

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA
FACULTAD DE RECURSOS NATURALES RENOVABLES
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA EN CONSERVACIÓN DE
SUELOS Y AGUA



EFFECTO DE LA MATERIA ORGÁNICA Y ROCA FOSFÓRICA EN
LA CONCENTRACIÓN DE CADMIO EN SUELO Y PLANTONES
DE CACAO

TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE:

INGENIERO EN CONSERVACIÓN DE SUELOS Y AGUA

Presentado por:

TOLENTINO LAVADO SUNILDA

2020



UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA
Tingo María – Perú



FACULTAD DE RECURSOS NATURALES RENOVABLES

ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS N° 015-2020-FRNR-UNAS

Los que suscriben, Miembros del Jurado de Tesis, reunidos con fecha 24 de febrero de 2020, a horas 10:00 a.m. en la en la Sala de Conferencias de la Facultad de Recursos Naturales Renovables para calificar la Tesis titulada:

“EFECTO DE LA MATERIA ORGÁNICA Y ROCA FOSFÓRICA EN LA CONCENTRACIÓN DE CADMIO EN SUELO Y PLANTONES DE CACAO”

Presentado por la Bachiller: **TOLENTINO LAVADO, Sunilda**, después de haber escuchado la sustentación y las respuestas a las interrogantes formuladas por el Jurado, se declara **APROBADA** con el calificativo de **“BUENO”**

En consecuencia, el sustentante queda apto para optar el Título de **INGENIERO EN CONSERVACIÓN DE SUELOS Y AGUA**, que será aprobado por el Consejo de Facultad, tramitándolo al Consejo Universitario para el otorgamiento del Título correspondiente.

Tingo María, 03 de agosto de 2020

Dr. LUCIO MANRIQUE DE LARA SUAREZ
PRESIDENTE

Ing. Mg. ROBERTO OBREGÓN PEÑA
MIEMBRO

Ing. MSc. JUAN PABLO RENGIFO TRIGOZO
MIEMBRO



Ing. JAIME TORRES GARCIA
ASESOR

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA

FACULTAD DE RECURSOS NATURALES RENOVABLES

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA EN CONSERVACIÓN DE SUELOS Y AGUA



EFECTO DE LA MATERIA ORGÁNICA Y ROCA FOSFÓRICA EN LA CONCENTRACIÓN DE CADMIO EN SUELO Y PLANTONES DE CACAO

Autor	:	TOLENTINO LAVADO, Sunilda
Asesor	:	Ing. TORRES GARCIA, Jaime
Asesor	:	Ing. M.Sc. OTTOS DIAZ, Elvis
Programa de Investigación	:	Gestión de Cuencas Hidrográficas
Línea de Investigación	:	Gestión y Conservación del Recursos Suelo
Eje Temático de Investigación	:	Indicadores Físicos y químicos del suelo
Lugar de Ejecución	:	Universidad Nacional Agraria de la Selva
Duración	Inicio :	16 de mayo del 2017
	Término :	20 de octubre de 2017
Financiamiento	Propio :	S/.4,500.00

DEDICATORIA

A Dios el que en todo momento está conmigo, bendiciendo cada día de mi vida y ayudándome aprender de mis errores. Es quien guía el destino de mi vida.

A mi padre; Solano Tolentino Cazo por su ejemplo de superación, comprensión, apoyo incondicional y haberme formado como persona

A mi madre Antolina Lavado Dimas por apoyarme incondicionalmente y sus sabios consejos en el proceso de mi carrera en todo momento,

A mis queridos hermanos: Maruja, Jesenia, Leonel y Roy por su amor y apoyo incondicional, en todo momento.

A mi esposo Elvis Ottos Diaz, por su comprensión, y apoyo incondicional; a mi hija Arianna Sunny Ottos Tolentino, por su amor y razón de mi ser.

AGRADECIMIENTO

A la Universidad Nacional Agraria de la Selva - UNAS y a todo el personal que la conforman, por contribuir y ser parte en mi formación profesional.

