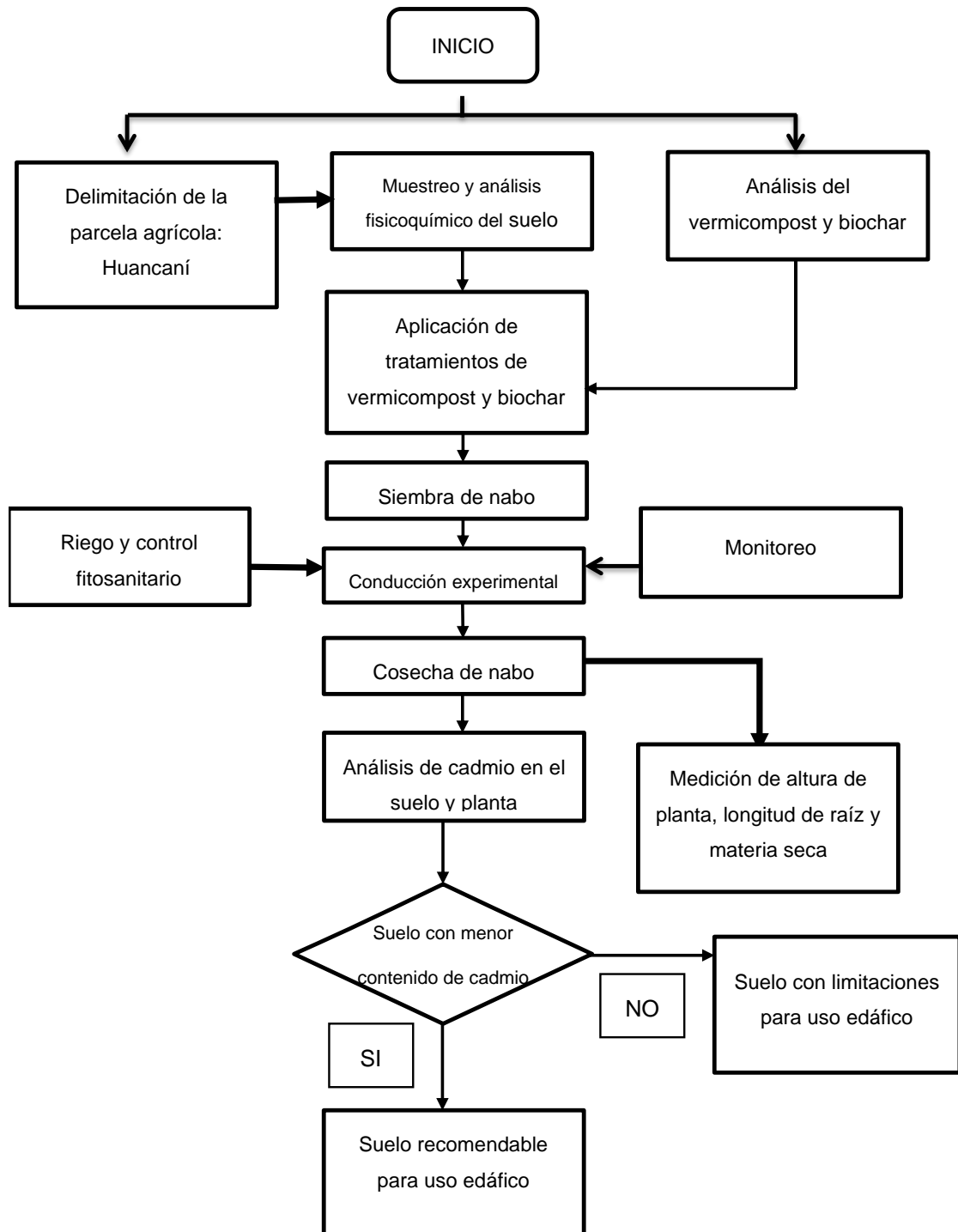


Figura 1. Diagrama de flujo del proceso experimental

3.3. Población y muestra

3.3.1. Población

La población está constituida por todas las plantas de *Brassica rapa L. var. rapa* en el experimento.

3.3.2. Muestra

La muestra está constituida por 3 plantas por cada unidad experimental para la medición del contenido de cadmio en los órganos de *Brassica rapa L. var. rapa*.

3.4. Técnicas e instrumentos de recolección de datos

3.4.1. Evaluaciones realizadas

3.4.1.1. Materia seca aérea

Al momento de la finalización del experimento (72 días después de la siembra), se cortó la parte aérea de cada planta en cada maceta, desde el ras del suelo y se colocó en una bolsa de papel *Kraft*, debidamente identificada para ser llevada al laboratorio y colocar en la estufa a una temperatura de 60 °C durante 24 horas para finalmente pesar cada unidad experimental y determinar la materia seca aérea.

3.4.1.2. Materia seca radicular

Las raíces de las plantas de cada maceta (5 plantas), se lavaron cuidadosamente y se orearon para después ser colocadas en una bolsa de papel *Kraft*, debidamente etiquetada, para ser llevada al laboratorio y obtener la materia seca de cada unidad experimental.

3.4.1.3. Análisis de cadmio total en la parte aérea

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

3.4.1.4. Análisis de cadmio total en la parte raíz

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

3.4.1.5. Factor de traslocación (FT)

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

$$FT = \frac{\text{Concentración de Cd en la parte aérea de Brassica rapa L.var.rapa}}{\text{Concentración de Cd en la raíz de Brassica rapa L.var.rapa}}$$

3.4.1.6. Factor de bioconcentración (FBC)

Para calcular el FBC de Cd, se relacionó el contenido de metal en la parte aérea, respecto al contenido del metal en el suelo, utilizando la siguiente expresión:

$$FBC \text{ parte aérea} = \frac{\text{Concentración de Cd en la parte aérea de Brassica rapa L.var.rapa}}{\text{Concentración de Cd en el suelo}}$$

3.4.1.7. Contenido final de Cd en el suelo

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

3.4.2. Procesamiento de datos

Al finalizar la obtención de datos estos fueron sistematizados, se verificó la distribución normal de cada variable utilizando la prueba Shapiro-Wilk; si la variable evaluada tenía distribución normal se realizó el análisis de variancia (tabla 4) 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 (75) y la hoja de cálculo de Excel.

Tabla 4. Esquema del análisis de variancia del diseño completamente al azar (DCA)

Fuentes de variación	Grados de libertad (GL)	Suma de cuadrados (SC)	Cuadrado medio (CM)	Fc
Testigo vs. combinaciones (T vs. C)	1	$\frac{\sum_i T^2}{r_t} + \frac{\sum_i C^2}{r_c} - FC$	$SC_{Tvs.C} / GL_{Tvs.C}$	$CM_{Tvs.C} / CM_{EE}$
Factor A (enmiendas orgánicas)	$(a-1) = (2-1) = \mathbf{1}$	$\sum_i \frac{(a_i)^2}{r} - FC$	SC_A / GL_A	CM_A / CM_{EE}
Factor B (niveles de enmiendas orgánicas)	$(b-1) = (3-1) = \mathbf{2}$	$\sum_i \frac{(b_i)^2}{r} - FC$	SC_B / GL_B	CM_B / CM_{EE}
Interacción A x B (AB)	$(a-1)(b-1) = (2-1)(3-1) = \mathbf{2}$	$\left(\frac{\sum_i C^2}{r_c} - FC \right) - SC_A - SC_B$	SC_{AB} / GL_{AB}	CM_{AB} / CM_{EE}
Error experimental (EE)	$(a)(b)(r-1) + (r-1) = (2)(3)(3-1) + (3-1) = \mathbf{14}$	$SC_T - SC_A - SC_B - SC_{Tvs.C}$	SC_{EE} / GL_{EE}	
Total (T)	$(a)(b)(r) + (r-1) = (2)(3)(3) + (3-1) = \mathbf{20}$	$\sum_{X_{ijk}} 2 - FC$	SC_T / GL_T	

Fuente: Steel y Torrie (74)

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

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.

4.1.1. Efecto del vermicompost y biochar en la acumulación de Cd en los órganos vegetativos de *Brassica rapa* L. var. *rapa*

4.1.1.1. Cadmio en la parte aérea

Tabla 5. Resultados del contenido de Cd en la parte aérea de nabo (cm) en un suelo de Huancaní contaminado con Cd con diferentes dosis de vermicompost y biochar

Tratamiento	Enmienda	Repeticiones			Promedio
		I	II	III	
1	5 % VC	5.53	7.65	4.48	5.89
2	10 % VC	5.15	6.65	5.98	5.93
3	15 % VC	5.88	4.45	4.4	4.91
4	5 % BC	4.3	5.3	5.85	5.15
5	10 % BC	5.53	6.03	5.83	5.80
6	15 % BC	5.7	4.3	6.6	5.53
7	Testigo	5.9	5.70	5.38	5.66

El contenido de Cd varió en cada tratamiento, siendo el promedio más alto el logrado por el tratamiento con 10 % de vermicompost (T2), evidenciando el efecto de la enmienda orgánica en el crecimiento de la planta en un suelo contaminado con Cd. Los datos se presentan en la tabla 5.

4.1.1.2. Cadmio en la raíz

Tabla 6. Resultados del contenido de cadmio en la raíz de nabo ($mg.kg^{-1}$) en un suelo de Huancaní contaminado con Cd con diferentes dosis de vermicompost y biochar

Tratamiento	Enmienda	Repeticiones			Promedio
		I	II	III	
1	5 % VC	3.65	4.82	3.67	4.05
2	10 % VC	3.12	3.48	3.53	3.38
3	15 % VC	3.5	3.15	3.04	3.23
4	5 % BC	5.77	5.16	4.64	5.19
5	10 % BC	8.3	4.54	5.76	6.20
6	15 % BC	6.65	4.63	5.48	5.59
7	Testigo	6.03	5.59	5.94	5.85

El contenido de cadmio en la raíz tuvo el más alto valor en el tratamiento 5 (10 % de biochar), posiblemente debido al mejor acondicionamiento del suelo contaminado, originado por la materia orgánica aplicada. Los datos se presentan en la tabla 6.

4.1.2. Factores de bioconcentración (FBC) y de traslocación (FT) del cultivo de nabo

4.1.2.1. Factor de bioconcentración

Tabla 7. Resultados del factor de bioconcentración (FBC) en nabo en un suelo de Huancaní contaminado con Cd con diferentes dosis de vermicompost y biochar

Tratamiento	Enmienda	Repeticiones			Promedio
		I	II	III	
1	5 % VC	0.79	0.94	0.6	0.78
2	10 % VC	0.67	0.9	0.8	0.79
3	15 % VC	0.82	0.58	0.57	0.66
4	5 % BC	0.55	0.76	1	0.77
5	10 % BC	0.89	0.9	0.89	0.89
6	15 % BC	0.84	0.64	1.01	0.83
7	Testigo	0.84	0.87	0.83	0.85

El factor de bioconcentración, que relaciona el Cd presente en la parte aérea del nabo y el contenido en el suelo, tuvo en el tratamiento 5 (10 % de biochar), sus mayores valores, comparado a los demás tratamientos. Todos los valores son menores que 1, lo cual indica una baja fitoextracción de Cd por este cultivo. Los datos se presentan en la tabla 7.

