

UNIVERSIDAD CATÓLICA SEDES SAPIENTIAE
FACULTAD DE INGENIERÍA AGRARIA



Efecto de tres enmiendas calcáreas en la reducción de cadmio en
suelos cultivados con “cacao” *Theobroma cacao* L., distrito de
Calzada-Moyobamba

**TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE
INGENIERO AGRARIO CON MENCIÓN FORESTAL**

AUTORA

Jenyfer Massiel Rosales Rivera

ASESOR

Carlos Hugo Egoávil De la Cruz

Rioja, Perú

2022

METADATOS COMPLEMENTARIOS

Datos del autor

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

Datos del asesor

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

Datos del Jurado

Datos del presidente del jurado

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

Datos del segundo miembro

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

Datos del tercer miembro

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

Datos de la obra

Materia*	
Campo del conocimiento OCDE Consultar el listado:	
Idioma (Normal ISO 639-3)	
Tipo de trabajo de investigación	
País de publicación	
Recurso del cual forma parte (opcional)	
Nombre del grado	
Grado académico o título profesional	
Nombre del programa	
Código del programa Consultar el listado:	

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

ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS

ACTA N° 018 - 2022/UCSS/FIA/DI

Siendo las 04:00 p. m. del día 23 de febrero de 2022 - Universidad Católica Sedes Sapientiae, el Jurado de Tesis, integrado por:

- | | |
|-----------------------------------|-----------------|
| 1. Amada Victoria Larco Aguilar | presidente |
| 2. Geomar Vallejos Torres | primer Miembro |
| 3. Luis Darío Santillán García | segundo Miembro |
| 4. Carlos Hugo Egoávil De la Cruz | asesor |

Se reunieron para la sustentación de la tesis titulada **Efecto de tres enmiendas calcáreas en la reducción de cadmio en suelos cultivados con "cacao" *Theobroma cacao* L., distrito de Calzada-Moyobamba** que presenta la bachiller en Ciencias Agrarias con mención Forestal, **Jenyfer Massiel Rosales Rivera** cumpliendo así con los requerimientos exigidos por el reglamento para la modalidad de titulación; la presentación y sustentación de un trabajo de investigación original, para obtener el Título Profesional de **Ingeniero Agrario con mención Forestal**.

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

APROBAR

DESAPROBAR

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

Lima, 23 de febrero de 2022.



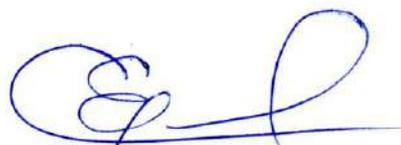
Amada Victoria Larco Aguilar
PRESIDENTE



Geomar Vallejos Torres
1° MIEMBRO



Luis Darío Santillán García
2° MIEMBRO



Carlos Hugo Egoávil De la Cruz
ASESOR

DEDICATORIA

Dedico esta tesis en primer lugar a Dios por brindarme la oportunidad de disfrutar del apoyo incondicional y lucha perseverante de una maravillosa familia, asimismo, por mantenerse presente en mí guiándome por el camino del bien y la felicidad, principalmente por su protección y misericordia que me dan la fortaleza para seguir en pie de lucha hacia mis sueños.

Con amor y cariño a mis padres, Joel y Élcida por regalarme la vida y su confianza infinita. Gracias por su compañía durante el proceso de la carrera profesional que me permitirá gozar a bien en mi futuro, ellos me apoyaron para cumplir mis metas profesionales. Por todo ello sólo les devuelvo lo que me brindaron a lo largo de mi vida. Los amo papá y mamá.

A mis hermanas Dalila, Abigail y Betsabé, por enseñarme a luchar con el alma para alcanzar nuestros objetivos, por alegrarme la vida con sus sonrisas y demostrarme que el verdadero amor está presente en los momentos más difíciles. Las amo con el alma princesas.

AGRADECIMIENTO

Al ingeniero Carlos Hugo Egoávil De la Cruz, en primera instancia por aceptar ser mi asesor y orientar mi camino académico a través de sus enseñanzas y sus experiencias impartidas en aulas. Pero sobre todo por brindarme su amistad y apoyo incondicional durante el proceso de mi formación profesional.

A la Universidad Católica Sedes Sapientiae, por acogerme en sus aulas durante cinco años como estudiante de la carrera profesional de Ingeniería Agraria con mención Forestal.

Al Proyecto Especial Alto Mayo (PEAM) y la Universidad Nacional de San Martín, por el apoyo a través de sus profesionales especialistas en el área de manejo de suelos, quienes brindaron las facilidades para el uso de sus laboratorios para el análisis de suelos muestreados en este proyecto.

Al señor Alex Gonzales por concederme el permiso para la evaluación *in situ* de este proyecto de investigación en su terreno con cultivo de “cacao”, asimismo, por brindar todas las facilidades para su ejecución.

ÍNDICE GENERAL

	Pág.
DEDICATORIA	v
AGRADECIMIENTO	vi
ÍNDICE DE TABLAS	ix
ÍNDICE DE APÉNDICES	xi
RESUMEN	xii
ABSTRACT	xiii
INTRODUCCIÓN	1
OBJETIVOS	3
CAPÍTULO I: MARCO TEÓRICO	4
1.1. Antecedentes del estudio	4
1.2. Bases teóricas especializadas	10
1.2.1. Suelos en la provincia de Moyobamba	10
1.2.2. Suelo como fuente de evaluación físico-químico	12
1.2.3. Suelos contaminados	13
1.2.4. Cadmio en el suelo	13
1.2.5. Fuentes de cadmio	14
1.2.6. Toxicidad del cadmio en el suelo	15
1.2.7. Cadmio en las plantas	15
1.2.8. Cadmio en las almendras de cacao	16
1.2.9. Enmiendas cálcicas	16
1.2.10. Factores que influyen al incremento de cadmio en el suelo	17
CAPÍTULO II: MATERIALES Y MÉTODOS	19
2.1. Diseño de la investigación	19
2.1.1. Lugar y fecha	19
2.1.2. Materiales	26
2.1.3. Descripción del experimento	26
2.1.4. Tratamientos	32
2.1.5. Unidades Experimentales	35
2.1.6. Identificación de las variables y su mensuración	35
2.1.7. Diseño estadístico del experimento	36

2.1.8. Análisis estadístico de datos.....	36
CAPÍTULO III: RESULTADOS	37
CAPÍTULO IV: DISCUSIONES	42
CAPÍTULO V: CONCLUSIONES	46
CAPÍTULO VI: RECOMENDACIONES	47
REFERENCIAS	48
TERMINOLOGÍA.....	53
APÉNDICES	56

ÍNDICE DE TABLAS

Pág.

Tabla 1. <i>Suelos del distrito de Calzada (11,687.84 has.)</i>	11
Tabla 2. <i>Capacidad de uso mayor de los suelos del distrito de Calzada</i>	11
Tabla 3. <i>Temperatura y precipitación del distrito durante el periodo de estudio</i>	21
Tabla 4. <i>Principales especies forestales de importancia en Calzada</i>	23
Tabla 5. <i>Niveles máximos de Cadmio que exige la Unión Europea</i>	26
Tabla 6. <i>Registro del contenido de cadmio en tres parcelas de cacao</i>	27
Tabla 7. <i>Características del área experimental</i>	28
Tabla 8. <i>Cálculo básico de equivalente en gramos</i>	34
Tabla 9. <i>Cantidad de enmiendas calcáreas aplicadas por planta según tratamiento</i>	34
Tabla 10. <i>Cantidad de enmiendas calcáreas a aplicarse por unidad experimental</i>	35
Tabla 11. <i>Mensuración de las variables</i>	36
Tabla 12. <i>Valores de cambio en tres parcelas de cacao</i>	37
Tabla 13. <i>Niveles de cadmio acumulado en un muestreo preliminar</i>	38
Tabla 14. <i>Cadmio acumulado en el área de estudio</i>	38
Tabla 15. <i>Promedio del contenido de cadmio antes y después de la aplicación de tratamientos</i>	39
Tabla 16. <i>Análisis de varianza del contenido de cadmio a los noventa día</i>	39
Tabla 17. <i>Análisis de varianza del contenido de cadmio a los sesenta días</i>	41
Tabla 18. <i>Análisis de varianza del contenido de cadmio a los noventa días</i>	68
Tabla 19. <i>Análisis de varianza del contenido de cadmio respecto a la aplicación de SO₄Ca</i>	68
Tabla 20. <i>Análisis de varianza del contenido de cadmio respecto a la aplicación de CO₃Ca</i>	69
Tabla 21. <i>Análisis de varianza del contenido de cadmio respecto a la aplicación de CaMg(CO₃)₂</i>	69
Tabla 22. <i>Reducción de cadmio respecto al tiempo inicial (0.49 ppm de cadmio al tiempo 0)</i>	70
Tabla 23. <i>Promedio del contenido de cadmio a los noventa días para la prueba de Tukey</i>	71

ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
<i>Figura 1.</i> Foto tomada del suelo que muestra la presencia natural de hojarascas.....	12
<i>Figura 2.</i> Vista panorámica de la estructura vegetal de selva alta.	20
<i>Figura 3.</i> Datos de temperatura y precipitación del área de estudio en el tiempo de trabajo de campo.....	22
<i>Figura 4.</i> Foto de la estructura vegetal del Bosque húmedo.	24
<i>Figura 5.</i> Foto del área de estudio “Fundo Nuevo Celendín”..	25
<i>Figura 6.</i> Técnica de muestreo.	30
<i>Figura 7.</i> Valores de materia orgánica, pH y capacidad de intercambio catiónico en el suelo del “Fundo Nuevo Celendín”.	39
<i>Figura 8.</i> Cadmio acumulado en el suelo según muestreo y fuente..	40
<i>Figura 9.</i> Prueba de Tukey resultante de la aplicación de SO_4Ca (yeso) en los diferentes periodos de muestreo.....	70
<i>Figura 10.</i> Prueba de Tukey de la aplicación de CO_3Ca (caliza) en diferentes periodos de muestreo.	71
<i>Figura 11.</i> Prueba de Tukey de aplicación de $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ (dolomita) en diferentes periodos de muestreo.....	72
<i>Figura 12.</i> Resultado de la prueba de Tukey a los noventa días.....	73

ÍNDICE DE APÉNDICES

	Pág.
Apéndice 1. Área experimental	56
Apéndice 2. Delimitación de área para la toma de muestras.....	57
Apéndice 3. Método de selección de área para toma de muestras.....	58
Apéndice 4. Encalado y enmiendas	59
Apéndice 5. Depósito y Análisis de muestras de suelo.....	60
Apéndice 6. El hábitat, Planta y Fruto del Cacao	61
Apéndice 7. Resultado de cadmio acumulado en tres parcelas iniciales	62
Apéndice 8. Resultado del análisis de suelo inicial	65
Apéndice 9. Resultados de cadmio según tratamiento, repetición y tiempo de muestreo ...	66

RESUMEN

En los últimos años los suelos agrícolas con cultivos de “cacao” han registrado elevadas concentraciones de cadmio en distintas regiones del Perú. En el año 2018 una investigación realizada por Lena Geiger describió las altas concentraciones de cadmio en los suelos con cultivo de “cacao” ubicados en el distrito de Calzada perteneciente al departamento de San Martín. El presente estudio tuvo como objetivo determinar a través de análisis físico-químico y absorción atómica del suelo en periodos mensuales, el efecto de tres enmiendas calcáreas como carbonato de calcio (CO_3Ca), sulfato de calcio (SO_4Ca) y carbonato doble de calcio y magnesio ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$), en la reducción de cadmio en los suelos con cultivo de “cacao” *Theobroma cacao* L.

Este estudio tuvo un enfoque cuantitativo con alcance explicativo. Con tal finalidad se instaló parcelas con cuatro tratamientos y tres repeticiones, en un área de 972 m² por un periodo de seis meses. Para estimar las dosis por enmienda se utilizó como base la concentración de cadmio registrado en los primeros análisis de suelo del área de estudio, estos análisis permitieron plantear los tratamientos en estudio y las dosis correspondientes para cada ejemplar: 5,545; 9,540 y 10,217 g por planta en las dosis usadas de cal, yeso y dolomita respectivamente, y además de un tratamiento testigo sin aplicación de enmienda. Las muestras fueron colectadas mensualmente desde julio hasta diciembre del 2019. El proceso permitió evaluar la dinámica del cadmio en el suelo a una concentración de 0,96 mg.kg⁻¹. Los resultados obtenidos demuestran que, los contenidos de cadmio después de 90 días de la aplicación fueron 0,52; 0,37; 0,41 y 0,32 mg.kg⁻¹ para los tratamientos testigo, yeso, cal y dolomita respectivamente, En conclusión, el efecto de la fuente calcárea con mayor reducción de cadmio disponible en el suelo fue la dolomita.

Palabras claves:

Cadmio disponible, carbonato de calcio, dolomita, enmienda calcárea, yeso, *Theobroma cacao* L.

ABSTRACT

In agricultural soils with “cacao” cultivation, high concentrations of cadmium have been recorded. In 2018 an investigation carried out by Lena Geiger described high concentrations of cadmium in the soils of “cacao” cultivation located in the Calzada district, belonging to the department of San Martin. The objective of this study was to determine, through physical-chemical analysis and atomic absorption of the soil in monthly periods, the effect of three calcareous amendments such as calcium carbonate (CO_3Ca), calcium sulfate (SO_4Ca) and double calcium and magnesium carbonate ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$), on the reduction of cadmium in soils with cultivation of "cacao" *Theobroma cacao* L.

This study had a quantitative approach with explanatory scope. For this purpose, plots were installed with four treatments and three repetitions, in an area of 972 m² during the six-month period. To estimate the doses per amendment, the concentration of cadmium registered in the first soil analysis of the study area was used as a base, these analyzes allowed to propose the treatments under study: 5,545; 9,540 and 10,217 g per plant, the doses used of lime, gypsum and dolomite respectively, and in addition to a control treatment without application of amendment. The only response variable was the cadmium content in the soil. The samples were collected monthly from July to December 2019. The process allowed evaluating the dynamics of cadmium in the soil with a concentration of 0,96 mg.kg⁻¹. The results obtained show that the cadmium contents after 90 days of the application were 0,52; 0,37; 0,41 and 0,32 ppm for the control treatments, gypsum, lime and dolomite respectively, In conclusion effect of dolomite in the reduction of available cadmium in the soil it was higher compared to calcium carbonate and agricultural gypsum

Keywords:

Cadmium available, calcium carbonate, dolomite, calcareous amendment, plaster, *Theobroma cacao* L.

INTRODUCCIÓN

El cadmio es un elemento metálico, que por su naturaleza y composición este metal en cantidades elevadas es altamente tóxico para el consumo humano, además es transmisible a través de alimentos vegetales que provienen de zonas de producción contaminadas o acumuladas en forma natural. Estudios previos reportan el incremento de los niveles de cadmio acumulados en suelos con fines agrícolas debido a la desmedida fertilización fosfatada, perjudicando a los agricultores con pequeñas y grandes extensiones de cultivos disminuyendo su calidad y limitando su exportación al mercado exterior (Charrupi y Martínez, 2017). Según los estándares de calidad ambiental para suelo establecen parámetros de $1,4 \text{ mg.kg}^{-1}$ de cadmio como máximo valor permisible en suelos agrícolas (Ministerio del Ambiente [MINAM], 2013), limitando la producción de cultivos debido a la toxicidad por cadmio. El problema es mayor cuando este metal se acumula dentro de los productos agrícolas y sus derivados como el chocolate para beber o cacao en polvo cuyo nivel máximo de cadmio permisible es 0.6 mg.kg^{-1} según lo exige la Unión Europea (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, 2018).

En términos de biodiversidad, Perú aporta el 60 % de la diversa variedad del cacao mundial. Solo en el departamento de San Martín, se cultivan cerca de 37 800 ha de cacao anualmente con un rendimiento de 800 kg ha^{-1} siendo el responsable del 40 % de las exportaciones de cacao a nivel nacional (Correa, 2019), factor a considerar siendo el departamento de San Martín el primer productor de cacao a nivel nacional y principal aportador del recurso para la elaboración de chocolate y otros subproductos de consumo humano. Por lo que resulta importante realizar investigación respecto a la reducción del cadmio disponible en el suelo para disminuir su absorción por las plantas de cacao. Pues debido a las altas concentraciones del metal, conformamos uno de los países restringidos para su venta (Herrera, 2011), lo que influye directamente en la exportación de nuestro producto bandera.

La dinámica del cadmio en el suelo depende de los factores que lo componen, como son: pH, textura y estructura, también las precipitaciones y las fuentes de origen de cadmio (Charrupi y Martínez, 2017). Para Hernández *et al.* (2019) la forma para contrarrestar la disponibilidad

del metal en el suelo es a través de la aplicación de enmiendas calcáreas (carbonato de calcio y magnesio, carbonato de calcio y sulfato de calcio) al suelo agrícola pero su reacción se encuentra íntimamente vinculada a la capacidad de intercambio catiónico (CIC) del suelo, porcentaje de materia orgánica y los niveles de pH, así como a las características climáticas de la zona. Las enmiendas calcáreas son compuestos básicos que provocan la dispersión de los iones de cadmio actuando por acción de masas en el sistema edáfico. Produciendo, de tal manera, la reducción de la disponibilidad de cadmio para las plantas de cacao mejorando su calidad, además de ello la adquisición de estas sustancias básicas resultan muy accesibles a la bolsa económica de los productores debido a su bajo costo, por lo que resulta viable su uso.

El distrito de Calzada presenta altas concentraciones de cadmio (mayor a 15 mg.kg^{-1}) en las almendras de “cacao” (Geiger, 2018) por lo que se deduce la existencia de cadmio en el suelo. Considerando los registros encontrados respecto a las cantidades de cadmio acumulado en suelos con cultivo de cacao en Calzada, el objetivo del presente estudio fue evaluar el efecto de tres enmiendas en la reducción del cadmio disponible en el suelo para disminuir su absorción por las plantas, asimismo, determinar la enmienda con mayor efecto positivo, en la reducción del cadmio disponible en el suelo, para ello se analizaron las muestras de suelo tomadas en cada uno de los tratamientos. Por tal motivo, se presentan los resultados, siguiendo la secuencia ordenada de capítulos: marco teórico, materiales y método, resultados, discusión y por último las recomendaciones, además de ello en los apéndices se encuentra la base de datos y tomas fotográficas rescatadas en la presente investigación.

OBJETIVOS

Objetivo general

Evaluar el efecto de tres enmiendas calcáreas en la reducción de disponibilidad del cadmio en el suelo con cultivo de “cacao” *Theobroma cacao* L. en el distrito de Calzada-Moyobamba.

Objetivos específicos

- a) Analizar los niveles de cadmio acumulado en los suelos con el cultivo de “cacao” *Theobroma cacao* L. y su relación con los factores que influyen en el incremento de cadmio en el suelo: Niveles de pH, porcentaje de materia orgánica y capacidad de intercambio catiónico.
- b) Comparar el contenido de cadmio en el suelo antes y después de la aplicación de enmiendas calcáreas: CO_3Ca (calcita), $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ (dolomita) y SO_4Ca (yeso). En tres tiempos diferentes: 30, 60 y 90 días después de aplicadas las enmiendas.
- c) Identificar la enmienda calcárea más adecuada para ser utilizada en la reducción de disponibilidad de cadmio en los suelos del distrito de Calzada, Moyobamba y su efecto a mayor tiempo de permanencia en el suelo.