A los miembros del jurado de tesis: Dr. Lucio Manrique De Lara Suarez, M.Sc. Roberto Obregón Peña, Dr. Hugo Huamani Yupanqui, por su aporte y contribución en la revisión académica científica al presente trabajo de tesis.

Al Ing. Jaime Torres García y M.Sc. Elvis Ottos Diaz asesores de la presente tesis, por su apoyo en el proyecto, ejecución, contribución científico y culminación.

A todos mis profesores, docentes de la Universidad Nacional Agraria de la Selva, que me brindaron su conocimiento, ayuda y sobre todo su amistad.

ÍNDICE

	Página
I. INTRODUCCIÓN.....	1
II. REVISIÓN DE LITERATURA.....	4
2.1. Materia orgánica	4
2.1.1. Origen y composición de la materia orgánica del suelo ..	5
2.1.2. Sustancias húmicas (SHs).....	6
2.1.3. Características químicas y fórmulas de las SHs	9
2.1.4. Ácidos fúlvicos (AF)	9
2.1.5. Humina (HUM).....	10
2.1.6. Ácidos húmicos (AH)	11
2.1.7. Humus	12
2.1.8. Compost	14
2.2. Materia orgánica del suelo y efecto en la disponibilidad del cadmio	16
2.3. Cadmio en el suelo	17
2.3.1. Origen del cadmio en el suelo.....	18
2.4. Toxicidad del cadmio en las plantas.....	19
2.5. Roca fosfatada	20
III. MATERIALES Y MÉTODOS.....	22
3.1. Ubicación política	22
3.2. Ubicación geográfica y zona de vida	22

3.3. Materiales y equipos	22
3.3.1. Materiales de escritorio.....	22
3.3.2. Materiales de campo	22
3.3.3. Materiales de laboratorio	23
3.3.4. Reactivos.....	23
3.3.5. Equipos	24
3.3.6. Herramientas	24
3.4. Metodología	24
3.4.1. Efecto de la materia orgánica y roca fosfórica en la concentración de cadmio total en el suelo	25
3.4.2. Definir efecto de la materia orgánica y roca fosfórica en la concentración de cadmio disponible en el suelo	26
3.4.3. Determinar el mejor nivel de la materia orgánica sobre la roca fosfórica en la menor absorción de cadmio en hojas de plántones de cacao.....	26
3.4.4. Correlación y regresión de los niveles de Cd de la roca fosfórica, materia orgánica con el cadmio absorbido por la hoja del cacao.....	27
3.5. Análisis de cadmio total en el suelo método (USEPA 3050).....	28
3.6. Análisis de Cd total de la roca fosfórica.....	29
3.7. Cadmio total en la planta método (digestión húmeda).....	29
3.8. Cadmio disponible en el suelo (soluble en EDTA), según GONZALES (1986)	30
3.9. Tratamientos en estudio.....	30

3.10. Diseño experimental.....	31
IV. RESULTADOS	33
4.1 Efecto de la materia orgánica y roca fosfórica en la presencia de cadmio total en el suelo.....	33
4.1.1. Efecto principal de la materia orgánica y roca fosfórica en la presencia de cadmio total en el suelo.	34
4.2 Efecto de la materia orgánica y roca fosfórica en la presencia de cadmio disponible en el suelo.....	37
4.2.1. Efecto principal de materia orgánica y roca fosfórica en la presencia de cadmio disponible en el suelo.	38
4.2.2. Efectos simples de las interacciones de materia orgánica con la roca fosfórica en la presencia de cadmio disponible en el suelo	39
4.3 Concentración de cadmio en hojas de plántones de cacao por efecto de la materia orgánica y roca fosfórica.	47
4.3.1. Efecto principal de la materia orgánica y roca fosfórica en la concentración de cadmio total en hojas de cacao. .	48
4.3.2. Efectos simples de las interacciones de materia orgánica con la roca fosfórica en la presencia de cadmio total en hojas de cacao	50
4.4 Correlación y regresión entre los niveles de roca fosfórica y materia orgánica con el cadmio absorbido por la planta de cacao.	56

