



FACULTAD DE CIENCIAS AMBIENTALES

CARRERA PROFESIONAL DE INGENIERÍA
AGROFORESTAL

“EFECTO DEL ENCALADO Y ENMIENDAS ORGÁNICAS EN EL
NIVEL DE CADMIO EN PLANTAS DE CACAO DEL CLON CCN-51”

Tesis para optar el título profesional de:
INGENIERO AGROFORESTAL

Presentado por:

Josselyn Alexandra Revollar Mateo (0000-0002-1107-959X)

Asesor:

Mg Sc. Santiago Pastor Soplin (0000-0001-7109-417X)

Co-Asesor:

Mg Sc. César O. Arévalo Hernández (0000-0002-1390-3503)

Lima – Perú
2020

ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS

Lima, 3 de diciembre de 2020.

Los integrantes del Jurado de tesis:

Presidente: Dra. HÉCTOR ALONSO APONTE UBILLÚS
Miembro: Mg. LUIS PAUL QUIRÓS ROSSI
Miembro: Mg. DANIEL ENCARNACIÓN CHÁVEZ BOCANEGRA

Se reúnen para evaluar la tesis titulada:

“EFECTO DEL ENCALADO Y ENMIENDAS ORGÁNICAS EN EL NIVEL DE CADMIO EN PLANTAS DE CACAO DEL CLON CCN-51”

Presentada por la/el estudiante/bachiller:

- **JOSELYN ALEXANDRA REVOLLAR MATEO**

Para optar el Título Profesional de Ingeniero Agroforestal

Asesorada por: Santiago Hilarión Pastor Soplín

Luego de haber evaluado el informe final de tesis y evaluado el desempeño de el/la estudiante de la carrera de Ingeniería Agroforestal en la sustentación, concluyen de manera unánime (X) por mayoría simple () calificar a:

Tesista: JOSELYN ALEXANDRA REVOLLAR MATEO	Nota (en letras): 17 (diecisiete)		
Aprobado ()	Aprobado - Muy buena (x)	Aprobado - Sobresaliente ()	Desaprobado ()

Los miembros del jurado firman en señal de conformidad.



Dr. HÉCTOR ALONSO APONTE UBILLÚS
Presidente



MG. SANTIAGO HILARIÓN PASTOR SOPLÍN
Asesor



Mg. LUIS PAUL QUIRÓS ROSSI
Miembro 1



Mg. DANIEL ENCARNACIÓN CHÁVEZ BOCANEGRA
Miembro 2

Para mis padres, por su amor, trabajo y sacrificio durante todos estos años, son el mejor ejemplo de fortaleza, perseverancia y humildad para nuestra familia.

AGRADECIMIENTOS

Al Instituto de Cultivos Tropicales (I.C.T) por darme la oportunidad y brindarme las facilidades para desarrollar esta investigación.

A mi co-asesor Ing. Mg Sc. César Arévalo Hernández, por guiarme y asesorarme durante todo el proceso de investigación y por compartirme sus conocimientos.

A mi asesor Mg Sc. Santiago Pastor Soplin por dedicar su tiempo y conocimientos para esta investigación.

Al Ing. Mg Sc. Abel Farfán Pinedo, por su invaluable tiempo e incondicional apoyo durante el proceso de investigación y a mis compañeros del Instituto de Cultivos Tropicales, por su apoyo durante la realización de la investigación tanto en campo como en el procesamiento de muestras de laboratorio.

A mis incondicionales amigos por su apoyo durante todo el tiempo que estuve lejos de casa.

ÍNDICE GENERAL

	Pág.
RESUMEN.....	10
ABSTRACT.....	11
1. INTRODUCCIÓN.....	12
2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	13
3. MARCO TEÓRICO.....	15
3.1 Cacao (<i>Theobroma cacao</i> L.)	15
3.2 Enmiendas orgánicas	17
a. <i>Compost</i>	18
b. <i>Dolomita</i>	19
c. <i>Biochar</i>	19
d. <i>Zeolita</i>	20
3.3 Metales pesados en suelos agrícolas.....	21
3.4 Cadmio.....	21
a. <i>Cadmio en los suelos</i>	22
b. <i>Cadmio en plantas</i>	23
c. <i>Factores que afectan la biodisponibilidad de cadmio en el suelo a las plantas de cacao</i>	24
4. OBJETIVOS E HIPÓTESIS	25
4.1 Objetivos	25
4.2 Hipótesis.....	26
5. METODOLOGÍA	26
5.1 Materiales	26
a. <i>Material genético</i>	26
b. <i>Materiales de campo</i>	26
c. <i>Insumos</i>	27

d.	<i>Equipos</i>	27
5.2	Ubicación del ensayo	27
5.3	Diseño experimental	28
5.4	Tratamientos en la investigación	28
5.5	Distribución de los tratamientos	29
5.6	Manejo de la investigación	30
a.	<i>Preparación del sustrato</i>	30
b.	<i>Preparación de la solución contaminante</i>	31
c.	<i>Contaminación del sustrato</i>	31
d.	<i>Aplicación de los tratamientos</i>	31
e.	<i>Obtención de semillas</i>	33
f.	<i>Pre-germinado</i>	34
g.	<i>Siembra</i>	35
h.	<i>Mantenimiento</i>	36
i.	<i>Sacrificio</i>	36
5.7	Evaluación de los parámetros	36
a.	<i>Diámetro de tallo y altura de los plantones</i>	36
b.	<i>Biomasa seca aérea y biomasa seca raíz (BSA/BSR)</i>	38
c.	<i>Concentración de cadmio en tejidos vegetales</i>	39
d.	<i>pH en suelos</i>	40
e.	<i>Cadmio disponible en suelos</i>	40
f.	<i>Análisis estadístico</i>	41
6.	RESULTADOS	42
7.	DISCUSIÓN	55
8.	CONCLUSIONES	61
9.	RECOMENDACIONES	62
10.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	63
11.	ANEXOS	73

ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Zonas productoras de cacao en el Perú	17
Figura 2. Vivero de la estación experimental "Juan Bernito"	28
Figura 3. Distribución de los tratamientos en las camas en el vivero. Los códigos de los tratamientos se encuentran en el anexo 13.	30
Figura 4. Recolección, tamizado y distribución de sustrato	31
Figura 5. Pesado de enmiendas orgánicas.....	32
Figura 6. Mazorcas recolectadas	33
Figura 7. Selección de semillas en el tercio de la mazorca	34
Figura 8. Pregerminado.....	35
Figura 9. Siembra de granos de cacao	35
Figura 10. Sacrificio de los plantones	36
Figura 11. Vernier Stanley 6 PGDS	37
Figura 12. Toma de datos de la altura de los plantones	37
Figura 13. Etiquetado y empaquetado de partes aéreas.....	38
Figura 14. Limpieza de las muestras vegetales.....	39
Figura 15. Lectura de las muestras en el espectrofotómetro de absorción atómica	40
Figura 16. Medias del parámetro altura	43
Figura 17. Medias del parámetro biomasa aérea	45
Figura 18. Medias del parámetro biomasa radicular	46
Figura 19. Medias de biomasa total	48
Figura 20. Resultados de la prueba de Duncan (cadmio foliar).....	49
Figura 21. Prueba de Duncan (parámetro radicular)	51
Figura 22. Prueba de Duncan (parámetro pH de suelos)	52
Figura 23. Prueba de Duncan (cadmio disponible).....	54

ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. <i>Tratamientos en la investigación</i>	28
Tabla 2. Análisis fisicoquímico del sustrato	30
Tabla 3. Análisis químico de las enmiendas orgánicas	33
Tabla 4. Prueba de Dunnett aplicada al parámetro altura	42
Tabla 5. Prueba de Dunnett aplicada al parámetro diámetro	43
Tabla 6. Prueba de Dunnett aplicada al parámetro biomasa aérea	44
Tabla 7. Prueba de Dunnett aplicada al parámetro biomasa radicular	46
Tabla 8. Prueba de Dunnett aplicada al parámetro biomasa total	47
Tabla 9. Prueba de Dunnett aplicada al parámetro cadmio foliar	48
Tabla 10. Prueba de Dunnett aplicada al parámetro cadmio radicular	50
Tabla 11. Prueba de Dunnett aplicada al parámetro pH	52
Tabla 12. Prueba de Dunnett aplicada al parámetro cadmio disponible	53

ANEXOS

	Pág.
Anexo 1. Tamizado de sustrato, relleno y pesado de macetas.	73
Anexo 2. Pesado de cloruro de cadmio para la contaminación del sustrato	73
Anexo 3. Obtención de mazorcas de la estación experimental “El Choclino”	73
Anexo 4. Extracción del mucilago de las semillas de cacao y pregerminado	74
Anexo 5. Recolección de compost de la estación experimental Juan Bernito	74
Anexo 6. Procesamiento de las enmiendas orgánicas para su análisis en laboratorio	74
Anexo 7. Incorporación de enmiendas al sustrato y etiquetado de macetas	75
Anexo 8. Crecimiento de plántones	75
Anexo 9. Riego de plántones	75
Anexo 10. Lavado de raíces y etiquetado de muestras	76
Anexo 11. Pesado de biomasa seca aérea y radicular	76
Anexo 12. Procesamiento de muestras	77
Anexo 13. Código de tratamientos	77
Anexo 14. Prueba de normalidad, de homocedasticidad y análisis de varianza (ANOVA) para todos los parámetros evaluados	80

RESUMEN

Las exportaciones de cacao pueden verse afectadas por el reglamento de la Unión Europea, la cual regula los niveles de cadmio en distintos derivados de cacao generando un posible problema de tipo socioeconómico en las familias de pequeños productores que se dedican a este cultivo. Actualmente se buscan soluciones mediante la aplicación de productos que puedan inmovilizar el cadmio en los suelos. El objetivo de esta investigación fue determinar el efecto de la aplicación del encalado (dolomita) y las enmiendas orgánicas (biochar, compost, gallinaza y zeolita) en el nivel de cadmio en plantas de cacao del clon CCN-51. Esta investigación se realizó en el Instituto de cultivos tropicales (ICT), ubicado en la ciudad de Tarapoto. Se utilizó el diseño completamente al azar (DCA), se incorporó a cada tratamiento 15 g de dolomita y 5 dosis (0 g, 1.29 g, 2.62 g, 5.23 g y 10.47 g) de cada enmienda. Se tuvo un tratamiento testigo el cual fue contaminado al igual que todos los tratamientos con cloruro de cadmio (CdCl_2) a 15 ppm. Todos los tratamientos tuvieron 5 repeticiones. Se evaluaron los parámetros de: altura, diámetro, biomasa (aérea, radicular y total), pH, contenido de cadmio disponible en suelos, contenido de cadmio parte aérea y radicular. El tratamiento dolomita y gallinaza (10.47 g) presentó mejores resultados, obtuvo el valor de pH más alto, menor contenido de cadmio disponible y cadmio foliar.

Palabras claves: gallinaza, dolomita, metales pesados.

ABSTRACT

Cocoa exports may be affected by the European Union regulation, which regulates cadmium levels in different cocoa derivatives, generating a possible socio-economic problem in the families of small producers who are dedicated to this crop. Solutions are currently being sought through the application of products that can immobilize cadmium in soils. This research was carried out at the Tropical Crops Institute, located in the city of Tarapoto. The objective was to determine the effect of the application of liming (dolomite) and organic amendments (biochar, compost, chicken manure and zeolite) on the level of cadmium in cacao plants from clone CCN-51. The completely randomized design (CRD) was used, 15 g of dolomite and 5 doses (0 g, 1.29 g, 2.62 g, 5.23 g and 10.47 g) of each amendment were incorporated into each treatment. There was a control treatment which was contaminated like all the treatments with cadmium chloride (CdCl_2) at 15 ppm. All treatments had 5 repetitions. Parameters of height, diameter, biomass (aerial, root and total), pH, cadmium content available in soils, cadmium content aerial and root part were evaluated. The dolomite and chicken manure treatment (10.47 g) obtained the best results, which presented the highest pH value, the lowest content of cadmium available and cadmium in the leaf part.

Keywords: chicken manure, dolomite, heavy metals

1. Introducción

El cacao (*Theobroma cacao L.*) es uno de los principales productos de importancia económica en nuestro país, brindando trabajo a agricultores debido al interés de compradores nacionales y extranjeros para la fabricación de chocolates y sus derivados (Barrientos, 2015). El Perú cuenta con el 60% de material genético existente en el cacao y se encuentra en el segundo lugar a nivel mundial como productor de cacao orgánico (MINAGRI, 2018).

Actualmente la existencia de metales pesados en los suelos donde el cacao se cultiva es un grave problema para los agricultores, ya que este cultivo absorbe los metales pesados y los concentra en sus granos (Huamaní, Huauya, Mansilla, Florida y Neyra, 2012). La contaminación por metales pesados, especialmente por cadmio, podría generar problemas irreversibles en los seres vivos y para los seres humanos por la ingesta de frutos contaminados o plantas (Rodríguez, Martínez, Romero, Del Río y Sandalio, 2008).

Desde el 1 de enero del 2019, según lo establecido en el Reglamento U.E. N°488/2014 el contenido máximo de cadmio en los siguientes productos derivados del cacao son: chocolate con leche con un contenido de materia seca total de cacao < 30% es de 0.10 mg kg⁻¹, chocolate con un contenido de materia seca total de cacao < 50% es de 0.30 mg kg⁻¹, chocolate con leche con un contenido de materia seca total de cacao ≥ 30% es de 0.30 mg kg⁻¹, chocolate

con un contenido de materia seca total de cacao $\geq 50\%$ es de 0.80 mg kg^{-1} , cacao en polvo vendido al consumidor final o como ingrediente en cacao en polvo edulcorado vendido al consumidor final (chocolate para beber) es de 0.60 mg kg^{-1} (Reglamento U.E, 2014), cualquier valor que sobrepase el dictaminado impedirá la venta de estos productos en el mercado europeo (Charrupi y Martínez, 2017).