CAPÍTULO I: MARCO TEÓRICO

1.1. Antecedentes del estudio

Internacional

Chávez *et al.* (2015) realizaron una investigación para conocer la concentración de cadmio en granos de cacao y su relación con el suelo, el objetivo fue conocer la mayor concentración del cadmio en suelos a diferentes profundidades, así como la concentración en plantas de cacao. El estudio fue realizado en las provincias de Guayas y El Oro en Ecuador. La investigación tuvo un enfoque cuantitativo de alcance experimental y correlativo, donde tomaron muestras en 19 granjas a cuatro profundidades de 0-5, 5-15, 15-30 y 30-50 cm, respectivamente. La técnica utilizada consistió en determinaciones químicas a nivel de laboratorio, tanto en hojas, suelo y granos, analizados mediante absorción atómica. Los datos obtenidos en campo fueron procesados en JMP Statistical Software, versión 8.0.2, SAS Institute, 2009. A fin de evaluar la distribución del cadmio en los diferentes perfiles del suelo. El cálculo de Cd total recuperable y extraíble en cada profundidad fue realizado mediante un ANOVA utilizando la misma herramienta estadística. Los resultados tomaron valores de 1,54 y 0,85 mg.kg⁻¹ en la superficie y 0,40 y 0,10 mg.kg⁻¹ a mayor profundidad, concluyendo que la acumulación de Cd en la superficie del suelo produce exceso de Cd en los granos de cacao.

Sánchez (2013) en el estudio “Modelización de los procesos químicos relacionados con la dinámica del cadmio en dos suelos agrícolas de Venezuela” analizó la movilidad, transporte y distribución del metal en el sistema suelo. La investigación tuvo el objetivo de modelar los procesos químicos asociados a la dinámica del cadmio mediante la adsorción y el fraccionamiento secuencial del metal a través del método Tessier, con la aplicación de dosis de fósforo sobre el contenido de Cd disponible y Cd en el tejido vegetal. Por lo cual realizó la incubación de muestras de suelo a nivel de laboratorio que contenían concentraciones

considerables de cadmio. El diseño estadístico realizado fue diseño de bloques completamente al azar aleatorizado y para el análisis de datos empleó el software SPSS Statistics. La técnica de evaluación entre las propiedades físicas y químicas del suelo lo realizó mediante un análisis de correlación y regresión lineal. Los resultados obtenidos de la investigación indicaron que la absorción de cadmio incrementó con el mayor contenido de arcilla, materia orgánica y pH ácido del suelo, el mismo que explicó en un modelo matemático de difusión y cinético. Concluyó que el 40 % de cadmio está ligado a la fracción intercambiable y el resto a la fracción residual, materia orgánica e hidrosoluble; en otro suelo obtuvo que esta relación tuvo un valor del 70 % y que los modelos matemáticos de cada uno de los suelos no muestran diferencias significativas respecto al cadmio absorbido.

Contreras *et al.* (2005) investigaron el efecto de dos fuentes de carbonato de calcio (CaCO_3) sobre la disponibilidad de cadmio para plantas de “cacao” *Theobroma cacao L.*, en suelos de Barlovento, Estado de Miranda. Tuvieron como objetivo evaluar el efecto que el carbonato de calcio produce en la dinámica de absorción de cadmio en suelos y plantas de cacao. El ensayo fue establecido en un invernadero durante el periodo de cinco meses, realizado en las localidades de Agua Clara, Capaya, Cumbo, Curiepe y Tapipala, Venezuela. Recolectaron 5 muestras, una por cada localidad, a 20 cm de profundidad. El diseño estadístico utilizado en campo fue diseño de bloques completamente al azar y en laboratorio diseño completamente al randomizado. La técnica utilizada para determinar el efecto del carbonato de calcio fue la determinación química en suelo y granos, mediante el análisis foliar y de absorción atómica. El proceso estadístico fue realizado a través de un ANOVA utilizando el software estadístico SPSS. Los resultados indicaron que al aplicar CaCO_3 y CaCl_2 la absorción de cadmio por las plantas disminuye, pero con el CaCl_2 es menor. Concluyeron que la disminución del metal se debe a que además de su absorción por las plantas, este pudo ser lavado y desplazado por el calcio aplicado.

Nacional

Sabino (2020) ejecutó una investigación titulada “Determinación de niveles de enmiendas para la remediación de suelos contaminados con cadmio (Cd) en el cultivo de “cacao” *Theobroma cacao L.*, distrito de San Alejandro. Ucayali. Perú” tuvo por objetivo determinar el nivel de enmienda que permita remediar suelos contaminados con cadmio en el cultivo de

cacao, para este estudio utilizó dos tipos de enmiendas y cada una con distintas dosis, según el autor las plantas que utilizó estuvieron entre edades de 12 y 15 años, además agregó que esta investigación es de tipo aplicada y experimental. Por otro lado, el diseño que el autor desarrolló fue el diseño en bloques completos al azar con arreglo en parcelas divididas, en el cual considero como fuente principal a la cascarilla de arroz y la dolomita; en cada subparcela colocó cuatro dosis: 0, 1, 2 y 3 t/ha, además de ello consideró cuatro repeticiones, haciendo un total de 32 unidades experimentales. El autor considero 256 plantas dentro de la muestra, así como una toma de muestra inicial a cada unidad experimental. Las variables que evaluó fueron: contenido de cadmio en el suelo y en las hojas, el análisis e interpretación de los resultados lo realizó a través del análisis de varianza, en los tratamientos en que encontró diferencias significativas utilizó la comparación múltiple tukey al 95 % de confianza, procesó la información con el programa estadístico SAS. Según los resultados, el autor señala que, en cuanto al contenido de cadmio en el suelo, la mayor reducción con la aplicación de cascarilla de arroz con la dosis de 1 t/ha, y con la aplicación de dolomita la mayor reducción fue con la dosis de 1 t/ha. En cuanto al contenido de cadmio en las hojas, el autor relata que no encontró diferencias a nivel de las fuentes, pero a nivel de dosis no encontró diferencias sin embargo aplicó la prueba de comparación y determinó que con la dolomita la mayor reducción fue con la dosis de 3 t/ha. Como conclusión el autor detalla que, la aplicación de dolomita y cascarilla de arroz permiten la corrección de cadmio.

Dávila (2019) realizó una investigación en Tingo María la cual llevó por título “Uso de enmiendas en la reducción del contenido de cadmio en el suelo y en los granos de “cacao” *Theobroma cacao* L., clon CCN-51” la cual tuvo por objetivo evaluar el efecto de las enmiendas; magnocal, dolomita y compost en las propiedades fisicoquímicas del suelo y el contenido de cadmio en los granos de cacao orgánico, el autor señala que, antes de ejecutar la parte experimental, realizó análisis inicial del campo, las muestras fueron enviadas a la Universidad Nacional Agraria La Molina en la ciudad de Lima. El investigador manifestó que las plantas que usó para este experimento tuvieron 14 años. Los tratamientos que utilizó fueron siete: T0 es el testigo, el T1 fue con compost a dosis de 27 kg/planta, el T2 fue dolomita a dosis de 1,8 kg/planta, el T3 con dolomita a dosis de 3,6 kg/planta, el T4 mezcla de compost y dolomita a dosis de 27 y 1,8 kg/planta respectivamente, el T5 mezcla de compost y dolomita a dosis de 27 y 3,6 kg/planta respectivamente y T7 con magnocal a dosis de 2,7 kg/planta. Según el autor, empleó un diseño en bloques completos al azar, utilizó el

análisis de varianza y la prueba de comparación múltiple Duncan, ambas con un nivel del 5 % de significancia. Las variables que el autor evaluó fueron: Análisis fisicoquímico del suelo, cadmio total en el grano de cacao. En cuanto a los resultados de esta investigación, el autor resalta que: en cuanto a las propiedades físico químicas el T4 tuvo el mayor valor en cuanto al pH, en cuanto al contenido de materia orgánica, fósforo no encontró diferencia entre los tratamientos, en cuanto al contenido de potasio encontró diferencias entre los tratamientos, siendo el T4 quien realizó mayor aporte de este elemento al suelo; en cuanto al contenido de Ca, el mayor aporte fue con el T1, el mayor contenido de magnesio lo obtuvo con el T3, el menor nivel de la capacidad de intercambio catiónico fue con el T3. En cuanto al nivel de cadmio en el suelo y grano, el autor manifiesta que no existieron diferencias entre los tratamientos, a pesar de ello el cadmio se redujo aproximadamente en un 70 %. En conclusión, todos los tratamientos evidenciaron diferencia en la reducción de cadmio.

Tantalean y Huauya (2017) realizaron una investigación denominada “Distribución del contenido de cadmio en los diferentes órganos del cacao CCN-51 en suelo aluvial y residual en las localidades de Jacintillo y Ramal de Aspuzana” cuyo objetivo fue determinar la distribución de las cantidades de cadmio en los órganos de plantas de cacao seleccionando el clon CCN-51 cultivados en suelos residuales y aluviales de la provincia de Jacintillo y Ramal de Aspuzana, Tocache. El estudio tuvo un alcance exploratorio de enfoque cualitativo. La técnica utilizada fue la elaboración de calicatas para retirar muestras de suelo, las que fueron llevadas a laboratorio para determinar el contenido de cadmio por horizontes. Muestrearon plantas de cacao recolectando partes de la raíz, ramas, hojas, almendras y cáscaras. El contenido de cadmio disponible en el suelo fue conocido mediante el uso de extractante, sin embargo, para conocer el cadmio total en los tejidos de la planta utilizaron EDTA 0,05M, a pH 7; la concentración de cadmio fue determinada por absorción atómica. El procesamiento de datos obtenidos a partir de los análisis de suelos fue procesado mediante el uso del programa SPSS versión 22 e interpretado a través del ANOVA. Los autores obtuvieron como resultados que el cadmio tuvo como residual 1,71; 0,52 y 0,46 ppm, en los horizontes A, AB y C; sin embargo, en el suelo aluvial fue 1,26; 2,55; 3,68 y 1,80 ppm, en los horizontes A y capas AC, C1 y C2, respectivamente. Por otro lado, el contenido de cadmio total en los tejidos de las plantas sembradas en suelo residual fue 1,22; 2,29; 1,44; 0,84 y 0,77 ppm, y en el suelo aluvial fue de 1,14; 2,97; 2,84; 1,08 y 0,75 ppm, respecto a raíces, ramas, hojas, almendras y cáscaras. Por lo que el estudio concluyó en que el suelo

aluvial presenta mayor contenido de cadmio disponible en el suelo, respecto a los tejidos, el cadmio total con mayor acumulación se observó en las ramas, para ambos suelos residual y aluviales.

Llactas (2016) realizó el estudio “Influencia de la dosis de aplicación de dolomita en la concentración de cadmio en las almendras de cacao en parcelas de la COOPAIN” realizada en Huánuco en el sector Afilador, provincia de Leoncio Prado. El objetivo del estudio fue determinar el efecto de cuatro dosis de dolomita en la reducción de cadmio en las almendras cacao, la investigación tuvo un enfoque cuantitativo de alcance descriptivo y correlativo. Utilizó un diseño experimental de bloques completamente al azar (DBCA) con tres repeticiones y cinco tratamientos aplicados con cuatro dosis en función a la dolomita del suelo: T0 (0 g), T1 (500 g), T2 (1 000 g), T3 (1 500 g) y T4 (2 000 g); asimismo, usó el software SPSS para el procesamiento de datos y el análisis de varianza para cada uno de los tratamientos, así como la comparación de medias a través de la prueba de Duncan. Los resultados del estudio fueron: a) los suelos sin dolomita $0,980 \text{ mg.kg}^{-1}$ de Cd en la almendra; y b) los suelos con dolomita $0,487 \text{ mg.kg}^{-1}$ de Cd en la almendra. Mediante la aplicación de dosis 2000 g (T4) y 1000 g (T2) respectivamente, por otro lado, la aplicación de dolomita redujo el cadmio en el suelo a 0,497 ppm con 500 g (T1) de dolomita. Al finalizar concluyó que la reducción de los niveles de cadmio mediante la aplicación de dolomita tiene una influencia significativa en las almendras de cacao.

Cárdenas (2012) realizó un trabajo de investigación denominado “Presencia de cadmio en algunas parcelas de cacao orgánico en la Cooperativa Agraria Industrial Naranjillo”, en la provincia Leoncio Prado de la región Huánuco. El objetivo del estudio fue identificar el estado del cadmio acumulado en el cultivo de cacao (CCN 51) perteneciente a los agricultores de la cooperativa. En esta investigación aplicaron un Diseño experimental al azar que tuvo un alcance exploratorio y correlacional con enfoque cualitativo y cuantitativo. El autor seleccionó 20 parcelas y delimitó áreas de muestreo totalmente al azar en forma de zigzag, para la evaluación de muestras foliares con 40 hojas, almendras 1 200 g que fueron secadas durante 5 días hasta el 8 % de humedad. Los datos que obtuvieron de las evaluaciones fueron procesados y analizados en el programa SPSS, logrando como resultado, la alta densidad de cadmio en época en que el río Huallaga tiene seca, siendo los

valores de 1,28 y 2,57 mg.kg⁻¹ en las estaciones CH-01-CA y CH-10-CA. Del mismo modo en las vertientes de este existieron concentraciones de 0,51 y 1,85 mg.kg⁻¹ en las estaciones CH-07-CA (quebrada Lluto) y CH-09-CA (Río Chimao). Concluyó que, el uso constante y alto de materiales parentales contaminantes que son utilizados en los ríos Huallaga Y Tulumayo, viene generando el incremento del cadmio en las plantaciones de cacao orgánico.

Regional

Correa (2019) realizó una investigación en el Instituto de Cultivos Tropicales de la Banda Shilcayo – Tarapoto, San Martín, Perú, en el que buscó obtener respuestas al problema de la elevada acumulación de cadmio en las almendras de cacao. Tuvo como objetivo determinar el efecto de dos enmiendas calizas (dolomita e hidróxido de calcio) y tres enmiendas orgánicas (guano de isla, gallinaza y compost) en la absorción de cadmio en plantaciones de cacao, utilizando variables biométricas como: cadmio en la zona foliar y en la zona radicular de las plantas. Enfocó el estudio en identificar las características cualitativas y cuantitativas de la aplicación de enmiendas al cultivo de cacao, el alcance del trabajo experimental fue exploratorio. El estudio fue de tipo aplicativo, de alcance descriptivo y elaboró mediante un diseño experimental al azar. El número de muestras fueron 80 plántones de cacao del clon CCN 51, la técnica utilizada fue la observación y recolección de datos en campo y la metodología en este estudio fue realizado mediante la aplicación de enmiendas encalantes y orgánicas. Para el análisis estadístico de los datos obtenidos en laboratorio fue utilizado el programa estadístico SPSS para procesarlos e interpretarlos. Los resultados registrados en este estudio describieron que las enmiendas orgánicas redujeron el cadmio en un 81,48 % y la mayor reducción se obtuvo con la aplicación del guano de isla. Concluyendo que el mayor porcentaje de cadmio acumulado se manifiesta en las raíces en relación con la zona aérea.

Geiger (2018) realizó un estudio “Análisis de cadmio en suelos, hojas y granos de cacao (*Theobroma cacao* L.) y su relación con el manejo y los factores del suelo en las plantaciones de cacao - Calzada". El objetivo fue analizar y evaluar los factores que influyen a las elevadas concentraciones de cd en granos, hojas y suelo con cultivo de cacao, así como la relación entre ellas. El trabajo tuvo un alcance descriptivo y correlacional de enfoque cualitativo. Para conocer la situación actual de los suelos con cultivos de cacao en el distrito de Calzada ubicada en la provincia de Moyobamba, el autor caracterizó, evaluó las

cantidades de Cd en cultivos de cacao y analizó la correlación de la concentración de cadmio en las plantas con las propiedades del suelo. El estudio fue desarrollado mediante un diseño experimental al azar, recolectando una muestra por cada predio sumando un total de 39 plantas muestreadas de las que fueron retirados de 2 a 3 frutos y 25 hojas para ser analizadas en el laboratorio. La determinación del contenido de cd que fue mediante el proceso de espectrometría de masas y emisión óptica de plasma acoplado inductivamente en el laboratorio del Instituto del suelo y el paisaje de la Universidad de Hohenheim. El análisis estadístico consistió en utilizar el programa de cálculo de tablas Microsoft Excel 2016 y el programa estadístico SPSS versión IBM 25, mientras que para el análisis de datos bivariados utilizó el análisis de varianza de rango de Kruskal-Wallis y para determinar la correlación usó la correlación de rango de Spearman que verificó en qué medida las concentraciones de granos, hojas y suelo estaban relacionadas entre sí y con otras variables. Los resultados indicaron los siguientes registros: a) en el 30 % de granos la concentración de Cd rebasó el umbral de 0,8 ppm, b) en los suelos la concentración de cadmio fue de $0,13 \pm 0,16$ ppm, y c) en las hojas la concentración de cadmio fue de $1,02 \pm 0,96$ ppm. Concluyendo que los factores influyentes para las altas concentraciones de cadmio eran las prácticas de riego y tipo de suelo, de la misma manera concluyó que el $P > Zn > Ca > K > Mg > Na$ influyeron positivamente sobre la reducción de cadmio total en los suelos.

1.2. Bases teóricas especializadas

1.2.1. Suelos en la provincia de Moyobamba

Moyobamba es la capital y una de las provincias del departamento de San Martín, está conformada por los distritos de Moyobamba, Japelacio, Soritor, Habana, Yantaló y Calzada, este último es uno de los distritos más antiguos del oriente peruano, se ubica a la margen derecha del Río Mayo, entre los 860 m s.n.m. La superficie de Moyobamba abarca 400 776,81 ha (Proyecto Especial Alto Mayo/Gobierno Regional de San Martín e Instituto de Investigaciones de la Amazonía Peruana [PEAM/GRSM e IIAP], 2007) cuya unidad predominante es la formación geológica denominada Pucará, con un 65 % constituida por calizas, lutitas grises y secuencia de areniscas cuarzosas con tonalidades gris oscuro e intercalaciones de pizarras arcillosas, que se originaron por la sedimentación con flujos fluviales y aluviales. Brindando a los suelos de la provincia características idóneas para el desarrollo agrícola.

Los suelos del distrito de Calzada, con 11 687,84 ha de extensión, donde se ubica el ensayo realizado, cuenta con 7 unidades de suelos (6 consociaciones y 1 asociación de sub grupo de suelo), que se muestran en la Tabla 1, se aprecia los diferentes tipos de suelos que hacen referencia a las cualidades del suelo en el área de estudio.

Tabla 1

Suelos del distrito de Calzada (11 687,84 ha)

Consociaciones	Soil Taxonomy	Área
Suelo Tónchima	Typic Udifluvents	1 386,02
Suelo Nipón I	Lithic Udorthents	446,17
Suelo Naranjillo	Fluventic Dystrudepts	136,10
Suelo Aguajal	Typic Epiaquepts	599,47
Suelo Habana	Humic Dystrudepts	6 803,68
Suelo Moyobamba	Typic Dystrudepts	746,06
Suelo Renacal - Aguajal (50 - 50 %)	Typic Endoaquepts - Typic Epiaquepts	1 457,11
Cuerpos de agua		113,23

Fuente: PEAM/GRSM e IIAP (2007).

El Plan de Ordenamiento Territorial de Moyobamba (PEAM/GRSM e IIAP, 2007) muestra la capacidad de uso mayor de los suelos del área de estudio, distrito de Calzada (Tabla 2). El ensayo fue instalado sobre suelos pertenecientes a la serie Tonchima, que cubre una superficie de 1 386,02 ha equivalente al 11,86 % del área estudiada, sobre una terraza baja, plana, ligeramente inundable, entre la margen izquierda del río Indoche y la carretera al distrito de Habana y Soritor, a 1 km de la carretera Fernando Belaunde Terry, cruce de Calzada.