4.4.1. Correlación entre los niveles de cadmio de la roca fosfórica con el cadmio en las hojas de cacao en cada nivel de M.O (0, 5, 10 y 15 %)	56
4.4.2. Correlación y regresión entre la materia orgánica (niveles) y cadmio de las hojas de cacao en cada nivel de Cd (0.0, 1.5, 3.0 y 4.5 ppm) de la roca fosfórica	59
V. DISCUSIÓN	63
5.1. Efecto de la materia orgánica y roca fosfórica en la presencia de cadmio total en el suelo	63
5.1.1. Efecto principal de la materia orgánica y roca fosfórica en la presencia de cadmio total en el suelo	63
5.2. Efecto de la materia orgánica y roca fosfórica en la presencia de cadmio disponible en el suelo	67
5.2.1. Efecto principal de materia orgánica y roca fosfórica en la presencia de cadmio disponible en el suelo	68
5.2.2. Efectos simples de las interacciones de materia orgánica con la roca fosfórica en la presencia de cadmio disponible en el suelo	70
5.3. Concentración de cadmio en hojas de plantones de cacao por efecto de la materia orgánica y roca fosfórica	73
5.3.1. Efecto principal de la materia orgánica y roca fosfórica en la presencia de cadmio total en hojas de cacao	74

5.3.2. Efectos simples de las interacciones de materia orgánica con la roca fosfórica en la presencia de cadmio total en hojas de cacao	76
5.4. Correlación y regresión entre los niveles de roca fosfórica y materia orgánica con el cadmio absorbido por la planta de cacao.	79
5.4.1. Correlación entre los niveles de cadmio de la roca fosfórica con el cadmio en las hojas de cacao en cada nivel de M.O (0, 5, 10 y 15 %).....	79
5.4.2. Correlación y regresión entre la materia orgánica (niveles) y cadmio de las hojas de cacao en cada nivel de Cd (0.0, 1.5, 3.0 y 4.5 ppm) de la roca fosfórica.....	81
VI. CONCLUSIONES	82
VII. RECOMENDACIONES	83
VIII. ABSTRACT	84
IX. REFERENCIAS BIBLIOGRÀFICAS.....	86
X. ANEXO	98

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro		Página
1.	Descripción de los tratamientos.....	31
2.	Esquema del análisis de variancia (ANVA).....	32
3.	ANVA del cadmio total en suelo.	33
4.	Duncan del cadmio total en el suelo para el efecto (efecto principal), de las dosis de la RF y niveles de materia orgánica.	34
5.	Duncan del cadmio total en el suelo para los tratamientos	35
6.	ANVA de cadmio disponible en el suelo.	37
7.	Duncan del cadmio disponible en el suelo por efecto de la RF y materia orgánica.....	38
8.	ANVA de efectos simple del Cd disponible.	40
9.	Prueba de Duncan para el efecto simple de las interacciones niveles de RF(Cd) sobre los niveles de M.O, en el contenido de Cd disponible a 120 días de instalado.....	41
10.	Duncan del efecto simple de la interacción de los niveles de M.O sobre los niveles de RF(Cd), en la concentración de Cd disponible a 120 días de instalado.....	43
11.	Duncan del Cd disponible entre todos los tratamientos	44
12.	ANVA de cadmio total en hojas de cacao.....	48
13.	Duncan de la concentración de cadmio total en hojas por efecto de la RF (A), y materia orgánica (B)	49