4.1.2.2. Factor de traslocación

Tabla 8. Resultados del factor de traslocación (FT) en nabo en un suelo de Huancaní contaminado con Cd con diferentes dosis de vermicompost y biochar

Tratamiento	Enmienda	Repeticiones			Promedio
		I	II	III	
1	5 % VC	1.51	1.59	1.22	1.44
2	10 % VC	1.65	1.91	1.7	1.75
3	15 % VC	1.68	1.41	1.45	1.51
4	5 % BC	0.75	1.03	1.26	1.01
5	10 % BC	0.67	1.32	1.01	1.00
6	15 % BC	0.86	0.93	1.2	1.00
7	Testigo	0.98	1.02	0.9	0.97

El factor de traslocación tuvo en el tratamiento 2 (10 % de vermicompost) su mayor valor y en el tratamiento 7 (testigo) su valor más bajo. Todos los datos son superiores a la unidad, excepto el tratamiento testigo; esto indica que el Cd absorbido por el nabo se trasladó a la parte aérea. Los datos se presentan en la tabla 8.

4.1.2.3. Materia seca de la parte aérea

Tabla 9. Resultados de la materia seca de la parte aérea de nabo (g) en un suelo de Huancaní contaminado con Cd con diferentes dosis de vermicompost, 2022

Tratamiento	Enmienda	Repeticiones			Promedio
		I	II	III	
1	5 % VC	17.66	14.23	12.43	14.77
2	10 % VC	15.62	17.02	19.92	17.52
3	15 % VC	14.7	16.44	18.64	16.59
4	5 % BC	11.21	12.69	12.67	12.19
5	10 % BC	12.06	12.53	12.44	12.34
6	15 % BC	11.73	13.17	12.72	12.54
7	Testigo	13.66	11.64	11.85	12.38

El peso de materia seca formada tuvo en el tratamiento 2 (10 % de vermicompost) el de más alto promedio, por efecto de la aplicación de materia orgánica al suelo contaminado. Los datos se presentan en la tabla 9.

4.1.2.4. Materia seca de raíz

Tabla 10. Resultados de la materia seca de la raíz de nabo (g) en un suelo de Huancaní contaminado con Cd con diferentes dosis de vermicompost y biochar

Tratamiento	Enmienda	Repeticiones			Promedio
		I	II	III	
1	5 % VC	10.11	9.59	9.22	9.64
2	10 % VC	9.93	10.02	10.04	10.00
3	15 % VC	9.97	9.98	9.91	9.95
4	5 % BC	9.17	9.1	9.24	9.17
5	10 % BC	8.96	9.18	9.25	9.13
6	15 % BC	9.19	9.29	9.29	9.26
7	Testigo	9.65	9.16	9.45	9.42

El peso de materia seca de raíz tuvo su mayor promedio en el tratamiento 2 (10 % de vermicompost), atribuible al mejoramiento de las propiedades del suelo con esa dosis de materia orgánica. Los datos se presentan en la tabla 10.

4.1.3. Contenido de cadmio en el suelo

4.1.3.1. Contenido inicial de cadmio en los tratamientos

Tabla 11. Resultados del contenido inicial de cadmio (ppm) en el suelo de Huancaní contaminado con Cd, cultivado con nabo, con diferentes dosis de vermicompost y biochar

Tratamiento	Enmienda	Repeticiones			Promedio
		I	II	III	
1	5 % VC	9.13	9.3	9.43	9.29
2	10 % VC	8.78	9	8.86	8.88
3	15 % VC	8.7	9.12	8.39	8.74
4	5 % BC	8.8	9	8.77	8.86
5	10 % BC	8.43	8.43	8.07	8.31
6	15 % BC	8.04	8.12	7.77	7.98
7	Testigo	8.52	8.52	8.1	8.38

El contenido de Cd total en el suelo al inicio del experimento fue mayor en el tratamiento 1 (5 % de vermicompost), y superior al testigo (0 % de enmienda), lo cual se atribuye principalmente al efecto del contenido de Cd en el vermicompost que incrementó su contenido en el sustrato. Los datos se presentan en la tabla 11.

4.1.3.2. Contenido final de cadmio en los tratamientos

Tabla 12. Resultados del contenido final de cadmio (ppm) en el suelo de Huancaní contaminado con Cd, cultivado con nabo, con diferentes dosis de vermicompost y biochar

Tratamiento	Enmienda	Repeticiones			Promedio
		I	II	III	
1	5 % VC	6.98	8.17	7.4	7.52
2	10 % VC	7.63	7.35	7.5	7.49
3	15 % VC	7.17	7.72	7.7	7.53
4	5 % BC	7.82	7.02	5.83	6.89
5	10 % BC	6.22	6.7	6.52	6.48
6	15 % BC	6.8	6.75	6.52	6.69
7	Testigo	7.03	6.55	6.48	6.69

El contenido de Cd total en el suelo al final del experimento fue menor en el tratamiento 5 (10 % de biochar), lo cual se atribuye principalmente al efecto de la enmienda aplicada que disminuyó su contenido en el sustrato. Los datos se presentan en la tabla 12.

4.2. Prueba de hipótesis

4.2.1. Hipótesis específica 1

H₀: El vermicompost y el biochar, en dosis crecientes, no incrementan la acumulación de Cd en los órganos vegetativos de *Brassica rapa L. var. rapa*

H₁: El vermicompost y el biochar, en dosis crecientes, incrementan significativamente la acumulación de Cd en los órganos vegetativos de *Brassica rapa L. var. rapa*

4.2.1.1. Contenido de Cd en la parte aérea

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

Para la prueba de normalidad se planteó la siguiente hipótesis:

H₀: La población está distribuida normalmente.

H_a: La población no está distribuida normalmente.

Nivel de significación: $\alpha = 0.05$

Tabla 13. Prueba de normalidad de Shapiro-Wilk para el contenido de Cd en la parte aérea

Tratamiento	Enmienda	Promedio (mg.kg ⁻¹)	Valor p
1	5 % VC	5.89	0.6382
2	10 % VC	5.93	0.8827
3	15 % VC	4.91	0.0561
4	5 % BC	5.15	0.6802
5	10 % BC	5.80	0.7806
6	15 % BC	5.53	0.7591
7	Testigo	5.66	0.7448

Como el valor *p*, en todos los tratamientos es mayor que 0.05, se acepta la hipótesis nula (H₀) 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 13. Posteriormente se desarrolló el análisis de variancia.

Tabla 14. Análisis de variancia para el contenido de Cd (mg.kg^{-1}) en la parte aérea

F. de V.	SC	GL	CM	Fc	F tablas		Significancia
					0.05	0.01	
T vs combin.	0.040	1	0.040	0.047	4.60	8.83	ns
Factor A (Enm)	0.030	1	0.030	0.035	4.60	8.83	ns
Factor B (dosis)	1.231	2	0.615	0.721	3.74	6.51	ns
A x B	1.393	2	0.696	0.816	3.74	6.51	ns
Error	11.943	14	0.853				
Total	14.637	20					

$$S = 0.924$$

$$\bar{x} = 5.552$$

$$CV = 16.636 \%$$

Del análisis de variancia, se observa que no existe significación estadística (ns) en todas las fuentes de variación, indicando que el contenido de Cd en la parte aérea no tuvo influencia de los tratamientos. Esto permite rechazar la hipótesis planteada. Los datos se presentan en la tabla 14.

4.2.1.2. Contenido de Cd en la 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-Wilk.

Para la prueba de normalidad se planteó la siguiente hipótesis:

H_0 : La población está distribuida normalmente.

H_a : La población no está distribuida normalmente.

Nivel de significación: $\alpha = 0.05$

Tabla 15. Prueba de normalidad de Shapiro-Wilk para el contenido de Cd en la raíz

Tratamiento	Enmienda	Promedio (mg.kg^{-1})	Valor p
1	5 % VC	4.047	0.0274
2	10 % VC	3.377	0.2143
3	15 % VC	3.230	0.4381
4	5 % BC	5.190	0.9129
5	10 % BC	6.213	0.6005
6	15 % BC	5.587	0.8255
7	Testigo	5.853	0.3704

Como el valor p , en el tratamiento 1 es menor que 0.05, se rechaza la hipótesis nula (H_0) y se acepta la hipótesis alternativa (H_a). La población de

donde proviene la muestra no está distribuida normalmente. Los datos se presentan en la tabla 15. Posteriormente se desarrolló la prueba no paramétrica de Kruskal-Wallis.

Tabla 16. Prueba de Kruskal-Wallis para el contenido de Cd en la raíz

F. de V.	H	Valor p
Tratamientos	15.307	0.018

La prueba de Kruskal-Wallis tuvo en la fuente de tratamientos un valor p menor que 0.05, indicando diferencias significativas entre cada tratamiento. Los datos se presentan en la tabla 16. Posteriormente se realizó las comparaciones entre tratamientos.

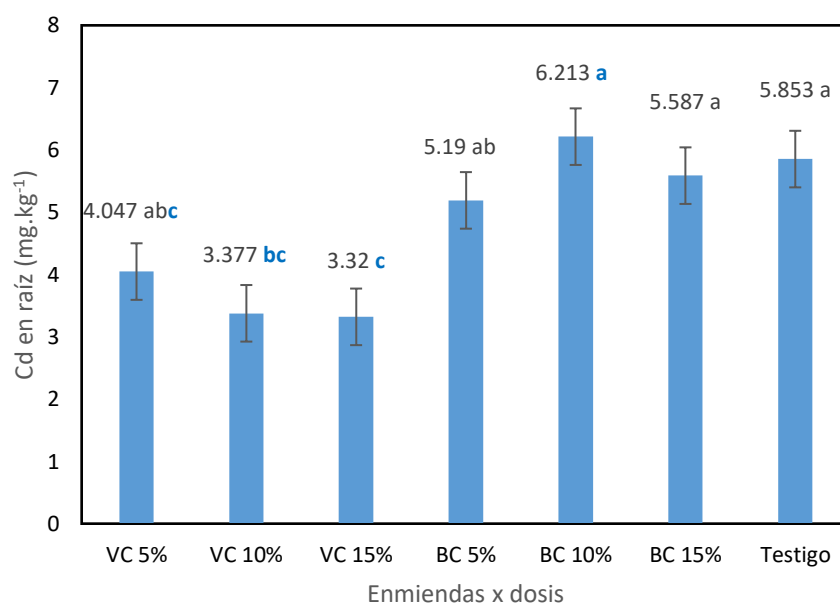


Figura 2. Prueba de Kruskal-Wallis para el contenido de Cd en la raíz, entre tratamientos. Las líneas verticales en la parte superior central de las barras representan el error estándar ($n = 3$)

La prueba de Kruskal-Wallis mostró que los tratamientos con 10 y 15 % de biochar y el testigo, tuvieron mayor Cd en la raíz; en cambio el tratamiento con 15 % de vermicompost tuvo la menor concentración de Cd en la raíz de nabo, lo cual se atribuye a que el vermicompost disminuye la biodisponibilidad de Cd en el suelo y la planta lo absorbe limitadamente. El biochar en alta dosis no afectaría la biodisponibilidad de Cd en el suelo y la planta absorbe más Cd. Estos resultados permiten aceptar la hipótesis planteada. Los datos se presentan en la figura 2.