Tabla 2

Capacidad de uso mayor de los suelos del distrito de Calzada

Clases de suelos	Hectáreas	
	Superficie	%
Tierras aptas para cultivos en limpio (A)	1 522,11	13,02
Tierras aptas para cultivos permanentes (C)	4 381,45	37,48
Tierras aptas para pastoreo (P)	2 722,02	23,29
Tierras aptas para producción forestal (F)	447,64	3,83
Tierras de protección (X)	2 502,75	21,41
Cuerpos de agua	113,23	0,97

Fuente: PEAM/GRSM e IIAP (2007).

Sobre la serie Tónchima, Escobedo, (2007) citado por Chuquijajas, (2012, p.41) menciona que:

Está constituido por suelos derivados de sedimentos fluviónicos recientes, estratificados, color con matices en secuencia vertical, pardo rojizo y rojo amarillento; con perfil sin desarrollo genético tipo AC, con epipedón ócrico y sin horizonte sub superficial de diagnóstico; profundos, moderadamente drenados, de textura franca sobre franco arcilloso. Químicamente, presentan una reacción fuerte a ligeramente ácida, con saturación de bases media.

La fertilidad natural de los suelos varía de media a baja debido a su gran cantidad de materia orgánica contenida como se muestra en la Figura 1.



Figura 1. Fotografía de la presencia natural de hojarasca en el suelo. Fuente: *Elaboración propia.*

1.2.2. Suelo como fuente de evaluación físico-químico

Siendo el suelo un elemento indispensable en el proceso de evaluación del presente estudio es fundamental analizarlo desde un punto de vista agroecológico, para comprender la dinámica que ocurre al incorporar sustancias orgánicas e inorgánicas que causen reacciones negativas en el suelo a través del tiempo.

El suelo es un recurso natural no renovable de carácter frágil, con características funcionales diversas que resultan fundamentales para la continuidad de la dinámica sostenible del planeta y la vida. Dentro de éste se originan de manera simultánea transformaciones producto de las interacciones de los procesos físicos, químicos, biológicos y de las actividades antropogénicas generando un ascenso y/o descenso de nutrientes y agua que conforman el sostén de las plantas. El suelo con frecuencia suele ser ácido y pobre, esto debido a las constantes precipitaciones y otros factores antropogénicos en muchas de las zonas tropicales del mundo, que lixivian los nutrientes y la materia orgánica presente en este mismo (Red de Forestaría Análoga, 2014); condición que realza la importancia del suelo como base para la producción de diversos cultivos, el crecimiento y desarrollo saludable de las plantas y la diversidad de microorganismos que enriquecen el suelo (Hernández, 2014). Razón por la que resulta de vital importancia el análisis del suelo para conocer su estado en un tiempo y lugar determinado frente a la presencia de sustancias que produzcan toxicidad y disminución de la calidad de este; así como aquellos factores que limitan su productividad.

1.2.3. Suelos contaminados

Según Arias, (2019), un suelo contaminado es aquel que ha sido alterado por la presencia de algún agente químico, el cual es considerado peligroso debido a su toxicidad y a su permanencia en el tiempo; entre las causales de la presencia de estos químicos es debido al incremento de las actividades industriales en un espacio y tiempo determinado. La contaminación de los suelos ha sido considerada desde años atrás uno de los problemas con mayor importancia debido a la estrecha relación que guarda con la entrada y almacenamiento de diversas sustancias que en concentraciones altas se consideran no deseadas (Munive, 2018). Sin embargo, este problema no ha sido abordado con gran interés sino hasta hace poco, debido a los problemas que se vienen suscitando en el sector agrario, siendo el suelo el principal constituyente más susceptible como medio receptor de contaminantes. Se produce contaminación cuando se incorporan elementos extraños con cierto grado perjudicial al sistema suelo, generando reacciones nocivas hacia los organismos que habitan en el suelo (Izquierdo, 2017).

1.2.4. Cadmio en el suelo

El cadmio es considerado un metal pesado debido a su gravedad específica mayor de 5 g.cm⁻³

³, según los estudios toxicológicos y contaminación que algunos metales pesados tienen sobre el ambiente y los seres vivos (Capacoila, 2017). Estos se encuentran presentes en la tierra, suelos agrícolas y plantas, de forma natural, pero también son originados por actividades antropogénicas de manera que su exceso contribuye a la degradación ambiental (Arévalo *et al.*, 2016).

Con el avance tecnológico se ha logrado determinar la existencia de plantas metalofitas que disponen de una alta capacidad en sus raíces para acumular, reducir y transformar los metales pesados a través de estructuras como las metal-proteína que mantienen el control de las cantidades acumuladas de cadmio, cromo y mercurio (Beltrán y Gómez, 2016).

El promedio de concentración del cadmio en suelos se encuentra entre 0,07 y 1,1 mg.kg⁻¹ (0,07 y 1,1 ppm), siendo 0,5 mg.kg⁻¹ (0,5 ppm) la base que no debería superarse (Adomako *et al.*, 2014). La incorporación del cadmio a los suelos agrícolas puede realizarse mediante la fertilización fosfática. La aplicación del cadmio al suelo se realiza luego de haber sido suministrada a través de fertilizantes industriales en altas concentraciones, juntamente con el fósforo (Herrera, 2011). Las concentraciones excesivas de cadmio en el suelo merman la absorción y transporte de nitratos hacia las plantas y posteriormente inhiben los procesos fisiológicos de las plantas expuestas (Cárdenas, 2012).

1.2.5. Fuentes de cadmio

Las fuentes de cadmio en el suelo pueden ser originadas de manera natural como por las actividades antropogénicas como: el uso excesivo de plaguicidas, fertilizantes, vertido de residuos de, industrias, fábricas, incendios industriales y actividades mineras. Muchos suelos poseen contenidos de cadmio muy altos, esto se debe a la presencia del elemento en partes rocosas de donde proviene su formación (Cárdenas, 2012). Las rocas fosfóricas son fuente primaria para la fabricación de fertilizantes fosfáticos, los mismos que poseen altos niveles de metales pesados perjudiciales para los suelos agrícolas y en general para la corteza terrestre (Sánchez, 2016). Asimismo, el agua para riego y la constante aplicación de diversas enmiendas orgánicas como el compost cuya elaboración está basada a partir de los residuos sólidos conforman una fuente una de las fuentes de metales pesados con mayor realce en los

suelos agrícolas (Cárdenas, 2012).

1.2.6. Toxicidad del cadmio en el suelo

Los metales pesados tales como el cadmio, arsénico y el plomo tienen un rol protagónico dentro de las afecciones humanas provocando la insuficiencia renal crónica producidas en las personas expuestas a ellos (Sabath y Robles, 2012). La exposición a estos metales causa enfermedades en los seres humanos e incluso en los animales (Vicente *et al.*, 2010). Además, los niveles de cadmio concentrados en forma natural dentro de los suelos agrícolas van en aumento debido a las actividades antropogénicas como el uso excesivo de fertilizantes fosforados incorporados a los suelos agrícolas, la quema de los bosques y la contaminación de los suelos y aire, principales contribuyentes de la deposición atmosférica. Holanda y Austria señalan que el valor tóxico del cadmio en los suelos es de 5 ppm (Cargua, *et al.*, 2010), debido al efecto nocivo que produce en el organismo de los seres humanos que introducen este metal en su cadena alimenticia a través del consumo de diversos productos y subproductos.

1.2.7. Cadmio en las plantas

En la rizósfera se originan sustancias de carácter ácidos que facilitan la absorción del cadmio por las plantas, uno de los factores que facilitan su absorción son los ácidos carboxílicos encontrados en la zona radicular de la planta, así como otras proteínas que pertenecen a la familia de transportadores del hierro y zinc (Hernández *et al.*, 2019). En este sentido se afirma que la concentración del metal difiere en cada parte de la planta, generalmente siguen una secuencia de: raíces > tallos > hojas > frutas > semillas. Aunque la cantidad se puede diversificar dependiendo de las especies y etapa de desarrollo del cultivo. Al no cumplir funciones fisiológicas en los vegetales y su presencia sea alta en los suelos el cadmio limita la absorción y translocación de algunos elementos importantes como Ca, Hg, Mn, Zn y Fe (Herrera, 2011). Al ingresar a la planta limita su respiración y fotosíntesis, da origen a un estrés oxidativo en combinación con el azufre, provocando perjuicios a nivel celular en los tejidos, lo que conlleva a la clorosis y arrocetamiento de las hojas, ya que la planta puede confundir al cadmio con el hierro el magnesio (Hernández *et al.*, 2019). Asimismo, las plantas de hojas frondosas como la “lechuga” *Lactuca sativa*. L. y la “espinaca” *Espinacia oleracea* L., entre otras, acumulan altas cantidades de cadmio ocasionando retraso en el

crecimiento de las plantas y otros procesos biológicos como la inhibición de la fotosíntesis y la alteración del contenido de agua en las plantas (Cargua *et al.*, 2010).

1.2.8. Cadmio en las almendras de cacao

La distribución de acumulación del cadmio en los frutos del “cacao” difiere. Este metal se moviliza con dirección a la testa y la almendra de “cacao” para terminar su recorrido posicionándose en el producto final que es el chocolate (Chupillón, 2017). Los genotipos que presentan alta capacidad de absorción de metales pesados son el CCN-51 con 14,7 $\mu\text{g planta}^{-1}$, POUND-12 con 20,6 $\mu\text{g. planta}^{-1}$, ETT-400 con 28,7 $\mu\text{g. planta}^{-1}$ y SCA-6 con 22,2 $\mu\text{g. planta}^{-1}$ (Chupillón, 2017) que indican la presencia del metal en el cuerpo vegetativo del cultivo de cacao.

Los niveles elevados de cadmio en las almendras de “cacao” está asociado con las características físico-químicas del suelo como es el pH, la materia orgánica, la capacidad de intercambio catiónico y la proporción de arcilla contenida (Florida *et al.*, 2018). Según Tantalean y Huauya (2017) la distribución del cadmio en las almendras del cacao es desuniforme, así mismo manifiestan que, al tratarse de un elemento móvil su movimiento es de los órganos inferiores hacia los superiores, y además este elemento se concentra en semillas grasosas.

1.2.9. Enmiendas cálcicas

Las enmiendas cálcicas son compuestos que contienen calcio, muchas de ellas usadas con el objetivo de corregir el pH del suelo agrícola, por ejemplo, en el proceso de encalado donde se usa la caliza a fin de mejorar el desarrollo y crecimiento de los cultivos. Con frecuencia en la agricultura se utilizan los productos como el hidróxido de cal, las dolomitas y las calizas como enmiendas cálcicas que mediante su acción de hidrólisis en el sistema suelo, neutralizan o regulan su acidez (Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura [IICA], 2016). Por lo tanto, el uso de enmiendas es un método de remediación de lotes o suelos agrícolas y se ha convertido en una de las alternativas más efectivas dentro del campo agronómico para mermar la absorción y disponibilidad del cadmio y otros metales pesados existentes en suelos con excesiva acidez (Arias, 2019). Así mismo el uso de enmiendas

resulta viable para los productores ya que su adquisición es rápida y de bajo costo.

- a. Carbonato de calcio. Es un compuesto químico y componente principal de la piedra caliza, en la agricultura se le considera como fertilizante con capacidad de elevar o neutralizar el pH del suelo, así como mejorar sus características y propiedades. Este compuesto aporta además otros beneficios como: permite la mayor mineralización y el adecuado desarrollo del sistema radicular de las plantas permitiendo que estas crezcan saludable (Arias, 2019).

- b. Carbonato de calcio y magnesio. También conocida como dolomita es un compuesto cuya fórmula química es $(\text{CO}_3)_2\text{CaMg}$, contiene de 2 hasta 13 % de Mg. Este mineral se origina producto del intercambio iónico entre el calcio y el magnesio (Contreras *et al.*, 2005). El carbonato de calcio y magnesio reacciona en medio ácido incrementando su solubilidad por lo que en el sector agrícola es usado como enmienda para encalar los suelos con pH bajos (*International Plant Nutrition Institute [IPNI]*, 2013) y en algunos casos es usado como fuente principal para reducir la presencia de metales pesados como el cadmio en el suelo.

- c. Sulfato de calcio. Conocido como yeso, es otro de los minerales usados para tratar los suelos con resultados más favorables comparados a la aplicación de los fertilizantes (Damian *et al.*, 2018). Es usada por los agricultores como enmienda muy efectiva en la recuperación de suelos, debido a las características de su composición hace que el calcio tenga mayor movilidad comparado con el de la cal de tal manera que tiene mayor movilidad en el suelo (Pérez y Azcona, 2012).

1.2.10. Factores que influyen al incremento de cadmio en el suelo

Existen diferentes factores que facilitan la disponibilidad y el incremento de cadmio en un suelo agrícola:

- a. El pH influye en la concentración de cadmio dentro del sistema edáfico, cuanto menor sea la concentración de iones hidrógenos y el pH del suelo sea más ácido, mayor será

la posibilidad de la existencia del cadmio en el suelo; sin embargo, si la concentración de iones hidrógeno es mayor, el pH del suelo será básico y la posibilidad de la concentración de cadmio será menor (Sánchez, 2013).

- b. Por otro lado, la materia orgánica cumple la función de acomplejar (quelata) al metal, así pues, la relación existente entre la materia orgánica y el cadmio es: a mayor materia orgánica, el cadmio disponible en el suelo será menor; ya que están quelatados los cationes del metal inmovilizándolo y, haciendo menor su disponibilidad para la planta. Sin embargo, a menor materia orgánica la disponibilidad cadmio será mayor; además, la materia orgánica es uno de los factores que incrementa la acidificación del suelo al liberar ácidos carboxílicos que lo acidifican y es incorporada al suelo agrícola por efecto de las crecidas de los ríos, trayendo consigo metales y otras sustancias que en cantidades mayores resultan tóxicas al suelo con fines de agricultura (Sánchez, 2013).

- c. La Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC) se toma como referente indicador que cuando éste es mayor, se incrementa la retención de cadmio en el suelo al confundirse con los cationes del calcio, haciendo al cadmio más disponible para la planta. No obstante, cuando la CIC es menor, será menor también la retención de cadmio que reemplace al calcio. Por lo que es necesario aplicar enmiendas cálcicas u optar por una de ellas en específico como es el caso del calcio que, por acción de masas, desplace al cadmio haciéndolo menos disponible para la planta (Sánchez, 2013).

CAPÍTULO II: MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Diseño de la investigación

En la presente investigación se empleó un enfoque cuantitativo que, según Hernández *et al.*, (2014), está basado en el procesamiento sistemático de datos cuya medición es numérica, estos datos se obtuvieron a partir de los análisis físico-químicos y absorción atómica del suelo, lo que permitió evaluar las concentraciones de cadmio y el efecto de las enmiendas calcáreas seleccionadas para esta investigación.

Lugar y fecha

La investigación se desarrolló en los suelos con cultivo de “cacao” *Theobroma cacao* L. del fundo “Nuevo Celendín” ubicado en el distrito de Calzada, a 1 km del cruce de Calzada con la carretera Fernando Belaunde Terry, a la margen izquierda, con dirección al distrito de Habana, iniciando el periodo de ejecución en mayo del 2019. Para ello se solicitó el permiso y autorización de ingreso al terreno del propietario Alex Gonzales Sandoval, mediante Carta N° 001- 2019 UCSS. Este fundo cuenta con una extensión de 8 ha de las cuales, 1 ha tiene cultivo de “cacao” y otras 7 ha con áreas productivas dentro de un sistema agroforestal integrado.

Calzada es uno de los seis distritos de la provincia de Moyobamba que cuenta con un área urbana de 65.60 ha y una población aproximada de 5 300 habitantes, distribuidos en su sector urbano y rural. El distrito sobresale por su biodiversidad y riqueza cultural, además, resalta entre los demás distritos gracias a su atractivo turístico llamado “Morro de Calzada”, sumado a ello el gran potencial que posee para la agricultura con cultivos de exportación como la “piña golden” *Ananas comosus*, “stevia” *Stevia rebaudiana* Bertoni, “café” *Coffea arabica* L. y “cacao” *Theobroma cacao* L.

El área de estudio se encuentra en la ecorregión Selva alta que es la más biodiversa del país, caracterizada por una geografía muy variada (Figura 2).



Figura 2. Vista panorámica de la estructura vegetal de selva alta. *Fuente:* Elaboración propia.

a) Altitud

El distrito de Calzada se encuentra ubicada a una altura de 859 m s.n.m., pero en sus zonas más bajas puede registrar 600 m s.n.m., donde se desarrolla actividades agropecuarias, sin embargo, en las partes más altas llega hasta los 3600 m s.n.m., donde no se realizan actividades agrícolas, generalmente estas áreas están cubiertas por áreas boscosas.

b) Clima

Posee dos climas: Clima frío varía entre los 3500 y 2500 m s.n.m., con temperaturas de 12 °C y precipitaciones moderadas. Clima semicálido muy húmedo entre 2500 y 600 m s.n.m., con precipitaciones elevadas y temperatura promedio de 22 °C.

El clima en la zona es un factor que puede incrementar las concentraciones de cadmio en los suelos, especialmente en los meses de noviembre, diciembre, enero y febrero donde las precipitaciones tienen mayor frecuencia e intensidad. Las lluvias constantes hacen que el caudal del río se incremente e inunde las chacras, arrastrando sustancias contaminantes y otros elementos que pueden producir toxicidad en suelos cultivados (Huamaní *et al.*, 2012). Siendo las precipitaciones pluviales promedio entre los 3500 y 2500 m s.n.m. es de 700 mm por año, sin embargo, entre los 2500 y 600 m s.n.m. se observan precipitaciones de 2000 mm por año.

En la Tabla 3, se muestra que durante la ejecución de la investigación la frecuencia de precipitaciones pluviales se incrementó en los últimos meses del año respecto al promedio anual, que es de 116 mm por mes, factor importante dentro de esta investigación ya que la presencia de agua en el suelo con enmiendas aplicadas causó el lixiviado de las mismas y como consecuencia la variación de datos en los meses de la evaluación (Figura 3).

Tabla 3

Temperatura y precipitación del distrito durante el periodo de estudio

	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC
Temperatura (°C)	22,44	21,83	21,93	22,51	21,93	22,80	22,76
Precipitación (mm mes)	102,90	171,60	19,50	29,40	133,20	109,80	108,90

Fuente: Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (2020).