14.	Duncan de la concentración de cadmio total en hojas por efecto de la materia orgánica en la	49
15.	Anva de efectos simpes del cadmio total en hojas	50
16.	Prueba de Duncan para el efecto simple de las interacciones niveles de RF(Cd) con los niveles de M.O sobre el contenido de Cd en hojas a 120 días de instalado.	52
17.	Prueba de Duncan para el efecto simple de las interacciones de los niveles de M.O con los niveles de RF(Cd) sobre el contenido de Cd en hojas a 120 días de instalado.	54
18.	Duncan del cadmio total en hojas de todos los tratamientos.	55
19.	Cadmio total del suelo a 120 días después de la emergencia	99
20.	Cadmio disponible a 120 días después de la emergencia	99
21.	Cadmio total en hojas a 120 días después de la emergencia	100

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura	Página
1. Concentración de cadmio total en suelo, en cada nivel de materia orgánica y roca fosfórica (Cd).....	36
2. Concentración de cadmio disponible en el suelo por efecto de la materia orgánica.....	39
3. Concentración del cadmio disponible en suelo por efecto de los niveles de RF y materia orgánica.	44
4. Efecto de los niveles de RF en cada nivel de materia orgánica en la concentración de cadmio disponible del suelo.....	45
5. Efecto de los niveles de la materia orgánica en cada nivel de RF en la concentración de cadmio disponible del suelo.....	46
6. Concentración del cadmio total en hojas de cacao por efecto de los niveles de RF y materia orgánica.	55
7. Correlación entre los niveles de cadmio de la roca fosfórica y cadmio en las hojas de cacao.....	58
8. Correlación entre los niveles de materia orgánica y cadmio en las hojas de cacao.....	62
9. Efecto de los niveles de cadmio (RF) sobre los niveles de M.O aplicado, en el contenido de Cd disponible a 120 días de instalado ..	101
10. Efecto de los niveles de M.O sobre los niveles de RF(Cd) aplicado, en el contenido de Cd disponible a 120 días de instalado.	102

RESUMEN

El estudio fue realizado entre mayo y septiembre del 2017, en la Universidad Nacional Agraria de la Selva, Leoncio Prado-Huánuco. Los objetivos fueron: i) Determinar el efecto de la materia orgánica (M.O) y roca fosfórica (RF) en la presencia de cadmio (Cd) total en el suelo, (ii) Definir efecto de la M.O y RF en la presencia de Cd disponible en el suelo, (iii) Determinar el mejor nivel de la M.O sobre la RF en la menor absorción de Cd en hojas de plantones de cacao (iiii) Correlación entre los niveles de RF y M.O con el Cd foliar del cacao. Con un diseño completo al azar, en arreglo factorial: Niveles de Cd de la roca fosfórica (0.0 1.5, 3.0 y 4.5 ppm Cd), y M.O (0, 5, 10,15 %). Se colocó una semilla pre germinada de cacao (CCN-51) en sustrato embolsado la RF y M.O incubados (45 días); las plantas de cacao fueron evaluadas a los 120 días. Los resultados muestran que la concentración del Cd total en el suelo fue mayor con las dosis más altas de materia orgánica (inmovilizo el Cd) y RF. La concentración del Cd disponible se incrementa con la mayor dosis del Cd (RF), y reduce cuando se incrementa los niveles de materia orgánica. Al incrementarse las dosis de M.O se reduce la concentración del Cd en la hoja del cacao; la menor concentración de cadmio en las hojas de cacao fue con 15 % de materia orgánica (b4) sobre 1.5 ppm de cadmio (a2). La correlación fue negativa y significativa entre los niveles de materia orgánica y cadmio en las hojas de cacao, disminuyendo el Cd en la hoja con la dosis más alta de M.O aplicado. La incorporación de la roca fosfórica aplicados en dosis agronómicas sobre el cacao, en periodo de tiempo corto, no produciría una contaminación por cadmio en el suelo.