El cacao en grano y sus derivados deben cumplir con la legislación europea y otras normas internacionales de seguridad alimentaria para evitar problemas por rechazo de lotes en el exterior; todos los que participan en la cadena productiva deben de asegurarse que tanto la materia prima como los productos finales sean sanos y cumplan con todos los requisitos en el mercado. Los procesos de control deben comenzar desde el campo, haciendo investigaciones para poder resolver el problema del cadmio (End y Dand, 2015). De esta forma, el uso de enmiendas orgánicas podría ser importante en la reducción de la absorción de cadmio en el cultivo de cacao ya que tienen la capacidad de aumentar la inmovilización de metales pesados (Obaji, Combatt, Díaz, Burgos, Urango y Marrugo, 2017), además podrían mejorar la fertilidad de suelos en el cultivo de cacao.

2. Planteamiento del problema

La contaminación del suelo por metales pesados es un problema que crece a través de los años, esto se debe a diferentes actividades antropogénicas y al mismo tiempo por un nivel acelerado de crecimiento demográfico (Obaji et al., 2017). Estos elementos se acumulan fácilmente en los organismos vivos y su concentración no disminuye con el tiempo (Abanto, 2016).

El cadmio es un metal pesado que se encuentra de manera natural (proveniente de la corteza terrestre, del océano, erupciones volcánicas y meteorización de la roca madre), por medio de actividades antropogénicas, principalmente minería o productos como desechos industriales, fabricación de plásticos, pigmentos para pinturas, pilas y fertilizantes (Rodríguez, 2017).

Su presencia en los suelos y alimentos ha generado una preocupación a nivel mundial. En 2018, se realizó un reporte por la United Nations Environment Programme (UNEP), donde se menciona que el consumo de alimentos derivados de plantas es la principal actividad en la que el humano acumula cadmio en el organismo. En Japón, el consumo de arroz contaminado con cadmio generó un evento de intoxicación masiva aguda al que se denominó síndrome de Itai-Itai. La intoxicación es producida por la retención de este metal en el hígado y riñón, acumulándose en las células tubulares, provocando disfunción renal y posteriormente desmineralización ósea. Es importante mencionar que la Agencia Internacional para la investigación del Cáncer (IARC), considera a este metal pesado como un cancerígeno humano (Jiménez, 2015). En los últimos años la Comunidad Europea, aprobó regulaciones rigurosas donde decretan límites máximos al contenido permisible de plomo y cadmio en distintos productos alimenticios, entre ellos el chocolate y otros derivados del cacao vendidos en Europa (Castebianco, 2018).

El cadmio es un gran problema a nivel mundial para los agricultores (Huamaní et al., 2012), ya que se encontraron niveles elevados de este metal pesado en algunos suelos y granos en áreas de cultivo de cacao (Arévalo, Obando, Zuñiga, Arévalo, Baligar y He (2016).

Las regulaciones internacionales, como es el caso del reglamento EU N° 488/2014, podrían comprometer las exportaciones del cacao y sus derivados (Castebianco, 2018). Sin embargo, es necesario realizar investigaciones en las que se busquen posibles soluciones ante este problema que puede afectar tanto a los pequeños agricultores como a los grandes productores de derivados de cacao.

3. Marco teórico

3.1 Cacao (*Theobroma cacao L.*)

El nombre de este cultivo significa “alimento de los dioses” (Cárdenas, 2011). Es una especie que crece de forma silvestre, originaria de la cuenca del río Amazonas (Morales, Borda, Argandoña, Farach, García y Lazo, 2015). El árbol de cacao, puede medir más de 20 metros, es un cultivo tolerante a la sombra (Ruiz, 2011) y se puede cultivar desde los 0 a 1200 msnm (Castebianco, 2018). Las condiciones adecuadas respecto al pH ideal en suelos debe ser de 5 a 7 en Perú y de preferencia en suelos francos (Arvelo, M., Gonzalez, D., Maroto, S., Delgado, T., & Montoya, P. (2017). El fruto, más conocido como mazorca, es una

baya de forma ovalada de color verde o roja, dependiendo de la variedad, con más de 25 cm de largo. Dentro de esta se encuentran los granos de cacao (Morales et al, 2015), donde se pueden obtener de 30 a 40 semillas o granos (Ruiz, 2011).

En nuestro país el 25% del cacao que se produce es corriente, en especial el clon híbrido CCN-51 (ICCO, 2015). Sin embargo, la alta demanda de cacao de buena calidad hace que la mayoría de agricultores consideren la posibilidad de sembrar cacao fino de aroma (Morales et al., 2015).

Según MINAGRI (2018) las principales zonas de cultivo de cacao (Figura 2) son: Cajamarca, Amazonas, Ayacucho, Huánuco, Cusco, Junin, Apurímac y San Martín.

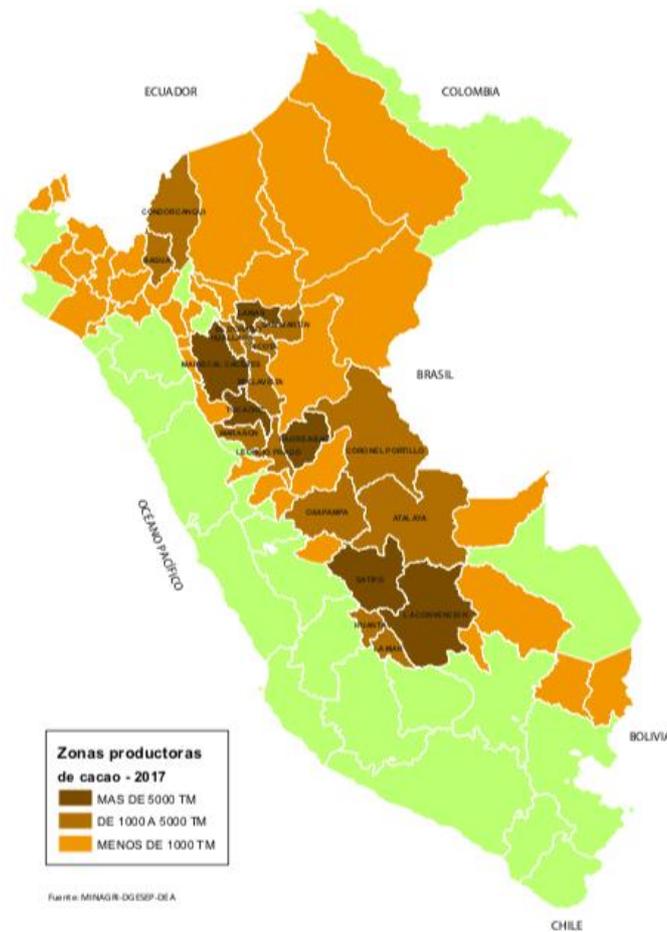


Figura 1. Zonas productoras de cacao en el Perú

Fuente: MINAGRI (2018)

3.2 Enmiendas orgánicas

Las enmiendas orgánicas son todos aquellos materiales orgánicos que se aplican al suelo. Estos pueden tener distintos fines como potenciar las condiciones físicas del suelo o reponer nutrientes disponibles para la planta (Jaramillo, 2002). Es importante tomar en cuenta que “las enmiendas en el suelo deben ser seguras para el medio ambiente y no tener efectos adversos sobre la estructura del suelo, la fertilidad del suelo o el ecosistema” (Al-Wabel et al., 2015).

“Los materiales usados como enmiendas tienen diferentes capacidades de inmovilización de metales pesados en el suelo, una enmienda podrá ser eficaz en la inmovilización de un metal, pero puede ser ineficaz para otro, o incluso puede aumentar su movilidad” (Obaji et al., 2017).

a. Compost

El compost es el resultado de la descomposición de los residuos orgánicos mediante la técnica del compostaje, la cual consiste en apilar los residuos orgánicos y favorecer la descomposición por medio de procesos biológicos transformándolos en un producto manejable y aprovechable para los suelos (Villegas, 2011).

El grado de descomposición de la materia orgánica depende de diversos factores como la temperatura, acidez, nutrientes en el suelo, y evidentemente, la descomposición de los residuos y del manejo que se dé al suelo (Bernal, 2010).

El compost tiene un valor importante agronómico por el contenido y la materia orgánica que tiene. Este se puede utilizar como acondicionador de suelo para controlar la erosión, recubrir o recuperar suelos (Venegas, 2015) y se puede considerar una solución ambiental a la problemática de los residuos sólidos orgánicos (Bernal, 2010).

b. Dolomita

La dolomita está compuesta por carbonato de calcio y magnesio, su fórmula química es $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$, fue descubierta por el geólogo francés Déodat de Dolomieu (Llactas, 2016).

“La dolomita es un material encalante que neutraliza la acidez del suelo (por cada mol de dolomita se neutralizan 4 moles de H^+) por medio del anión carbonato (CO_3^{2-}); y a su vez aporta Mg^{+2} y Ca^{+2} ” (Nazar, 2011, p.11).

Físicamente, es semidura, no presenta mucho peso, se puede encontrar de color blanco o gris de distinta intensidad hasta negro según las impurezas que presentan (Cisneros, 2013).

Las aplicaciones de dolomita, incrementan el rendimiento de los cultivos, mejorando la estabilidad de los agregados y ayudando a incrementar la capacidad del suelo de transmitir aire y agua, teniendo como resultado un buen crecimiento y desarrollo de las raíces (Ruiz, 2012).

c. Biochar

El biochar o biocarbón es el resultado de una técnica en la que se combustionan fuentes ricas en carbonos, lo que permite obtener un producto que ayuda a

mejorar las propiedades químicas, físicas y biológicas del suelo. Esta técnica era aplicada antiguamente en los pueblos indígenas de la amazonia central, haciéndose conocida con el nombre “tierra negra de indio” (Oliveira, 2016). Los efectos de esta enmienda dependen de: “el tipo de suelo, materia prima utilizada para carbonizar, condiciones de la pirolisis y la cantidad de biochar aplicado al suelo” (Al-wabel et al., 2015).

El biochar produce cambios mejorando la calidad de suelo, en el crecimiento de los cultivos y mayor producción de estos. Los materiales que usualmente se usan para producir biocarbón son: residuos vegetales (residuos de cosecha, plantas secas, biomasa de árboles, de arroz, etc.) y otros residuos como, por ejemplo: cáscaras de naranjas, lodos residuales, camas de aves, etc. Se debe tener en consideración que no todos los residuos o subproductos son materias primas adecuadas para producir biochar (Escalante, et al., 2016).

d. Zeolita

Es un mineral perteneciente a la familia de aluminosilicatos compuestas por aluminio, silicio, sodio, hidrógeno y oxígeno. Se pueden encontrar 800 tipos diferentes de zeolitas (Espinoza y Symonds, 2009).

Presenta alta capacidad de intercambio catiónico y canales internos en su estructura que permite que retenga agua, asegurando una mejor condición de humedad en el suelo. Es usado usualmente como acondicionador de suelos o potenciador de fertilizantes, que hace que estos no se pierdan por volatilización

y lixiviación. No es tóxico, por eso se usa en grandes cantidades en prácticas agrícolas (Paredes, María, Osuna, Alamilla y Mandujano, 2013).

3.3 Metales pesados en suelos agrícolas

Los metales pesados son elementos químicos altamente tóxicos y se acumulan fácilmente en los organismos vivos. Entre los más abundantes encontrados en suelos son: Mn, Cr, Zn, Ni y Pb, en menores concentraciones encontramos: Co, Cu y As y con mínimos porcentajes considerados los iones metales más tóxicos el Cd y Hg.

Estos metales pesados pueden quedar retenidos en el suelo, de dos maneras: i) disueltos en la solución del suelo o ii) fijados por procesos de adsorción, quelatación y precipitación absorbidos por las plantas, volatizarse o moverse a aguas superficiales o subterráneas (Abanto, 2016). Pero también pueden ser incorporados en el suelo por medio de prácticas agronómicas, actividades industriales, mineras y accidentes ambientales (Venegas, 2015).

3.4 Cadmio

El cadmio no es un elemento esencial, es de color blanco-plateado, es maleable y dúctil, presentando una estructura cristalina hexagonal. Presenta una gran resistencia a la corrosión, un bajo punto de ebullición y una buena conductividad eléctrica (Abanto, 2016).

Este elemento no puede descomponerse física, química y biológicamente, por esa razón, la remediación de los sitios contaminados con este metal se basa en la alteración de la solubilidad, movilidad o toxicidad de esta (Mite, 2012).

Las plantas que se encuentran a niveles elevados de este elemento causan la reducción de fotosíntesis, absorción de agua y nutrientes (Jiménez, 2015). Estas fuentes de contaminación pueden darse por actividades realizadas por los humanos o actividades naturales tales como erupciones volcánicas (Mite, Carrillo y Durango, 2010).

a. Cadmio en los suelos

El cadmio es uno de los metales pesados que se mueve con mas facilidad en los suelos y por lo tanto presenta mas riesgo de que las plantas lo absorban (Charrupi y Martínez, 2017). Este metal se mantiene en los suelos a través del tiempo conservando su efecto tóxico, su nivel natural en este medio es generalmente <1 ppm (Huaynates, 2013).

A medida que el pH sea mayor en el suelo, este tendrá mayor adsorción del cadmio, el mismo proceso ocurre con altos niveles de intercambio catiónico en suelos, se podrá retener el cadmio teniendo en cuenta el proceso edafogénico o el material parental (Charrupi y Martínez, 2017). Este metal parece intransitable a consecuencia de la lixiviación, extracción de cultivo, reacciona con los minerales o elementos del suelo específicamente bajo condiciones de suelos

calcáreos

(Cárdenas,

2011).

b. Cadmio en plantas

El cadmio es uno de los metales más solubles, y dañinos para las plantas, debido a su alta tasa de movilidad en pequeñas concentraciones y puede ser absorbido por las plantas como Cd^{2+} . Este metal interfiere en la absorción y transporte de varios elementos (Ca, Mg, P, K) y del agua (Huaynates, 2013) originando desequilibrios nutricionales e hídricos en la planta, altera también los procesos metabólicos normales, reduce la tasa de fotosíntesis y transpiración, e incrementa la frecuencia respiratoria (Abanto, 2016).