4.2.2. Hipótesis específica 2

H₀: Los factores de bioacumulación y translocación de Cd en *Brassica rapa* L. var. *rapa* no se incrementan por la aplicación de vermicompost y biochar.

H₁: Los factores de bioacumulación y translocación de Cd en *Brassica rapa* L. var. *rapa* se incrementan significativamente por la aplicación de vermicompost y biochar.

4.2.2.1. Factor de bioacumulación (FBC)

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-Wilk.

Para la prueba de normalidad se planteó la siguiente hipótesis:

H₀: La población está distribuida normalmente.

H_a: La población no está distribuida normalmente.

Nivel de significación: $\alpha = 0.05$

Tabla 17. Prueba de normalidad de Shapiro-Wilk para el FBC

Tratamiento	Enmienda	Promedio	Valor <i>p</i>
1	5 % VC	0.777	0.8708
2	10 % VC	0.790	0.8577
3	15 % VC	0.657	0.0680
4	5 % BC	0.770	0.9260
5	10 % BC	0.893	<0.0001
6	15 % BC	0.830	0.9107
7	Testigo	0.847	0.4628

Como el valor *p*, en el tratamiento 5 es menor que 0.05, se rechaza la hipótesis nula (H₀) y se acepta la hipótesis alternativa (H_a). La población de donde proviene la muestra no está distribuida normalmente. Los datos se presentan en la tabla 17. Posteriormente se desarrolló la prueba no paramétrica de Kruskal-Wallis.

Tabla 18. Prueba de Kruskal-Wallis para el FBC

F. de V.	H	Valor <i>p</i>
Tratamientos	5.576	0.471

La prueba de Kruskal-Wallis tuvo en la fuente de tratamientos un valor p mayor que 0.05, indicando que no existen diferencias significativas entre los tratamientos. Los datos se presentan en la tabla 18. Esto permite rechazar la hipótesis planteada.

4.2.2.2. Factor de traslocación (FT)

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-Wilk.

Para la prueba de normalidad se planteó la siguiente hipótesis:

H_0 : La población está distribuida normalmente.

H_a : La población no está distribuida normalmente.

Nivel de significación: $\alpha = 0.05$

Tabla 19. Prueba de normalidad de Shapiro-Wilk para el FT

Tratamiento	Enmienda	Promedio	Valor p
1	5 % VC	1.440	0.395
2	10 % VC	1.753	0.345
3	15 % VC	1.513	0.261
4	5 % BC	1.013	0.893
5	10 % BC	1.000	0.946
6	15 % BC	0.997	0.371
7	Testigo	0.967	0.639

Como el valor p , es mayor que 0.05 en todos los tratamientos, 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 19. Posteriormente se desarrolló el análisis de variancia de los datos.

Tabla 20. Análisis de variancia para el FT

F. de V.	SC	GL	CM	Fc	F tablas		Signific.
					0.05	0.01	
T vs combin.	0.262	1	0.262	6.435	4.60	8.83	*
Factor A (Enm)	1.440	1	1.440	35.368	4.60	8.83	**
Factor B (dosis)	0.076	2	0.038	0.933	3.74	6.51	ns
A x B	0.085	2	0.043	1.044	3.74	6.51	ns
Error	0.570	14	0.041				
Total	2.433	20					
S = 0.202				$\bar{x} = 1.240$	CV = 16.290 %		

Del análisis de variancia, se observa que existe significación estadística (*) entre testigo vs. combinaciones (T vs. Combin.) y alta significación estadística (**) entre los niveles de enmiendas (Factor A Enm). No se observó diferencias significativas entre los niveles del factor B ni en la interacción. Esto permite aceptar la hipótesis planteada. Los datos se presentan en la tabla 20. Se procedió a realizar la prueba de Duncan para las fuentes de interacción significativas.

La prueba de Duncan mostró que las combinaciones de tratamientos con un promedio de 1.286 fueron superior estadísticamente al testigo, con una probabilidad de error del 5 %. La aplicación de vermicompost y biochar incrementó el FT. Estos resultados permiten aceptar la hipótesis planteada. Los datos se presentan en la figura 3.

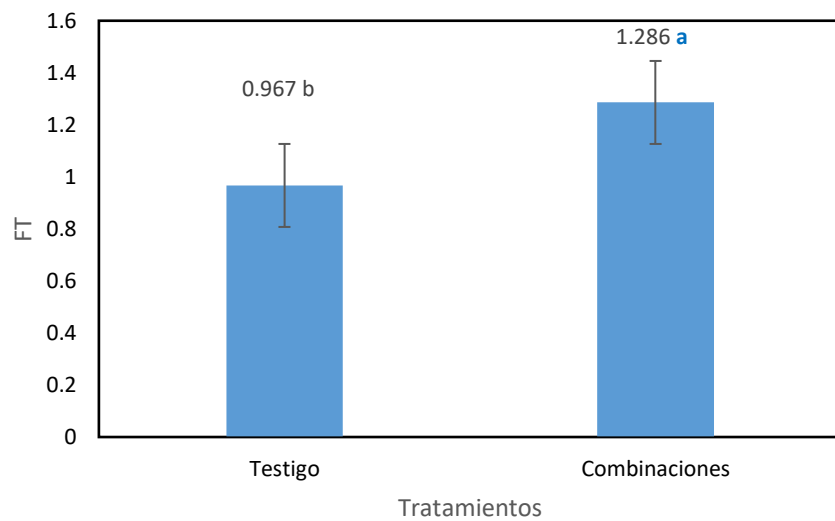


Figura 3. Prueba de Duncan para el FT entre el testigo y las combinaciones de tratamientos. Las líneas verticales al centro superior de las barras representan el error estándar ($n = 3$)

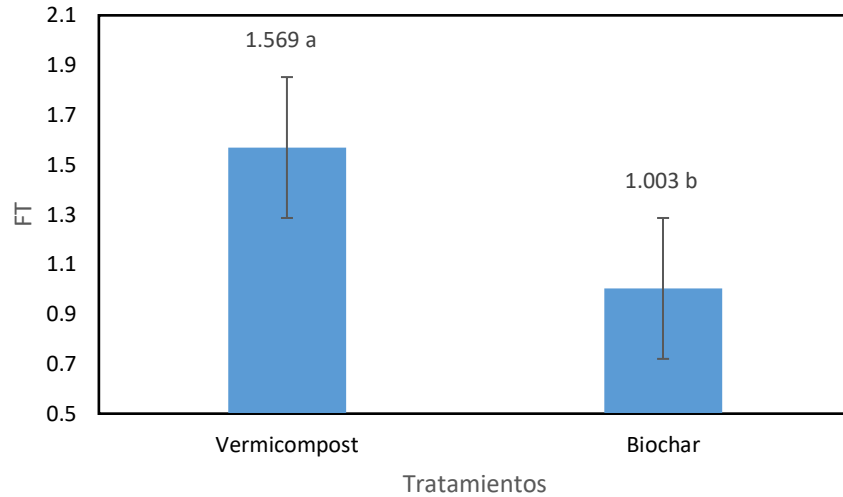


Figura 4. Prueba de Duncan para el FT entre los tipos de enmienda. Las líneas verticales al centro superior de las barras representan el error estándar ($n = 3$)

La prueba de Duncan para las fuentes de enmiendas mostró que el vermicompost incrementó el FT respecto al biochar, debido a que la planta al tener menor disponibilidad de Cd, la cantidad absorbida por la raíz lo traslocó hacia la parte aérea. Lo que no sucedió con el biochar. Esto permite aceptar la hipótesis planteada. Los datos se presentan en la figura 4.

4.2.3. Hipótesis específica 3

H_0 : La biomasa seca aérea y radicular de *Brassica rapa L. var. rapa* no se incrementa por la adición de vermicompost y biochar.

H_1 : La biomasa seca aérea y radicular de *Brassica rapa L. var. rapa* se incrementa significativamente por la adición de vermicompost y biochar.

4.2.3.1. Biomasa 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-Wilk.

Para la prueba de normalidad se planteó la siguiente hipótesis:

H_0 : La población está distribuida normalmente.

H_a : La población no está distribuida normalmente.

Nivel de significación: $\alpha = 0.05$

Tabla 21. Prueba de normalidad de Shapiro-Wilk para la biomasa seca aérea (g)

Tratamiento	Enmienda	Promedio	Valor <i>p</i>
1	5 % VC	14.777	0.660
2	10 % VC	17.518	0.620
3	15 % VC	16.595	0.869
4	5 % BC	12.187	0.021
5	10 % BC	12.344	0.348
6	15 % BC	12.541	0.588
7	Testigo	12.384	0.173

Como el valor *p* del tratamiento 4 es menor que 0.05, se rechaza la hipótesis nula (H_0) y se acepta la hipótesis alternativa (H_a). La población de donde proviene la muestra no está distribuida normalmente. Los datos se presentan en la tabla 21. Posteriormente se desarrolló la prueba de Kruskal-Wallis.

Tabla 22. Prueba de Kruskal-Wallis para la biomasa seca aérea (g)

F. de V.	H	Valor <i>p</i>
Tratamientos	12.675	0.048

La prueba de Kruskal-Wallis tuvo en la fuente de tratamientos un valor *p* menor que 0.05, indicando que existen diferencias significativas entre los tratamientos. Los datos se presentan en la tabla 22. Esto permite aceptar la hipótesis planteada.