I. INTRODUCCIÓN

Diversos estudios mostraron elevadas concentraciones de cadmio en suelo y almendras (cotiledón) de cacao en Leoncio Prado y otras zonas del Perú. En Leoncio Prado, CÁRDENAS (2012) reportó 1.55 ppm de cadmio en almendras. ARÉVALO *et al.* (2017) para la región San Martín y Amazonas reportó valores de cadmio en suelo y grano que superan el nivel permisible según reglamento establecido por la Unión Europea, (UE) N° 488/2014, publicado en que establece niveles máximos de Cd para diversos alimentos incluido chocolates y cocoa en polvo que fluctúan de 0.05 - 0.8 ppm Cd total, que se aplica desde el 1 de enero de 2019, que afectara la comercialización y economía de los productores.

La roca fosfórica es la principal fuente (nutriente) orgánico de fosforo que se utiliza en el cultivo de cacao y en otros cultivos, sin embargo, tendría elevado contenido de cadmio mayor de 20 ppm, y habría sido considerada como causa antropogénica del cadmio en el cacao. En la actualidad no se tiene un producto que lo remplace por lo tanto en la agricultura orgánica su aplicación es indispensable. La materia orgánica reduce la movilidad del cadmio previniendo la contaminación y toxicidad por su bioacumulación (BRAVO *et al.*, 2014). La materia orgánica del suelo (MOS) está compuesta por sustancias complejas, entre ellos las sustancias no húmicas y sustancias húmicas agrupadas en ácidos

fúlvicos, ácidos húmicos y huminas (KANG *et al.*, 2003), sustancias húmicas de la M.O con ligandos naturales que retienen el cadmio (CLARK *et al.*, 2007)., estos ligandos son moléculas orgánicas con carga negativa que retiene (adsorbe) el Cd, retiene el Cd disponible formando moléculas órgano-mineral (HAN-SONG *et al.*, 2010).

Sin embargo, mezclando la roca fosfórica con la materia orgánica en una aplicación conjunta, se podría mitigar el posible efecto contaminante (si existiera) de la RF, el complejo arcillo húmico generado por la materia orgánica formaría compuestos muy estables, insolubles con el cadmio, reduciendo su biodisponibilidad y evitando que las plantas generen acumulación del cadmio en principalmente en los granos (cotiledones) de cacao. La interacción de distintos niveles de la materia orgánica en distintos niveles de roca fosfórica sobre la absorción del cadmio en las hojas de plántones de cacao permitirá conocer la dosis de la materia orgánica para la reducción de la absorción del cadmio; y nivel de la roca fosfórica que genere una acumulación significativa de cadmio en las hojas de cacao.

1.1. Objetivo general

- Determinar el efecto de la materia orgánica y roca fosfórica en la concentración de cadmio en suelo y plántones de cacao *Theobroma cacao* L. en etapa de vivero.

1.2. Objetivos específicos

- Determinar el efecto de la materia orgánica y roca fosfórica en la concentración de cadmio total en el suelo.
- Definir el efecto de la materia orgánica y roca fosfórica en la concentración de cadmio disponible en el suelo.
- Determinar el mejor nivel de la materia orgánica sobre la roca fosfórica en la menor absorción de cadmio en hojas de plantones de cacao.
- Determinar la correlación y regresión entre los niveles de roca fosfórica y materia orgánica con el cadmio absorbido por la planta de cacao.

II. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. Materia orgánica

La fracción orgánica del suelo que incluye vegetales y animales en diferente estado de descomposición se conoce como materia orgánica. Se pueden diferenciar los grupos de: carbohidratos; proteínas, polipéptidos y ácidos nucleicos; grasas, ceras y resinas; ligninas; y otros compuestos (FASSBENDER y BORNEMISZA, 1987). La materia orgánica del suelo (MOS) actualmente es considerado como un factor que controla la capacidad del suelo como recursos para brindar servicios agrícolas y ambientales y sustentar a la sociedad humana a nivel local y global (por ejemplo, mitigación de la atmósfera de emisiones de carbono) (SYERS y CRASWELL, 1995).