La absorción de los metales pesados se produce a través de las raíces, siendo esta, la ruta más importante para el ingreso a las plantas. Existen tres maneras en las cuales se puede dar el movimiento de estos metales: i) Intercepción radicular, ii) flujo de masas y iii) difusión. Sin embargo, según Rodríguez et al. (2008), el cadmio por ser un metal no esencial para el metabolismo de la planta se considera razonable que no exista un mecanismo específico de entrada para el cadmio.

Las plantas absorben el cadmio y lo mantienen en sus tejidos (Abanto, 2016). Los niveles altos de cadmio generan que se altere la tasa fotosintética cambiando los números de granos en las mazorcas y afectando las células que se encuentran en la raíz de la planta (Charrupi y Martínez, 2017). No obstante,

es fundamental recalcar que no todas las plantas acumulan cadmio de igual manera (Rodríguez et al., 2008), ya que depende de la especie vegetal, capacidad de retención, interacción planta-raíz y la naturaleza de los contaminantes (Correa, 2018).

c. Factores que afectan la biodisponibilidad de cadmio en el suelo a las plantas de cacao

- Capacidad de intercambio catiónico: Cuando esta capacidad disminuye, existe una menor adsorción y movilización de los metales, ya que existe una mayor competencia entre los cationes y Cd^{2+} (Abanto, 2016).
- pH: Este factor es uno de los mas importantes, ya que interviene en la movilidad, solubilidad y disponibilidad del cadmio. En suelos con pH alcalinos, el cadmio no es disponible ya que se adhiere fuertemente a las partículas del suelo; en contraste, en suelos con pH ácidos los metales se encuentran mas solubles, es decir, presentan mayor disponibilidad para las plantas. El aumento de pH en suelos ácidos tiene como resultado una cantidad menor absorción de cadmio en los cultivos (Meter, Atkinson y Laliberte, 2019).
- Contenido de materia orgánica: es importante tener en consideración este factor ya que la materia orgánica tiene la capacidad de unirse y adsorber el cadmio debido a su alta CIC (dependiendo del tipo de materia orgánica aplicada) (Meter et al., 2019).

- Textura del suelo: existen distintos tipos de textura, estos influyen en el contenido y biodisponibilidad de cadmio, estos parecen incrementar en los suelos francos. Los suelos de textura fina (arcillas) presentan regularmente un incremento en su capacidad de adsorción que los suelos de textura más gruesa (arenas). Cabe mencionar que la capacidad de adsorción de la arcilla depende de la estructura mineral de esta (Meter et al., 2019).

4. Objetivos e hipótesis

4.1 Objetivos

Objetivo general:

Evaluar el efecto del encalado y enmiendas orgánicas en el nivel de cadmio en plantas de cacao del clon CCN-51.

Objetivos específicos:

- Evaluar el efecto del encalado en el nivel de cadmio en plantas de cacao del clon CCN-51.
- Evaluar el efecto del encalado y compost en el nivel de cadmio en plantas de cacao del clon CCN-51.
- Evaluar el efecto del encalado y gallinaza en el nivel de cadmio en plantas de cacao del clon CCN-51.
- Evaluar el efecto del encalado y biochar en el nivel de cadmio en plantas de cacao del clon CCN-51.

- Evaluar el efecto del encalado y zeolita en el nivel de cadmio en plantas de cacao del clon CCN-51.

4.2 Hipótesis

Ha: El nivel de cadmio disminuirá por la aplicación del encalado y de las enmiendas orgánicas en las plantas de cacao del clon CCN-51

Ho: El nivel de cadmio no disminuirá por la aplicación del encalado y de las enmiendas orgánicas en las plantas de cacao del clon CCN-51

5. Metodología

5.1 Materiales

Los materiales necesarios para esta investigación fueron:

a. Material genético

- Semillas del clon CCN-51

b. Materiales de campo

- Regadera
- Bolsas Ziplog
- Lápiz
- Cuaderno
- Pala
- Macetas de 4 litros
- Balanza

- Tablero de apuntes
- Guantes
- Vernier
- Mascarillas
- Wincha de 3 m
- Tamiz de 4mm
- Carretilla

c. Insumos

- Cloruro de cadmio (CdCl_2)
- Dolomita
- Compost
- Zeolita
- Gallinaza
- Biochar

d. Equipos

- Cámara fotográfica
- Laptop
- Potenciómetro
- Espectrofotómetro de Absorción Atómica
- Balanza
- Estufa

5.2 Ubicación del ensayo

La presente investigación se realizó en el vivero de la estación experimental “Juan Bernito” del Instituto de Cultivos Tropicales (ICT) (Figura 2), ubicado en el

distrito de la Banda de Shilcayo, provincia de San Martín en el norte del Perú
(Latitud Sur: 06° 30' 28"; Longitud Oeste: 76° 30' 18"; Altitud: 333 m.s.n.m).



Figura 2. Vivero de la estación experimental "Juan Bernito"

5.3 Diseño experimental

El diseño utilizado en la investigación fue completamente al azar (DCA), se comparó el efecto de cuatro tratamientos con cinco dosis contaminados con cloruro de cadmio (CdCl_2) a 15 ppm. También se tuvo un tratamiento testigo contaminado solo con cadmio (sin enmiendas) considerado como tratamiento testigo absoluto. Los tratamientos tuvieron 5 repeticiones (Tabla 1).

5.4 Tratamientos en la investigación

Tabla 1. *Tratamientos en la investigación*

N°	Código	Descripción
1	Tcd	Testigo con cadmio
2	T1	Dolomita
3	T2	Dolomita + Biochar (1.29 g)
4	T3	Dolomita + Biochar (2.62 g)

5	T4	Dolomita + Biochar (5.23 g)
6	T5	Dolomita + Biochar (10.47 g)
7	T6	Dolomita + Compost (1.29 g)
8	T7	Dolomita + Compost (2.62 g)
9	T8	Dolomita + Compost (5.23 g)
10	T9	Dolomita + Compost (10.47 g)
11	T10	Dolomita + Gallinaza (1.29 g)
12	T11	Dolomita + Gallinaza (2.62 g)
13	T12	Dolomita + Gallinaza (5.23 g)
14	T13	Dolomita + Gallinaza (10.47 g)
15	T14	Dolomita + Zeolita (1.29 g)
16	T15	Dolomita + Zeolita (2.62 g)
17	T16	Dolomita + Zeolita (5.23 g)
18	T17	Dolomita + Zeolita (10.47 g)

5.5 Distribución de los tratamientos

El sorteo de la ubicación de los tratamientos se realizó en Microsoft Excel. Se le designó un número a cada tratamiento con la respectiva dosis y repetición. Los tratamientos fueron designados en el orden respectivo de acuerdo con el sorteo realizado (Ver anexo 13), estos fueron ubicados en dos camas en el vivero y cada una contuvo 45 macetas respectivamente (Figura 3). Las camas almacigueras tienen 5 metros de alto y 1 metro de ancho.

45	32	20
31	61	55
79	70	22
52	80	6
7	50	78
37	67	23
40	26	19
89	47	48
62	86	10
75	74	84
73	29	65

72	88	4
16	43	81
33	64	5
34	24	3
71	53	35
13	63	39
56	27	28
18	12	30
58	69	14
76	87	8
66	68	11

60	42	59	36	44	2
46	82	25	15	21	1
83	9	77	54	41	90
57	51	49	17	38	85

Figura 3. Distribución de los tratamientos en las camas en el vivero. Los códigos de los tratamientos se encuentran en el anexo 13.

5.6 Manejo de la investigación

a. Preparación del sustrato

Se realizó un muestreo de suelos en un sistema agroforestal en el Instituto de Cultivos Tropicales, obteniendo un pH de 4.56, necesario para la investigación (tabla 2). Teniendo este resultado, se procedió a recolectar el sustrato para posteriormente ser tamizado y ser distribuido en cada maceta con un peso total de 5 kg (Figura 4).

Análisis del sustrato

Tabla 2. Análisis fisicoquímico del sustrato

Atributos	Valor
pH	4.56
M.O (%)	1.63
N (%)	0.07
P (ppm)	3.09
K (ppm)	35
Clase Textural	Fra-Arc-Are
Ca+ (cmol/kg)	1.16
Mg2+ (cmol/kg)	0.38
K+ (cmol/kg)	0.09
Na+ (cmol/kg)	0
Al3++H+ (cmol/kg)	2.24

Cd+2 (cmol/kg)	0
% Sat. de Al+3	57.8



Figura 4. Recolección, tamizado y distribución de sustrato

b. Preparación de la solución contaminante

La solución se preparó con cloruro de cadmio (CdCl_2), a una concentración objetivo de 5000 ppm. Primero, se pesó 5 g de cloruro de cadmio, luego se procedió a diluir con agua destilada en una fiola de un litro. Finalmente, se llenó la fiola con agua destilada y se agitó para poder homogenizar la mezcla.

c. Contaminación del sustrato

Para contaminar el sustrato, se procedió a diluir 10 ml de la solución contaminante con agua destilada en una fiola con capacidad de 100 ml. Luego, se mezcló la solución con el sustrato en una bandeja y se homogenizó la mezcla.

d. Aplicación de los tratamientos

Aplicación de dolomita (encalado)

Primero, se procedió a calcular la dosis de dolomita, por medio del análisis de suelos y se calculó mediante el método de saturación de bases de Van Raij. Luego, se pesó la cantidad necesaria de dolomita para cada maceta (Figura 5). Cada sustrato de cada maceta fue puesto en una bandeja, en la cual se aplicó 15 g de dolomita y se removi6 para poder homogenizar la mezcla, este 6ltimo procedimiento se realiz6 tres veces en un lapso de dos semanas. Durante este periodo el sustrato se mantuvo al 60% de capacidad de campo (-33 Kpa), regando inter diario las macetas con 100 ml de agua destilada.



Figura 5. Pesado de enmiendas orgánicas

Aplicación de las enmiendas orgánicas

Luego de realizar el encalado, se aplicaron las enmiendas orgánicas en las siguientes dosis: 0 g, 1.29 g, 2.63 g, 5.23 g y 10.47 g, correspondientes a dosis referenciales de 0, 500, 1000, 2000 y 4000 kg/ha, respectivamente; según la distribución que se tuvo de las macetas. Luego de la aplicación de las dosis se procedió a remover cada maceta para poder homogenizar el sustrato con las enmiendas, este procedimiento se realiz6 tres veces durante dos semanas. Se

regó dejando un día, para poder mantener las macetas a capacidad de campo, durante dos semanas.

Análisis de las enmiendas orgánicas y dolomita

Tabla 3. Análisis químico de las enmiendas orgánicas

ENMIENDAS ORGANICAS	pH	C.E.	N	P	K	Ca	Cd
		dS/m	%	%	%	%	ppm
Biochar	8.89	8.41	0.85	1.42	0.93	3.23	0.85
Zeolita	5.587	318	0.45	0.49	0.12	0.97	0
Dolomita	8.043	874	0.21	0.61	0	10.84	3.69
Gallinaza	9.848	16.55	2.09	4.54	2.72	14.53	2.25
Compost	7.355	722	2.04	0.88	1.13	1.02	0.5

Fuente: Laboratorio químico ICT, 2019.

e. Obtención de semillas

Para el estudio se obtuvieron semillas del clon CCN-51 del banco de germoplasma de la estación experimental de “El Choclino” – Anexo del Instituto de Cultivos tropicales (Figura 6). En total se obtuvieron 12 mazorcas.



Figura 6. Mazorcas recolectadas

Estas fueron llevadas a la estación “Juan Bernito”, y seleccionadas para posteriormente abrirlas con un machete. Se eligieron las semillas que se

encontraron en el tercio medio de la mazorca (Figura 7), y se procedió a retirar el mucilago con aserrín. Al finalizar este proceso se aplicó un fungicida agrícola para evitar posible crecimiento de hongos.

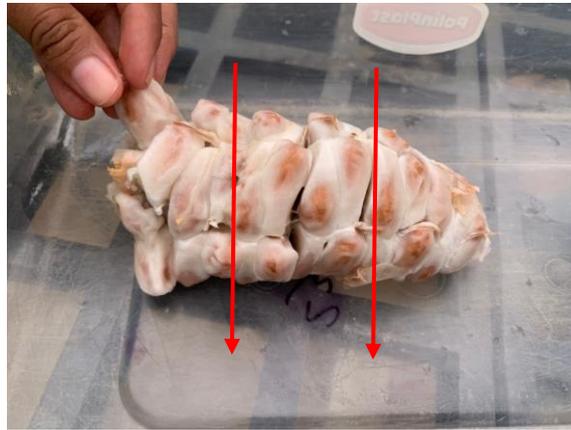


Figura 7. Selección de semillas en el tercio de la mazorca

f. Pre-germinado

En esta etapa se estableció una cama germinadora dentro del vivero del ICT a base de aserrín para posteriormente, acomodar las semillas y luego ser tapadas con otra capa de aserrín. Finalmente, se regó con agua y se tapó con un plástico negro para poder retener humedad. Este último procedimiento se realizó dos veces. Las semillas germinaron a los 5 días (Figura 8).



Figura 8. Pregerminado

g. Siembra

Las semillas se colocaron en pequeños orificios en el centro de cada maceta (Figura 9), de forma horizontal (teniendo en cuenta que el lado pre germinado debe de ir para abajo), para facilitar su crecimiento en cada maceta.



Figura 9. Siembra de granos de cacao

h. Mantenimiento

Durante los tres siguientes meses, se mantuvo las macetas a 60% de capacidad de campo, regando de forma inter diaria con agua destilada. Se realizó un control de malezas, al igual que de insectos.

i. Sacrificio

Pasado los tres meses se procedió a sacrificar los plantones. Primero se separó la parte aérea (Figura 10), luego, se procedió a llevar la maceta a un balde con agua para poder separar las raíces del sustrato.



Figura 10. Sacrificio de los plantones

5.7 Evaluación de los parámetros

a. Diámetro de tallo y altura de los plantones

El diámetro del tallo se midió antes de que los plantones fueran sacrificados, a dos centímetros por encima del cuello. El instrumento usado para la medición fue un vernier digital Stanley (Figura 11).