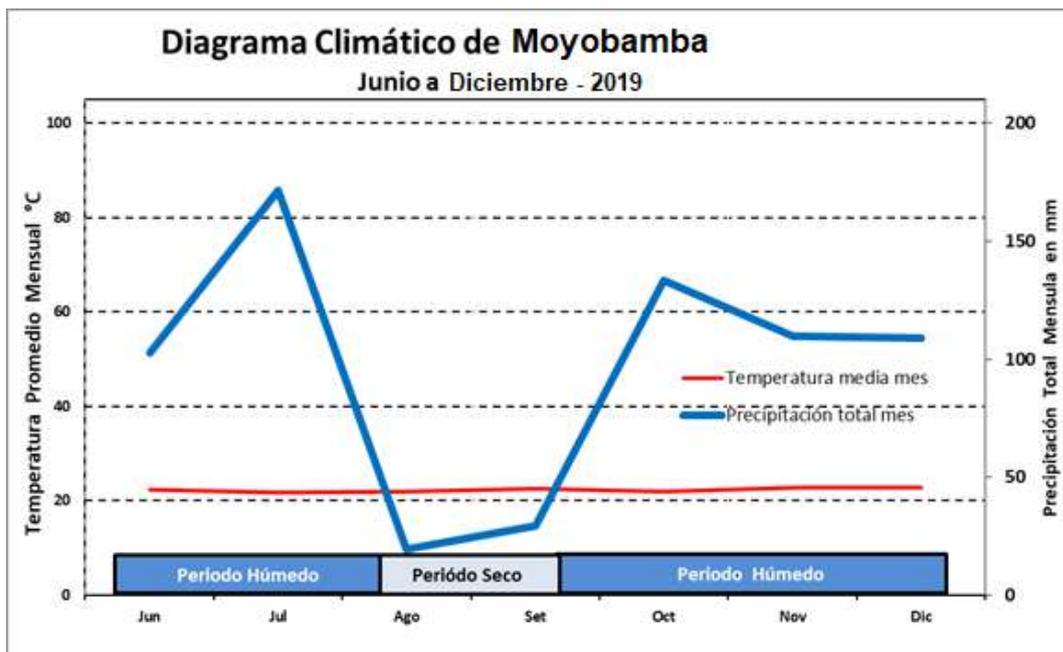


Figura 3. Datos de temperatura y precipitación del área de estudio en el tiempo de trabajo de campo. Fuente: Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (2020). Elaboración propia.

c) Relieve y suelos

De acuerdo con el plan de ordenamiento territorial de Moyobamba (PEAM/GRSM e IIAP, 2007), las altitudes se encuentran entre 3500 y 2000 m s.n.m., presentando relieve de pendientes extremas y valles; en cambio a los 2000 m s.n.m. presenta mayor amplitud de valles y un relieve menos accidentado.

Las características del relieve en estas zonas húmedas varían entre ondulado y espinado, presentan una conformación colinosa en forma dominante. Generalmente están constituidos por suelos profundos, con rango textural medio a pesado y pH ácido, aunque en algunas zonas con presencia de material calcáreo los suelos son más fértiles y el pH tiende a ser más elevado. Los grupos edafogénicos presentes en Calzada son: a) Acrisoles órticos, Luvisoles y Cambisoles también llamados éutricos y distrícos que son los suelos fértiles e infértiles respectivamente. b) Gleysoles que se caracterizan por ser suelos de mal drenaje y c) Fluvisoles con mayor importancia para la agricultura por sus características productivas.

Respecto al tipo de suelo se presentan tres tipos: a) Litosoles que son los suelos pedregosos y se encuentran en las partes altas. b) Cambisoles, suelen encontrarse en las partes

intermedias y c) Acrisoles ubicados en las partes bajas. Debido a la tala indiscriminada y la quema de los bosques en pendientes muy pronunciadas los suelos se encuentran expuestos a erosionarse y deslizarse de manera peligrosa.

d) Vegetación

De acuerdo con Edquén (2018) la provincia posee un bosque con clima siempre verde, alto y tupido, con grandes volúmenes de madera que tiene gran demanda en el mercado. Se encuentra conformado de 4 estratos arbóreos. Los árboles más altos alcanzan los 35 m de alto y 2 m de diámetro, conformando así el primer estrato con un dosel muy alto. Los árboles de 30 m de alto, con diámetros entre 0,60 y 1,4 m conforman el segundo estrato. Los árboles más pequeños, delgados y con tamaños entre 10 y 20 m de alto conforman el tercer y cuarto estrato. El sotobosque posee una vegetación generalmente escasa debido a la competencia del sistema radicular y la sombra dominante de los árboles. Esta zona se caracteriza por componerse de árboles perennifolios, algunos dominantes y emergentes que muchas veces son heliófilos y pierden sus hojas durante el periodo de la estación seca, entre las especies más importantes y vistosas al florecer se encuentra especies del género *Erythrina* y *Jacaranda*. Las especies forestales de importancia económica que se encuentran en el área muestreo se indican en la Tabla 4.

Tabla 4

Principales especies forestales de importancia en Calzada

Espece forestal	Nombre científico
Tornillo	<i>Cedrelinga catenaeformis</i>
Congona	<i>Brosimum guianense</i>
Nogal	<i>Juglans neotrófica</i>
Cedro de altura	<i>Cedrela odorata</i>

Fuente: Edquén (2018).

Entre otras especies de los géneros *Phytelephas*, *Scheelea*, *Astrocaryum*, *Cordia*, *Ficus*, *Erythrina*, *Tabebuia*, *Sapium*, *Calycophyllum*, *Matisia*, *Hura*, *Croton*, *Aspidosperma*, *Schizolobium*, *Cecropia*, *Chorisia*, *Calophyllum*, *Guazuma*, *Brosimum*, etc.



Figura 4. Estructura vegetal del Bosque húmedo. *Fuente:* Elaboración propia.

e) Ecosistema correspondiente al área de estudio

El área de estudio se caracteriza por poseer solo un tipo de estructura vegetal, por lo que se denomina Área de No Bosque Amazónico (ANO-BA), condición que atribuye a una cobertura vegetal con presencia de una fuerte presión antrópica respecto debido a las actividades agrícolas y ganaderas (Edquén, 2018). En sus suelos con producción cacaotera se registró contaminación por cadmio, este es un metal pesado que de encontrarse en concentraciones mayores a $0,05-0,12 \text{ mg.kg}^{-1}$ resulta tóxico para el consumo humano, según indican los estándares de calidad ambiental para suelos (MINAM, 2013), lo cual reduce la calidad y condiciona la exportación del “cacao” sanmartinense

Comprende áreas agropecuarias que fueron desboscadas tiempo atrás, actualmente se visualizan en esta unidad los cultivos agrícolas y pastos cultivados (Figura 5). Asimismo, comprende áreas cubiertas por purma o vegetación secundaria, que están en descaso por un determinado tiempo hasta que las condiciones climáticas y el proceso de regeneración

edáfica regresen la fertilidad natural del suelo y nuevamente integrarlo a la actividad agropecuaria.



Figura 5. Área de estudio “Fundo Nuevo Celendín”. Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 5, se aprecia las áreas productivas dentro de un sistema agroforestal en el Fundo Nuevo Celendín, con cultivos de arroz, cítricos, cacao, maíz y también acuicultura. Su ubicación geográfica en el datum WGS84 es 272053 m este y 93307535 m norte, a una altitud de 860 m s.n.m. El área cacaotera del Fundo Nuevo Celendín cuenta con 5 años de producción activa del clon CCN 51 injertado sobre cacao criollo; este cultivo se encuentra instalado mediante un sistema de siembra cuadrado combinado con “guaba” *Inga edulis* y especies forestales ubicadas a los linderos del terreno, al ser una zona inundable suelen producirse avenidas del río Indoche aportando lodos residuales con concentraciones de cadmio que se incrementan en los suelos agrícolas. Sin embargo, las especies forestales suelen ser perjudicadas en caso de inundaciones ya que no soportan más de 12 horas en suelos inundados.

En la zona se logró identificar suelos con producción cacaotera contaminados por cadmio,

este es un metal pesado que de encontrarse en concentraciones mayores resulta tóxico para el consumo humano, lo cual reduce la calidad y condiciona la exportación del cacao sanmartinense. Para el caso del chocolate que contiene entre 50 y 70 % de cacao, el límite máximo es de 0,80 mg.kg⁻¹ (ppm) de cadmio, pero si el contenido de cacao supera el 70 % el límite máximo permisible será 0,9 ppm de cadmio (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura [FAO], 2018) como se puede apreciar en la Tabla 5. Estos datos fueron registrados el 01 de enero del 2019, la exportación del cacao en Calzada ya que ésta produce 977,55 kg por ha al año.

Tabla 5

Niveles máximos de cadmio que exige la Unión Europea

Productos específicos de cacao y chocolate	Nivel de cadmio (mg.kg⁻¹)
Chocolate con leche con contenido seco de cacao < 30 %	0,1
Chocolate con contenido de materia seca tota < 50 %	0,3
Chocolate con leche con contenido de materia seca total > 30 %	0,3
Chocolate con contenido de materia seca total > 50 %	0,8
Chocolate para beber o cacao en polvo	0,6

Fuente: FAO (2018).

2.1.1. Materiales

- Enmiendas calcáreas: cal 1 t/ha, dolomita 1 t/ha y yeso 1 t/ha.
- GPS garmin modelo MAP 76 CSx
- Wincha
- Palana
- Balanza de kg con aproximación de 1 g
- Cámara fotográfica
- Paja rafia
- Bolsas de 1 kg
- Letrero de identificación de tratamientos

2.1.2. Descripción del experimento

El presente estudio se llevó a cabo en una parcela de cacao ubicada en el distrito de Calzada. El desarrollo de la investigación se basa en las referencias históricas del lugar, las que indican presencia de niveles altos de cd en los suelos agrícolas, lo que motivó su selección. En la parcela seleccionada se realizó evaluaciones físico químicas del suelo a través del análisis de suelo y absorción atómica a nivel laboratorio, para cuantificar la presencia del metal en el sistema edáfico. Las evaluaciones se realizaron antes de la aplicación de las tres enmiendas calcáreas y posterior a ello, a fin de comparar la eficiencia de cada una de ellas en la reducción de la disponibilidad de cd en el suelo.

A continuación, se presenta detalladamente el desarrollo del experimento que consta de cuatro etapas descritas de la siguiente manera:

a. Etapa Preliminar

Inicialmente, se realizó la identificación de tres parcelas de “cacao” con suelos contaminados por cadmio descritos en la investigación de Geiger, (2018) dentro del distrito de Cazada (Tabla 6). Se realizó la ubicación según coordenadas geográficas de las parcelas de cacao, se tomaron muestras de suelo de cada una para ser analizadas en el laboratorio a fin de conocer la concentración de cadmio presente en cada una de las parcelas. Con los resultados obtenidos se seleccionó el terreno del señor Sandoval Gonzales Alex propietario del fundo “Nuevo Celendín” para realizar la investigación tomando en cuenta las condiciones de accesibilidad al terreno, el estado del cultivo y los resultados del análisis, por lo que se realizó la solicitud de permiso y autorización para realizar el trabajo de investigación. Posterior a ello se realizaron dos reuniones para coordinar las actividades a realizar durante el desarrollo de la investigación.

Tabla 6

Registro del contenido de cadmio en el suelo de tres parcelas de cacao

Apellidos y nombres	Coordenadas		Altitud	pH Suelo	Cadmio	
	Coor. X	Coor. Y			Suelo [mg/kg]	Grano [mg/kg]
Ventura Goñas Francisco	265268	9331185	836	7,26	0,730	1,606

López Suxe Esmerildo	271316	9329503	839	5,41	0,078	0,684
Sandoval Gonzales Alex	271459	9330140	824	8,03	0,263	1,623

Fuente: Resultados del laboratorio de absorción atómica de la Universidad Nacional de San Martín. Elaboración propia.

El reconocimiento del área de estudio se realizó mediante un recorrido del terreno en compañía de los propietarios y el asesor Ing. Carlos Hugo Egoavil De La Cruz, para verificar el estado del cultivo y georreferenciar el área mediante el uso de un GPS. Posteriormente se ubicaron 6 puntos de muestreo con hoyos de 20 cm de profundidad para su análisis y precisar el área para los tratamientos. Finalmente se realizó un segundo análisis del área donde se registró una mayor concentración de cadmio.

Según la tabla 7 menciona que las características de área experimental cuentan con área total de campo experimental de 1066 m²

Tabla 7

Características del área Experimental

Característica	Medida
- Número de tratamientos	4
- Ancho de parcela	9 m
- Largo de parcelas	9 m
- Área de parcela	81 m ²
- Número de repeticiones	3
- Longitud de bloques	36 m
- Ancho de bloques	9 m
- Área de bloques	324 m ²
- Área total de bloques	972 m
- Ancho de calles	1 m
- Área de calles	94 m ²

Fuente: Elaboración propia.

b. Etapa de campo

El área experimental cuya extensión total contaba con 972 m² fue dividida en bloques con dimensiones de 36 m de largo y 27 m de ancho. Los límites quedaron enmarcados mediante

rafias color azul lo que permitió la ubicación, delimitación y colocación de distintivos para cada tratamiento. El primer paso fue tomar un primer muestreo antes de la aplicación de enmiendas a fin de conocer el estado inicial del área.

Consecutivamente se realizó de forma manual y mediante el uso de materiales agrícolas la aplicación de las dosis de cada enmienda por tratamiento, haciendo uso de la técnica circular con proyección a la copa del cultivo de cacao, las dosis correspondientes fueron 5,545 g de calcita (CaCO_3), 10,217 g de dolomita ($\text{CaMg}(\text{CaCO}_3)_2$) y 9,540 g de yeso (SO_4Ca), calculadas en base a los miliequivalentes (meq) de cadmio presentes en las muestras de suelo inicial. Se fijó 12 puntos estratégicos de muestreo (una planta céntrica) por cada unidad experimental.

Por cada punto de muestreo se realizó un hoyo de 20 cm y se tomó 1 kg de muestra de suelo para ser analizadas en el laboratorio. Los análisis fueron tomados dos veces por mes a primeras horas del día y en la tarde durante un periodo de 90 días iniciando desde junio del 2019, tiempo en el que se desarrolló la investigación, la información obtenida contribuyó al registro de datos que mostraron cambios importantes en el área de cultivo como el incremento de materia orgánica debido a las frecuentes lluvias durante los meses de evaluación y al conocimiento de la dinámica del cadmio en función a las dosis de cada enmienda aplicada en el suelo.

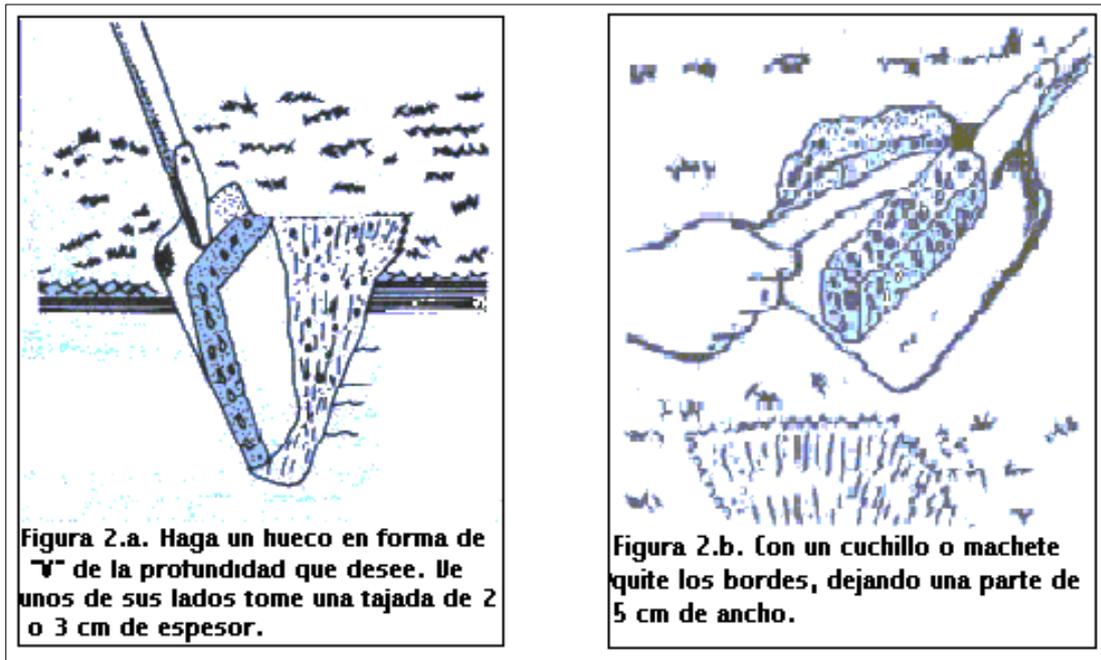


Figura 6. Técnica de muestreo. *Fuente:* Fertilidad de los suelos y parámetros que la definen (2014).

El criterio para la extracción de muestras se obtuvo de la metodología propuesta por el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos [USDA] (2014), que demanda la extracción de 10 muestras por hectárea, sin embargo, solo se tomaron 6 muestras debido a la inaccesibilidad y estado del terreno en la época de lluvias. Esta metodología se llevó a cabo mediante el uso de técnicas como: a) Selección: Primero, se tomaron puntos de muestreo al azar para evaluar la presencia de cadmio en el área mediante el análisis de suelo antes y después de la aplicación de enmiendas y b) Aplicación: Mediante la delimitación del área establecida para los tratamientos, se determinó el número de plantas a las que se aplicaron las enmiendas validando con la toma fotográfica cada una de las actividades.

Por otro lado, para el cálculo de dosificación de enmiendas calcáreas se empleó fuentes bibliográficas como libros y textos especializados en suelos concluyendo en el uso del Factor X, metodología descrita por Fassbender (1987).

c. Etapa de análisis de laboratorio

Las muestras colectadas fueron analizadas en los laboratorios del PEAM-Nueva Cajamarca (análisis físico-químico) y en la UNSM-Tarapoto (concentración de cadmio por absorción

atómica). Además, las muestras fueron sometidas al análisis de caracterización de suelo completo como estipula el Decreto Supremo N° 013-2010-AG de las normas legales de agricultura del Perú, que describe la metodología a aplicarse en los análisis de suelos que se detalla a continuación:

Caracterización del suelo:

- Análisis granulométrico: Método del hidrómetro de Bouyoucos.
- Conductividad eléctrica: Lectura del extracto acuoso en la relación suelo – agua 1:1.
- pH: Medida en el potenciómetro de la suspensión suelo – agua 1:1.
- Materia orgánica: Método de Wakley y Black.
- Fósforo disponible: Método de Oslen modificado, extractor NaHCO_3 0,5 M, pH 8,5
- Potasio disponible: Saturación con acetato de amonio 1N, pH 7,0. Lectura en espectrofotómetro.
- Capacidad de intercambio catiónico: Método de acetato de amonio 1N, pH 7,0
- Cationes cambiabiles: Determinados en el extracto de amonio
 - o Ca: Absorción atómica
 - o Mg: Absorción atómica
 - o K: Absorción atómica
 - o Na: Absorción atómica
 - o Cd: Absorción atómica
- Aluminio cambiabile: Método de Yuán. Extracción de cloruro de potasio 1N.

Procedimiento para la determinación de cadmio en el suelo:

- Se seca y se tamiza la muestra de suelo.
- Pesa 5 g de suelo y coloca en contenedores de plástico con capacidad de 60 ml.
- Se agrega 50 ml de ácido nítrico 4 molar (260 ml / litro) en los contenedores de plástico.
- Se somete a baño maría a 12 horas con una temperatura de 70 °C.
- Se retira del baño maría y se deja a temperatura ambiente.
- Se agita por una hora en placa.
- Se filtra y se colecta el filtrado.
- Se analiza el residuo filtrado en absorción atómica

d. Etapa de procesamiento de datos en gabinete

Se desarrolló en tres sub etapas:

– Ordenamiento de datos

Se desarrolló mediante la selección, ordenamiento y análisis de datos obtenidos en la etapa preliminar y etapa de campo en base a los criterios descritos por el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (2014). Lográndose, a partir de la información adquirida en las dos etapas seleccionar el área adecuada para desarrollar la investigación.

– Tabulación

Se desarrolló con los datos de los resultados del análisis de suelos obtenidos en la etapa de laboratorio, mediante su introducción al software Excel donde fueron tabulados, ordenados, seleccionados y finalmente procesados en el software SPSS.