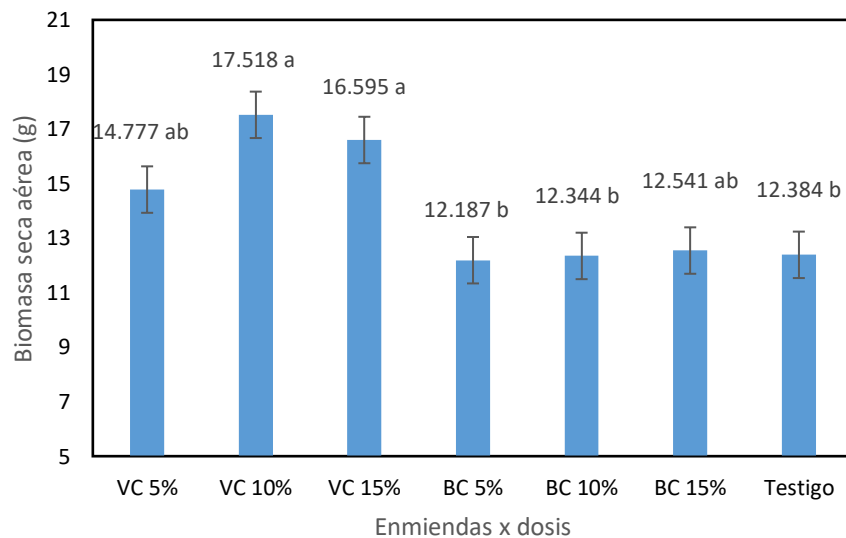


Figura 5. Prueba de Kruskal-Wallis para la biomasa seca aérea, entre tratamientos. Las líneas verticales en la parte superior central de las barras representan el error estándar ($n = 3$)

La prueba de Kruskal-Wallis mostró que los tratamientos con 10 y 15 % de vermicompost fueron superiores estadísticamente respecto a los demás tratamientos, debido a que esta enmienda orgánica disminuyó la biodisponibilidad de Cd en el suelo y permitió un mayor crecimiento de nabo y mayor peso de materia seca vegetal aérea. El biochar no mostró tal efecto. Los datos se presentan en la figura 4.

4.2.3.2. Biomasa seca 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-Wilk.

Para la prueba de normalidad se planteó la siguiente hipótesis:

H_0 : La población está distribuida normalmente.

H_a : La población no está distribuida normalmente.

Nivel de significación: $\alpha = 0.05$

Tabla 23. Prueba de normalidad de Shapiro-Wilk para la biomasa seca radicular (g)

Tratamiento	Enmienda	Promedio	Valor p
1	5 % VC	9.640	0.809
2	10 % VC	9.993	0.327
3	15 % VC	9.954	0.288
4	5 % BC	9.167	0.983
5	10 % BC	9.130	0.405
6	15 % BC	9.255	0.032
7	Testigo	9.418	0.804

Como el valor p del tratamiento 6 es menor que 0.05, se rechaza la hipótesis nula (H_0) y se acepta la hipótesis alternativa (H_a). La población de donde proviene la muestra no está distribuida normalmente. Los datos se presentan en la tabla 23. Posteriormente se desarrolló la prueba de Kruskal-Wallis.

Tabla 24. Prueba de Kruskal-Wallis para la biomasa seca aérea (g)

F. de V.	H	Valor p
Tratamientos	13.628	0.0341

La prueba de Kruskal-Wallis tuvo en la fuente de tratamientos un valor p menor que 0.05, indicando que existen diferencias significativas entre los tratamientos. Los datos se presentan en la tabla 24. Esto permite aceptar la hipótesis planteada.

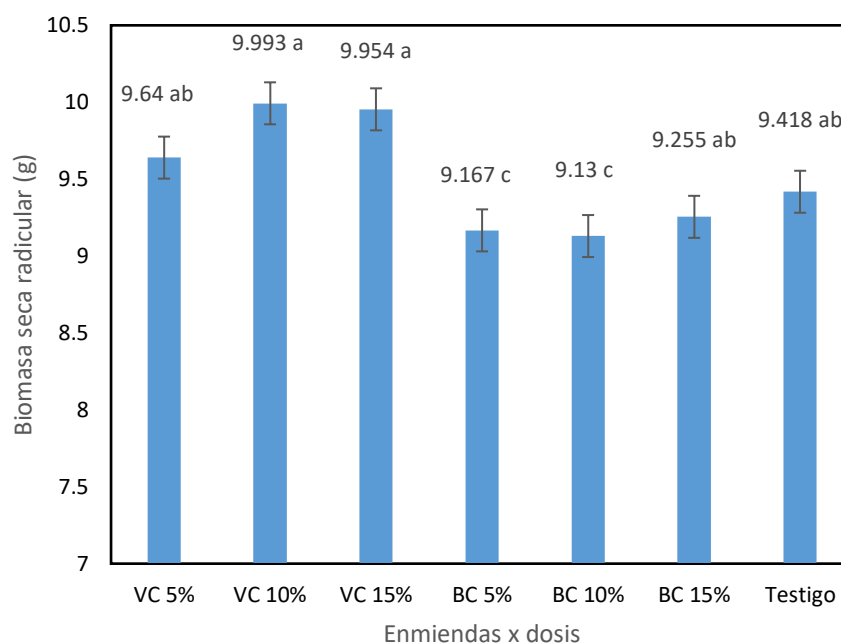


Figura 6. Prueba de Kruskal-Wallis para la biomasa seca radicular, entre tratamientos. Las líneas verticales en la parte superior central de las barras representan el error estándar ($n = 3$)

La prueba de Kruskal-Wallis mostró que los tratamientos con 10 y 15 % de vermicompost fueron superiores estadísticamente respecto a los demás tratamientos, debido a que esta enmienda orgánica disminuyó la biodisponibilidad de Cd en el suelo y permitió un mayor crecimiento de la raíz y mayor peso de materia seca vegetal radicular. El biochar no mostró tal efecto. Los datos se presentan en la figura 5.

4.2.4. Hipótesis específica 4

H_0 : El vermicompost y el biochar no disminuyen la concentración de Cd en el suelo agrícola contaminado de Huancaní.

H_1 : El vermicompost y el biochar disminuyen significativamente la concentración de Cd en el suelo agrícola contaminado de Huancaní.

4.2.4.1. Contenido de Cd en el suelo

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

Para la prueba de normalidad se planteó la siguiente hipótesis:

H₀: La población está distribuida normalmente.

H_a: La población no está distribuida normalmente.

Nivel de significación: $\alpha = 0.05$

Tabla 25. Prueba de normalidad de Shapiro-Wilk para el contenido de Cd final en el suelo (mg.kg⁻¹)

Tratamiento	Enmienda	Promedio	Valor <i>p</i>
1	5 % VC	7.517	0.678
2	10 % VC	7.493	0.921
3	15 % VC	7.530	0.061
4	5 % BC	6.890	0.784
5	10 % BC	6.480	0.723
6	15 % BC	6.690	0.319
7	Testigo	6.687	0.224

Como el valor *p* de todos los tratamientos es mayor que 0.05, se acepta la hipótesis nula (H₀) 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 25. Posteriormente se desarrolló el análisis de variancia de los datos.

Tabla 26. Análisis de variancia para el contenido de Cd (mg.kg⁻¹) en el suelo

F. de V.	SC	GL	CM	Fc	F tablas		Significancia
					0.05	0.01	
T vs combin.	0.439	1	0.439	1.857	4.60	8.83	ns
Factor A (Enm)	3.075	1	3.075	13.010	4.60	8.83	**
Factor B (dosis)	0.142	2	0.071	0.300	3.74	6.51	ns
A x B	0.113	2	0.057	0.239	3.74	6.51	ns
Error	3.309	14	0.236				
Total	7.078	20					

S = 0.486

$\bar{x} = 7.041$

CV = 6.902 %

Del análisis de variancia, se observa que existe alta significación estadística (**) entre los niveles del Factor A (enmiendas), debido al efecto

diferenciado del vermicompost y el biochar en el contenido final de Cd en el suelo. En las demás fuentes de variación no se observó significación estadística (ns). Esto permite aceptar la hipótesis planteada. Los datos se presentan en la tabla 26. Se procedió a realizar la prueba de Duncan para las fuentes de interacción significativas.

La prueba de Duncan para las enmiendas mostró que al final del experimento el tratamiento con biochar tuvo la más baja cantidad de Cd en el suelo, significativamente diferente que el vermicompost. Al inicio del experimento ambos tratamientos mostraron el mismo comportamiento diferenciado significativamente. Esto se atribuye al carácter adsorbente del biochar, que disminuye la disponibilidad de este metal pesado en el suelo de Huancaní. Los datos se presentan en la figura 6.

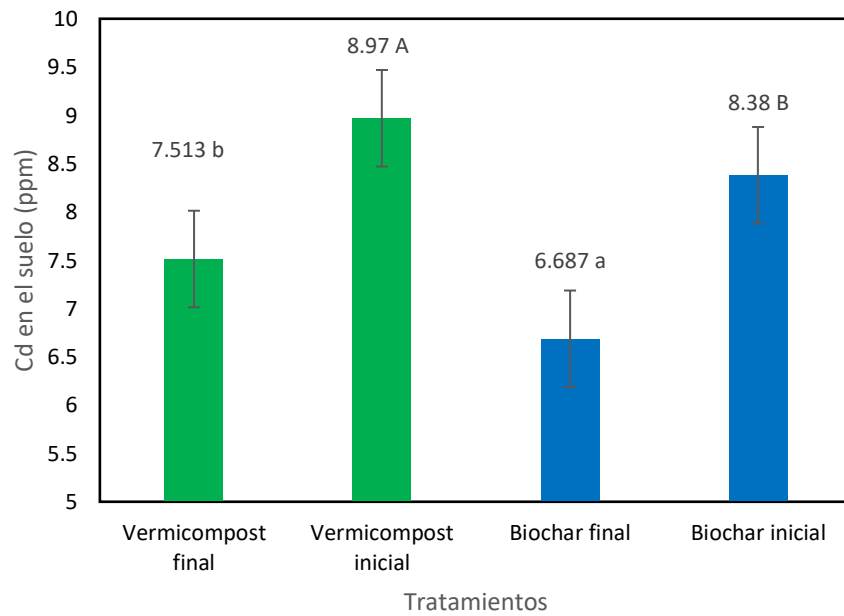


Figura 7. Prueba de Duncan para el contenido de Cd en el suelo al final e inicio del experimento para los tipos de enmiendas. Las líneas verticales al centro superior de las barras representan el error estándar (n = 3)

Tabla 27. Variación porcentual del contenido de Cd en el suelo de Huancaní

Tratamiento	Enmienda	Inicio (ppm)	Final (ppm)	Variación (%)
1	5 % VC	9.287	7.517	-19.059
2	10 % VC	8.880	7.493	-15.619
3	15 % VC	8.737	7.530	-13.815
4	5 % BC	8.857	6.890	-22.208
5	10 % BC	8.310	6.480	-22.022
6	15 % BC	7.977	6.690	-16.134
7	Testigo	8.380	6.687	-20.203

La disminución porcentual de Cd en el suelo fue mayor con 5 % de biochar. Esta disminución no alcanza el valor permitido del ECA. Los datos se presentan en la tabla 27.

4.3. Discusión de resultados

El contenido de Cd en la parte aérea del nabo con 10 % de vermicompost evidenció el efecto de esta enmienda orgánica en la absorción y traslocación de Cd a la parte aérea, favoreciendo la remediación del suelo. No se observó diferencias significativas con los demás tratamientos.

Estos resultados son similares a los encontrados en la evaluación del compostaje y vermicompostaje en pasivos mineros de Huamantanga – Canta, donde se concluyó que el vermicompostaje fue el más eficiente en la biorremediación del suelo (18).