Figura 11. Vernier Stanley 6 PGDS

La altura de los plantones se midió con una cintra métrica Stanley de tres metros, los datos se tomaron desde la base del tallo hasta la última yema terminal (Figura 12).



Figura 12. Toma de datos de la altura de los plantones

b. Biomasa seca aérea y biomasa seca raíz (BSA/BSR)

Luego del sacrificio de las plantas, se procedió a separar la parte aérea de la raíz, para posteriormente ser guardadas en sobres y etiquetadas según los tratamientos. Todos los sobres fueron llevados al laboratorio para poder ser procesados (Figura 13).

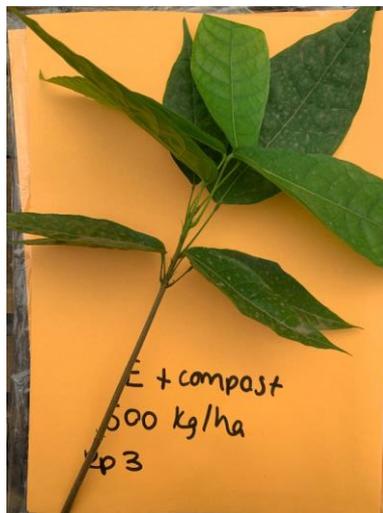


Figura 13. Etiquetado y empaquetado de partes aéreas

El primer procedimiento consistió en la limpieza de las muestras, por medio de tres pasos: el primero fue lavar las muestras solo con agua, el segundo con ácido clorhídrico (HCl) al 1% y por último con agua destilada (Figura 14). Luego, se colocó cada muestra en sobres con sus respectivas etiquetas, para llevar a estufa a 60° grados por 72 horas. Finalmente, se procedió a tomar el peso seco de cada muestra.



Figura 14. Limpieza de las muestras vegetales

c. Concentración de cadmio en tejidos vegetales

Luego del proceso de limpieza y secado de las muestras, se procedió moler la parte aérea y radicular en un molino con un tamiz de 20 mesh (2 mm de diámetro) para ser inmediatamente empaquetadas y etiquetadas con el respectivo tratamiento y la dosis. Después, se pesó aproximadamente 0.50 g de cada muestra en un tubo de ensayo, se agregó 8 ml de ácido nítrico y se procedió a hacer la pre digestión por 10 horas. Al día siguiente, se procedió a hacer la digestión en un bloque digestor por 10 horas a 130 °C, luego de este último procedimiento las muestras fueron colocadas en fioles de 50 ml y diluidas con agua destilada. Para poder determinar la cantidad de cadmio (Cd^{2+}) contenido cada muestra, se utilizó el espectrofotómetro de absorción atómica (EAA-VARIAN) (Figura 15).



Figura 15. Lectura de las muestras en el espectrofotómetro de absorción atómica

d. pH en suelos

Se tomaron los niveles pH en suelos al comienzo y al final de la investigación por medio de un potenciómetro utilizando la relación 1:2, 5, con suelo y agua, respectivamente. Para preparar las muestras para la lectura, se pesó con una tara de 10 ml, después se agregó 25 ml de agua destilada. Finalmente, pasada una hora, se procedió a tomar la lectura de las muestras con un potenciómetro.

e. Cadmio disponible en suelos

Luego del sacrificio de los plantones, se recolectó el suelo de todos los tratamientos y se realizó el análisis de cadmio disponible en el laboratorio químico de suelos del Instituto de Cultivos Tropicales. Este procedimiento consistió, en utilizar una tara de 2.5 g de la muestra de suelo, pesarla en una balanza analítica, después agregar 25 ml de cloruro de calcio, y se pasó a poner las muestras en una agitadora orbital por 15 minutos. Después, se filtró las

muestras con un papel filtro n°42. Finalmente, se tomaron los datos con el espectrofotómetro de absorción atómica (EAA-VARIAN).

f. Análisis estadístico

Los datos recolectados para los parámetros evaluados fueron recopilados en tablas de Excel y analizados en el programa estadístico R v. 4.0. Para evaluar cada parámetro se realizó el análisis de varianza (ANOVA) y se realizaron las pruebas para el cumplimiento de los supuestos como la normalidad de los residuos (Prueba de Shapiro-Wilk) y la homocedasticidad (Breusch-Pagan) de los mismos. Luego de cumplir con los supuestos, se realizó la prueba de Dunnett, la cual comparó todos los tratamientos con el tratamiento testigo. Los parámetros que mostraron significancias para todos los tratamientos fueron procesados por la prueba de Duncan.

6. Resultados

6.1 Altura de los plántones

El parámetro de altura cumplió con los supuestos de normalidad y de homocedasticidad; de igual manera mediante la prueba de ANOVA, se pudo comprobar que existieron diferencias significativas entre las medias de todos los tratamientos (ver anexo 14). Los tratamientos de dolomita + biochar (1.29 g) y dolomita + zeolita (1.29 g) presentaron diferencias estadísticas según la prueba de Dunnett ($p > 0.05$) al compararla con el tratamiento testigo con cadmio (Figura 16).

Tabla 4. Prueba de Dunnett aplicada al parámetro altura

Tratamientos	Pr(> t)
Dolomita - Testigo con cadmio == 0	0.990
Dolomita + Biochar (1.29 g) - Testigo con cadmio == 0	< 0.001 ***
Dolomita + Biochar (2.62 g) - Testigo con cadmio == 0	0.526
Dolomita + Biochar (5.23 g) - Testigo con cadmio == 0	0.946
Dolomita + Biochar (10.47 g) - Testigo con cadmio == 0	0.232
Dolomita + Compost (1.29 g) - Testigo con cadmio == 0	1.000
Dolomita + Compost (2.62 g) - Testigo con cadmio == 0	0.769
Dolomita + Compost (5.23 g) - Testigo con cadmio == 0	1.000
Dolomita + Compost (10.47 g) - Testigo con cadmio == 0	0.607
Dolomita + Gallinaza (1.29 g) - Testigo con cadmio == 0	0.806
Dolomita + Gallinaza (2.62 gr) - Testigo con cadmio == 0	1.000
Dolomita + Gallinaza (5.23 g) - Testigo con cadmio == 0	1.000
Dolomita + Gallinaza (10.47 g) - Testigo con cadmio == 0	0.690
Dolomita + Zeolita (1.29 g) - Testigo con cadmio == 0	0.001 **
Dolomita + Zeolita (2.62 g) - Testigo con cadmio == 0	0.486
Dolomita + Zeolita (5.23 g) - Testigo con cadmio == 0	0.873
Dolomita + Zeolita (10.47 g) - Testigo con cadmio == 0	0.314

Significancia: (***) 0.001 (**) 0.01 (*) 0.05

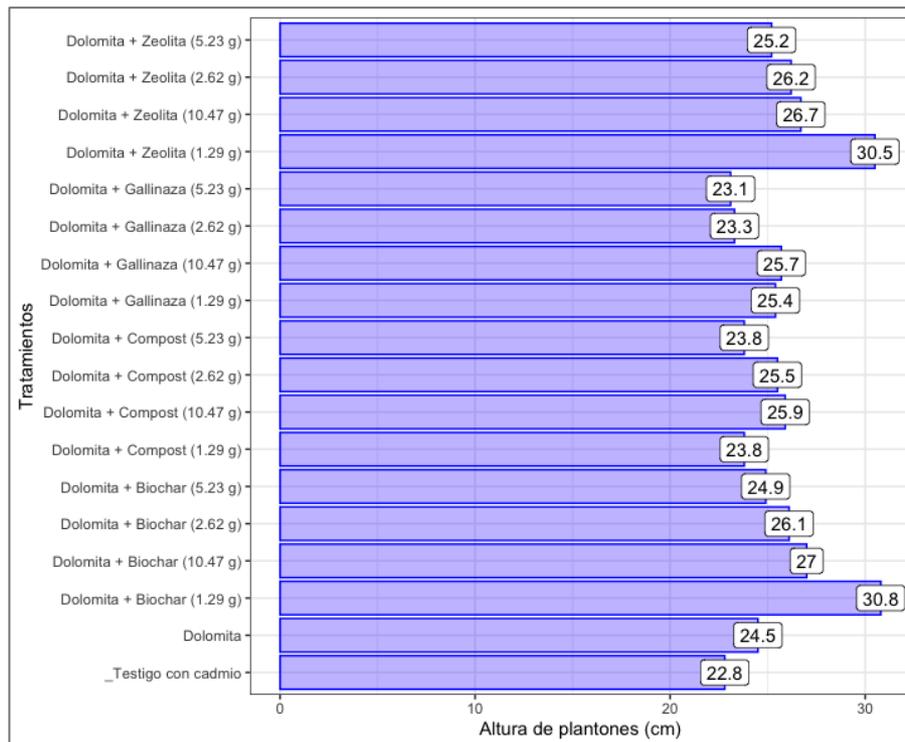


Figura 16. Medias del parámetro altura

6.2 Diámetro

El parámetro diámetro cumplió con los supuestos de normalidad y de homocedasticidad; de igual manera mediante la prueba de ANOVA, se pudo comprobar que existieron diferencias significativas (ver anexo 14). En la tabla 5 se puede observar la prueba de Dunnett ($p > 0.05$), la cual muestra que no existen diferencias significativas entre los tratamientos con el testigo con cadmio.

Tabla 5. Prueba de Dunnett aplicada al parámetro diámetro

Tratamientos	Pr(> t)
Dolomita - Testigo con cadmio == 0	0.105
Dolomita + Biochar (1.29 g) - Testigo con cadmio == 0	0.188
Dolomita + Biochar (10.47 g) - Testigo con cadmio == 0	0.523
Dolomita + Biochar (2.62 g) - Testigo con cadmio == 0	1.000
Dolomita + Biochar (5.23 g) - Testigo con cadmio == 0	1.000
Dolomita + Compost (1.29 g) - Testigo con cadmio == 0	1.000
Dolomita + Compost (10.47 g) - Testigo con cadmio == 0	0.822

Dolomita + Compost (2.62 g) - Testigo con cadmio == 0	0.073
Dolomita + Compost (5.23 g) - Testigo con cadmio == 0	1.000
Dolomita + Gallinaza (1.29 g) - Testigo con cadmio == 0	0.052
Dolomita + Gallinaza (10.47 g) - Testigo con cadmio == 0	0.606
Dolomita + Gallinaza (2.62 g) - Testigo con cadmio == 0	0.246
Dolomita + Gallinaza (5.23 g) - Testigo con cadmio == 0	1.000
Dolomita + Zeolita (1.29 g) - Testigo con cadmio == 0	1.000
Dolomita + Zeolita (10.47 g) - Testigo con cadmio == 0	0.999
Dolomita + Zeolita (2.62 g) - Testigo con cadmio == 0	1.000
Dolomita + Zeolita (5.23 g) - Testigo con cadmio == 0	0.143

*Significancia: (***) 0.001 (**) 0.01 (*) 0.05*

6.3 Biomasa aérea

El parámetro biomasa aérea cumplió con los supuestos de normalidad y de homocedasticidad; de igual manera mediante la prueba de ANOVA, se pudo comprobar que existieron diferencias significativas entre las medias de los tratamientos (ver anexo 14). La prueba de Dunnett (Tabla 6) muestra que los tratamientos de dolomita + compost (2.62 g) y dolomita + gallinaza (5.23 g), cada uno con un valor de 3.20 y 3.08 g respectivamente, demostraron obtener valores mas significativos respecto a los demás tratamientos comparados con el tratamientos testigo con cadmio (Figura 17).

Tabla 6. Prueba de Dunnett aplicada al parámetro biomasa aérea

Tratamientos	Pr(> t)
Dolomita - Testigo con cadmio == 0	0.057
Dolomita + Biochar (1.29 g) - Testigo con cadmio == 0	0.027 *
Dolomita + Biochar (2.62 g) - Testigo con cadmio == 0	0.015 *
Dolomita + Biochar (5.23 g) - Testigo con cadmio == 0	0.024 *
Dolomita + Biochar (10.47 g) - Testigo con cadmio == 0	0.168
Dolomita + Compost (1.29 g) - Testigo con cadmio == 0	0.308
Dolomita + Compost (2.62 g) - Testigo con cadmio == 0	0.000 ***
Dolomita + Compost (5.23 g) - Testigo con cadmio == 0	0.096
Dolomita + Compost (10.47 g) - Testigo con cadmio == 0	0.133

Dolomita + Gallinaza (1.29 g) - Testigo con cadmio == 0	0.011	*
Dolomita + Gallinaza (2.62 g) - Testigo con cadmio == 0	0.005	**
Dolomita + Gallinaza (5.23 g) - Testigo con cadmio == 0	0.000	***
Dolomita + Gallinaza (10.47 g) - Testigo con cadmio == 0	0.014	*
Dolomita + Zeolita (1.29 g) - Testigo con cadmio == 0	0.030	*
Dolomita + Zeolita (2.62 g) - Testigo con cadmio == 0	0.107	
Dolomita + Zeolita (5.23 g) - Testigo con cadmio == 0	0.137	
Dolomita + Zeolita (10.47 g) - Testigo con cadmio == 0	0.013	*

*Significancia: (***) 0.001 (**) 0.01 (*) 0.05*

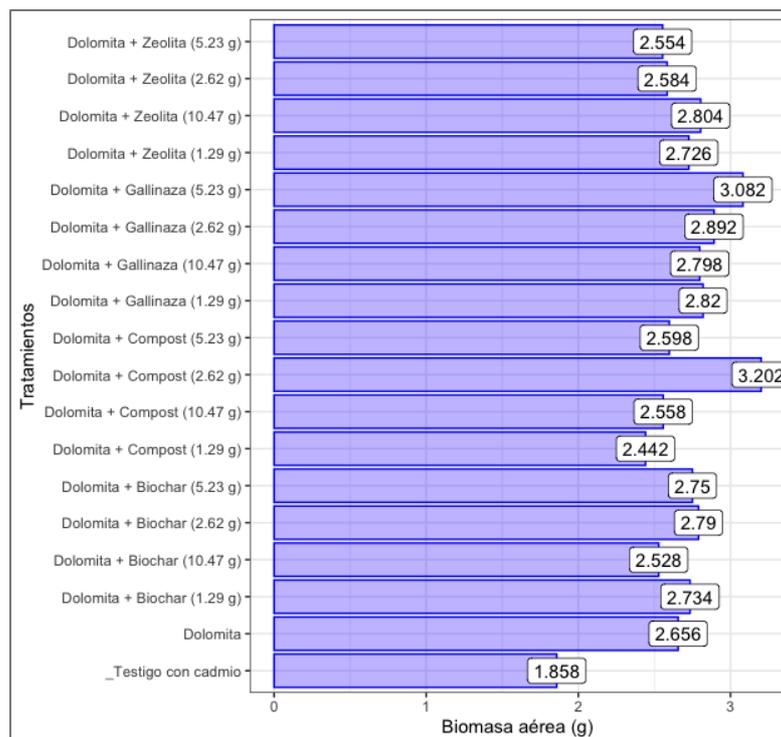


Figura 17. Medias del parámetro biomasa aérea

6.4 Biomasa radicular

El parámetro biomasa radicular cumplió con los supuestos de normalidad y de homocedasticidad; de igual manera mediante la prueba de ANOVA, se pudo comprobar que existieron diferencias significativas entre las medias de todos los tratamientos (ver anexo 14). La prueba de Dunnett (Tabla 7) mostró que ocho tratamientos presentaron diferencias significativas con el testigo con cadmio, los tratamientos que mayor diferencias significativas obtuvieron fueron: dolomita,

dolomita + biochar (10.47 g) y dolomita + compost (2.62 g). Cada uno con un valor de 1.36, 1.40 y 1.37 g respectivamente (Figura 18).