– Análisis de los datos

Se realizó en base a los resultados obtenidos del procesamiento de datos estadístico en el software SPSS a partir de los cuales se obtuvo tablas de Análisis de Variancia y pruebas Tukey con los que se desarrolló el análisis de datos ordenándolos por tiempo (30, 60 y 90 días), finalmente se realizó la comparación e interpretación de los resultados mediante la elaboración de tablas resumen sobre la relación entre los tratamientos y el suelo.

2.1.3. Tratamientos

Los tratamientos utilizados en esta investigación corresponden a enmiendas calcáreas distribuidas en: carbonato de calcio (CO_3Ca), carbonato doble de calcio y magnesio ($(\text{CO}_3)_2\text{Ca Mg}$), sulfato de calcio (SO_4Ca) y un testigo, con claves T1, T2, T3 y T4 respectivamente como se muestra en la Tabla 8. Las enmiendas calcáreas o sustancias básicas poseen propiedades de dispersión de iones de cadmio que actúan por acción de masas en el sistema edáfico (Fassbender, 1987) reduciendo la disponibilidad de cadmio para las plantas.

La aplicación de carbonato de calcio se basó en su capacidad de mejorar las características y propiedades del suelo, así como elevar o neutralizar su pH (Arias, 2019); la dosis aplicada fue 5,545 g graduándose durante el periodo de desarrollo de la investigación.

Por otro lado, la aplicación de carbonato de calcio y magnesio conocida como dolomita se basó en su reacción en medio ácido al encalar suelos de pH bajos y reducir la presencia de metales pesados (*International Plant Nutrition Institute* [IPNI], 2013); la dosis aplicada fue 10,217 g según la metodología del Factor X descrita por Fassbender (1987). Finalmente, la aplicación de sulfato de calcio conocido como yeso se basó en su composición al hacer que el calcio sea más móvil en el suelo asegurando su absorción por las plantas (Pérez y Azcona, 2012); aplicándose una dosis de 9,540 g.

Tabla 8

Tratamientos y bloques aplicados

Claves	Tratamientos			
	CO ₃ Ca	(CO ₃) ₂ Ca Mg	SO ₄ Ca	Testigo
Bloque 1	T1	T2	T3	T4
Bloque 2	T2	T3	T4	T1
Bloque 3	T3	T4	T1	T2

Fuente: Elaboración propia.

Las dosis para cada uno de los tratamientos se determinaron en base al fundamento químico de estequiometría, donde: 1 meq de Cd se contrarresta con 1 meq de Ca (Galagovxky y Giudice, 2015). Entendiendo que 1 eq-g es igual al peso molecular del elemento químico o compuesto entre su valencia. Este procedimiento matemático permite la uniformidad de las sustancias a nivel de reactivo: 1 meq de Cd = 1 meq de Ca = 1 meq de Al (estequiometría). Por otro lado, usando el fundamento de acción de masas se utilizó el factor 2X con la finalidad de obtener mayor seguridad en el desplazamiento de Cd en el suelo.

En la Tabla 9 se muestra el peso molecular de las sustancias que, divididas entre su valencia da como resultado el peso equivalente en gramos para cada una. Valores que fueron utilizados en el cálculo de dosis para las sustancias que se aplicaron en cada tratamiento.

Tabla 9

Cálculo básico de equivalente en gramos

		Peso Molecular	Valencia	Equivalente g
Cadmio	Cd	112,4100	2	56,205
Dolomita	CaMg (CaCO ₃) ₂	184,4000	2	92,200
Yeso	SO ₄ Ca	172,1800	2	86,090
Caliza	CaCO ₃	100,0869	2	50,043

Fuente: Elaboración propia.

La Tala 10 muestra la equivalencia en gramos de enmienda a aplicar por 1 Eq. de cadmio presente en el suelo que al ser multiplicado por el peso molecular de las enmiendas calizas (T₁, T₂, T₃ y T₄) expresado en meq. da como resultado la dosis a aplicar por ha, este último al ser dividido entre el número de plantas presentes en una ha da como resultado la dosis de enmienda por planta.

Tabla 10

Tratamientos y cantidad de enmiendas calcáreas aplicadas por planta según tratamiento

Tratamientos	Clave	Enmiendas calizas	Eq de enmienda aplicado por Eq de Cd	Peso de enmienda por planta (g)
1	T ₁	CO ₃ Ca	2	5,545
2	T ₂	(CO ₃) ₂ Ca Mg	2	10,217
3	T ₃	SO ₄ Ca	2	9,540
4	T ₄	Sin aplicación (Testigo)	0	0

Fuente: Elaboración propia.

El reporte del análisis indica que el contenido de cd en el suelo es de 0,49 ml/kg⁻¹ que, al realizar el cálculo de este valor para una ha, es igual a 3,46 kg; para ello se consideró una profundidad de 25 cm y una densidad aparente de 1,4416 t/m³. Siendo este último calculado por la fórmula de Fondjo *et al.* (2021) que se basa en las proporciones de arena y arcilla del análisis textural mediante una curva de regresión, revisar Anexo N° 7.

En la Tabla 11 se muestra las cantidades de enmiendas aplicadas por unidad experimental (UE) que contenían 12 plantas respectivamente.

Tabla 11

Cantidad de enmiendas calcáreas a aplicarse por unidad experimental

Tratamientos	Clave	Enmiendas	Dosis de enmienda (g)	Número de plantas por UE (und.)	Cantidad de enmiendas por UE (g.UE ⁻¹)
1	T1	CO ₃ Ca ₂	5,545	9	66,54
2	T2	(CO ₃) ₂ Ca Mg	10,217	9	122,60
3	T3	SO ₄ Ca	9,54	9	114,48
4	T4	Testigo	0	9	0

Fuente: Elaboración propia.

2.1.4. Unidades experimentales

En este estudio se instalaron doce unidades experimentales, una por cada tratamiento y repetición. Cada unidad experimental estuvo conformada por un área de 81 m² (9 m x 9 m), con 9 plantas por área, de las cuales se tomó los suelos de la planta central como muestra para los análisis correspondientes, a fin de evitar el efecto de borde que se produce en plantas ubicadas en los bordes de cada tratamiento.

2.1.5. Identificación de las variables y su mensuración

En esta investigación se identificaron dos tipos de variables: variables independientes y variables dependientes (Tabla 12), cada una de ellas se describen a continuación:

- a. Variables independientes. Se conformó por las enmiendas calcáreas: CO₃Ca o calcita, (CO₃)₂ CaMg o dolomita, SO₄Ca o yeso y el testigo.
- b. Variables dependientes. Se conformó por las concentraciones de cadmio en el suelo que fueron registrados en los resultados de los análisis de laboratorio, y la reducción del cadmio en el tiempo.

Tabla 12

Mensuración de las variables

Variables		Dimensión	Indicadores
Independiente	Enmiendas calcáreas	Carbonato de calcio Carbonato doble de calcio y magnesio Sulfato de calcio	Porcentaje de Cd concentrado en el suelo
Dependientes	Elemento contaminante en el suelo	Presencia de cadmio en el suelo	Concentración en ppm de cadmio en el suelo Después de 90 días

Fuente: Elaboración propia.

2.1.6. Diseño estadístico del experimento

El diseño estadístico utilizado en esta investigación fue un diseño de bloques completamente al azar (DBCA), en la que se consideró 4 tratamientos con tres repeticiones.

Los tratamientos T1, T2, T3 y T4 detallados en la Tabla 8 fueron sometidos a 3 repeticiones: Bloque 1, Bloque 2 y Bloque 3, una repetición por cada bloque. Se consideró una frecuencia de evaluación mensual durante un periodo de tiempo de 90 días.

2.1.7. Análisis estadístico de datos

El análisis estadístico se realizó con los resultados del laboratorio de suelos y absorción atómica obtenidos de las muestras extraídas de campo. Para su análisis e interpretación se utilizó el software estadístico SPSS. Éstos se clasificaron en: datos de la evaluación de caracterización de los suelos (pH, materia orgánica, capacidad de intercambio catiónico, textura como arena, arcilla y limo y clase textural), datos de la evaluación del contenido de metales pesados y datos obtenidos del procesamiento estadístico del análisis de varianza. Las medias fueron comparadas mediante la prueba significación de Tukey ($p < 0,05$) a fin de encontrar los niveles de diferencias entre tratamientos.

CAPÍTULO III: RESULTADOS

3.1. Niveles de cadmio acumulado en los suelos de cultivos de cacao en el área de estudio

Durante el proceso de ejecución de la investigación se identificó dentro del distrito de Calzada tres parcelas de cacao con mayor concentración de cadmio acumulado en el suelo. En la Tabla 13 se observan los resultados del pH y niveles de cadmio presentes en las parcelas seleccionadas, donde el mayor contenido de cadmio se registró en la parcela del agricultor Francisco Ventura.

Tabla 13

Niveles de cadmio en tres parcelas de cacao

Agricultor	pH del suelo	Cadmio en $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$
Francisco Ventura – Calzada	7,786	1,12
Esmerildo López – Calzada	5,71	0,63
Alex Gonzales – Calzada	7,483	0,96

Fuente: Elaboración propia.

Los puntos de muestreo fueron tomados al azar y georreferenciados en una ha de cacao en producción del Fundo Nuevo Celendín – Calzada. En la Tabla 14 se observa los niveles de cadmio en el suelo registrados en cada punto de muestreo, con la finalidad de conocer la concentración de cadmio promedio en la extensión de cacao y determinar el área propicia con mayor contenido de cadmio acumulado para instalar los bloques y tratamientos.

Tabla 14

Niveles de cadmio acumulado en un muestreo preliminar

MUESTRAS	UTM (WGS 84, Zona 18)	Cadmio en mg*kg⁻¹
M ₁	18 M 272290 E, 9330827 N	0,47
M ₂	18 M 272275 E, 9330841 N	0,51
M ₃	18 M 272293 E, 9330868 N	0,52
M ₄	18 M 272301 E, 9330892 N	0,41
M ₅	18 M 272301 E, 9330906 N	0,55
M ₆	18 M 272298 E, 9330960 N	0,46
	Promedio	0,49
	Desviación Estándar	0,05
	Coefficiente de variación	10,29%

Fuente: Resultados del laboratorio de absorción atómica de la Universidad Nacional de San Martín. Elaboración propia.

El cadmio promedio en la Tabla 14 registró un valor de 0,49 mg*kg⁻¹ con una desviación estándar de 0,05 y coeficiente de variación de 10,29 %, valor que es aceptable en ensayos agropecuarios (Mora y Arriagada, 2016).

Para corroborar los niveles de cadmio promediados en la tabla anterior, se tomó la segunda muestra cuyo resultado se observa en la Tabla 15. En el segundo análisis se reflejó un valor de 0,96 mg*kg⁻¹ mayores al promedio de 0,49 mg*kg⁻¹ registrado inicialmente (Tabla 14). Sin embargo, por razones estadísticas se aceptó el promedio de 0,49 mg*kg⁻¹ de cadmio por derivarse del resultado de seis muestreos analizados, dejando a un lado el valor de 0,96 mg*kg⁻¹, que fue el resultado de un solo análisis de suelo.

Tabla 15

Cadmio acumulado en el área de estudio

Agricultor	UTM (WGS 84, Zona 18)	Cadmio en mg*kg⁻¹
Alex Gonzales - Calzada	18 M 272301 E, 9330906 N	0,96

Fuente: Elaboración propia.

La Figura 7 muestra los resultados del análisis de caracterización de suelos. Se tomó en

cuenta el pH, materia orgánica y capacidad de intercambio catiónico considerados factores que facilitan el incremento del contenido de cadmio en el suelo. En esta investigación se obtuvo un promedio del pH de 7,7, materia orgánica 2,2 % y CIC 42,3 meq / 100 g de suelo, considerado elevado para esta investigación.

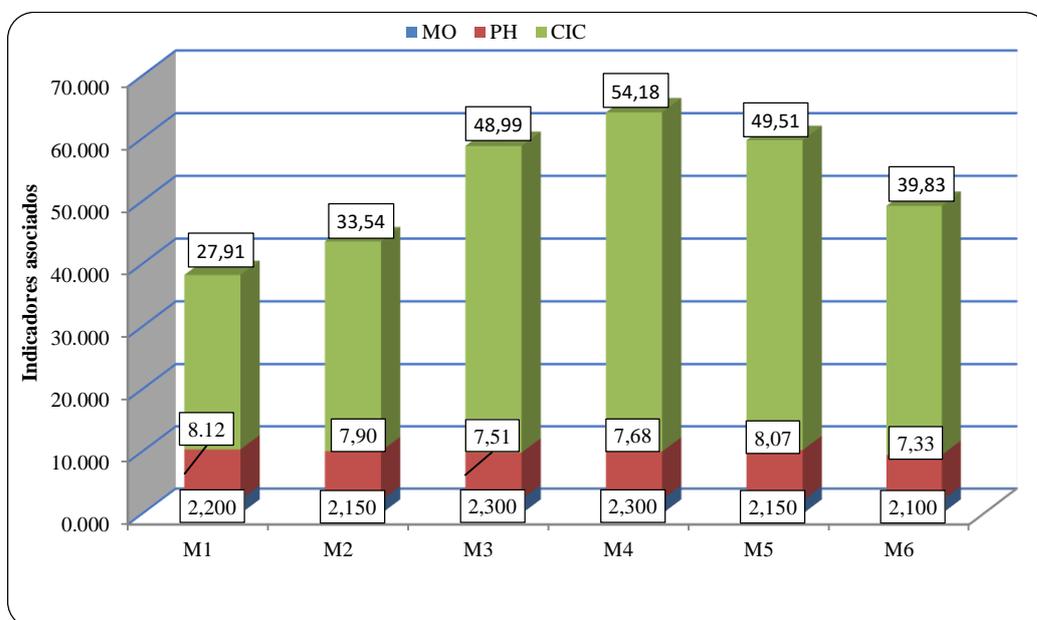


Figura 7. Materia orgánica, pH y capacidad de intercambio catiónico en el suelo del “Fundo Nuevo Celendín”. Fuente: Elaboración propia.

3.2. Comparación del contenido de cadmio en el suelo antes y después de la aplicación de las enmiendas cálcicas: calcita (CO_3Ca), dolomita ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$) y yeso (SO_4Ca)

La Tabla 16 muestra los resultados promediados del contenido de cadmio previo a la aplicación de enmiendas y posterior a su aplicación, se realizó la comparación de los resultados en tres tiempos diferentes con la concentración de Cd inicial.

Tabla 16

Promedio del contenido de cadmio antes y después de la aplicación de tratamientos

Tratamiento	Tiempo (días después de la aplicación)			
	Inicio	30 dda	60 dda	90 dda
Testigo	0,49	0,42	0,48	0,52

Sulfato de calcio	0,49	0,39	0,42	0,37
Carbonato de calcio	0,49	0,35	0,51	0,41
Carbonato doble de calcio y magnesio	0,49	0,29	0,36	0,32

Fuente: Elaboración propia.

Se observa en la Tabla 16 el promedio del contenido de cadmio antes y después de la aplicación de enmiendas, comparando su comportamiento en el sistema edáfico. Se observa que, aunque reducen el contenido de cadmio inicialmente, con el tiempo progresivamente vuelven a subir, esto debido al aumento de lluvias producidas durante el tiempo de evaluación al lixiviar las enmiendas. Finalmente reducen la concentración de cadmio con un mayor efecto producido por la aplicación de carbonato doble de calcio y magnesio llegando a reducir 0,32 ppm posterior a la aplicación de las enmiendas.

Todas las fuentes calcáreas utilizadas reducen el contenido de cadmio a los 30 días de la aplicación de los tratamientos, pero a los sesenta días el contenido de cadmio aumenta ligeramente, en un solo caso supera al valor original. Sin embargo, a los 90 días reduce nuevamente el contenido de cadmio (Figura 8).

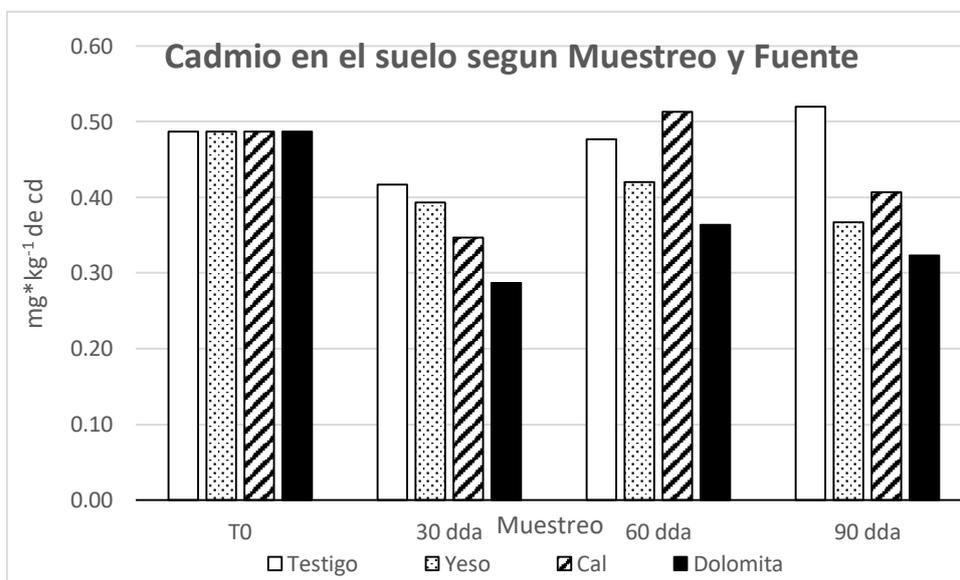


Figura 8. Cadmio acumulado en el suelo según muestreo y fuente. Fuente: Elaboración propia.

3.3. Enmienda calcárea más adecuada a ser utilizada en la reducción de la disponibilidad de cadmio en el área de estudio

Los valores de cadmio que fueron encontrados en los diferentes tiempos de muestreo, como los promedios del contenido de cadmio antes y días después de la aplicación (dda) de tratamientos, fueron base para la elaboración de la Tabla 17 que muestra la reducción del contenido de cadmio después de la aplicación de enmiendas en estudio, la misma que se detalla a continuación.

Tabla 17

Reducción de cadmio respecto al tiempo inicial (0,49 ppm de cadmio al tiempo 0)

Tratamiento	Reducción (%)		
	30 dda	60 dda	90 dda
Testigo	-	-	-
Yeso	19%	14%	25%
Cal	29%	-5%	16%
Dolomita	41%	25%	34%

Fuente: Elaboración propia.

En la Tabla 17 se observa la reducción de cadmio, que fue calculado restando el cadmio inicial (0,49) menos el cadmio encontrado al tiempo de muestreo; el resultado se divide entre el cadmio inicial y se expresa en porcentaje. Se observó que la enmienda dolomita tiene mayor porcentaje de reducción, mientras que el testigo a los 90 días de la incorporación de enmiendas facilitó el incremento del cadmio inicial (6,85 %); en general, la incorporación de enmiendas permitió su reducción en un 41 % de cadmio en el suelo. La fuente calcárea carbonato doble de calcio y magnesio finalmente resultó siendo la más efectiva entre todas las fuentes probadas (reducción del 33,6 %), seguido por el yeso y la caliza (24,7 y 28,8 %, respectivamente)

Para encontrar la diferencia estadísticamente significativa entre los tratamientos se aplicó la prueba de Tukey a nivel de 0,05; mostrando el contenido de cadmio a los noventa días de aplicación de las enmiendas. Apéndice 12 (Figura 12).