Asimismo, se observa resultados similares al evaluar *Brassica rapa* junto con otras dos especies, donde además de Cd se determinó Zn y Pb en lugares de acumulación de basura de Abancay, donde se concluyó que esta especie junto con *Amaranthus hybridus* y *Amaranthus spinosus* presentaron rápido crecimiento con altos niveles de absorción de Pb, Cd y Zn, constituyéndose en una alternativa para la fitorremediación (19).

Se observa del análisis de las referencias, que esta especie vegetal, en diferentes sustratos contaminados, pasivos ambientales y lugares de acumulación de basura urbana, tiene potencial para absorber contaminantes.

Para el contenido de Cd en la raíz con los tratamientos de biochar al 10 % y 15 %, así como el testigo, se tuvo el más alto promedio, sin diferencias significativas entre sí, pero superiores estadísticamente a los demás tratamientos. Este efecto de mayor contenido de Cd en la raíz de nabo se atribuye a la mejora de las propiedades del suelo por efecto del biochar, que favorecen la absorción de este metal pesado.

Este resultado se observó similarmente en *Helianthus annuus* L. var. Sunbright, donde al aplicar dosis entre 0 a 25 mg Cd/kg suelo, se encontró que la raíz concentró más Cd conforme se incrementó el Cd en el suelo, debido a una baja traslocación a la parte aérea (20).

El factor de bioacumulación (FBC) de Cd de la parte aérea de nabo fue mayor con la dosis de 10 % de biochar, sin diferencias significativas con los demás tratamientos. Los valores fueron menores a la unidad ($FBC < 1$), indicando que esta especie vegetal no acumula Cd en sus órganos vegetativos aéreos; es decir, no es una planta bioacumuladora o fitoextractora.

Este resultado fue similar, pero utilizando *Lupinus mutabilis* y estiércol de lombriz en un suelo contaminado de Huancaní, donde el factor de bioconcentración tuvo valores inferiores a 1, indicando que esta especie podría ser considerada fitoestabilizadora, pero se requieren posteriores evaluaciones (21).

Para el factor de traslocación (FT), el más alto valor fue con el tratamiento de 10 % de vermicompost, superior significativamente al biochar; de igual manera los tratamientos con las enmiendas orgánicas fueron superiores estadísticamente al testigo, mostrándose que hubo efecto de las enmiendas orgánicas en este indicador de fitorremediación.

Los valores encontrados fueron superiores a la unidad ($FT > 1$), mostrando que el nabo transfirió a la parte aérea, el Cd absorbido por la raíz. Estos resultados fueron diferentes a lo observado en *Zea mays* L. en un suelo contaminado con Cd en Leonor Ordoñez (Jauja), donde el FT fue menor que 1, siendo el compost a dosis entre 5 y 20 % los que tuvieron mejores resultados (20).

Uno de los mecanismos que explica la acumulación de metales, como el Cd, es la formación de complejos metal-fitoquelatina o complejo metal-ligante en la raíz, después de su absorción (47).

En la formación de materia seca aérea y radicular, los tratamientos con 10 % y 15 % de vermicompost (VC) tuvo los mayores valores, significativamente superiores a los demás tratamientos, mostrando el efecto de esta enmienda orgánica en incrementar el crecimiento de nabo, cuando crece en un suelo contaminado; lo cual se puede atribuir a la mejora de las propiedades del suelo, como retención de agua, aireación, densidad aparente, actividad microbial, entre otras (56), así como su efecto en disminuir la disponibilidad de Cd en el suelo (58).

El contenido final de Cd en el suelo disminuyó significativamente debido a la aplicación de las enmiendas orgánicas, siendo mayor la disminución significativa, con la aplicación de biochar en sus diferentes dosis, respecto al vermicompost. Se tuvo una disminución del 22.028 % con la aplicación de 5 % de biochar al suelo.

Esta disminución de Cd del suelo, debido al nabo, indica el carácter fitorremediador de la hortaliza favorecido por el carácter adsorbente de Cd del biochar (62), que disminuye la disponibilidad del metal pesado en el suelo.

Estos resultados también advierten la limitación en sembrar hortalizas en suelos contaminados con Cd debido a que el metal pesado es absorbido por la planta y puede ser trasferido a los canales alimenticios al momento de su utilización para consumo humano o animal.

CONCLUSIONES

1. El contenido de Cd en la parte aérea de nabo, *Brassica rapa* L. var. *rapa*, fue mayor con la dosis de 10 % de vermicompost, con un promedio de 5.93 mg/kg, sin diferencias significativas con los demás tratamientos.
2. El Cd en la raíz de nabo fue superior con 10 % y 15 % de biochar, con promedios de 6.20 y 5.50 mg/kg, respectivamente, superiores estadísticamente al vermicompost.
3. El factor de bioacumulación (FBC) fue mayor con la dosis de 10 % de biochar, con un promedio de 0.89, sin diferencias significativas con el vermicompost.
4. El factor de traslocación (FT) fue superior significativamente con 10 % de vermicompost, con un promedio de 1.75, superando al biochar.
5. En el crecimiento de la planta, la formación de materia seca aérea y radicular fue significativamente superior con 10 % y 15 % de vermicompost, superando al biochar.
6. El biochar en sus diferentes dosis disminuyó significativamente el Cd en el suelo de Huancaní al final del experimento, superando al vermicompost.

RECOMENDACIONES

1. Limitar la siembra de nabo, *Brassica rapa* L. var. *rapa* en suelos contaminados con Cd, debido a que absorben este metal pesado y su consumo introduciría este metal pesado a los canales alimenticios.
2. Combinar la utilización de vermicompost y biochar como enmiendas orgánicas para remediar suelos agrícolas contaminados con Cd, pues el primero favorece el crecimiento de la planta y el segundo disminuye la disponibilidad del metal pesado en el suelo.
3. Utilizar enmiendas orgánicas para remediar suelos contaminados con Cd por su probado efecto en disminuir su concentración en el suelo.

LISTA DE REFERENCIAS

1. **ZULFIQAR, U.; JIANG, W.; XIUKANG, W.; HUSSAIN, S.; AHMAD, M.; MAQSOOD, M.; ALI, N.; ISHFAQ, M.; KALEEM, M.; HAIDER, F. et al.** Cadmium phytotoxicity, tolerance, and advanced remediation approaches in agricultural soils; A comprehensive review. *Front. Plant Sci.* [en línea]. 2022, 13, 773815. [Consulta: 14 de enero 2022]. Disponible en:
<https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2022.773815/full>
2. **YAN, A.; WANG, Y.; TAN, S.; YUSOF, M.; GHOSH, S.; CHEN, Z.** Phytoremediation: A promising Approach for Revegetation of Heavy Metal-Polluted Land. *Frontiers in Plant Science* [en línea]. 2020, 11:359. [Consulta: 14 de enero 2022]. Disponible en: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2020.00359/full>
3. **ZULFIQAR, U.; AYUB, A.; HUSSAIN, S.; WARAICH, E.; EL-ESAWI, M.; ISHFAQ, M.; AHMAD, M.; ALI, N.; MAQSOOD, M.** Cadmium Toxicity in Plants: Recent Progress on Morpho-physiological Effects and Remediation Strategies. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition.* [en línea]. 2021, 22(500). [Consulta: 14 de enero 2022]. Disponible en:
<https://www.semanticscholar.org/paper/Cadmium-Toxicity-in-Plants-%3A-Recent-Progress-on-and-Zulfiqar-Ayub/f66d605e1c329cd073f49b9abf3fb628cf4a1cdc>
4. **YAO, P.; ZHOU, H.; LI, X.; WEI, L.; WANG, J.; ZHANG, S. et al.** Effect of biochar on the accumulation and distribution of cadmium in tobacco (Yunyan 87) at different developmental stages. *Ecotoxicol. Environ. Saf.* [en línea]. 2021, 207:111295. [Consulta: 14 de enero 2022]. Disponible en:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0147651320311337>
5. **KHAN, S.; HESHAM, A.; QIAO, M.; REHMAN, S.; HE, J.** Effect of Cd and Pb on soil microbial community structure and activities. *Environ. Sci. Pollut. Res.* [en línea]. 2010, 17, 288-196. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/19333640/>
6. **DE GODOI, M.; MATOS, T.; SANTOS, M.; ARAGAO, C.; LEITE, K.; DA COSTA, P.; SANTOS, H.; VASCONCELOS, A.; SOUZA, L.; DOS SANTOS, E.; KORN, M.** An interdisciplinary approach to evaluate the mobility and toxicity of cadmium in a soil-plant system. *CLEAN-Soil, Air, Water* [en línea]. 2018, 46, 1800134.
<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/clen.201800134>
7. **GONG, X.; HUANG, D.; LIU, Y.; ZENG, G.; WANG, R.; WEI, J.; HUANG, C.; XU, P.; WAN, J.; ZHANG, C.** Pyrolysis, and reutilization of plant residues after phytoremediation of heavy metals contaminated sediments: for heavy metals stabilization and dye adsorption. *Bioresour. Technol.* [en línea]. 2018, 253, 64-71.

- <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S096085241830018X>
8. **GREIPSSON, S.** Phytoremediation. *Nat. Educ. Knowl.* [en línea]. 2011, 3(10):7.
<https://www.nature.com/scitable/knowledge/library/phytoremediation-17359669/>
 9. **VITHANAGE, M.; DABROWSKA, B.; MUKHERJEE, B.; SANDHI, A.; BHATTACHARYA, P.** Arsenic uptake by plants and phytoremediation applications: a brief overview. *Environ. Chem. Lett.* [en línea]. 2012, 10, 217-224.
<https://link.springer.com/article/10.1007/s10311-011-0349-8>
 10. **LEBRUN, M.; NANDILLON, R.; MIARD, F.; BOURGERIE, S.; MORABITO, D.** Biochar assisted phytoremediation for metal(loid) contaminated soils. In: Pandey V. Editors. Assisted Phytoremediation. [en línea]. 2022.
<https://www.sciencedirect.com/book/9780128228937/assisted-phytoremediation#book-info>
 11. **PANDEY, J.; SARKAR, S.; PANDEY, V.** Compost-assisted phytoremediation. In: Pandey V. Editors. Assisted Phytoremediation. [en línea]. 2022.
<https://www.sciencedirect.com/book/9780128228937/assisted-phytoremediation#book-info>
 12. **CACCIAMENI, M.** Lombricultura. Una actividad ecológica y rentable. Editorial Hemisferio Sur. 2004.
 13. **BEESLEY, L.; MORENO-JIMENEZ, E.; GOMEZ-EYLES, J.; HARRIS, E.; ROBINSON, B.; SIZMUR, T.** A review of biochars' potential rol in the remediation, revegetation, and restoration of contaminated soils. *Environmental Pollution* 159: 3269-3282. 2011. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0269749111003939>
 14. **TANGAHU, B.V.; ABDULLAH, S.; ROZAIMAH, S.; HASSAN, B.; MUSHRIFAH, I.; NURINA, A.; MUKHLISIN, M.** A review on heavy metals (As, Pb, and Hg) uptake by plants through phytoremediation. *International Journal of Chemical Engineering* vol. 2011, 31 pages. 2011. <https://www.hindawi.com/journals/ijce/2011/939161/>
 15. **FAGERIA, N.; BALIGAR, V.; CLARK, R.** *Physiology of Crop Production*. Food Products Press. ISBN 139781560222880. 2006.
 16. **SANCHEZ - LOPEZ, A.; GONZALES – CHAVEZ, M.; y CARRILLO – GONZALES, R.** Absorber, inmovilizar o atrapar. Funciones de las plantas en la remediación de sitios contaminados por elementos potencialmente tóxicos. *Agroproductividad*: Vol 10, Num. 4, abril. Pp. 80 – 86. 2017. [fecha de consulta: 22 de setiembre de 2021]. Disponible en:
<https://revista-agroproductividad.org/index.php/agroproductividad/articulo/view/1007/861>
 17. **CONTRERAS, M.; CUBA, S.; y ROJAS, E.** Eficiencia del compostaje y vermicompostaje en la biorremediación de suelos contaminados con cadmio y plomo por