Tabla 7. Prueba de Dunnett aplicada al parámetro biomasa radicular

Tratamientos	Pr(> t)
Dolomita - Testigo con cadmio == 0	0.009 **
Dolomita + Biochar (1.29 g) - Testigo con cadmio == 0	0.044 *
Dolomita + Biochar (2.62 g) - Testigo con cadmio == 0	0.161
Dolomita + Biochar (5.23 g) - Testigo con cadmio == 0	0.039 *
Dolomita + Biochar (10.47 g) - Testigo con cadmio == 0	0.003 **
Dolomita + Compost (1.29 g) - Testigo con cadmio == 0	0.684
Dolomita + Compost (2.62 g) - Testigo con cadmio == 0	0.005 **
Dolomita + Compost (5.23 g) - Testigo con cadmio == 0	0.304
Dolomita + Compost (10.47 g) - Testigo con cadmio == 0	0.061
Dolomita + Gallinaza (1.29 g) - Testigo con cadmio == 0	0.039 *
Dolomita + Gallinaza (2.62 g) - Testigo con cadmio == 0	0.975
Dolomita + Gallinaza (5.23 g) - Testigo con cadmio == 0	0.077
Dolomita + Gallinaza (10.47 g) - Testigo con cadmio == 0	0.674
Dolomita + Zeolita (1.29 g) - Testigo con cadmio == 0	0.028 *
Dolomita + Zeolita (2.62 g) - Testigo con cadmio == 0	0.247
Dolomita + Zeolita (5.23 g) - Testigo con cadmio == 0	0.253
Dolomita + Zeolita (10.47 g) - Testigo con cadmio == 0	0.049 *

(***) 0.001 (**) 0.01 (*) 0.05 Significativo para la prueba de Dunnett, nivel de 5%

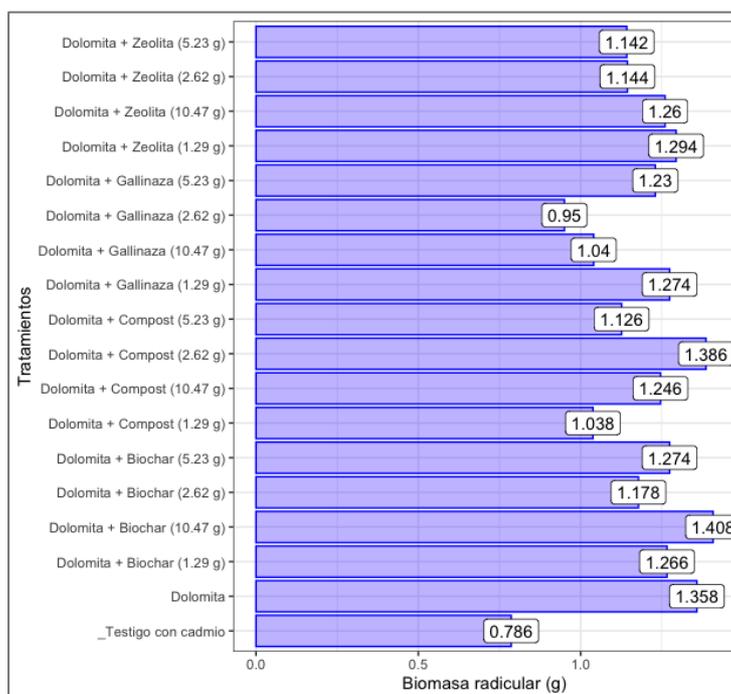


Figura 18. Medias del parámetro biomasa radicular

6.5 Biomasa total

El parámetro biomasa radicular cumplió con los supuestos de normalidad y de homocedasticidad; de igual manera mediante la prueba de ANOVA, se pudo comprobar que existieron diferencias significativas entre las medias de los tratamientos (ver anexo 14). Los resultados de la prueba de Dunnett (Tabla 8) muestran que doce de los diecisiete tratamientos presentaron diferencias significativas con el tratamiento testigo. El tratamiento con mayor diferencia significativa fue el de dolomita + compost (2.62 g) con un valor de 4.34 g (Figura 19).

Tabla 8. Prueba de Dunnett aplicada al parámetro biomasa total

Tratamientos	Pr(> t)
Dolomita - Testigo con cadmio == 0	0.010 **
Dolomita + Biochar (1.29 g) - Testigo con cadmio == 0	0.011 *
Dolomita + Biochar (2.62 g) - Testigo con cadmio == 0	0.014 *
Dolomita + Biochar (5.23 g) - Testigo con cadmio == 0	0.009 **
Dolomita + Biochar (10.47 g) - Testigo con cadmio == 0	0.004 **
Dolomita + Compost (1.29 g) - Testigo con cadmio == 0	0.231
Dolomita + Compost (2.62 g) - Testigo con cadmio == 0	< 0.001 ***
Dolomita + Compost (5.23 g) - Testigo con cadmio == 0	0.065
Dolomita + Compost (10.47 g) - Testigo con cadmio == 0	0.040 *
Dolomita + Gallinaza (1.29 g) - Testigo con cadmio == 0	0.006 **
Dolomita + Gallinaza (2.62 g) - Testigo con cadmio == 0	0.949
Dolomita + Gallinaza (5.23 g) - Testigo con cadmio == 0	0.007 **
Dolomita + Gallinaza (10.47 g) - Testigo con cadmio == 0	0.032 *
Dolomita + Zeolita (1.29 g) - Testigo con cadmio == 0	0.009 **
Dolomita + Zeolita (2.62 g) - Testigo con cadmio == 0	0.063
Dolomita + Zeolita (5.23 g) - Testigo con cadmio == 0	0.076
Dolomita + Zeolita (10.47 g) - Testigo con cadmio == 0	0.007 **

(***) 0.001 (**) 0.01 (*) 0.05 Significativo para la prueba de Dunnett, nivel de 5%

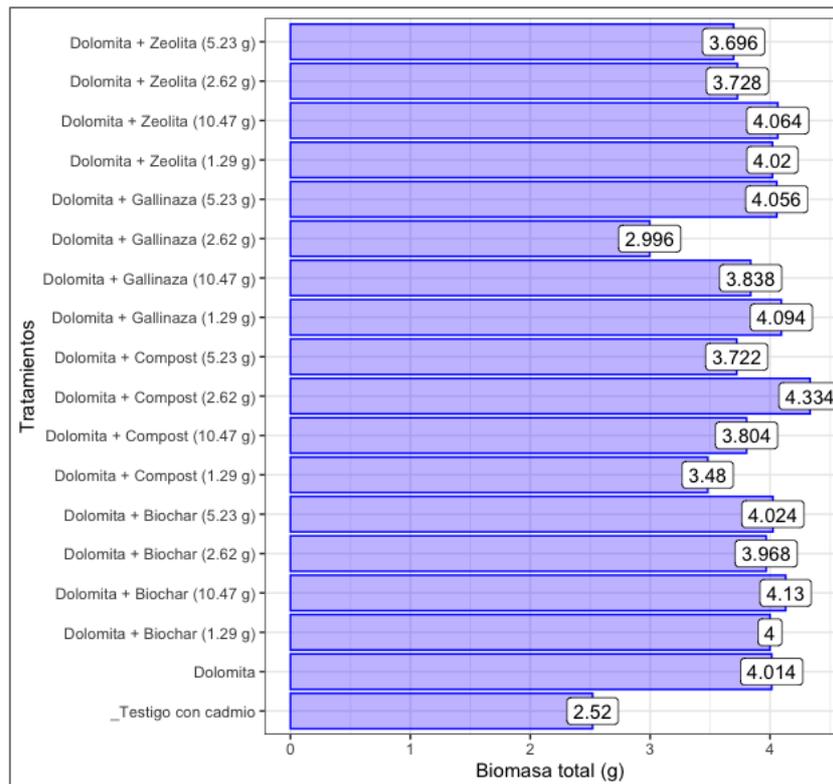


Figura 19. Medias de biomasa total

6.6 Cadmio foliar

El parámetro cadmio foliar cumplió con los supuestos de normalidad y de homocedasticidad; de igual manera mediante la prueba de ANOVA, se pudo comprobar que existieron diferencias significativas entre las medias de los tratamientos (ver anexo 14). Los resultados de la prueba de Dunnett (Tabla 9) muestran que todos los tratamientos obtuvieron diferencias significativas con el testigo con cadmio. Por lo tanto, se realizó la prueba de Duncan (Tabla 10) para verificar si existen diferencias significativas entre tratamientos.

Tabla 9. Prueba de Dunnett aplicada al parámetro cadmio foliar

Tratamientos	Pr(> t)
Dolomita - Testigo con cadmio == 0	0.009 **
Dolomita + Biochar (1.29 g) - Testigo con cadmio == 0	0.010 *
Dolomita + Biochar (2.62 g) - Testigo con cadmio == 0	0.038 *

Dolomita + Biochar (5.23 g) - Testigo con cadmio == 0	0.024	*
Dolomita + Biochar (10.47 g) - Testigo con cadmio == 0	< 0.001	***
Dolomita + Compost (1.29 g) - Testigo con cadmio == 0	< 0.001	***
Dolomita + Compost (2.62 g) - Testigo con cadmio == 0	0.998	
Dolomita + Compost (5.23 g) - Testigo con cadmio == 0	< 0.001	***
Dolomita + Compost (10.47 g) - Testigo con cadmio == 0	0.010	*
Dolomita + Gallinaza (1.29 g) - Testigo con cadmio == 0	0.006	**
Dolomita + Gallinaza (2.62 g) - Testigo con cadmio == 0	< 0.001	***
Dolomita + Gallinaza (5.23 g) - Testigo con cadmio == 0	< 0.001	***
Dolomita + Gallinaza (10.47 g) - Testigo con cadmio == 0	< 0.001	***
Dolomita + Zeolita (1.29 g) - Testigo con cadmio == 0	0.004	**
Dolomita + Zeolita (2.62 g) - Testigo con cadmio == 0	< 0.001	***
Dolomita + Zeolita (5.23 g) - Testigo con cadmio == 0	0.001	**
Dolomita + Zeolita (10.47 g) - Testigo con cadmio == 0	0.024	*

(***) 0.001 (**) 0.01 (*) 0.05 Significativo para la prueba de Dunnett, nivel de 5%

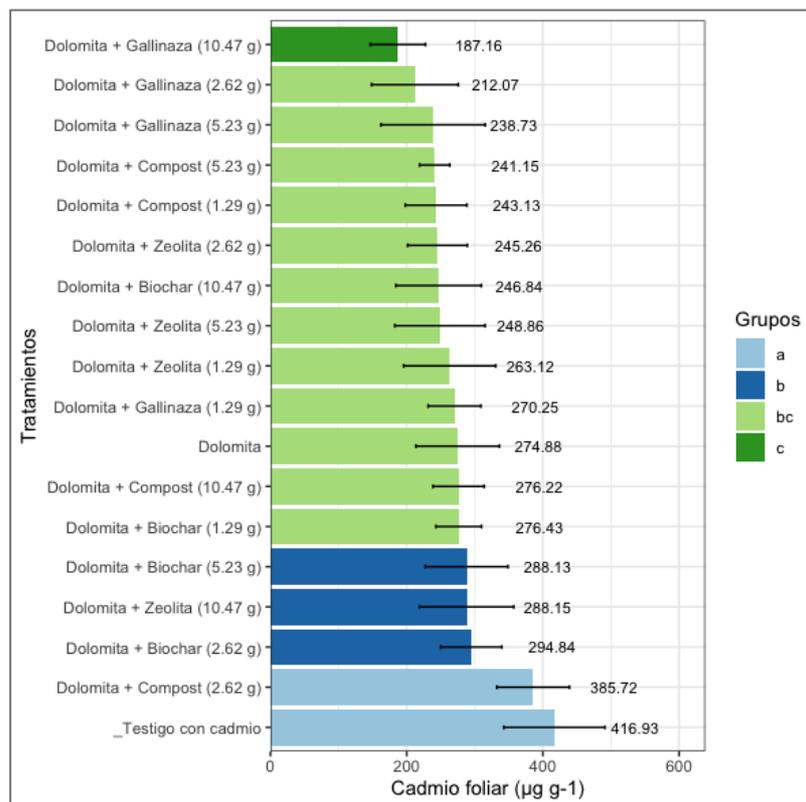


Figura 20. Resultados de la prueba de Duncan (cadmio foliar)

La prueba de Duncan muestra que el tratamiento de dolomita + gallinaza (10.47 g) con una media de $187.16 \mu\text{g g}^{-1}$ mostró resultados estadísticamente superiores a los demás.