CAPÍTULO IV: DISCUSIONES

4.1. Análisis de suelos para conocer los niveles de cadmio acumulado en los suelos con cultivo de cacao

El estudio realizado por Geiger (2018), en tres parcelas de cacao dentro del distrito Calzada mostró resultados de los análisis físico-químicos de suelos con concentraciones de cadmio elevadas para realizar agricultura, obteniendo valores de cadmio total concentrado de 0,73; 0,078 y 0,263 ppm, como se observa en la Tabla 6, valores que son menores a los resultados obtenidos en esta investigación, que fueron de 1,12; 0,63 y 0,96 ppm. respectivamente, como muestra la Tabla 13, efecto producido naturalmente por los cambios ambientales a los cuales fue sometido el suelo posterior al estudio de Geiger. Sin embargo, en la segunda y tercera parcela se registró pH de 5,71 y 7,483 respectivamente, con concentración de cadmio menor a la primera parcela. Esto se explica de la siguiente manera, el pH es considerado uno de los factores más influyentes que condicionan la movilidad del cadmio en el suelo, sin embargo su movilidad también está asociada a factores como el potencial redox, presencia de arcillas y óxidos de hierro (Sánchez, 2016), por lo que su presencia en mayor o menor concentración dentro del sistema edáfico no depende esencialmente de los niveles de pH, resultados que se reflejan en la tabla 13 con concentraciones menores de cadmio a pH ácidos.

La Tabla 14 registra el resultado promedio del contenido de cadmio en seis muestras y en la figura 7 se observa los factores que condicionan la presencia de cadmio, mostrando en la **M₅** un pH neutro casi alcalino de 7,68 y un porcentaje de **MO** de 2,151 que es medio. Sin embargo, al comparar estos resultados con los parámetros que condicionan los niveles de cadmio descritos en la literatura por Sánchez (2013) quien afirma que en suelos ácidos hay mayor concentración de cadmio y que un porcentaje alto de materia orgánica favorece la retención del metal al quelatarlo en el suelo; esta teoría difiere con los resultados de esta investigación respecto al pH y porcentaje de **MO**. Esto se debe a que su disponibilidad en el suelo depende también de factores físicos como el estado del metal, la temperatura y factores químicos como la solubilidad y el potencial redox (Robledo Vélez y Castaño Puerta, 2012).

Por otro lado, los resultados de la **CIC** indicaron un valor elevado de 49,51 que incrementa la retención de cadmio en el suelo y haciéndolo más disponible para la planta, de tal manera que se corroboró la teoría de Sánchez (2013).

4.2. Contenido de cadmio en el suelo antes y después de la aplicación de enmiendas calcáreas en tres tiempos diferentes

El resultado de la Tabla 14 muestra un promedio de 0,49 ppm de cadmio antes de la aplicación de enmiendas, sin embargo, en la Tabla 16 se muestra la reducción de cadmio a los treinta, sesenta y noventa días por efecto de la aplicación de enmiendas. Produciéndose el mayor efecto a los noventa días de permanencia en el suelo con valores de 0,41 mg*kg⁻¹ para el carbonato de calcio, 0,37 mg*kg⁻¹ para el Sulfato de calcio mayor y 0,32 mg*kg⁻¹ para el carbonato doble de calcio y magnesio; esto debido al efecto del desplazamiento de los iones de cadmio debido a la acción de masas promovido por las enmiendas utilizadas que incorporan mayor cantidad de cationes de calcio al suelo, reduciendo la absorción de cadmio por las plantas. Resultados similares obtuvo Contreras *et al.* (2005) quienes aplicaron CaCO₃ y CaCl₂ en suelos con cultivo de cacao, reportando reducciones significativas para ambas fuentes respecto a la concentración de cadmio en el testigo. Así mismo al suelo, logrando disminuir los niveles de cadmio en los órganos de la planta de cacao.

Los iones de cadmio son desplazados por los cationes de calcio aportados por el material encalante aplicados al suelo. Los iones de hidrógeno contenidos en las enmiendas carbonato de calcio, sulfato de calcio y carbonato doble de calcio y magnesio al reaccionar con los cationes de los carbonatos finalmente terminan formando dióxido de carbono y agua neutralizando los iones de hidrógeno e incrementando el pH del suelo (Dávila, 2019). En la Figura 8 se observa la reducción de cadmio respecto al testigo a partir de la aplicación de enmiendas, sin embargo, el efecto es mayor con el carbonato doble de calcio y magnesio (dolomita) incrementándose a mayor tiempo de permanencia en el suelo y mayor cantidad de dosis aplicada. Por otro lado, Correa, (2019), menciona que, encuentra una explicación similar al utilizar fuentes de calcio como carbonato doble de calcio y magnesio (dolomita) y cal en suelos cacaoteros, reportando reducciones de cadmio estadísticamente significativas.

Este estudio reporta que en el rango de cero a treinta días de aplicada las enmiendas se produce una reducción notoria del cadmio en el suelo para cada una de las fuentes, sin embargo, a los sesenta días esta reducción disminuye. Probablemente, el resultado obtenido en este periodo se debe al efecto de liberación que ocurre con el cadmio en el sistema edáfico (Sánchez, 2013), al descomponerse parte de la materia orgánica que contiene cadmio en su constitución o a los efectos climatológicos al aumentar las precipitaciones durante el periodo de evaluación dentro del rango de los sesenta días. Finalmente, a los noventa días se incrementa la reducción, probablemente por el balance de cationes que ocurre en el suelo al cesar las lluvias y disminuir la descomposición de la materia orgánica.

4.3. Fuente calcárea más adecuada para ser utilizada en la reducción de la disponibilidad de cadmio en los suelos

La reducción de la disponibilidad de cadmio en el suelo según los resultados de la Tabla 17 no muestran diferencia estadísticamente significativa entre los tratamientos con sulfato de calcio y carbonato de calcio desde el tiempo cero hasta después de la aplicación de enmiendas encalantes, tal como se explica en el Apéndice 11 (Figura 12), reduciendo de manera significativa a los 90 días el contenido de cadmio inicial en el suelo. Así mismo, el carbonato doble de calcio y magnesio difiere de los tratamientos carbonato de calcio y sulfato de calcio reduciendo mucho más el contenido de cadmio inicial, mostrando valores de 0.32 ppm a los noventa días de permanencia en el suelo.

Las letras en la tercera columna descritas en Apéndice 12 (Tabla 24) indican la similitud o diferencia estadística entre tratamientos.

Los resultados obtenidos en la Tabla 17 muestran que la fuente carbonato doble de calcio y magnesio $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ o dolomita es la que en cada uno de los muestreos exhibe mayor porcentaje de reducción al obtener un valor de 41 % a los treinta días, 25 % a los sesenta días y 34 % a los noventa días, respecto a las otras dos fuentes encalantes.

Estos resultados concuerdan con lo expresado por Sabino (2020) quien evaluó la reducción

de cadmio mediante el uso de dos tipos de enmiendas (cascarilla de arroz y dolomita) con cuatro dosis: 0, 1, 2 y 3 t/ha y comprobó que ambas fuentes reducen el contenido de cadmio en el suelo, sin embargo, la dolomita brinda mayor reducción de cadmio, concluyendo que a mayor dosis de dolomita aplicada al suelo mayor será su reducción. Lo mencionado líneas arriba guarda relación con lo afirmado por Correa (2019) quien ensayó con enmiendas orgánicas, dolomita e hidróxido de calcio en plántones de cacao a condiciones controladas, encontrando reducciones de cadmio en el suelo al incorporar la dolomita y el hidróxido de calcio

CAPÍTULO V: CONCLUSIONES

- Los suelos con cultivo de cacao que principalmente se ubican a orillas del río Indoche en el distrito de Calzada, presentan niveles de cadmio que son condicionados por la variación de los parámetros que influyen en su acumulación como son los niveles de pH, porcentaje de materia orgánica y capacidad de intercambio catiónico.
- La aplicación de las tres enmiendas calcáreas reduce la concentración de cadmio a los treinta, sesenta y noventa días después de su aplicación pasando de 0,49 mg*kg⁻¹ de cadmio inicial a 0,37 mg*kg⁻¹ con sulfato de calcio, 0,41 mg*kg⁻¹ con carbonato de calcio y 0,32 mg*kg⁻¹ con carbonato doble de calcio a los noventa días de permanencia en el suelo.
- La enmienda calcárea más adecuada a utilizar en el área de estudio y que permitió mayor reducción de la concentración de cadmio a mayor tiempo de permanencia en el suelo es el carbonato doble calcio magnesio CaMg (CO₃)₂ o dolomita, al aportar dos fuentes encalantes (Ca y Mg) mientras que las otras dos enmiendas actúan de manera inmediata pero no son persistentes en el tiempo.

CAPÍTULO VI: RECOMENDACIONES

- Esta investigación abre camino para futuras investigaciones que relacionen la dinámica del suelo respecto a la concentración y disponibilidad del cadmio u otros metales pesados que causen toxicidad a los suelos agrícolas, por lo que se recomienda realizar la extensión del estudio con un tiempo de evaluación más amplio y usando nuevas tecnologías orgánicas de tal manera que sean ecoamigables con el medio ambiente.
- Se sugiere que, a través de los resultados obtenidos en esta investigación, se desarrolle un estudio más detallado de la reacción que se produce en el suelo al aplicar enmiendas calcáreas en los primeros treinta y sesenta días después de su incorporación, así mismo se sugiere analizar a profundidad la relación existente entre los niveles de pH y el aumento de la concentración de cadmio en los suelos de la zona.
- Se sugiere efectuar un estudio similar, pero comprando mayores dosis de enmiendas a las cantidades utilizadas en el presente estudio, de tal manera que se pueda relacionar su efecto en el desarrollo biológico de las plantas.
- Se recomienda la aplicación de la enmienda carbonato doble de calcio y magnesio en la reducción de la disponibilidad de cadmio en los suelos del distrito de Calzada, ya que su uso tiene mayor efecto y al encontrarse dentro de la zona su costo es menor al de las otras dos enmiendas.

REFERENCIAS

- Adomako, E; Deacon, C y Meharg (2014). Impactos de la minería de oro en la producción de arroz en el valle de Anum en Ghana. *Agricultural Sciences*, 5 (9), 793-804. Doi:org/10.4236 / as.2014.59084
- Andrades, M y Martínez, E (2014). *Fertilidad de suelos y los parámetros que la definen*. 3° edición. Universidad de La Rioja. España. <https://dialnet.unirioja.es/descarga/libro/267902.pdf>
- Arias, R (2019). *Efectividad de las enmiendas calcáreas en suelos cacaoteros contaminados con cadmio en la Amazonía peruana* (Trabajo de investigación) Facultad de Ciencias Ambientales. Universidad Científica del Sur. Lima-Perú. <https://repositorio.cientifica.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12805/1408/TB-Arias%20R.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Arévalo, E; Obando, M; Zúñiga, L; Arévalo, C; Baligar, V y He, Z. (2016). Metales pesados en suelos de plantaciones de cacao (*Theobroma cacao* L.) en tres regiones del Perú. *Ecología aplicada*, 15 (2), 747. Doi: [org/10.21704/rea.v15i2.747](https://doi.org/10.21704/rea.v15i2.747)
- Beltrán, M. y Gómez, A. (2016). Biorremediación de metales pesados cadmio (Cd), cromo (Cr) y mercurio (Hg), mecanismos bioquímicos e ingeniería genética. *Revista facultad de ciencias básicas*, 12 (2), 172-197. <https://revistas.unimilitar.edu.co/index.php/rfcb/article/view/2027>.
- Dávila, E (2019). *Uso de enmiendas en la reducción del contenido de cadmio en el suelo y en los granos del cacao (theobroma cacao l.) clon ccn-51*. (Tesis de maestría). Escuela de posgrado. Universidad Nacional Agraria de la Selva. Tingo Maria – Perú. Recuperado de <http://repositorio.unas.edu.pe/handle/UNAS/1623>
- Decreto Supremo N° 013-2010-AG. Método de análisis de suelos en el laboratorio. Diario oficial El Peruano, Lima, Perú, 20 de noviembre de 2010, pp. 26-27.
- Cargua, Ch; Mite, V; Carrillo, Z y Durango, C (2010). *Determinación de las formas de Cu, Cd, Ni, Pb, y Zn y su biodisponibilidad en los suelos agrícolas del Litoral Ecuatoriano*. (Tesis para maestría). Universidad Tecnológica Equinoccial, Santo Domingo, Ecuador. [https://www.researchgate.net/publication/304013941_Determinación de las formas de _Cu_Cd_Ni_Pb_Y_Zn_y su biodisponibilidad en suelos agrícolas del Litoral Ecuatoriano](https://www.researchgate.net/publication/304013941_Determinación_de_las_formas_de_Cu_Cd_Ni_Pb_Y_Zn_y_su_biodisponibilidad_en_suelos_agrícolas_del_Litoral_Ecuatoriano)
- Cárdenas, A (2012). *Presencia de cadmio en algunas parcelas de cacao orgánico en la Cooperativa Agraria Industrial Naranjillo*. (Tesis de grado). Facultad de Agronomía. Universidad Nacional Agraria de la Selva, Tingo María. Huánuco. Perú. <http://repositorio.unas.edu.pe/handle/UNAS/153>
- Maycotte, M.C.C. (2011) *Edafología I*. Colombia. Equipo de Educación Comité Departamental de Cafeteros de Caldas. <https://www.uaeh.edu.mx/investigacion/productos/4776/edafologia.pdf>

- Capacoila, J. (2017). *Evaluación de la concentración de metales pesados en las aguas superficiales del Río Coata*. (Tesis de grado). Ciencias de la Ingeniería. Universidad Nacional del Antiplano, Puno, Perú. <http://repositorio.unap.edu.pe/handle/UNAP/6639>
- Chávez, E., He Z.L.; Stoffella P.J.; Mylavarapu R.S.; Li Y.C.; Moyano B. y Baligar, V.C. (2015). Concentración de cadmio en granos de cacao y su relación con el cadmio del suelo en el sur de Ecuador. *Science of The Total Environment* 533:205–214. doi: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.06.106>
- Charrupi, N y Martínez, D (2017). Estudio ambiental del cadmio y su relación con suelos destinados al cultivo de cacao en los departamentos de Arauca y Nariño (Trabajo de investigación). Facultad de Ingeniería. Universidad de la Salle. Bogotá. Colombia https://ciencia.lasalle.edu.co/cgi/viewcontent.cgi?article=1717&context=ing_ambiental_sanitaria
- Chupillón, C.J.W. (2017). *Determinación de la absorción de cadmio y plomo en genotipos de cacao (theobroma cacao L.), para el establecimiento de plantaciones comerciales*. (Tesis de grado). Universidad Nacional de San Martín – Tarapoto, San Martín, Perú. <http://repositorio.unsm.edu.pe/handle/11458/2473>
- Chuquijajas, M (2012). *Evaluación preliminar de impacto ambiental de la construcción del Aeropuerto Nacional de la Localidad de Calzada 2012*. (Informe de Tesis). Facultad de Ecología. Universidad Nacional de San Martín. <https://core.ac.uk/download/pdf/287328616.pdf>
- Contreras, V; Herrera, M e Izquierdo, A. (2005). Efecto de dos fuentes de carbonato de calcio (CaCO₃) sobre la disponibilidad de cadmio para plantas de cacao (Theobroma cacao L.), en suelos de Barlovento, estado Miranda. *Venesuelos*, 13 (1), pp. 52-63. https://www.agua.org.mx/wp-content/uploads/2007/11/venesuelos_v13.pdf
- Correa, J (2019). *Efectos de enmiendas cálcicas y orgánicas en la absorción cadmio en plantones de cacao (Theobroma cacao L.) en la Región San Martín*. (Tesis de grado). Universidad Nacional de San Martín, Tarapoto, Perú. <http://repositorio.unsm.edu.pe/handle/11458/3237>
- Damian, M; Gonzáles, M; Quiñones, P y Terán, J (2018). Plan de enmiendas, yeso agrícola, compost mejorado y enriquecido con EM y humus de lombriz, para mejorar el suelo. *Arnaldoa* 25 (1): 141–158, 2018. <https://dx.doi.org/http://doi.org/10.22497/arnaldoa.251.25109>
- Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (2014) Soil Survey Field and Laboratory Methods Manual. <https://books.google.com.pe/books?id=ShCiDwAAQBAJ&pg=PA423&lpg=PA423&dq=Whittaker,+C.W.,+M.S.+Anderson,+and+R.F.+Reitemeier.+1959.+Liming+so+il,+an+aid+to+better+farming.+USDA.+Farmers+Bul.+2124&source=bl&ots=7QR3OEggUN&sig=ACfU3U0bx5EV74pb-rKTR604W7CeOy5gWQ&hl=es-419&sa=X&ved=2ahUKEwisld7b6o3wAhWRnOAKHc6XA7MQ6AEwBHoECBQQA#wv=onepage&q=Whittaker%2C%20C.W.%2C%20M.S.%20Anderson%2C%20>

and%20R.F.%20Reitemeier.%201959.%20Liming%20soil%2C%20an%20aid%20to%20better%20farming.%20USDA.%20Farmers%20Bul.%202124&f=false

Edquén, O. (2018). *Influencia de la quema del residuo agrícola (paja) post cosecha del arroz (in-situ) sobre la flora microbiana responsable de la fertilidad del suelo, distrito de San Fernando*. Tesis de grado. Universidad Nacional de San Martín – Moyobamba, San Martín, Perú.
http://directorio.concytec.gob.pe/appDirectorioCTI/VerDatosInvestigador.do;jsessionid=0b4dd1ddca1f07625167aa7d6333?id_investigador=71735

Fassbender, H.W. (1987). *Química de suelos con énfasis en América Latina*. Costa Rica. Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura.
<http://repositorio.iica.int/bitstream/11324/6801/2/BVE18039990e.pdf>

Florida, R.N.; Shilton, L.C.M; Gómez, B.R. (2018). El Ph y la absorción de cadmio en almendras de cacao orgánico (*Theobroma cacao L.*) en Leoncio Prado, Huánuco, Perú. *Folia Amazónica*, 27 (1), 1-8. [Doi.org/10.24841/fa.v27i1.458](https://doi.org/10.24841/fa.v27i1.458)

Fondjo, A; Theron, E y Ray, R (2021). Models for predicting the suction of heaving compacted soils using geotechnical properties. *Earth and Environmental Science* 727 (2021) 012016. Recuperado de: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/727/1/012016/pdf>

Geiger, L. (2018). *Análisis de cadmio en suelos, hojas y granos de cacao (Theobroma cacao L.), y su relación con el manejo y los factores del suelo en las plantaciones de cacao – Calzada, San Martín, Perú*. Tesis de grado. University of Hohenheim, Alemania.