La determinación de la materia orgánica se basa en la cuantificación del carbono que se encuentra en los suelos formando parte de materiales orgánicos, FAO (2002) muestra que el carbono orgánico del suelo representa la mayor reserva de interacción con la atmosfera. La materia orgánica es fuente principalmente de carbono (cerca del 58 % por peso), en la tierra. El termino MO se refiere a todos los compuestos que contienen carbono (C) orgánico en el suelo, incluyendo los microorganismos vivos y muertos, residuos de animales y plantas en diversas etapas de descomposición, biomasa microbiana, las raíces

y la fracción más estable llamado humus (BAYER y MIELNICZUK ,1999). La MOS juega un papel clave en las funciones del suelo, siendo, por eso, considerada la principal característica indicadora de su calidad, por presentar una fuerte interrelación con casi todas las propiedades físicas, químicas y, biológicas del suelo, ejerciendo una fuerte influencia en su capacidad productiva y de modo muy intenso en la nutrición de las plantas (ACOSTA *et al.*, 2014).

La materia orgánica del suelo (MOS) es el componente esencial que ocurre en los ecosistemas terrestres, dentro de los cuales se destacan: la estructuración del suelo, reducción de la contaminación de agua, el taponamiento del pH del suelo, disponibilidad de aire y agua a las raíces de las plantas y el desarrollo del sistema radicular (CONCEIÇÃO *et al.*, 2015).

2.1.1. Origen y composición de la materia orgánica del suelo

El suelo recibe una gran cantidad de restos orgánicos de distinto origen, entre estos, restos de las plantas superiores que llegan al suelo de dos maneras: se depositan en la superficie (hojas, ramas, flores y frutos) o quedan directamente en la masa del suelo (raíces al morir). Otras dos fuentes importantes son el plasma microbiano y los restos de la fauna habitante del suelo. Inmediatamente después de la caída de los materiales al suelo y muchas veces antes, comienza un rápido proceso de transformación por parte de los macro y microorganismos que utilizan los residuos orgánicos como fuente de energía. El proceso de descomposición está acompañado de la liberación de CO₂ y de los nutrimentos contenidos en los residuos orgánicos. Del 75 a 90%

de los restos orgánicos están constituidos por agua. Una fracción pequeña de la materia orgánica del suelo está constituida por carbohidratos, aminoácidos, ácidos alifáticos, proteínas, grasas, etc y en su mayor parte están formadas por las llamadas sustancias húmicas, que son una serie de compuestos de alto peso molecular (STEVENSON, 1994).

Estas sustancias húmicas han sido divididas en grupos de acuerdo a su solubilidad en soluciones ácidas y básicas concentradas: ácidos húmicos, ácidos fúlvicos y huminas. Los ácidos húmicos son moléculas más grandes y complejas que los ácidos fúlvicos, además presentan contenidos más alto de nitrógeno, pero menor de grupos funcionales (FASSBENDER y BORNEMISZA, 1987).

2.1.2. Sustancias húmicas (SHs)

La materia orgánica del suelo (MOS) es objeto de atención importante en numerosas investigaciones, sobre todo en la última década. Es constituida por C, H, O, N, S y P, con los contenidos 58%, 6%, 33% respectivamente y los tres últimos 3% (DUCHAUFOR, 1982). La MOS puede ser dividida en dos grupos fundamentales: las biomoléculas y las sustancias húmicas (SHs). El primer grupo es representado por los carbohidratos, grasas, ceras, proteínas y ácidos nucleicos (BARRETO *et al.* 2008). El segundo comprende a las sustancias húmicas (SHs). Según BENDECK (2003) el humus es el componente con mayor importancia, y alcanza hasta el 90 % del carbono total del suelo, y el humus ha sido dividido, convencionalmente, en sustancias no húmicas y en sustancias húmicas.