6.7 Cadmio radicular

El parámetro cadmio radicular cumplió con los supuestos de normalidad y de homocedasticidad; de igual manera mediante la prueba de ANOVA, se pudo comprobar que existieron diferencias significativas entre las medias de los tratamientos (ver anexo 14). Los resultados de la prueba de Dunnett (Tabla 11) muestran que todos los tratamientos obtuvieron diferencias significativas con el testigo con cadmio. Por lo tanto, se procedió a realizar la prueba de Duncan para verificar si existen diferencias significativas entre tratamientos.

Tabla 10. Prueba de Dunnett aplicada al parámetro cadmio radicular

Tratamientos	Pr(> t)
Dolomita - Testigo con cadmio == 0	0 ***
Dolomita + Biochar (1.29 g) - Testigo con cadmio == 0	0 ***
Dolomita + Biochar (2.62 g) - Testigo con cadmio == 0	0 ***
Dolomita + Biochar (5.23 g) - Testigo con cadmio == 0	0 ***
Dolomita + Biochar (10.47 g) - Testigo con cadmio == 0	0 ***
Dolomita + Compost (1.29 g) - Testigo con cadmio == 0	0 ***
Dolomita + Compost (2.62 g) - Testigo con cadmio == 0	0 ***
Dolomita + Compost (5.23 g) - Testigo con cadmio == 0	0 ***
Dolomita + Compost (10.47 g) - Testigo con cadmio == 0	0 ***
Dolomita + Gallinaza (1.29 g) - Testigo con cadmio == 0	0 ***
Dolomita + Gallinaza (2.62 g) - Testigo con cadmio == 0	0 ***
Dolomita + Gallinaza (5.23 g) - Testigo con cadmio == 0	0 ***
Dolomita + Gallinaza (10.47 g) - Testigo con cadmio == 0	0 ***
Dolomita + Zeolita (1.29 g) - Testigo con cadmio == 0	0 ***
Dolomita + Zeolita (2.62 g) - Testigo con cadmio == 0	0 ***
Dolomita + Zeolita (5.23 g) - Testigo con cadmio == 0	0 ***
Dolomita + Zeolita (10.47 g) - Testigo con cadmio == 0	0 ***

(***) 0.001 (**) 0.01 (*) 0.05 Significativo para la prueba de Dunnett, nivel de 5%

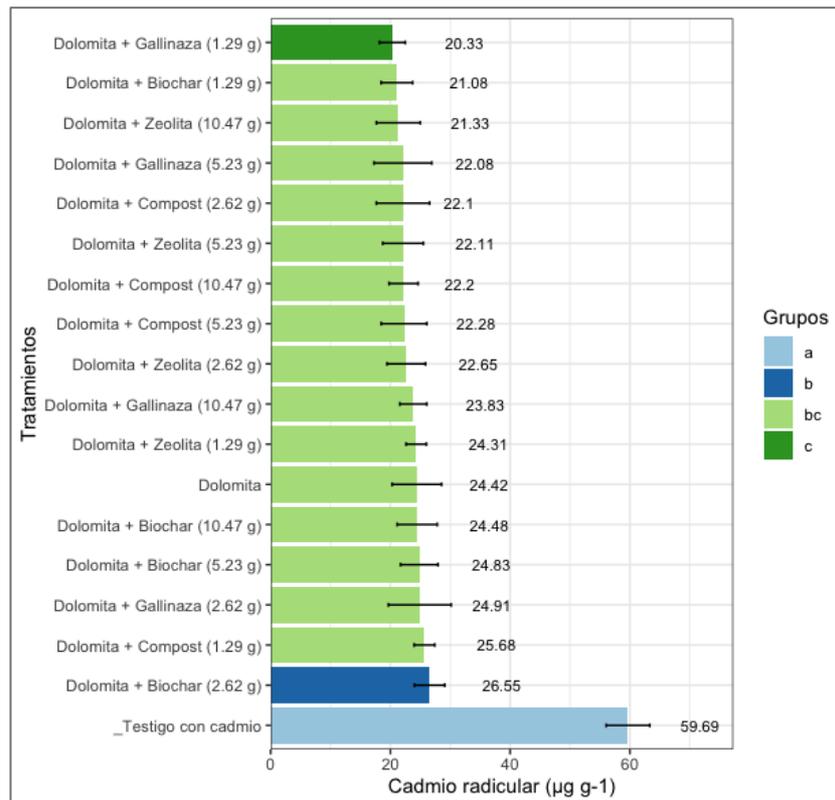


Figura 21. Prueba de Duncan (parámetro radicular)

La prueba de Duncan muestra que el mejor tratamiento respecto al parámetro de cadmio radicular es dolomita + gallinaza (1.29 g) con una media de 20.33 µg g⁻¹.

6.8 pH de suelos

El parámetro pH cumplió con los supuestos de normalidad y de homocedasticidad; de igual manera mediante la prueba de ANOVA, se pudo comprobar que existieron diferencias significativas entre las medias de los tratamientos (ver anexo 14). Los resultados de la prueba de Dunnett (Tabla 11) muestran que todos los tratamientos obtuvieron diferencias significativas con el testigo con cadmio. Por lo tanto, se procedió a realizar la prueba de Duncan para verificar si existen diferencias significativas entre tratamientos.

Tabla 11. Prueba de Dunnett aplicada al parámetro pH

Tratamientos	Pr(> t)
Dolomita - Testigo con cadmio == 0	0 ***
Dolomita + Biochar (1.29 g) - Testigo con cadmio == 0	0 ***
Dolomita + Biochar (2.62 g) - Testigo con cadmio == 0	0 ***
Dolomita + Biochar (5.23 g) - Testigo con cadmio == 0	0 ***
Dolomita + Biochar (10.47 g) - Testigo con cadmio == 0	0 ***
Dolomita + Compost (1.29 g) - Testigo con cadmio == 0	0 ***
Dolomita + Compost (2.62 g) - Testigo con cadmio == 0	0 ***
Dolomita + Compost (5.23 g) - Testigo con cadmio == 0	0 ***
Dolomita + Compost (10.47 g) - Testigo con cadmio == 0	0 ***
Dolomita + Gallinaza (1.29 g) - Testigo con cadmio == 0	0 ***
Dolomita + Gallinaza (2.62 g) - Testigo con cadmio == 0	0 ***
Dolomita + Gallinaza (5.23 g) - Testigo con cadmio == 0	0 ***
Dolomita + Gallinaza (10.47 g) - Testigo con cadmio == 0	0 ***
Dolomita + Zeolita (1.29 g) - Testigo con cadmio == 0	0 ***
Dolomita + Zeolita (2.62 g) - Testigo con cadmio == 0	0 ***
Dolomita + Zeolita (5.23 g) - Testigo con cadmio == 0	0 ***
Dolomita + Zeolita (10.47 g) - Testigo con cadmio == 0	0 ***

(***) 0.001 (**) 0.01 (*) 0.05 Significativo para la prueba de Dunnett, nivel de 5%

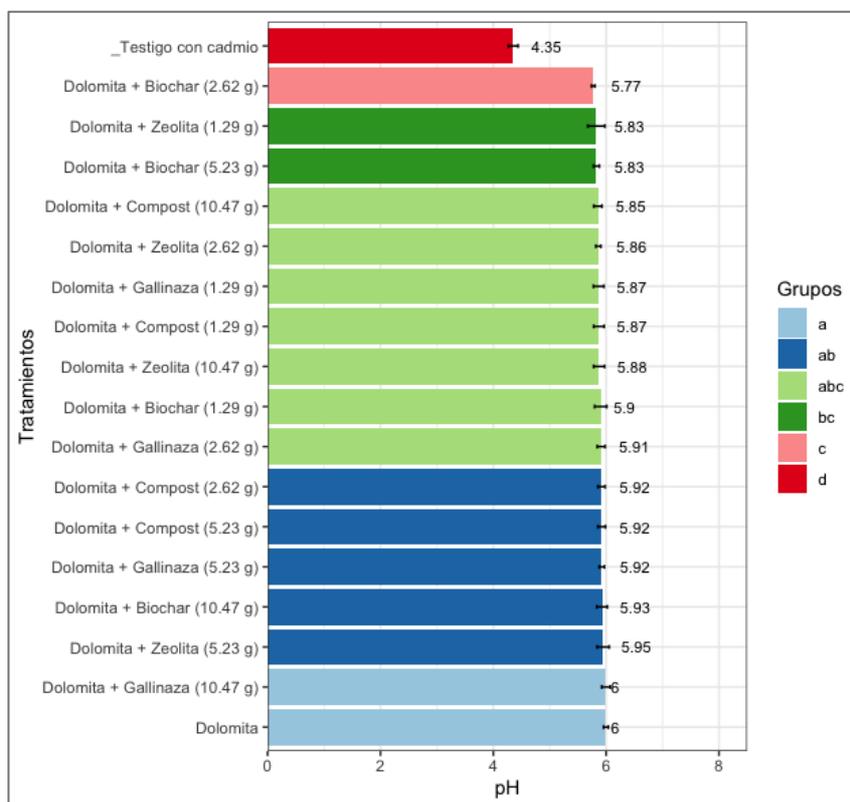


Figura 22. Prueba de Duncan (parámetro pH de suelos)

La prueba de Duncan muestra que los mejores tratamientos respecto al parámetro de pH fueron: dolomita y dolomita + gallinaza (10.47 g) (Figura 22). Sin embargo, se observó que todos los tratamientos obtuvieron un aumento considerable en el pH en comparación al testigo con cadmio.

6.9 Cadmio disponible

El parámetro cadmio radicular cumplió con los supuestos de normalidad y de homocedasticidad; de igual manera mediante la prueba de ANOVA, se pudo comprobar que existieron diferencias significativas entre las medias de los tratamientos (ver anexo 14). Los resultados de la prueba de Dunnett (Tabla 12) muestran que todos los tratamientos obtuvieron diferencias significativas con el testigo con cadmio. Por lo tanto, se procedió a realizar la prueba de Duncan para verificar si existen diferencias significativas entre tratamientos.

Tabla 12. Prueba de Dunnett aplicada al parámetro cadmio disponible

Tratamientos	Pr(> t)
Dolomita - Testigo con cadmio == 0	0 ***
Dolomita + Biochar (1.29 g) - Testigo con cadmio == 0	0 ***
Dolomita + Biochar (2.62 g) - Testigo con cadmio == 0	0 ***
Dolomita + Biochar (5.23 g) - Testigo con cadmio == 0	0 ***
Dolomita + Biochar (10.47 g) - Testigo con cadmio == 0	0 ***
Dolomita + Compost (1.29 g) - Testigo con cadmio == 0	0 ***
Dolomita + Compost (2.62 g) - Testigo con cadmio == 0	0 ***
Dolomita + Compost (5.23 g) - Testigo con cadmio == 0	0 ***
Dolomita + Compost (10.47 g) - Testigo con cadmio == 0	0 ***
Dolomita + Gallinaza (1.29 g) - Testigo con cadmio == 0	0 ***
Dolomita + Gallinaza (2.62 g) - Testigo con cadmio == 0	0 ***
Dolomita + Gallinaza (5.23 g) - Testigo con cadmio == 0	0 ***
Dolomita + Gallinaza (10.47 g) - Testigo con cadmio == 0	0 ***
Dolomita + Zeolita (1.29 g) - Testigo con cadmio == 0	0 ***
Dolomita + Zeolita (2.62 g) - Testigo con cadmio == 0	0 ***
Dolomita + Zeolita (5.23 g) - Testigo con cadmio == 0	0 ***
Dolomita + Zeolita (10.47 g) - Testigo con cadmio == 0	0 ***

(***) 0.001 (**) 0.01 (*) 0.05 Significativo para la prueba de Dunnett, nivel de 5%

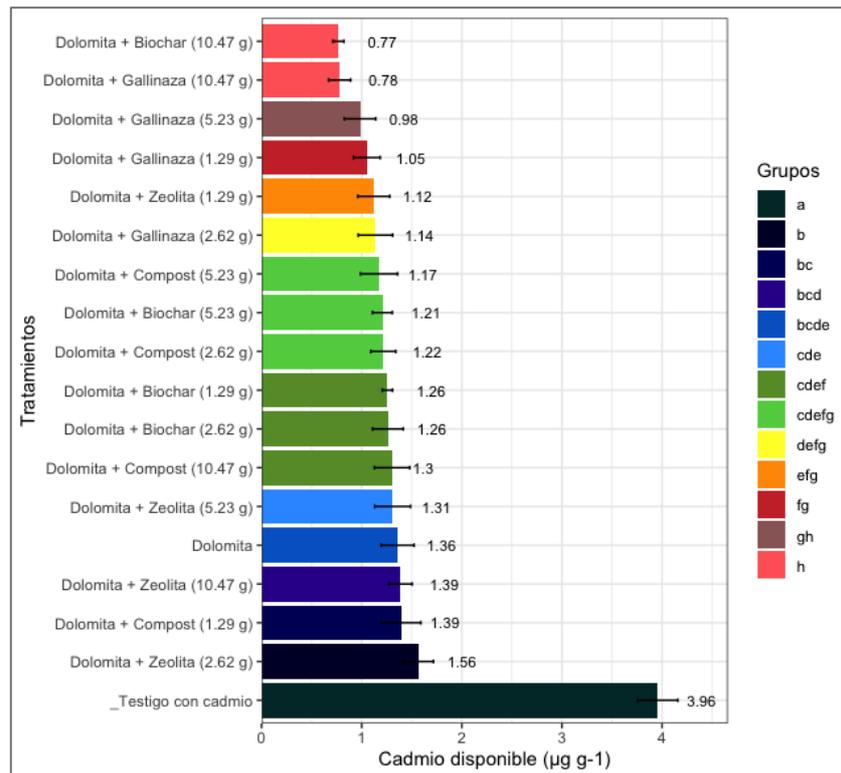


Figura 23. Prueba de Duncan (cadmio disponible)

La prueba de Duncan muestra que los mejores tratamientos respecto al parámetro cadmio disponible fueron: dolomita + biochar (10.47 g) y dolomita + gallinaza (10.47 g) 0.77 y 0.78 µg g⁻¹ respectivamente (Figura 22). Esto concuerda con los resultados mencionados anteriormente en el parámetro pH, el tratamiento de dolomita + gallinaza (10.47 g) obtuvo el segundo valor mas alto, confirmando la relación cadmio disponible en suelos con la variable pH, ya que a mayor pH se puede observar menor cantidad de cadmio disponible en suelos. Cabe resaltar que este tratamiento tambien obtuvo el mejor resultado en el parámetro cadmio foliar.