- pasivos ambientales mineros de Huamantanga – Canta. [en línea]. Tesis de grado. Callao: Universidad Nacional del Callao, 2021 [consulta: 13 enero 2023]. 150 p. Disponible en: <http://repositorio.unac.edu.pe/handle/20.500.12952/5802>
18. **SOTO, C.; JIMENEZ, W.** Potential Phytoremediator of Native Species in Soils Contaminated by Heavy Metals in the Garbage Dump Quitasol-Imponeda Abancay. *J. Sustain. Dev. Energy Water Environ. Syst.* [en línea]. 2019, 7(4), 584-600. [consulta: 13 enero 2023]. 150 p. Disponible en: <https://www.sdewes.org/jsdewes/pid7.0261>
 19. **CLEMENTE, J.; MEDINA, J.; LAURA, J.; PARIONA, L.; GUTIERREZ, P.** Fitorremediación en suelos contaminados con Cd usando girasol (*Helianthus annuus* L. var. Sunbright). *Acta Agronómica* [en línea]. 2021, 70-2, 163-170. [consulta: 13 enero 2023]. 150 p. Disponible en: https://revistas.unal.edu.co/index.php/acta_agronomica/article/view/94208
 20. **POMA, A.; y QUIÑONEZ, C.** Efecto de enmiendas orgánicas en la fitorremediación con *Zea mays* L. en un suelo contaminado con cadmio. Leonor Ordóñez, Jauja – 2021. [en línea]. Tesis de grado. Huancayo: Universidad Continental, 2022 [consulta: 13 enero 2023]. 150 p. Disponible en: <https://repositorio.continental.edu.pe/handle/20.500.12394/11108#:~:text=Los%20resultados%20mostraron%20que%20la,que%20tuvieron%20los%20mejores%20resultados.>
 21. **ROMERO, M.; BRAVO, S.** Estudio del potencial de acumulación de metales pesados de plantas nativas peruanas para la fitorremediación de pasivos mineros. [en línea]. Tesis de grado. Lima: Pontificia Universidad Católica del Perú, 2021 [consulta: 13 enero 2023]. 110 p. Disponible en: <https://tesis.pucp.edu.pe/repositorio/handle/20.500.12404/19519>
 22. **HINOSTROZA, S.** Fitoestabilización de cadmio por *Lupinus mutabilis* en un suelo contaminado del distrito El Mantaro, Jauja 2016. [en línea]. Tesis de grado. Huancayo: Universidad Continental, 2018 [consulta: 13 enero 2023]. 99 p. Disponible en: <https://repositorio.continental.edu.pe/handle/20.500.12394/4918>
 23. **PAPUICO, R.** Fitorremediación de un suelo contaminado con cadmio, utilizando *Lupinus mutabilis* y estiércol de lombriz. Huancaní, Jauja. 2019. [en línea]. Tesis de grado. Huancayo: Universidad Continental, 2020 [consulta: 13 enero 2023]. 96 p. Disponible en: <https://hdl.handle.net/20.500.12394/8548>
 24. **NAVARRO-LEON, E.; RUIZ, J.; ALBACETE, A.; BLASCO, B.** Tolerance to cadmium toxicity and phytoremediation potential of three *Brassica rapa* CAX1a TILLING mutants. *Ecotoxicology and Environmental Safety*. [en línea]. 2020, 189, 109961. [consulta: 13 enero 2023]. 150 p. Disponible en: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/31759737/>

25. **ZHANG, X.; GU, P.; LIU, X.; HUANG, X.; WANG, J.; ZHANG, S.; JI, J.** Effect of crop straw biochars on the remediation of Cd-contaminated farmland soil by hyperaccumulator *Bidens pilosa* L. *Ecotoxicology and environmental Safety* [en línea]. 2021, 219, 112332. [consulta: 13 enero 2023]. 150 p.
26. **CHAVARREA, B.; AGUAISA, J.** Evaluación de la capacidad fitorremediadora de dos especies vegetales *Raphanus sativus* y *Brassica rapa* en suelos contaminados con cadmio en laboratorio. [en línea]. Tesis de grado. Riobamba, Ecuador: Universidad Nacional de Chimborazo. 2021. [consulta: 13 enero 2023]. 115 p. Disponible en: <http://dspace.unach.edu.ec/handle/51000/8491>
27. **TURAN, M.; ESRINGU.** Phytoremediation based on canola (*Brassica napus* L.) and Indian mustard (*Brassica juncea* L.) planted on spiked soil by aliquot amount of Cd, Cu, Pb, and Zn. *Plant Soil Environ.* [en línea]. 2007, 53 (1): 7-15. [consulta: 13 enero 2023]. Disponible en: <https://www.agriculturejournals.cz/pdfs/pse/2007/01/02.pdf>
28. **AMAD, I.; MALIK, S.; SAEED, Sh.; REHMAN, A.; MUNIR, T.** Phytoremediation a wastewater-Irrigated soil contaminated with toxic metals: comparing the efficacies of diferent crops. *Soil Systems.* [en línea]. 2022, 6 (77): 7-15. [consulta: 13 enero 2023]. Disponible en: <https://www.mdpi.com/2571-8789/6/4/77>
29. **HOUBEN, D.; EVRARD, L.; SONNET, P.** Beneficial effects of biochar application to contaminated soils on the bioavailability of Cd, Pb and Zn and the biomass production of rapeseed (*Brassica napus* L.). *Biomass and Bioenergy* [en línea]. 2013, 57, 196-204. [consulta: 13 enero 2023]. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0961953413003449>
30. **UCHIMIYA, Minori; LIMA, Isabel M.; THOMAS Klasson, K.; CHANG, Sechin; WARTELLE, Lynda H.; RODGERS, James E.** Immobilization of heavy metal ions (CuII, CdII, NiII, and PbII) by broiler litter-derived biochars in water and soil. *Journal of Agricultural and Food Chemistry.* [en línea]. 2010, 58 (9), 5538–5544. [consulta: 13 enero 2023]. Disponible en: <https://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/jf9044217>
31. **WEIL, R.; BRADY, N.** *The nature and properties of soils.* Fifteenth edition. Pearson. Boston. USA. 2017. ISBN 9780133254488
32. **MIRSAL, I.** *Soil Pollution. Origin, Monitoring & Remediation.* 2nd edition. Berlín: Springer. 2010. ISBN 9783642089688.
33. **SMOLDERS, E.; MERTENS, J.** Cadmium. B. J. Alloway (ed.). *Heavy Metals in Soils: Trace Metals and Metalloids in Soils and their Bioavailability*, Environmental Pollution 22, DOI. Springer. 2013. ISBN 9789400744691
34. **SMOLDERS, E.; BRANS, K.; FOLDI, A.; and MERCKX, R.** Cadmium fixation in soils measured by isotopic dilution. *Soil Science Society of American Journal.* [en línea]. 1999, 63(1), 78-85. [fecha de consulta: 13 de enero de 2023]. Disponible en:

<https://access.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.2136/sssaj1999.0361599500630001001>

3x

35. **KHAN, M.; KHAN, S.; KHAN, A.; and ALAM, M.** Soil contamination with cadmium, consequences and remediation using organic amendments. *Science of the Total Environment*. [en línea]. 2017, 601-602, 1591 – 1605. [fecha de consulta: 13 de enero de 2023]. Disponible en: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/28609847/>
36. **CLOQUET, C.; CARIGNAN, J.; LIBOUREL, G.; STERCKEMAN, T.; and PERDRIX, E.** Tracing source pollution in soil using cadmium and lead isotopes. *Environ. Sci. Technol.* [en línea]. 2006, 40, 2525-2530. [fecha de consulta: 13 de enero de 2023]. Disponible en: <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/es052232 %2B>
37. **LOGANATHAN, P.; VIGNESWARAN, S.; KANDASAMY, J.; NAIDU, R.** Cadmium sorption and desorption in soils: a review. *Crit. Rev. Environ. Sci. Technol.* [en línea]. 2012, 42, 489-533. [fecha de consulta: 13 de enero de 2023]. Disponible en: https://hero.epa.gov/hero/index.cfm/reference/details/reference_id/3342936
38. **AHMED, I.; CROUT, N.; YOUNG, S.** Kinetics of Cd sorption, desorption, and fixation by calcite: a long-term radiotracer study. *Geochem. Cosmochim.* [en línea]. 2008, Acta 72, 1498-1512. [fecha de consulta: 13 de enero de 2023]. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0016703708000203>
39. **AL HUSSEINI, A.; BECHET, B.; GAUDIN, A.; RUBAN, V.** Trace metal fractionation as a mean to improve on the management of contaminated sediments from runoff water in infiltration basins. *Environ. Technol.* [en línea]. 2013, 34, 1255-1266. [fecha de consulta: 13 de enero de 2023]. Disponible en: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/24191459/>
40. **LIU, Y.; XIAO, T.; PERKINS, R.; ZHU, J.; ZHU, Z.; XIONG, Y.; NING, Z.** Geogenic cadmium pollution and potential health risks, with emphasis on black shale. *J. Geochem. Explor.* [en línea]. 2017, 176, 42-49. [fecha de consulta: 13 de enero de 2023]. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0375674216300929>
41. **ASHRAF, S.; ALI, Q.; ZAHIR, Z.; ASHRAF, S.; ASGHAR, H.** Phytoremediation: Environmentally sustainable way for reclamation of heavy metal polluted soils. *Ecotoxicol. Environ. Saf.* [en línea]. 2019, 174, 714–727. [fecha de consulta: 13 de enero de 2023]. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0147651319302271>
42. **PIVETZ, B.** Phytoremediation of contaminated soil and ground water at hazardous waste sites. *US Environmental Protection Agency*. [en línea] 2001. [fecha de consulta: 13 de enero de 2023]. Disponible en: <https://www.epa.gov/remedytech/phytoremediation-contaminated-soil-and-ground-water-hazardous-waste-sites>