De acuerdo con BENITES *et al.* (2003), las sustancias húmicas (SHs) pueden ser definidas como una serie de polímeros amorfos de coloración amarillo, marrón a negro, de peso molecular relativamente alto y formado por reacciones de síntesis secundarias, bióticas y abióticas, generalmente clasificados de acuerdo a su solubilidad en álcali y ácidos. Las SHs son químicamente muy similares, pero las fracciones pueden ser diferenciados unos de otros por el color, peso molecular, presencia de grupos funcionales, grado de polimerización y el contenido de C, O, H, N y S.

Las sustancias húmicas (SHs) son divididas en tres fracciones con diferentes propiedades físico-químicas: Ácidos fúlvicos (AF), ácidos húmicos (AH) y humina (HUM). Las SHs contribuyen alrededor del 85-90% de carbono orgánico total (COT) y son el principal componente de la materia orgánica del suelo (MOS), que consta con grandes reservas orgánicas del suelo (SANTOS, 2005). La parte humificada de la materia orgánica del suelo (MOS) del suelo está formado por moléculas recalcitrantes de origen vegetal, animal y microbiana, y representa un estado indefinido de MOS. Las SHs desempeñan un importante papel en la retención de cationes, reserva de nutrientes a los cultivos, masa microbiana y en la estabilidad de agregados. Esta última, por su vez, interfiere en la infiltración, retención de agua y aeración del suelo. Así, las SHs constituyen un componente fundamental de la capacidad productiva de los suelos (BAYER y MIELNICZUCK, 1999).

STEVENSON (1994) describe la génesis, la composición y las reacciones químicas del humus con base en el modelo macromolecular, Piccolo

(2001) reunió evidencias sobre un arreglo supraestructural para explicar la estructura de estas sustancias, por lo tanto, las sustancias húmicas se mantienen agregadas por medio de fuerzas de interacción débil, como las de van der Waals y otras conexiones hidrofóbicas, en pH neutro, y de puentes de hidrógeno, en valores más bajos de pH. Según BALDOTTO y BALDOTTO (2014) las sustancias húmicas vienen siendo concebidas como agregados supramoleculares, organizándose en agrupaciones de diversos compuestos conteniendo dominios predominantemente hidrofílicos (ácidos fúlvicos), o hidrofílico-hidrofóbicos (ácidos húmicos). Las SHs representan casi la totalidad de la materia orgánica del suelo (MOS), debido a su gran reactividad, es responsable de las reacciones químicas del suelo (CANELLAS *et al.*, 1999). Las SHs destacan en muchas investigaciones, ya que representan la principal reserva de C en el suelo y aun integran con la atmósfera modificando la cantidad de CO₂, dependiendo del uso y manejo adoptado (PICCOLO, 2001).

La distribución de C orgánico, en las tres fracciones de las SHs depende del tipo de suelo, del tipo de vegetación, del uso y manejo empleado (DICK y MARTINAZZO, 2006). El uso intensivo del suelo, la quema de sus residuos y la manutención de cultivos con baja incorporación de residuos vegetales promueven la degradación de sus propiedades químicas y físicas. El conocimiento de la aplicación de técnicas que promuevan la manutención o recuperación de MOS, permiten la búsqueda del equilibrio entre pérdidas y ganancias observados en ambientes sobre vegetación natural.

2.1.3. Características químicas y fórmulas de las SHs

Con los recursos de la química moderna, la estructura molecular de las SHs sigue siendo objeto de numerosos estudios y controversias, siendo formados por una mezcla heterogénea y bastante compleja de moléculas orgánicas, polimerizadas y con masa molecular bastante variada

El ácido húmico, contiene menos grupos carboxílicos por unidad de masa que los ácidos fúlvicos (BALDOTTO y BALDOTTO, 2014). Muchos investigadores han tratado de desarrollar modelos químicos para representar las estructuras medias de las SHs tal como se presentaron las del AH por STEVENSON (1982). La amplia variación en el grado de polimerización y el número de cadenas laterales y radicales que pueden ser encontradas en las SHs hace con que no exista similitud entre dos moléculas húmicas. Las sustancias húmicas (SH) agrupadas en ácidos fúlvicos (AF), ácidos húmicos (AH) y huminas (H) (KANG *et al.*, 2003), estarían asociados al cadmio.