7. Discusión

Como se observó en los resultados presentados, se puede apreciar en los parámetros biométricos la diferencia de los tratamientos con el tratamiento testigo con cadmio, este último presenta los valores mas bajos en altura, diámetro, biomasa foliar, biomasa radicular y biomasa total. Estos resultados concuerdan con lo mencionado por Huaynates (2013), quien interpreta sus resultados mencionando que el cadmio es un metal tóxico para la planta, que interfiere en la absorción y transporte de varios elementos originando desequilibrios nutricionales e hídricos. Abanto (2016) y Herrera (2000) confirman lo mencionado por Huaynates agregando que el cadmio también altera los procesos metabólicos normales, reduce la tasa de fotosíntesis y transpiración.

Respecto al parámetro cadmio disponible en suelos, los resultados mostraron que el tratamiento con menor contenido de cadmio disponible es el de dolomita con biochar (10.47 g) con $0.77 \mu\text{g g}^{-1}$, seguido del tratamiento de dolomita con gallinaza (10.47 g) con $0.78 \mu\text{g g}^{-1}$. Este último tratamiento mencionado, presentó el valor de pH de suelos más alto (6) al igual que el tratamiento de dolomita, óptimo para el crecimiento del cacao según Arvelo, M. et al. (2017). Confirmando que la absorción de cadmio disminuye cuando el pH se acerca a los rangos de pH óptimos para el desarrollo fisiológico de las plantas de cacao (Abanto, 2016; Charrupi y Martínez, 2017; Herrera, 2000; Nazar, 2010 y Patiño et al., 2017). Orozco y Thienhaus (1997), realizaron una investigación de esta enmienda aplicada en un cultivo de cacao juvenil, como resultado incremento la producción inicial y el diámetro del tallo. Se encontró un aumento de la materia orgánica en

los suelos, así como de calcio y pH, sin embargo dentro de los análisis químicos realizados en los suelos no se estudió el cadmio. Esta investigación apoya los resultados respecto a esta enmienda, la cual obtuvo resultados en el aumento de pH. En contraste con los resultados de mayor pH, se puede observar que el tratamiento testigo con cadmio obtuvo el pH más bajo (4.35), el valor más alto de contenido de cadmio disponible en suelos ($3.96 \mu\text{g g}^{-1}$), cadmio foliar ($416.39 \mu\text{g g}^{-1}$) y cadmio radicular ($59.69 \mu\text{g g}^{-1}$), teniendo relación con lo mencionado anteriormente.

Liu, Chen, Cai, Liang y Huang (2009) realizaron una investigación para evaluar el efecto de la gallinaza en la inmovilización y biotoxicidad de cadmio en suelos en macetas de trigo, obteniendo como resultados, la disminución de más del 50% de la absorción de cadmio por el tejido de trigo, aumento en el pH del suelo y la inmovilización de cadmio en suelos. Al igual que Huang, Wan, Luo, Qiao, Su y Li (2019), los cuales investigaron el efecto de la gallinaza y la biodisponibilidad de cadmio en suelos y su absorción en plantas de arroz, concluyendo que, esta enmienda orgánica podría reducir efectivamente la biodisponibilidad de cadmio a medida que aumenta el pH del suelo. Wang, Xu, Liang, Sun, Lin y Dong (2014), evaluaron el efecto del biochar y gallinaza en la biodisponibilidad y movilidad de cadmio en *Brassica chinensis*, confirmando que estas dos enmiendas orgánicas podrían promover una reducción significativa en la biodisponibilidad y movilidad de cadmio. Lo cual se confirma en la presente investigación.

Cabe resaltar que todos los tratamientos presentaron aumentos en el pH y disminución del cadmio disponible, confirmando que la adición de materiales para el encalado y enmiendas orgánicas, contribuyen a un crecimiento adecuado para los cultivos (Ruíz, 2011) y disminuyen la absorción de cadmio en las plantas, ya que, logran alterar las características del suelo logrando disminuir la biodisponibilidad de cadmio (Meter et al., 2019).

Huaynates (2013) realizó una investigación con encalado (dolomita) y enmiendas orgánicas (compost y guano de isla) para ver el efecto de estas dos enmiendas en la absorción de cadmio en el suelo, la cual demostró que: “la materia orgánica puede adsorber tan fuertemente al cadmio, que pueden quedar de forma no disponible para el suelo y plantas”. Zamora, Reyes, Aldoradin, Londoño y Aleman (2020), realizaron una investigación en la cual aplicaron compost y estiércol de aves de corral para reducir el contenido de Cd y Pb en las almendras de cacao. Como resultado obtuvieron que el cadmio disponible disminuyó al aplicar las enmiendas orgánicas, tanto el cadmio como el plomo disminuyeron 75% y 98% respectivamente con respecto al contenido inicial. En la presente investigación se obtuvo que todos los tratamientos de dolomita con compost fueron eficientes, ya que mostraron resultados positivos tanto en el parámetro pH, cadmio disponible en suelos, cadmio foliar y cadmio radicular.

Chávez, He, Stoffella, Mylavarapu, Li, & Baligar (2016), mencionan que el biochar es considerado como una gran alternativa para atenuar el problema de

la contaminación por cadmio en los suelos. Al-Wabel et al. (2015), realizaron una investigación con el uso del biochar en plantas de maíz, obteniendo resultados positivos en la disminución de concentraciones de metales pesados incluido el cadmio. Otra investigación fue la de Obaji et al. (2017), en donde evaluaron enmiendas orgánicas como potenciales retenedores de metales pesados en suelos contaminados, los resultados mostraron que el biochar se encontró entre los materiales que obtuvieron mayor porcentaje de retención de cadmio en suelo, al igual que Beesley et al. 2010 (citado en Venegas, 2015), realizaron una investigación con biochar y compost, en la cual el biochar tuvo un resultado positivo, reduciendo la concentración inicial de cadmio en el suelo. Ramtahal, Umaharan, Hanuman, Davis y Ali (2019) realizaron una investigación aplicando cal y biochar, la cual redujo la bioacumulación de cadmio, confirmando todas las investigaciones mencionadas anteriormente. Sin embargo, Oliveira (2016) menciona que es necesario monitorear de cerca al biochar en técnicas de remediación de suelos contaminados con cadmio y considera que no es un material eficiente para este propósito, ya que los desechos con los que son producidos el biochar pueden presentar sustancias contaminantes.

En la presenta investigación, se confirma que el tratamiento de dolomita con biochar (10.47 g) obtuvo buenos resultados al igual que el tratamiento de dolomita con gallinaza (10.47 g). Este tratamiento obtuvo como resultados: pH de 5.93, un valor de $0.77 \mu\text{g g}^{-1}$ en el parámetro de cadmio disponible en suelos. Confirmando lo mencionado por Chávez et al. (2016), Al-Wabel et al. (2015), Obaji et al. (2017) y Umaharan et al. (2019).

Hurtado (2012) realizó una investigación aplicando varias enmiendas para recuperar suelos cacaoteros contaminados con cadmio, entre ellas la zeolita, sin embargo, no logró resultados óptimos con esta enmienda mencionada. Chavez et al. (2016) presentaron un resultado parecido al mencionado anteriormente, en la cual aplicaron vermicompost y zeolita en suelos de cultivo de cacao en laboratorio para poder reducir el cadmio disponible en estos, eligieron estas enmiendas por su bajo costo y por sus antecedentes en la reducción de cadmio disponible en la planta. Sin embargo, el vermicompost tuvo mejores resultados que la zeolita. Esto se refleja en los resultados de la presente investigación.

Respecto al parámetro contenido de cadmio foliar, el mejor tratamiento fue el de dolomita con gallinaza (10.47 g) con $187.16 \mu\text{g g}^{-1}$. Correa (2018) obtuvo resultados positivos con este mismo tratamiento y con el tratamiento de dolomita con compost también usado en esa investigación, obteniendo valores de 86.47 y $100.82 \mu\text{g g}^{-1}$ respectivamente, valores menores a los obtenidos en la presente investigación. Para el contenido de cadmio radicular en la presente investigación, el mejor tratamiento fue el de dolomita con gallinaza (1.29 gr) con un valor de $20.33 \mu\text{g g}^{-1}$. Correa (2018) obtuvo mejores resultados con el tratamiento dolomita con compost con un valor de $168.18 \mu\text{g g}^{-1}$. Se debe de tener en cuenta que en la investigación de Correa, aplicó un nivel más alto de contaminación con cloruro de cadmio, sin embargo, se obtuvieron resultados similares con el tratamiento de gallinaza y compost, probablemente debido a las mayores dosis de compost en relación a este trabajo en el parámetro de cadmio foliar y cadmio radicular. Cabe resaltar que en la investigación de Correa, se obtuvieron

concentraciones más altas en las raíces que en la parte aérea, todo lo contrario a la presente investigación en la cual se obtuvieron valores mas elevados en la parte foliar que en la parte radicular. En la presente investigación se uso un sustrato distinto al de Correa, al igual que el tiempo de duración del experimento.

8. Conclusiones

La aplicación de enmiendas orgánicas en los suelos indujo a cambios significativos en algunos atributos de suelos, especialmente el pH, demostrando que el efecto de las enmiendas orgánicas juega un papel importante en el aumento del valor de pH (volviéndolo más alcalino) y por ende en la inmovilización del cadmio disponible en suelos.

La aplicación combinada de dolomita con la gallinaza (10.47 g) proporcionó un efecto positivo en la reducción de cadmio disponible en el sustrato, un incremento en el nivel de pH de suelos y obtuvo el mejor resultado respecto al parámetro cadmio foliar. Al mismo tiempo este tratamiento presentó resultados positivos en los parámetros biométricos (altura, diámetro, biomasa aérea, biomasa radicular y biomasa total).

Por lo tanto se puede concluir que este tratamiento puede ser usado como una estrategia de mitigación para los niveles de cadmio presentes en el cacao, siendo a la vez beneficioso para el desarrollo biométrico de la planta.

9. Recomendaciones

- Realizar pruebas similares en campo, utilizando los tratamientos que obtuvieron mejores resultados.
- Realizar pruebas con las mismas enmiendas, pero teniendo en consideración dosis específicas para cada una de estas.
- Teniendo en consideración los resultados y los precios de las enmiendas orgánicas aplicadas en esta investigación, se puede recomendar usar a los agricultores el compost. El utilizado en esta investigación fue realizado con residuos de las plantaciones de cacao ubicadas en la estación experimental de Juan Bernito.

10. Referencias bibliográficas

Abanto Aguirre, M. A. (2016). Fuentes fosfatadas en dos suelos en la concentración de cadmio foliar en maíz bajo condiciones de invernadero (Tesis de pregrado). Universidad Agraria La Molina, Lima, Perú.

Al-Wabel, M. I., Usman, A. R., El-Naggar, A. H., Aly, A. A., Ibrahim, H. M., Elmaghraby, S., & Al-Omran, A. (2015). Conocarpus biochar as a soil amendment for reducing heavy metal availability and uptake by maize plants. *Saudi journal of biological sciences*, 22(4), 503-511.

Arévalo-Gardini, E., Obando-Cerpa, M. E., Zúñiga-Cernades, L. B., Arévalo-Hernández, C. O., Baligar, V., & He, Z. (2016). Metales pesados en suelos de plantaciones de cacao (*Theobroma cacao* L.) en tres regiones del Perú. *Ecología Aplicada*, 15(2), 81-89.

Arvelo, M., Gonzalez, D., Maroto, S., Delgado, T., & Montoya, P. (2017). Manual Técnico del Cultivo de Cacao Buenas practicas para America Latina. Costa Rica: Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura. Recuperado de <https://www.academia.edu/36393999/CACAO>.

Barrientos Felipa, P. (2015). La cadena de valor del cacao en Perú y su oportunidad en el mercado mundial. *Semestre Económico*, 18(37).

Bernal, G. (2010). Buenas prácticas agrícolas (BPA) desde la perspectiva de la microbiología de suelos. Santo Domingo, Ecuador.

Cárdenas Morales, A. A. (2013). Presencia del cadmio en algunas parcelas de cacao orgánico en la cooperativa Agraria Industrial Naranjillo-Tingo María-Perú (Tesis de pregrado). Universidad Nacional Agraria de la Selva, Tingo María, Perú.

Castebianco, J. A. (2018). Técnicas de remediación de metales pesados con potencial aplicación en el cultivo de cacao. *Revista La Granja*. Volumen (27), p.21.

Charrupi Riascos, N., & Martínez Novoa, D. C. (2017). Estudio ambiental del cadmio y su relación con suelos destinados al cultivo de cacao en los departamentos de Arauca y Nariño (Tesis de pregrado). Universidad de la Salle, Bogotá, Colombia.

Chávez, E., He, Z. L., Stoffella, P. J., Mylavarapu, R., Li, Y., & Baligar, V. C. (2016). Evaluation of soil amendments as a remediation alternative for

cadmium-contaminated soils under cacao plantations. *Environmental Science and Pollution Research*, 23(17), 17571-17580.

Cisneros Beraun, M. F. (2013). Efecto de la enmienda dolomita y el abono orgánico bokashi sobre el crecimiento del ginger rojo (*alpinia purpurata* k. schum.) bajo condiciones de suelos degradados.

Correa Villacorta, J.A. (2019). Efecto de enmiendas cálcicas y orgánicas en la absorción de cadmio en plántones de cacao (*Theobroma cacao* L.) en la Región San Martín.