43. **SHABANI, N.; SAYADI, M.** Evaluation of heavy metals accumulation by two emergent macrophytes from the polluted soil: an experimental study. *Environment*. [en línea]. 2012, 32, 91–98. [fecha de consulta: 13 de enero de 2023]. Disponible en: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10669-011-9376-z>
44. **ANTONIADIS, V.; LEVIZOU, E.; SHAHEEN, S.; OK, Y.; SEBASTIAN, A.; BAUM, C.; PRASAD, M.; WENZEL, W.; RINKLEBE, J.** Trace elements in the soil-plant interface: Phytoavailability, translocation, and phytoremediation—a review. *Earth Sci. Rev.* [en línea]. 2017, 171, 621–645. [fecha de consulta: 13 de enero de 2023]. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0012825216303518>
45. **DARY, M.; CHAMBER-PÉREZ, M.; PALOMARES, A.; PAJUELO, E.** “In situ” phytostabilisation of heavy metal polluted soils using *Lupinus luteus* inoculated with metal resistant plant-growth promoting rhizobacteria. *J. Hazard. Mater.* [en línea]. 2010, 177, 323–330. [fecha de consulta: 13 de enero de 2023]. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0304389409020068>
46. **NISSIM, W.; PALM, E.; MANCUSO, S.; AZZARELLO, E.** Trace element phytoextraction from contaminated soil: a case study under Mediterranean climate. *Environ. Sci. Pollut. Res.* [en línea]. 2018, 25, 9114–9131. [fecha de consulta: 13 de enero de 2023]. Disponible en: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/29340860/>
47. **LAJAYER, B.; MOGHADAM, N.; MAGHSOODI, M.; GHORBANPOUR, M.; KARIMAN, K.** Phytoextraction of heavy metals from contaminated soil, water and atmosphere using ornamental plants: mechanisms and efficiency improvement strategies. *Environ. Sci. Pollut. Res.* [en línea]. 2019, 26, 8468–8484. [fecha de consulta: 13 de enero de 2023]. Disponible en: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/30712209/>
48. **LI, H.; SHENG, G.; SHENG, W.; XU, O.** Uptake of trifluralin and lindane from water by ryegrass. *Chemosphere*. [en línea]. 2002, 48, 335–341. [fecha de consulta: 13 de enero de 2023]. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0045653502000930>
49. **Interstate Technology & Regulatory Council.** *Phytotechnology technical and regulatory guidance and decision trees (revised)*. 2009, 1-131. [fecha de consulta: 13 de enero de 2023]. Disponible en: <https://connect.itrcweb.org/HigherLogic/System/DownloadDocumentFile.ashx?DocumentFileKey=9d763797-c32e-4f2b-8e07-ed81b323245c>.
50. **HAMMOND, C.; ROOT, R.; MAIER, R.; CHOROVER, J.** Mechanisms of arsenic sequestration by *Prosopis juliflora* during the phytostabilization of metalliferous mine tailings. *Environ. Sci. Technol.* [en línea]. 2018, 52, 1156–1164. [fecha de consulta: 13 de enero de 2023]. Disponible en: <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acs.est.7b04363>

51. **JADIA, C.; FULEKAR, M.** Phytoremediation of heavy metals: recent techniques. *Afr. J. Biotechnol.* [en línea]. 2009, 8 [fecha de consulta: 13 de enero de 2023]. Disponible en: <https://www.ajol.info/index.php/ajb/article/view/59987>
52. **MITHEMBU, M.** Nitrogen and phosphorus removal from agricultural wastewater using constructed rhizofiltration in Durban, South Africa. *J. Agricul. Sci. Technol.* [en línea]. 2012, 1142–1148. [fecha de consulta: 13 de enero de 2023]. Disponible en: <https://search.proquest.com>
53. **LIMMER, M.; BURKEN, J.** Phytovolatilization of organic contaminants. *Environ. Sci. Technol.* [en línea]. 2016, 50, 6632–6643. [fecha de consulta: 13 de enero de 2023]. Disponible en: [https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/27249664/#:~:text=Abstract,root%20activities%20\(indirect%20phytovolatilization\)](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/27249664/#:~:text=Abstract,root%20activities%20(indirect%20phytovolatilization)).
54. **LI, H.; SHENG, G.; SHENG, W.; XU, O.** Uptake of trifluralin and lindane from water by ryegrass. *Chemosphere* [en línea]. 2002, 48, 335–341. [fecha de consulta: 13 de enero de 2023]. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0045653502000930>
55. **GARRISON, A.; NZENGUNG, V.; AVANTS, J.; ELLINGTON, J.; JONES, W.; RENNELS, D.; WOLFE, N.** Phytodegradation of p, p-DDT and the Enantiomers of o, p-DDT. *Environ. Sci. Technol.* [en línea]. 2000, 34, 1663–1670. [fecha de consulta: 13 de enero de 2023]. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/313840326_Phytodegradation_of_pp'-DDT_and_the_Enantiomers_of_op'-DDT.
56. **ZU, W.; DU, W.; SHEN, X.; ZHANG, H.; DING, Y.** Comparative adsorption of Pb⁺² and Cd⁺² by cow manure and its vermicompost. *Environ. Pollut.* [en línea]. 2017, 227: 89-97. [fecha de consulta: 13 de enero de 2023]. Disponible en: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/28458250/>
57. **AIRA, M.; MONROY, F.; DOMINGUEZ, J.** Earthworms strongly modify microbial biomass and activity triggering enzymatic activities during vermicomposting independently of the application rates of pig slurry. *Sci. Total Environ.* [en línea]. 2007, 385: 252-261. [fecha de consulta: 13 de enero de 2023]. Disponible en: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/17628641/>
58. **SANCHEZ-HERNANDEZ, J.** *Bioremediation of agricultural soils*. CRC Press, Taylor & Francis Group, Boca Ratón. 2019.
59. **AIRA, M.; MONROY, F.; DOMINGUEZ, J.** *Eisenia fétida* (Oligochaeta, Lumbricidae) activates fungal growth, triggering cellulose decomposition during vermicomposting. *Microb. Ecol.* [en línea]. 2006, 52: 738-747. [fecha de consulta: 13 de enero de 2023]. Disponible en: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/16944346/>

60. **CERNANSKY, Rachel.** Agriculture: State-of-the-art soil. *Nature*. [en línea]. 2015, 517, 7534, 258–260. [fecha de consulta: 13 de enero de 2023]. Disponible en: <https://www.nature.com/>
61. **REES, F.; SIMONNOT, M. O.; 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*. [en línea]. 2014, 65 (1), 149–161. [fecha de consulta: 13 de enero de 2023]. Disponible en: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1111/ejss.12107>
62. **LI, Hongbo; DONG, Xiaoling; DA SILVA, Evandro B.; DE OLIVEIRA, Letuzia M.; CHEN, Yanshan; MA, Lena Q.** Mechanisms of metal sorption by biochars: Biochar characteristics and modifications. *Chemosphere*. [en línea]. 2017, 178 (9), 466–478. [fecha de consulta: 13 de enero de 2023]. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0045653517304356>
63. **WANG, Shuguang; XU, Yan; NORBU, Namkha; WANG, Zhan.** Remediation of biochar on heavy metal polluted soils. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. [en línea]. 2018, 108 (4), 042113. [fecha de consulta: 13 de enero de 2023]. Disponible en: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/108/4/042113>
64. **GUO, M.; SONG, W.; TIAN, J.** Biochar – Facilitated Soil Remediation: Mechanisms and Efficacy Variations. *Front. Environ. Sci.* [en línea]. 2020. 8: 521512. [consulta: 01-10-2022]. Disponible en: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fenvs.2020.521512/full>
65. **TARAQI-A-KAMAL, A.; ATKINSON, C.; KHAN, A.; ZHANG, K.; SUN, P.; AKTHER, S.; ZHANG, Y.** Biochar remediation of soil: linking biochar production with function in heavy metal contaminated soils. *Plant, Soil and Environment* [en línea]. 2021. 67 (4), 183 – 201. [consulta: 01-10-2022]. Disponible en: https://www.agriculturejournals.cz/publicFiles/544_2020-PSE.pdf
66. **ISLAM, T.; LI, Y.; CHENG, H.** Biochars and Engineered Biochars for Water and Soil. *Sustainability* [en línea]. 2021. 13, 9932. [consulta: 01-10-2022]. Disponible en: <https://www.mdpi.com/2071-1050/13/17/9932>
67. **GIACONI, M.; ESCAFF, G.** Cultivo de hortalizas. Editorial Universitaria. Chile. 2004.
68. **NOGUERA, V.** El huerto en el jardín. Mundi – Prensa. España. 2004.
69. **VAN HAEFF, J.; BERLJIN, J.** Manual para la Educación Agropecuaria: Horticultura. Editorial Trillas. México. Pp. 39-41. 2006.
70. **Ministerio del Ambiente.** Glosario de términos para la Gestión Ambiental Peruana. Dirección General de Políticas, Normas e Instrumentos de Gestión Ambiental. Lima, Perú. 2012.

71. _____. Glosario de términos. Sitios Contaminados. Lima, Perú. 2012.
72. **BERNAL, César A.** *Metodología de la investigación*. 3ra Edition. Pearson, Colombia. 2010. ISBN 9789586991285
73. **CERRAGA, J.** *Metodología de la Investigación Científica y Tecnológica*. Madrid, España. Editorial Días de Santos, 2012.
74. **STEEL, Robert G. D.; TORRIE, James H.** *Bioestadística: Principios y procedimientos*. 2nd Edition. 1985.
75. **DI RIENZO J.; CASANOVES F.; BALZARINI M.; GONZALEZ L.; TABLADA M.; ROBLEDO, C.** InfoStat versión 2020. Centro de Transferencia InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina. URL <http://www.infostat.com.ar>

ANEXOS

Anexo 1

Resultados del análisis de caracterización del suelo del experimento.