González, S (2017). *Determinación de espectrofotometría por absorción atómica de la bioacumulación de cadmio y mercurio y su relación con el crecimiento en truchas arcoíris (Oncorhynchus mykiss) de dos criaderos de la región Junín, Perú*. (Tesis de grado) Universidad Inca Garcilaso de la Vega, Lima, Perú.
<http://repositorio.uigv.edu.pe/handle/20.500.11818/1564>

Hernández, R.; Fernández, C, y Baptista M. (2014). *Metodología de la Investigación*. <http://observatorio.epacartagena.gov.co/wp-content/uploads/2017/08/metodologia-de-la-investigacion-sexta-edicion.compressed.pdf>

Hernández, Y; Rodríguez, P; Peña, M; Meriño, Y, y Cartaya, O. (2019). Toxicidad del Cadmio en las plantas y estrategias para disminuir sus efectos. Estudio de caso: El tomate. *Cultivos Tropicales*, 40(3), e10. Epub 01 de septiembre de 2019.
http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0258-59362019000300010&lng=es&tlng=es

Hernández, P (2014). *Determinación de cadmio (Cd) en suelos agrícolas dedicados a la producción de alfalfa Medicago sativa irrigado con aguas residuales*. (Tesis de grado.) Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro Unidan Laguna, México.
[http://repositorio.uaaan.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/123456789/101/DeterminaciondeCadmio\(Cd\)ensuelosagricolasdedicadosala.pdf;sequence=1](http://repositorio.uaaan.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/123456789/101/DeterminaciondeCadmio(Cd)ensuelosagricolasdedicadosala.pdf;sequence=1)

- Herrera, T (2011). La Contaminación con Cadmio en Suelos Agrícolas. *Venesuelos* 8(1 y 2):42–47. http://saber.ucv.ve/ojs/index.php/rev_venes/article/view/1112
- Huamaní, Y.H.A.; Huauya, R.M.A.; Mansilla, M.L.G.; Florida, R.N. y Neira, T.G.M. (2012). Presencia de metales pesados en cultivo de cacao (*Theobroma cacao* L.) orgánico. *Acta Agronómica*, vol. 61 (4), p. 339-344,2012. https://revistas.unal.edu.co/index.php/acta_agronomica/article/view/38134
- Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (2016). *Manejo de suelos ácidos de las zonas altas de Honduras*. Tegucigalpa, Honduras <https://repositorio.iica.int/handle/11324/3108>
- International Plant Nutrition Institute (2013). Carbonato de calcio. *Fuentes de nutrientes específicos*. <https://www.ipni.net/publication/nss-es.nsf/beagle?OpenAgent&d=NSS-ES-18&f=NSS-ES-18.pdf>
- Izquierdo, J (2017). *Contaminación de los suelos agrícolas provocados por el uso de agroquímicos en la parroquia San Joaquín*. (Trabajo de Titulación). Carrera de Ingeniería Ambiental. Universidad Politécnica Salesiana. Cuenca. Ecuador. <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/14712/1/UPS-CT007228.pdf>
- Llactas, F.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*. (Tesis de grado). Universidad Nacional Agraria de la Selva, Huánuco. <http://repositorio.unas.edu.pe/handle/UNAS/1301>
- Munive, C. R. (2018). *Recuperación de suelos degradados por contaminación con metales pesados en el valle del Mantaro mediante compost de stevia y fitorremediación*. (Tesis de Doctorado). Escuela de Posgrado. Universidad Nacional Agraria La Molina. <http://repositorio.lamolina.edu.pe/bitstream/handle/UNALM/3770/munive-cerron-ruben-victor.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Ministerio del Ambiente (2013). *Estándares de calidad ambiental para suelos*. Perú: Guía para el muestreo de suelos. <https://www.gob.pe/institucion/minam/noticias/1148-ministerio-del-ambiente-publico-decreto-supremo-que-aprueba-los-estandares-de-calidad-ambiental-eca-para-suelo>
- Mora, F. y Arriagada, O. (2016). A classification proposal for coefficients of variation in Eucalyptus experiments involving survival, growth and wood quality variables. *Bragantia*, Campinas, Ahead of print, 2016. <http://dx.doi.org/10.1590/1678-4499.4>
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (2018). Informe de la 12ª reunión del comité del codex sobre contaminantes de los alimentos. http://www.fao.org/fao-who-codexalimentarius/sh-proxy/en/?lnk=1&url=https%253A%252F%252Fworkspace.fao.org%252Fsites%252Fcodex%252FMeetings%252FCX-735-12%252FREPORT%252520%2528FINAL%2529%252FREP18_CFs.pdf
- Pérez, G. y Azcona, C. (2012). Los efectos del cadmio en la salud. *Revista científica de América Latina y el Caribe*, 17 (3). Recuperado de <https://www.medigraphic.com/cgi->

bin/new/resumen.cgi?IDARTICULO=37773

Municipalidad Provincial de Moyobamba (2012). Plan de Ordenamiento Territorial – POT. http://www.munimoyobamba.gob.pe/app/archivos_sigolo/docs/sigolo_mdp5vF.pdf

Proyecto Especial Alto Mayo/Gobierno Regional de San Martín e Instituto de Investigaciones de la Amazonia Peruana (2007). Propuesta de Meso Zonificación Ecológica y Económica de la cuenca del Alto Mayo. <http://siar.regionsanmartin.gob.pe/download/file/fid/48586>

Raviolo, A. y Lerzo, G. (2016). Enseñanza de la estequiometría: uso de analogías y comprensión conceptual. *Educación Química*, Volumen 27, Issue 3, July 2016, Pages 195-204. <https://doi.org/10.1016/j.eq.2016.04.003>

Red de Forestaría Análoga (2014). Entender el suelo tropical. *Restaurando los sistemas de soporte de vida del planeta de la Red internacional de forestería análoga*. Guía práctica. Costa Rica. 25 pp. <https://www.analogforestry.org/understanding-tropical-soils/?lang=es>

Sabath, E. y Robles, O (2012). Medio ambiente y riñón: nefrotoxicidad por metales pesados. *Revista Nefrología*, 32 (3), 279-286. [Doi:10.3265/Nefrologia.pre2012.Jan.10928](https://doi.org/10.3265/Nefrologia.pre2012.Jan.10928)

Sabino, D (2020). *Determinación de niveles de enmiendas para la remediación de suelos contaminados con cadmio (Cd) en el cultivo de cacao (Theobroma cacao L.) distrito de San Alejandro. Ucayali. Perú*. (Tesis de maestría). Escuela de posgrado. Universidad Nacional de Ucayali. Pucallpa – Perú. <http://repositorio.unu.edu.pe/handle/UNU/4340>

Sánchez, G (2016). *Ecotoxicología del cadmio riesgo para la salud de la utilización de suelos ricos en cadmio*. (Tesis de grado). Universidad Complutense, Madrid, España. <https://eprints.ucm.es/50902/>

Sánchez, N (2013). *Modelización de los procesos químicos relacionados con la dinámica del cadmio en dos suelos agrícolas de Venezuela*. Tesis doctoral. Universidad de Carabobo, Venezuela. <http://mriuc.bc.uc.edu.ve/bitstream/handle/123456789/3857/nsanchez.pdf?sequence=1>

Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (2020). Estación Meteorológica de Naranjillo. www.senamhi.gob.pe/?p=estaciones

Tantaleán, E y Huauya, M (2017). Distribución del contenido de cadmio en los diferentes órganos del cacao CCN-51 en suelo aluvial y residual en las localidades de Jacintillo y Ramal de Aspuzana. *Revista de Investigación en Agroproducción Sustentable*. 1 (2), 365. [Doi.org/10.25127/aps.20172.365](https://doi.org/10.25127/aps.20172.365)

Vicente, L; Quirós, Y; Barriocanal, F; Hernández, J y Morales, A (2010). Nefrotoxicidad del uranio: perspectivas fisiopatológicas, diagnósticas y terapéuticas. *Ciencias toxicológicas*, 118, 324-347. <https://academic.oup.com/toxsci/article/118/2/324/1648537>

TERMINOLOGÍA

- Absorción

La absorción es el proceso de fijación física superficial de una sustancia sobre un cuerpo, que no implica reacciones químicas, ésta depende en gran medida de la dinámica y cinética de los metales pesados en el suelo hacia la zona radicular y posteriormente a toda la planta. La absorción de cadmio y otros metales tóxicos están en función a diversos factores del suelo como la acidez, concentración de cadmio, temperatura, humus y materia orgánica (Cárdenas, 2012).

- Absorción atómica

Es una técnica espectroscópica que cumple la función de transformar una muestra en átomos mediante la absorción de energía radiante con especificidad de longitud de onda, así mismo durante este proceso se mide la radiación electromagnética de los átomos. Con frecuencia los espectros atómicos y los espectros moleculares suelen ser confundidos por las transiciones de ambos procesos, pero se diferencian gracias a que en el aislamiento de los átomos no existen rotaciones. Mediante la absorción atómica se logran obtener datos cuantificables de diversos compuestos orgánicos (González, 2017).

- Encalado

Es la aplicación de una mezcla de cal que se le añade al suelo, esta actividad se realiza con el objeto de incrementar el valor de su pH y facilitar la disponibilidad del fósforo y en casos similares para dispersar metales presentes en el suelo (Contreras *et al.*, 2005).

- Enmienda

La enmienda es el aporte de un producto destinado a mejorar la calidad del suelo (en términos de estructura y composición, ajustando sus nutrientes, su pH ya sea para su acidez o basicidad). Las enmiendas suelen ser derivados del calcio o componentes orgánicos que varían sus reacciones en el suelo, modificando acidez o alcalinidad. Este proceso disminuye la absorción de cadmio y aumenta los contenidos de iones calcio causando un efecto antagónico y en el suelo respecto al cadmio (Herrera, 2011).

- Estándares de calidad ambiental

Es una norma legal que muestra los límites máximos permisibles de elementos o sustancias contaminantes que pueden existir en los diferentes tipos de uso del suelo (urbano, agrícola e industrial) (MINAM, 2013).

- Estequiometría

La estequiometría expresa la relación cuantitativa entre los reactivos y los productos en una ecuación química. Los coeficientes estequiométricos en una ecuación balanceada indican las proporciones molares en esa reacción (Raviolo y Lerzo, 2016).

- Dinámica de absorción

Se entiende por dinámica de absorción a la cantidad de un elemento químico retenido en un determinado coloide, con respecto al tiempo de ocurrencia. Este proceso es utilizado en estudios de contaminación y descontaminación de suelos (Fassbender, 1987)

- Suelos aluviales

Son aquellos suelos originados por la deposición de aluviones (huaycos) sean éstos causados por procesos naturales de erosión y gravedad o procesos de inundación de los ríos. Por su naturaleza o formación se consideran suelos de alta productividad (Municipalidad Provincial de Moyobamba, 2012).

- Plan de ordenamiento territorial

Es el informe final de un proceso mediante el cual se reordena el uso actual de las tierras, sean agrícolas, urbanas, mineras o industriales. Con el fin de orientarlas a su máximo potencial vocacional (Municipalidad Provincial de Moyobamba, 2012).

- Quelatar

Es un término derivado de la palabra quelatos que son compuestos con una estabilidad elevada utilizados en la agricultura como suministro de micronutrientes. La acción de

quelatar hace referencia a formar compuestos complejos entre la materia orgánica con iones metálicos para acomplejarlos en el sistema suelo (Llactas, 2016).

APÉNDICES

Apéndice 1. Área experimental



A: Ingreso al fundo Nuevo Celendín, **B:** Vista panorámica del fundo Nuevo Celendín, **C:** Tipo de vegetación y plantación de cacao (Área experimental), **D:** Georreferenciación (Área experimental).

Fuente: Fundo Nuevo Celendín

Apéndice 2. Delimitación de área para la toma de muestras



A: *Medición del área experimental, B:* *Instalación de drizas para diferenciar tratamientos, C:* *Fijación de jalones, D:* *Etiquetado de tratamientos.*

Fuente: Fundo Nuevo Celendín

Apéndice 3. Método de selección de área para toma de muestras



A: Criterio y sistema de extracción de muestras, **B:** Limpieza y selección de área para la toma de muestra, **C:** Selección y toma de muestra, **D:** Envasado y etiquetado de la muestra de suelo.

Fuente: Fundo Nuevo Celendín

Apéndice 4. Encalado y enmiendas



A: Enmiendas calcáreas, **B:** Pesado de enmiendas calcáreas, **C:** Aplicación de enmiendas calcáreas. **D:** Sellado e sedimentado de enmiendas calcáreas.

Fuente: Fundo Nuevo Celendín

Apéndice 5. Depósito y Análisis de muestras de suelo



A: Reconocimiento de tipo de suelo en laboratorio, **B:** Mesclado y selección de muestra, **C:** Pesado de muestra de suelo. **D:** Secado y análisis.

Apéndice 6. El hábitat, Planta y Fruto del Cacao



A: *Micro clima y estrato agroforestal, B: Fructificación, C: Fruto de Cacao.*

Fuente: Fundo Nuevo Celendín

Apéndice 7. Cálculo de enmienda por planta

Concentración de Cd = 0.960

Da = 1.4416 t/ m³

Volumen = 2.500 m³

Entonces: $1.4416 \text{ t / m}^3 * 2.500 \text{ m}^3 = 3\ 603.91$

$3\ 603.91 \text{ t} \quad - \quad X \text{ ppm}$

$1\ 000\ 000 \quad - \quad 0.960 \text{ ppm}$

$$X = \frac{3\ 603.91 \text{ t} * 0.960 \text{ ppm}}{1\ 000\ 000} = 0.00346 \text{ t / ha}$$

$$0.00346 \text{ t / ha} * 1\ 000 = 3.46 \text{ kg de Cd por ha}$$

Cálculo de la dosificación de CaCO₃:

$$\frac{3.46 \text{ kg de Cd por ha}}{56.205 \text{ eq - g}} = 0.061556 \text{ kg}$$

$$0.061556 \text{ kg} * 1\ 000 = 61.556 \text{ eq - g de Ca}$$

Lo que significa que 61.556 eq-g de Cd reacciona con 61.556 eq-g de Ca, dolomita y yeso.

Expresado en peso del producto es:

$$61.556 \text{ eq-g de Cd} * 50.043 \text{ g de CaCO}_3 = 3\ 080.472 \text{ g de CaCO}_3$$

$$3\ 080.472 \text{ g de CaCO}_3 / 1\ 000 = 3.080 \text{ kg de CaCO}_3 \text{ por ha}$$

Si en 1 ha de cacao entran 1111 plantas de cacao, en una planta se utilizará 2.772 g de CaCO₃

$$3.080 \text{ kg de CaCO}_3 / 1111 \text{ plantas} = 0.0027 \text{ kg de CaCO}_3 \text{ por planta}$$

$$0.0027 \text{ kg de CaCO}_3 \text{ por planta} * 1000 = 2.772 \text{ g de CaCO}_3$$

Los cálculos precedentes sirvieron para estimar la dosis de enmienda a aplicar en el caso de usar el Factor X (1 eq de Cd es igual a 1 eq de Ca). Pero en esta investigación se usó el Factor 2X por lo que la dosis usada es equivalente a 5.545 g. Cálculo de la dosificación de

CaMg(CO₃)₂:

Si 61.556 eq-g de Cd reacciona con 61.556 eq-g de CaMg(CO₃)₂.

Expresado en peso del producto es:

$$61.556 \text{ eq-g de Cd} * 92.200 \text{ g de CaMg(CO}_3)_2 = 5\,675.463 \text{ g de CaMg(CO}_3)_2$$

$$5\,675.463 \text{ g de CaMg(CO}_3)_2 / 1000 = 5.675 \text{ kg de CaMg(CO}_3)_2 \text{ por hectárea}$$

Si en 1 ha de cacao entran 1111 plantas de cacao:

$$5.675 \text{ kg de CaMg(CO}_3)_2 / 1111 \text{ pl} = 0.005 \text{ kg de CaMg(CO}_3)_2 \text{ por planta}$$

$$0.005 \text{ kg de CaMg(CO}_3)_2 \text{ por planta} * 1000 = 5.108 \text{ g de CaMg(CO}_3)_2$$

Entonces $2X = 2 (5.108 \text{ g de CaMg(CO}_3)_2) = 10.217 \text{ g de CaMg(CO}_3)_2$

Cálculo de la dosificación de SO₄Ca:

Si 61.556 eq-g de Cd reacciona con 61.556 eq-g de SO₄Ca.

Expresado en peso del producto es:

$$61.556 \text{ eq-g de Cd} * 86.090 \text{ g de SO}_4\text{Ca} = 5\,299.356 \text{ g de SO}_4\text{Ca}$$

$$5\,299.356 \text{ g de SO}_4\text{Ca} / 1000 = 5.299 \text{ kg de SO}_4\text{Ca por hectárea}$$

Si en 1 ha de cacao entran 1111 plantas de cacao:

$$5.299 \text{ kg de SO}_4\text{Ca} / 1111 \text{ pl} = 0.005 \text{ kg de SO}_4\text{Ca por planta}$$

$$0.005 \text{ kg de SO}_4\text{Ca por planta} * 1000 = 4.770 \text{ g de SO}_4\text{Ca}$$

Entonces $2X = 2 (4.770 \text{ g de SO}_4\text{Ca}) = 9.539 \text{ g de SO}_4\text{Ca}$

Apéndice 8. Resultado de cadmio acumulado en tres parcelas iniciales



UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN MARTÍN - TARAPOTO
FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS
LABORATORIO DE ANÁLISIS DE SUELOS, AGUAS Y FOLIARES



ANÁLISIS DE SUELO - CADMIO

SOLICITANTE: JENIFER ROSALES RIVERA
 PROVINCIA: MOYOBAMBA
 DISTRITO: CALZADA/SORITOR

FECHA DE MUESTREO: 1/08/2019
 FECHA DE REPORTE: 19/08/2019
 LUGAR DE ENVÍO: NUEVA CAJAMARCA

Muestra N° 01: Moyobamba/Calzada/Sr. ESMERILDO

MICRONUTRIENTES					Cadmio (Cd)	pH
ELEMENTOS	Hierro (Fe)	Manganeso (Mn)	Zinc (Zn)	Cobre (Cu)		
Metodologías	DTPA	DTPA	DTPA	DTPA	Absorción atómica	5.71
Niveles	0	0	0	0	0.63	
	Bajo	Bajo	Bajo	Bajo	Medio	

Muestra N° 02: Moyobamba/Calzada/Sr. Francisco

MICRONUTRIENTES					Cadmio (Cd)	pH
ELEMENTOS	Hierro (Fe)	Manganeso (Mn)	Zinc (Zn)	Cobre (Cu)		
Metodologías	DTPA	DTPA	DTPA	DTPA	Absorción atómica	7.786
Niveles	0	0	0	0	1.12	
	Bajo	Bajo	Bajo	Bajo	Medio	

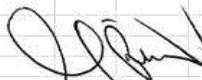
Muestra N° 03: Moyobamba/Soritor/Sr. ALEX GONZALEZ SANDOVAL

MICRONUTRIENTES					Cadmio (Cd)	pH
ELEMENTOS	Hierro (Fe)	Manganeso (Mn)	Zinc (Zn)	Cobre (Cu)		
Metodologías	DTPA	DTPA	DTPA	DTPA	Absorción atómica	7.483
Niveles	0	0	0	0	0.96	
	Bajo	Bajo	Bajo	Bajo	Medio	

Jenifer Rosales Rivera

Ing. Carlos Verde Girbau
 Lab. de Análisis de Suelos y Aguas
 UNSM - TARAPOTO
 Facultad de Ciencias Agrarias