End, M., & Dand, R. (2015). Cacao en grano: requisitos de la calidad de la industria del Chocolate y del Cacao. CAOBISCO/ECA/FCC Cocoa Beans: Chocolate and Cocoa Industry Quality Requirements.

Escalante Rebolledo, A., Pérez López, G., Hidalgo Moreno, C., López Collado, J., Campo Alves, J., Valtierra Pacheco, E., & Etchevers Barra, J. D. (2016). Biocarbón (biochar) I: Naturaleza, historia, fabricación y uso en el suelo. *Terra Latinoamericana*, 34(3), 367-382.

Espinoza Gallego, I. & Symonds Argüelles, C. (2009) Zeolita natural como filtro de metales pesados (Tesis de pregrado). Universidad de Sonora. Hermosillo, Sonora, México.

Huamani-Yupanqui, H. A., Huauya-Rojas, M. Á., Mansilla-Minaya, L. G., Florida-Rofner, N., & Neira-Trujillo, G. M. (2012). Presencia de metales pesados en cultivo de cacao (*Theobroma cacao* L.) orgánico. *Acta agronómica*, 61(4), 339.

Huang, Q., Wan, Y., Luo, Z., Qiao, Y., Su, D., & Li, H. (2019). The effects of chicken manure on the immobilization and bioavailability of cadmium in the soil-rice system. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 1-12.

Huaynates, J. (2014). Efecto de la materia orgánica en la absorción de cadmio en el suelo en la localidad de Supte (Tesis de pregrado). Universidad Nacional Agraria de la Selva, Tingo María, Perú.

Hurtado Mora, L. E. (2012). Evaluación de varias enmiendas para recuperar suelos cacaoteros contaminados con Cadmio (Cd) en condiciones de invernadero (Bachelor's thesis, Quevedo: UTEQ).

ICCO (2015) Report by Chairman on the Meeting of the ICCO Ad Hoc Panel on Fine or Flavour Cocoa to Review Annex “C” Of the International Cocoa Agreement, 2010.

Jaramillo Jaramillo, D. F. (2002). Introducción a la ciencia del suelo. Universidad Nacional de Colombia, Medellin, Colombia.

Jiménez Tobón, C. S. (2015). Estado legal mundial del cadmio en cacao (*Theobroma cacao* L.): fantasía o realidad. *Producción+ Limpia*, 10(1), 89-104.

Liu, L., Chen, H., Cai, P., Liang, W., & Huang, Q. (2009). Immobilization and phytotoxicity of Cd in contaminated soil amended with chicken manure compost. *Journal of Hazardous Materials*, 163(2-3), 563-567

Llactas Flores, M. (2016). Influencia de la dosis de aplicación de dolomita en la concentración de cadmio en las almendras de cacao en parcelas de la COOPAIN.

Marcano, T. H. (2011). La contaminación con cadmio en suelos agrícolas. *Venesuelos*, 8(1 y 2), 42-47.

Meter, A., Atkinson, R. J., & Laliberte, B. (2019). Cadmio en el cacao de América Latina y el Caribe: Análisis de la investigación y soluciones potenciales para la mitigación.

MINAGRI (2018). Análisis de la cadena productiva de cacao con enfoque en los pequeños productores de limitado acceso al mercado. Recuperado de: http://agroaldia.minagri.gob.pe/biblioteca/download/pdf/tematicas/f-taxonomia_plantas/f01-cultivo/2018/cadena_cacao_nov188.pdf

Mite, F., Carrillo, M., & Durango, W. (2010). Avances del monitoreo de presencia de cadmio en almendras de Cacao, suelos y aguas en Ecuador. In XII Congreso Ecuatoriano de la Ciencia del Suelo.

Morales, O., Borda, A., Argandoña, A., Farach, R., Garcia, L., & Lazo, K. (2015). La alianza cacao Perú y la cadena productiva del cacao fino de aroma. Lima: ESAN. Recuperado de: <http://www.esan.edu.pe/publicaciones/2015/08/17/La%20Alianza%20Cacao%20Per%C3%BA%20para%20web.pdf>

Nazar Cipriano, J. (2011). Efecto de la dolomita en el crecimiento del *Theobroma cacao* L.(CLON CCN-51) en un suelo ácido bajo condiciones de vivero en Tingo María (Tesis de pregrado). Universidad Nacional Agraria de la Selva, Tingo María, Perú.

Obaji, A., Romero, K., Combatt, E., Díaz, L., Burgos, S., Urango, I., & Marrugo, J. (2017, July). Evaluación de materiales como potenciales retenedores de metales pesados para su aplicación como enmiendas en suelos contaminados. Memorias III Seminario Internacional de Ciencias Ambientales SUE-Caribe , p.209-211.

Oliveira, T. (2016). Potencialidades do vermicomposto, de seu resíduo sólido (da extração de substâncias húmicas), do biochar e de humina para o uso na remediação de solo contaminado com cádmio. 2016. 61 f. Dissertação (Mestrado em Fitossanidade e Biotecnologia Aplicada). Instituto de Ciências Biológicas e da Saúde, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, RJ, 2016.

Orozco, María & Thienhaus, Susanne. (1997). Efecto de la gallinaza en plantaciones de cacao (*Theobroma cacao* L.) en desarrollo.. *Agron Mesoam.* 8. 10.15517/am.v8i1.24735.

Ramtahal, G., Umaharan, P., Hanuman, A., Davis, C., & Ali, L. (2019). The effectiveness of soil amendments, biochar and lime, in mitigating cadmium bioaccumulation in *Theobroma cacao* L. *Science of The Total Environment*, 693, 133563.

Reglamento (UE) N° 488/2014, Diario Oficial de la Unión Europea, 12 de Mayo de 2014. (DOL 138 de 13-05- 2014)

Rodríguez-Serrano, M., Martínez-de la Casa, N., Romero-Puertas, M. C., Del Río, L. A., & Sandalio, L. M. (2008). Toxicidad del cadmio en plantas. *Revista Ecosistemas*, 17(3).

Paredes Melesio, R., María Ramírez, A., Osuna Ceja, E. S., Alamilla Gómez, P., & Mandujano Bueno, A. (2013). Zeolita Natural. Alternativa ecológica y económica para la agricultura de temporal en México.

Patiño, G., Puentes-Páramo, Y. J., & Menjivar-Flores, J. C. (2017). Relación entre el pH y la disponibilidad de nutrientes para cacao en un entisol de la Amazonia colombiana. *Corpoica Ciencia y Tecnología Agropecuaria*, 18(3), 529-541.

Pastor, Santiago (2020). EROSIÓN GENÉTICA DEL CACAO. Revista AGRONOTICIAS, N ° 475, 44-46.

Rodríguez-Serrano, M., Martínez-de la Casa, N., Romero-Puertas, M. C., Del Río, L. A., & Sandalio, L. M. (2008). Toxicidad del cadmio en plantas. Revista Ecosistemas, 17(3)

Ruiz Pinedo, V. (2012). Efecto de la dolomita en las propiedades físicas y químicas del suelo, en el cultivo de cacao (*Theobroma Cacao L.*) bajo condiciones de acidez, en Ricardo Palma-Naranjillo (Tesis de pregrado). Universidad Nacional Agraria de la Selva. Facultad de Recursos Naturales Renovables, 2012.

Shahid, M., Dumat, C., Khalid, S., Niazi, N. K., & Antunes, P. M. C. (2016). Cadmium Bioavailability, Uptake, Toxicity and Detoxification in Soil-Plant System. Reviews of Environmental Contamination and Toxicology Volume 241, 73–137.

Venegas Sepúlveda, A. (2015). Evaluación de la adición de materiales de origen orgánico para la remediación de suelos contaminados con metales pesados. (Tesis post-grado). Universitat de Barcelona.

Villegas, Y. (2011). Propuesta para la capacitación de la población estudiantil en la elaboración de compost. la Unidad Educativa “Francisco Javier Urbina”, de Flor de PATRIA, Municipio Pampán. Estado Trujillo. Trabajo de Grado. Universidad de los Andes NURR Venezuela.

Wang, L., Xu, Y., Liang, X., Sun, Y., Lin, D., & Dong, R. (2014). Effects of biochar and chicken manure on cadmium uptake in pakchoi cultivars with low cadmium accumulation. *China Environmental Science*, 34(11), 2851-2858.

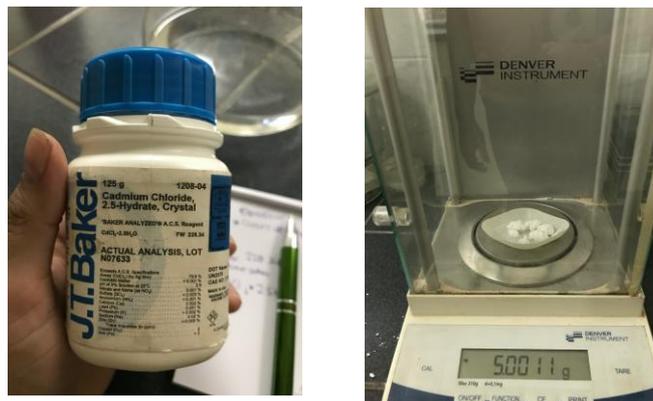
Zamora, E. C. D., Reyes-Evangelista, L. A., Aldoradin-Puza, E., Londoño-Bailon, P., & Aleman-Polo, J. M. (2020). Cd and Pb reduction in cocoa (*Theobroma cacao*) nib using two organic amendments. *Revista Colombiana De Investigaciones Agroindustriales*, 7(1), 20-29

11. ANEXOS

Anexo 1. Tamizado de sustrato, relleno y pesado de macetas.



Anexo 2. Pesado de cloruro de cadmio para la contaminación del sustrato



Anexo 3. Obtención de mazorcas de la estación experimental “El Choclino”



Anexo 4. Extracción del mucilago de las semillas de cacao y pregerminado



Anexo 5. Recolección de compost de la estación experimental Juan Bernito



Anexo 6. Procesamiento de las enmiendas orgánicas para su análisis en laboratorio



Anexo 7. Incorporación de enmiendas al sustrato y etiquetado de macetas



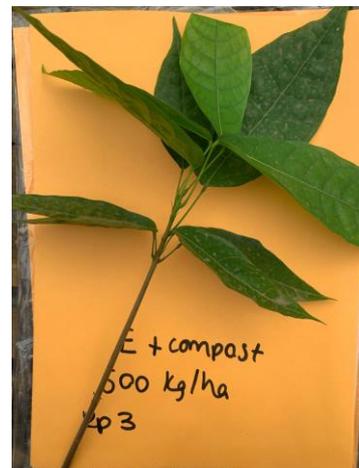
Anexo 8. Crecimiento de plantones



Anexo 9. Riego de plantones



Anexo 10. Lavado de raíces y etiquetado de muestras



Anexo 11. Pesado de biomasa seca aérea y radicular



Anexo 12. Procesamiento de muestras



Anexo 13. Código de tratamientos

Código	Repetición	Tratamiento	Dosis dolomita	Dosis enmienda orgánica
1	1	Encalado	15 g	0 g
2	2			
3	3			
4	4			
5	5			
6	1	Encalado + Compost	15 g	1.29 g
7	2			
8	3			
9	4			
10	5			
11	1	Encalado + Compost	15 g	2.62 g
12	2			
13	3			
14	4			
15	5			
16	1	Encalado + Compost	15 g	5.23 g
17	2			
18	3			
19	4			
20	5			
21	1	Encalado + Compost	15 g	10.47 g
22	2			
23	3			
24	4			
25	5			
26	1	Encalado + Zeolita	15 g	1.29 g

27	2			
28	3			
29	4			
30	5			
31	1	Encalado + Zeolita	15 g	2.62 g
32	2			
33	3			
34	4			
35	5			
36	1	Encalado + Zeolita	15 g	5.23 g
37	2			
38	3			
39	4			
40	5			
41	1	Encalado + Zeolita	15 g	10.47 g
42	2			
43	3			
44	4			
45	5			
46	1	Encalado + Biochar	15 g	1.29 g
47	2			
48	3			
49	4			
50	5			
51	1	Encalado + Biochar	15 g	2.62 g
52	2			
53	3			
54	4			
55	5			
56	1	Encalado + Biochar	15 g	5.23 g
57	2			
58	3			
59	4			
60	5			
61	1	Encalado + Biochar	15 g	10.47 g
62	2			
63	3			
64	4			
65	5			

66	1	Encalado + Gallinaza	15 g	1.29 g
67	2			
68	3			
69	4			
70	5			
71	1	Encalado + Gallinaza	15 g	2.62 g
72	2			
73	3			
74	4			
75	5			
76	1	Encalado + Gallinaza	15 g	5.23 g
77	2			
78	3			
79	4			
80	5			
81	1	Encalado + Gallinaza	15 g	10.47 g
82	2			
83	3			
84	4			
85	5			
86	1	Testigo con cadmio		
87	2			
88	3			
89	4			
90	5			

Anexo 14. Prueba de normalidad, de homocedasticidad y análisis de varianza (ANOVA) para todos los parámetros evaluados

Parámetros	Prueba de normalidad			Prueba de homocedasticidad			ANOVA		
	P (Shapiro-Wilk)	NO CUMPLE (P<0.05)	CUMPLE (P>0.05)	P (Breusch-Pagan)	NO CUMPLE (P<0.05)	CUMPLE (P>0.05)	P(VA-LOR)	ACEPTA HO (P>0.05)	RECHAZA HO (P<0.05)
Altura	0.2843		X	0.56095		X	0.001		X
Diámetro	0.1077		X	0.30148		X	0.000		X
Biomasa aérea	0.5761		X	0.87269		X	0.017		X
Biomasa radicular	0.7074		X	0.15951		X	0.026		X
Biomasa total	0.1988		X	0.93918		X	0.015		X
Cadmio foliar	0.2057		X	0.39441		X	0.001		X
Cadmio radicular	0.3521		X	0.84333		X	0.000		X
pH	0.5491		X	0.83565		X	0.000		X
Cadmio disponible en suelos	0.1516		X	0.10849		X	0.000		X