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



ANALISIS DE SUELOS : CARACTERIZACION

Solicitante : YASMIN CELY PUENTE MEDINA

Departamento : JUNIN

Distrito : HUANCANI

Referencia : H.R. 77573-140C-22

Bolt.: 5326

Provincia : JAUJA

Predio :

Fecha : 31/08/2022

Número de Muestra	pH	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 ⁺			
11923	7.80	0.63	14.31	2.89	33.6	341	40	38	22	Fr.	11.20	7.99	2.32	0.72	0.17	0.00	11.20	11.20	100

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



Dr. Constantino Calderón Mendoza
 Jefe del Laboratorio

Anexo 2

Resultados del análisis de cadmio en el suelo con tratamientos, antes 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 : YASMIN CELY PUENTE MEDINA
PROCEDENCIA : JUNIN/ JAUJA/ HUANCANI
REFERENCIA : H.R. 77574
BOLETA : 5326
FECHA : 31/08/2022

Lab	Número Muestra		Cd ppm
	Claves		
1598	T1R1		9.13
1599	T1R2		9.30
1600	T1R3		9.43
1601	T2R1		8.78
1602	T2R2		9.00
1603	T2R3		8.86
1604	T3R1		8.70
1605	T3R2		9.12
1606	T3R3		8.39
1607	T4R1		8.80
1608	T4R2		9.00
1609	T4R3		8.77
1610	T5R1		8.43
1611	T5R2		8.43
1612	T5R3		8.07
1613	T6R1		8.04
1614	T6R2		8.12
1615	T6R3		7.77
1616	T7R1		8.52
1617	T7R2		8.52
1618	T7R3		8.10



Constantino Calderón Mendoza
Jefe del Laboratorio

Anexo 3

Resultados del análisis de cadmio en el biochar.



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



**INFORME DE ANALISIS ESPECIAL DE
MATERIA ORGANICA**

SOLICITANTE : YASMIN CELY PUENTE MEDINA
PROCEDENCIA : JUNIN/ JAUJA/ HUANCANI
MUESTRA DE : BIOCHAR
REFERENCIA : H.R. 77575
BOLETA : 5326
FECHA : 02/09/2022

Nº LAB	CLAVES	Cd ppm
507		0.83



Constantino Calderón Mendoza
Jefe de Laboratorio

Anexo 4

Resultados del análisis de cadmio en el vermicompost



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



**INFORME DE ANALISIS ESPECIAL DE
MATERIA ORGANICA**

SOLICITANTE : YASMIN CELY PUENTE MEDINA
PROCEDENCIA : JUNIN/ JAUJA/ HUANCANI
MUESTRA DE : VERMICOMPOST
REFERENCIA : H.R. 77576
BOLETA : 5326
FECHA : 02/09/2022

Nº LAB	CLAVES	Cd ppm
508		1.58



Constantino Calderón Mendoza
Jefe de Laboratorio

Anexo 5

Resultados del análisis de Cd en la parte aérea de nabo



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



INFORME DE ANALISIS ESPECIAL EN FOLIAR

SOLICITANTE : YASMIN CELY PUENTE MEDINA
PROCEDENCIA : JUNIN/ JAUJA/ HUANCANI/ LUGAR HUANCANI
MUESTRA : HOJAS
REFERENCIA : H.R. 78412
BOLETA : 5503
FECHA : 14/12/2022

N. Lab.	CLAVE DE CAMPO	Cd ppm
3947	T1R1-N-H	5.53
3948	T1R2-N-H	7.65
3949	T1R3-N-H	4.48
3950	T2R1-N-H	5.15
3951	T2R2-N-H	6.65
3952	T2R3-N-H	5.98
3953	T3R1-N-H	5.88
3954	T3R2-N-H	4.45
3955	T3R3-N-H	4.40
3956	T4R1-N-H	4.30
3957	T4R2-N-H	5.30
3958	T4R3-N-H	5.85
3959	T5R1-N-H	5.53
3960	T5R2-N-H	6.03
3961	T5R3-N-H	5.83
3962	T6R1-N-H	5.70
3963	T6R2-N-H	4.30
3964	T6R3-N-H	6.60
3965	T7R1-N-H	5.90
3966	T7R2-N-H	5.70
3967	T7R3-N-H	5.38



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 6

Resultados del análisis de Cd en la raíz de nabo



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



INFORME DE ANALISIS ESPECIAL EN FOLIAR

SOLICITANTE : YASMIN CELY PUENTE MEDINA
PROCEDENCIA : JUNIN/ JAUJA/ HUANCANI/ LUGAR HUANCANI
MUESTRA : RAIZ
REFERENCIA : H.R. 78411
BOLETA : 5503
FECHA : 14/12/2022

N. Lab.	CLAVE DE CAMPO	Cd ppm
3926	T1R1-N-R	3.65
3927	T1R2-N-R	4.82
3928	T1R3-N-R	3.67
3929	T2R1-N-R	3.12
3930	T2R2-N-R	3.48
3931	T2R3-N-R	3.53
3932	T3R1-N-R	3.50
3933	T3R2-N-R	3.15
3934	T3R3-N-R	3.04
3935	T4R1-N-R	5.77
3936	T4R2-N-R	5.16
3937	T4R3-N-R	4.64
3938	T5R1-N-R	8.30
3939	T5R2-N-R	4.58
3940	T5R3-N-R	5.76
3941	T6R1-N-R	6.65
3942	T6R2-N-R	4.63
3943	T6R3-N-R	5.48
3944	T7R1-N-R	6.03
3945	T7R2-N-R	5.59
3946	T7R3-N-R	5.94



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 7

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 : YASMIN CELY PUENTE MEDINA
PROCEDENCIA : JUNIN/ JAUJA/ HUANCANI/ LUGAR HUANCANI
REFERENCIA : H.R. 78413
BOLETA : 5503
FECHA : 16/12/2022

Lab	Número Muestra	Cd ppm
	Claves	
3267	T1R1-N-S	6.98
3268	T1R2-N-S	8.17
3269	T1R3-N-S	7.40
3270	T2R1-N-S	7.63
3271	T2R2-N-S	7.35
3272	T2R3-N-S	7.50
3273	T3R1-N-S	7.17
3274	T3R2-N-S	7.72
3275	T3R3-N-S	7.70
3276	T4R1-N-S	7.82
3277	T4R2-N-S	7.02
3278	T4R3-N-S	5.83
3279	T5R1-N-S	6.22
3280	T5R2-N-S	6.70
3281	T5R3-N-S	6.52
3282	T6R1-N-S	6.80
3283	T6R2-N-S	6.75
3284	T6R3-N-S	6.52
3285	T7R1-N-S	7.03
3286	T7R2-N-S	6.55
3287	T7R3-N-S	6.48



Constantino Calderón Mendoza
Jefe del Laboratorio

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

Anexo 8
Panel fotográfico



Figura 8. Parcela agrícola de Huancaní, muestreada para el presente experimento



Figura 9. Vermicompost utilizado en el presente experimento



Figura 10. Biochar utilizado en el presente experimento



FICHA TECNICA DEL BIOCHAR

Comprador: PUENTE MEDINA, YAZMIN CELY

DNI: 73123594

Cantidad: 10 kg

Fecha: 01-08-2022

Características:

Origen de biomasa: Vegetal: residuos de aserrios forestales.

Proceso de pirolisis: lenta (72 horas).

Proceso de enriado: Lenta (15 días).

Temperatura de pirolisis: 450 °C

Humedad: ≤ 8 %

Densidad del Biochar: Media (235 kg/m3)

Colecta: No aplica

Sistema de producción de biochar: Horno cerrado, ecológico de ladrillos tipo brasileño –

Peruano adecuado por la Empresa Bio Energy Ingenieros E.I.R.L.

Datos del proceso: El proceso de Carbonización fue de 72 horas en 4 etapas.

1. Secado de la materia prima, hasta 150 °C
2. Degradación de hemicelulosa, hasta 270 °C
3. Degradación de la celulosa hasta 350 °C
4. Fijación de carbono mayor y/o igual al 70% hasta 450 °C

Tamaño de malla - granulometría: muestra entera menor a 10mm.

Tipo de selección: zaranda



*Para fines de investigación se recomienda realizar un nuevo análisis, ya que los valores son referenciales a la producción general.

RUC: 20602070761
 Av. Del Pangosa 5/11, urb. Quinta Aurora- Mazamari – Setipo - Junín
 Teléfono: 959660307 – Email: bioenergyingenieros@gmail.com

Figura 11. Ficha técnica del biochar (hoja 1)



BIO ENERGIAS

PROPIEDADES: Mejora las propiedades físicas (estructura, infiltración, retención de agua y metales pesados, aireación, temperatura, porosidad), químicas (regula pH, CIC, retención y balance de nutrientes) y biológicas del suelo (fuente de carbono, control biológico, procesos de nitrificación, intercambio gaseoso), mejora la retención de agua, reduce la volatilización del amoníaco, favorece la presencia de microorganismos beneficiosos del suelo.

USOS:

- Agrícola, forestal, ambiental, mejorador de suelos, sustrato para germinadores, viveros, excelente enraizador, combinación con fertilizantes comerciales inorgánicos, Biorremediación de suelos, restauración de áreas degradadas y otros.

RUC: 20602070761
 Av. Del Pangao 5/II, urb. Quinta Aurora- Mazamari - Satipo - Junín
 Teléfono: 595660307 – Email: bioenergias@gmail.com

Figura 12. Ficha técnica del biochar (hoja 2)



Figura 13. Tamizado del suelo antes de instalar el experimento



Figura 14. Pesado del lombricompost antes de la instalación del experimento



Figura 15. Tamizado del biochar antes de la instalación del experimento



Figura 16. Preparación y mezcla de los tratamientos con lombricompost y biochar



Figura 17. Preparación y mezcla de los tratamientos con lombricompost y biochar



Figura 18. Pesado del suelo para cada tratamiento



Figura 19. Experimento instalado

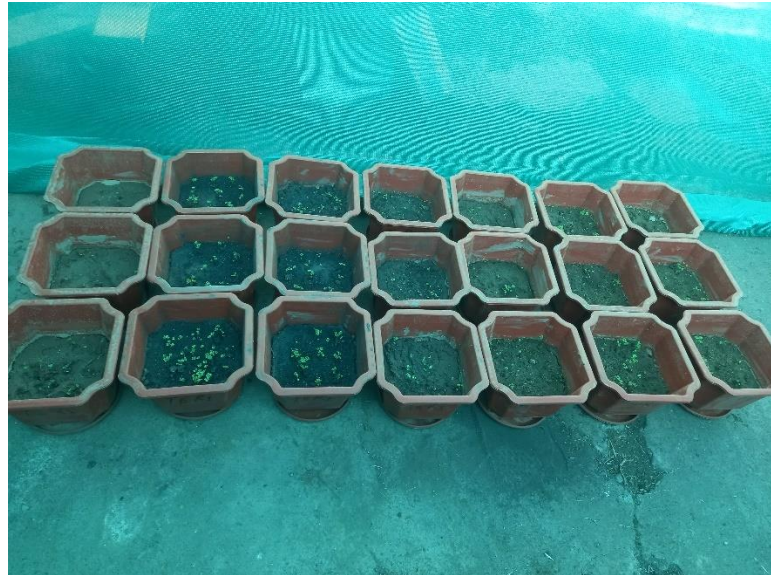


Figura 20. Emergencia de nabo, Brassica rapa L. var. rapa



Figura 21. Brassica rapa L. var. rapa en pleno crecimiento



Figura 22. Brassica rapa L. var. rapa a la finalización del experimento



Figura 23. Evaluación de tratamientos