Apéndice 9. Resultado del análisis de suelo inicial

 LABORATORIO DE ANÁLISIS DE SUELOS - ESTACIÓN EXPERIMENTAL DE NUEVA CAJAMARCA Av. Cajamarca Norte N° 1151, Los Olivos IV Etapa - Distrito de Nueva Cajamarca Provincia de Rioja, San Martín. Teléfono 556443																								
RESULTADO DE ANALISIS DE SUELO - CARACTERIZACION																								
NOMBRE : ALEX GONZALEZ SANDOVAL PROCEDENCIA : Fundo Gonzales, Carretera Calzada a Soritor Km 1 FECHA DE INGRESO : 21-May-19										PROFUNDIDAD : Variable FECHA DE REPORTE : Cacao CULTIVO : Cacao ATENCION : "Efecto de tres enmiendas calcáreas sobre la reducción de Cd en suelos cultivados con cacao (<i>Theobroma cacao</i> L.), distrito de Calzada-Moyobamba"														
Nro	CLAVE LABORATORIO	EDAD DEL CULTIVO	PROCEDENCIA y/o AGRICULTOR	Análisis Físico						Análisis Químico														
				Textura			Clase Textural	Densidad Aparente	pH	Conductividad Eléctrica	Calcio	Materia Orgánica	Elementos Disponibles			Capac. de Intercambio Catiónico	Elementos Cambiables							
				Arena %	Arcilla %	Limo %							N %	P ppm	K ppm		Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	Na ⁺	K ⁺	Al ⁺⁺⁺	Saturación de Al %		
1	S019 - 059	M1	18 M 272290 E, 9330827 N	75.80	6.44	17.76	Franco Arenoso	1.64	8.12	0.00202	0.47	2.200	0.099	18.24	58.54	27.91	24.00	3.60	0.16	0.15	Trazas	0%		
2	S019 - 060	M2	18 M 272275 E, 9330841 N	53.84	16.40	29.76	Franco Arenoso	1.46	7.90	0.00128	0.51	2.150	0.097	20.16	84.55	33.54	28.80	4.32	0.20	0.22	Trazas	0%		
3	S019 - 061	M3	18 M 272293 E, 9330868 N	53.80	14.48	31.72	Franco Arenoso	1.48	7.51	0.00054	0.52	2.300	0.104	18.48	199.99	48.99	42.00	6.30	0.18	0.51	Trazas	0%		
4	S019 - 062	M4	18 M 272301 E, 9330892 N	31.80	16.44	51.76	Franco Limoso	1.42	7.68	0.00131	0.41	2.300	0.104	12.00	58.53	54.18	46.80	7.02	0.21	0.15	Trazas	0%		
5	S019 - 063	M5	18 M 272301 E, 9330906 N	27.80	22.44	49.76	Franco Limoso	1.37	8.07	0.00117	0.55	2.150	0.097	42.24	27.64	49.51	42.80	6.42	0.22	0.07	Trazas	0%		
6	S019 - 064	M6	18 M 272298 E, 9330960 N	23.80	24.44	51.76	Franco Limoso	1.35	7.33	0.00064	0.46	2.100	0.095	17.40	42.28	39.83	34.40	5.16	0.16	0.11	Trazas	0%		
PROMEDIO				44.47	16.77	38.75	Franco	1.44	7.77	0.00116	0.49	2.2000	0.0990	21.42	78.59	42.33	36.47	5.47	0.19	0.20	Trazas	0%		
Desviación Estandar				20.11	6.37	14.36		0.11	0.32	0.00054	0.05	0.0837	0.0038	10.57	62.44	10.27	8.90	1.33	0.03	0.16				
Coeficiente de variación				45.22%	38.00%	37.05%		7.38%	4.07%	46.13%	10.29%	3.80%	3.80%	49.35%	79.45%	24.28%	24.40%	24.40%	13.61%	79.56%				
METODOLOGIA EMPLEADA EN LOS ANALISIS:																								
Textura :				Hidrómetro de Bouyoucos				Materia Orgánica :				Walkley y Black				Sodio y Potasio :				Fotometría de Llama				
pH :				Potenciómetro en suspensión suelo: agua				Nitrógeno :				Micro Kjeldahl				Calcio y Magnesio :				Versenato E.D.T.A				
Conductividad Eléctri :				Extracto acuoso en la relación suelo: agua 1:1				Fósforo :				Olsen Modificado				Aluminio cambiabile :				Yuan, extracción con KCl 1N				
Carbonatos :				Gasovolumétrico con calcímetro de Bernard				Capacidad de Intercambio Catiónico :				Suma de Bases cambiabiles				Acidez Activa :				Yuan, extracción con KCl 1N				
 Vº Bº Ing. Carlos Egoávil De la Cruz C.I.P. Nº 32743										  Cleode Flores Laboratorista de Suelos														

Apéndice 10. Resultados de cadmio según tratamiento, repetición y tiempo de muestreo



UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN MARTÍN - TARAPOTO
FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS
LABORATORIO DE ANÁLISIS DE SUELOS, AGUAS Y FOLIARES



ANÁLISIS DE SUELO - CADMIO

SOLICITANTE: JENIFER ROSALES RIVERA

FECHA DE MUESTREO:

PROVINCIA: MOYOBAMBA

FECHA DE REPORTE: 13/01/2020

DISTRITO: CALZADA

LUGAR DE ENVÍO: NUEVA CAJAMARCA

Primer muestreo : Fundo Alex Sandoval

Fecha: 21/05/2019

Clave: 210519	Muestra	Cd (ppm, mg/kg)
	M1	0.47
	M2	0.51
	M3	0.52
	M4	0.41
	M5	0.55
	M6	0.46

Segundo Muestreo

Fecha: 18/10/2019

Clave: 181019	Muestra	Cd (ppm, mg/kg)
	Testigo	0.42
	Yeso - I	0.45
	Yeso - II	0.41
	Yeso - III	0.32
	Cal - I	0.34
	Cal - II	0.4
	Cal - III	0.3
	Dolomita - I	0.3
	Dolomita - II	0.3
	Dolomita - III	0.26

Tercer Muestreo

Fecha: 11/11/2019

Clave: 111119	Muestra	Cd (ppm, mg/kg)
	Testigo	0.48
	Yeso - I	0.45
	Yeso - II	0.42
	Yeso - III	0.39
	Cal - I	0.55
	Cal - II	0.51
	Cal - III	0.48
	Dolomita - I	0.38
	Dolomita - II	0.36
	Dolomita - III	0.35

UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN MARTÍN
 Facultad de Ciencias Agrarias
 Ing. Carlos Verde Cirbau
 TÉCNICO DEL LABORATORIO DE SUELOS Y AGUA

Continúa en la siguiente hoja.

Viene de la hoja anterior



UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN MARTÍN - TARAPOTO
FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS
LABORATORIO DE ANÁLISIS DE SUELOS, AGUAS Y FOLIARES



ANÁLISIS DE SUELO - CADMIO

SOLICITANTE: JENIFER ROSALES RIVERA

FECHA DE MUESTREO:

PROVINCIA: MOYOBAMBA

FECHA DE REPORTE: 13/01/2020

DISTRITO: CALZADA

LUGAR DE ENVIO: NUEVA CAJAMARCA

Cuarto muestreo : Fundo Alex Sandoval

Fecha: 10/12/2019

Clave: 101219	Muestra	Cd (ppm, mg/kg)
	Testigo	0.52
	Yeso - I	0.38
	Yeso - II	0.32
	Yeso - III	0.4
	Cal - I	0.39
	Cal - II	0.41
	Cal - III	0.42
	Dolomita - I	0.3
	Dolomita - II	0.34
	Dolomita - III	0.33



UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN MARTÍN
Facultad de Ciencias Agrarias

Ing. Carlos Verde Girbau
TÉCNICO DEL LABORATORIO DE SUELOS Y AGUA

Apéndice 11. Análisis estadístico de los datos mostrados en el ítem resultados del objetivo 2

El análisis de varianza que muestra la Tabla 18 registra diferencia estadística significativa tanto entre bloques como en los tratamientos a treinta días de la aplicación de enmiendas.

Tabla 18

Análisis de varianza del contenido de cadmio a los treinta días

Fuente de variación	GL	SC	CM	Fc	Ft	Significación
Bloques	2	0.0115	0.0057	7.1667	5.14	*
Tratamientos	3	0.0296	0.0099	12.3438	4.76	*
Error Experimental	6	0.0048	0.0008			
Total	11	0.0459				

Fuente: Elaboración propia.

A nivel de bloques el F_c obtenido es mayor que el F_t ; lo que se interpreta que ha sido conveniente efectuar el bloqueo del terreno para la aplicación de los tratamientos en estudio.

El análisis de varianza que muestra la Tabla 19 registra diferencia estadística significativa solo para los tratamientos a los sesenta días de aplicada las enmiendas.

Tabla 19

Análisis de varianza del contenido de cadmio a los sesenta días

Fuente de variación	GL	SC	CM	Fc	Ft	Significación
Bloques	2	0.0021	0.0011	2.0595	5.14	N.S.
Tratamientos	3	0.0389	0.0130	25.2108	4.76	*
Error Experimental	6	0.0031	0.0005			
Total	11	0.0441				

Fuente: Elaboración propia.

El análisis de varianza obtenido a los noventa días de aplicada las enmiendas, Tabla 20, muestra que no existe diferencia estadística significativa entre bloques, pero sí entre

tratamientos.

Tabla 20

Análisis de varianza del contenido de cadmio a los noventa días

Fuente de variación	GL	SC	CM	Fc	Ft	Significación
Bloques	2	0.0021	0.0010	1.7547	5.14	N.S.
Tratamientos	3	0.0641	0.0214	36.2783	4.76	*
Error Experimental	6	0.0035	0.0006			
Total	11	0.0697				

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 21

Análisis de varianza del contenido de cadmio respecto a la aplicación de SO₄Ca

Fuente de variación	GL	SC	CM	Fc	Ft	Significación
Bloques	2	0.0040	0.0020	1.1637	5.14	N.S.
Tiempo de muestreo	3	0.0239	0.0080	4.6874	4.76	N.S.
Error Experimental	6	0.0102	0.0017			
Total	11	0.0380				

Fuente: Elaboración propia (2020).

Se realizó la prueba de Tukey respecto al ANVA obtenido en la Tabla 21, a fin de conocer la existencia de diferencias significativas en las repeticiones y tiempo de muestreo. Se presenta dichas diferencias a continuación en la Figura 9.

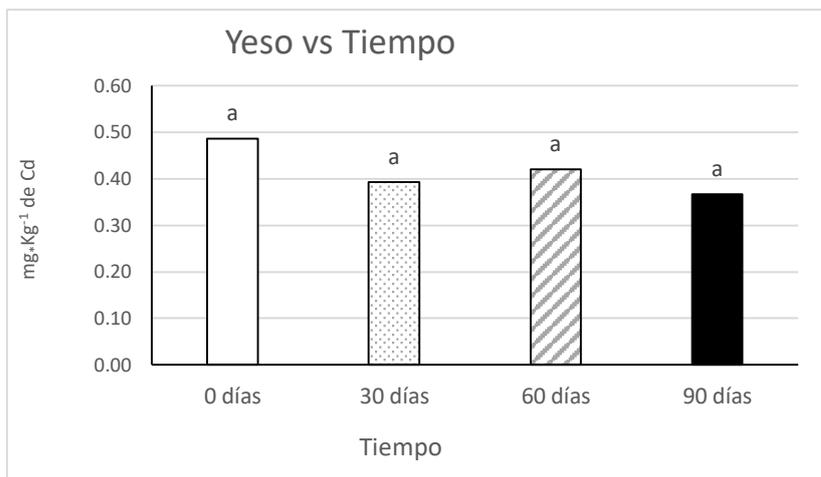


Figura 9. Prueba de Tukey resultante de la aplicación de SO_4Ca (yeso) en los diferentes periodos de muestreo. Fuente: Elaboración propia.

La prueba de Tukey presente en la Figura 9, muestra que estadísticamente no hay diferencia en la reducción de cadmio entre los periodos de muestreo después de la incorporación de yeso, a pesar de que a los 90 días se observa una reducción del contenido de cadmio en el suelo en un 25 % pero sin valor estadístico.

Tabla 22

Análisis de varianza del contenido de cadmio respecto a la aplicación de CO_3Ca

Fuente de variación	GL	SC	CM	Fc	Ft	Significación
Repeticiones	2	0.0019	0.0009	0.9130	5.14	N.S.
Tiempo de muestreo	3	0.0521	0.0174	16.9891	4.76	*
Error Experimental	6	0.0061	0.0010			
Total	11	0.0601				

Fuente: Elaboración propia.

El ANVA obtenido en la Tabla 22 muestra la aplicación de carbonato de calcio a diferentes periodos de tiempo, en la que se observa que no existen diferencias estadísticas significativa entre repeticiones, pero si entre tiempos de muestreo.

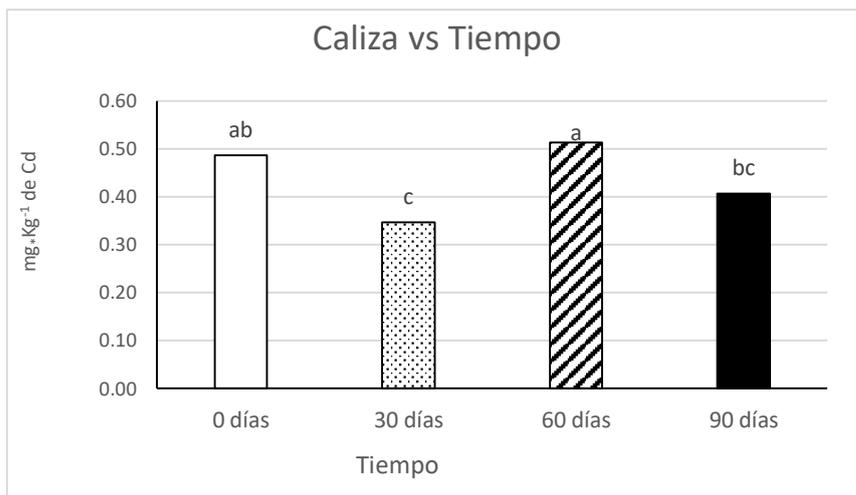


Figura 10. Prueba de Tukey de la aplicación de CO_3Ca (caliza) en diferentes periodos de muestreo. Fuente: Elaboración propia.

La prueba de Tukey presente en la Figura 10 muestra que estadísticamente hay diferencias en la reducción de cadmio entre los periodos de muestreo después de la incorporación de caliza $P \leq 0,05$ y que esta es estadísticamente más significativa a los 30 días, reducción del 29 %. Los otros tiempos tuvieron valores cercanos a la inicial.

Tabla 23

Análisis de varianza del contenido de cadmio respecto a la aplicación de $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$

Fuente de variación	GL	SC	CM	Fc	Ft	Significación
Repeticiones	2	0.0005	0.0002	0.7241	5.14	N.S.
Tiempo de muestreo	3	0.0680	0.0227	70.3793	4.76	*
Error Experimental	6	0.0019	0.0003			
Total	11	0.0704				

Fuente: Elaboración propia.

El ANVA resultante del procesamiento de datos obtenidos en laboratorio respecto a la aplicación de carbonato doble de calcio y magnesio en la Tabla 22 no arroja diferencia significativa para repeticiones, pero sí para el tiempo de muestreo.

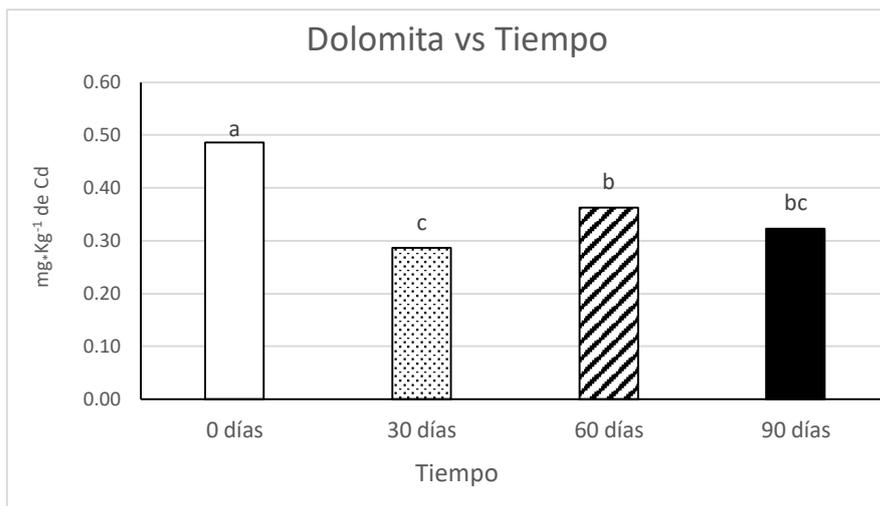


Figura 11. Prueba de Tukey de aplicación de $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ (dolomita) en diferentes periodos de muestreo. Fuente: elaboración propia.

La prueba de Tukey presente en la Figura 11 muestra que estadísticamente hay diferencias en la reducción de cadmio entre los periodos de muestreo después de la incorporación de caliza, y que esta es estadísticamente más significativa a los 30 días, reducción del 41 %. Los otros tiempos tuvieron valores cercanos a la inicial.

Apéndice 12. Análisis estadístico de los datos mostrados en el ítem resultados del objetivo 3

Tabla 24

Promedio del contenido de cadmio a los noventa días para la prueba de Tukey

Tratamiento	90 dda	Tukey 0.05
Testigo	0.52	d
Yeso	0.37	bc
Cal	0.41	bc
Dolomita	0.32	ab

Fuente: Elaboración propia.

Las letras en la tercera columna descritas en la Tabla anterior indican la similitud o diferencia estadística entre tratamientos, por ejemplo, el testigo con mayor contenido de cadmio muestra la letra **d**, mientras los tratamientos con sulfato de calcio y carbonato de calcio que ambos muestran la letra **bc** indican que no hay diferencia estadísticamente significativa entre ambos pero si guardan diferencia significativa respecto al testigo; es decir, los tratamientos

citados reducen de manera estadísticamente significativa el contenido de cadmio inicial en el suelo. Así mismo, el carbonato doble de calcio y magnesio difiere del carbonato de calcio y del sulfato de calcio, pero a su vez es estadísticamente son similares a estos dos tratamientos, en otras palabras, el carbonato doble de calcio y magnesio reduce mucho más el contenido de cadmio inicial que los otros dos tratamientos. mostrando valores de 0.32 ppm y 0.37 ppm respectivamente, la similitud se refleja en la inclusión de la letra b en las tres enmiendas.

Para calcular el Tukey que se muestra en la Figura 12, se usó el valor de la raíz del cuadrado medio del error (CM) 0.0006 entre el número de repeticiones que son 3 que equivale a la desviación estándar de las observaciones 0.014, el que se multiplicó por 4.9 (valor extraído de la tabla de Tukey) con 6 grados de libertad del error y 4 tratamientos en estudio, que es equivalente a 4.9.

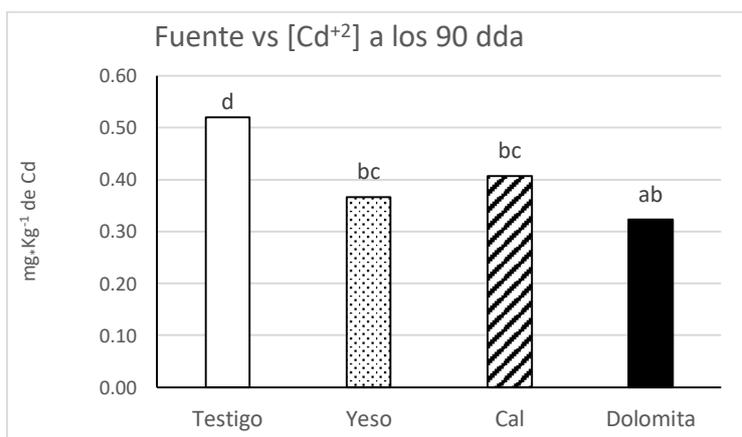


Figura 12. Resultado de la prueba de Tukey a los noventa días. Fuente: Elaboración propia.

El resultado de la diferencia estadística mostrado en la Figura 12, se denomina amplitud límite de significación de Tukey que es equivalente a 0.0687.

A cada promedio se le resta 0.0687 y el resultado sirve de referencia si el resultado siguiente está fuera de este límite hay diferencia significativa. Indicando según la prueba de Tukey que la enmienda Carbonato doble de calcio y magnesio es superior al sulfato de calcio y carbonato de calcio en la reducción de cadmio presente en el suelo. Según los valores

reportados en los análisis de suelos obtenidos en la facultad de agronomía de la Universidad Nacional de San Martín.