2.1.4. Ácidos fúlvicos (AF)

Fracción o derivado de la materia orgánica del suelo caracterizado por su solubilidad en solución alcali (base) y ácido, el AF es mezcla de ácidos orgánicos alifáticos débiles y aromáticos con PM que van desde 1000 a 10000 (RODRÍGUEZ, 2009). AF contienen oxígeno dos veces mayor que los ácidos húmicos, contienen más grupos carboxílicos (-COOH) e hidroxilos (-COH), generando un compuesto químicamente más reactivo, con doble CIC (con capacidad de intercambio aniónico y catiónico) que el AH, además la alta CIC

es producido por los grupos carboxilos (RON, 2004). El ácido fúlvico, contiene más grupos carboxílicos por unidad de masa (BALDOTTO y BALDOTTO, 2014).

Los AF son solubles en un medio álcali y en ácido diluido. Son constituidos principalmente por polisacáridos, aminoácidos y compuestos fenólicos, que son más reactivos que las otras dos fracciones por la mayor cantidad de grupos carboxílicos y fenólicos que contiene. Estudios realizados en la acción directa de las SHs sobre el metabolismo y crecimiento de las plantas se han centrado principalmente en los AF, la fracción humificada considerada de menor peso molecular, mayor solubilidad y movilidad en el suelo (DUCHAUFOR, 1982). Según STEVENSON (1994) el ácido húmico tiene un peso molecular < 100 000.

2.1.5. Humina (HUM)

La humina es insoluble en medios alcalinos y ácidos y pueden tener una composición variable, reducida capacidad de reacción. Su falta de sensibilidad en un medio acuoso puede ser debido simultáneamente a la alta hidrofobicidad y fuerte interacción con los componentes inorgánicos y también por tener compuestos lipídicos, estructuras de carbohidratos y aromáticos en diferentes proporciones (KONOVA, 1966; PETTIT, 2012). se consideran sustancias macro orgánicas (muy grandes) porque sus pesos moleculares (PM) oscilan entre 100,000 y 10.000,000. aproximadamente En comparación, los pesos moleculares de carbohidratos (azúcares/complejos) varía de aproximadamente 500 a 100,000. Las propiedades químicas y físicas de la

humina se entienden solo parcialmente. Las humina presentes en el suelo son los más resistentes a la descomposición de todas las sustancias húmicas (PETTIT, 2012).

La humina (HUM) presenta baja acidez en comparación con los AF y AH, que, junto con la fuerte asociación a los minerales, provoca insolubilidad en el medio alcalino acuoso (BENITES *et al.*, 2003). La insolubilidad de la HUM puede ser proveniente de haber sido fuertemente adsorbida o unida a los componentes inorgánicos del suelo. La resistencia a la degradación microbiana de materiales húmicos también parece ser en gran parte debido a la formación de complejos metálicos y/o arcilla-orgánicas estables (SCHNITZER *et al.*, 1991). La estructura química y propiedades de la fracción HUM parecen ser similares aquellas de los AH (STEVENSON, 1982).

2.1.6. Ácidos húmicos (AH)

Sustancias orgánicas de color oscuro soluble en base e insoluble en ácidos, por lo tanto, es extraído del suelo con álcalis (base) y otros reactivos, que se precipitan cuando el pH disminuye por debajo de 2. En promedio, el 35% de las moléculas de ácido húmico (HA) son aromáticas (anillos de carbono), el resto son moléculas alifáticas (cadenas de carbono) (PETTIT, 2012). El AH tiene mayor peso molecular y es menos ácido que el Ácido Fúlvico, constituido por grupos funcionales, hidroxilos (-OH) fenólicos con menor carboxílicos (-COOH) sin embargo el AH tiene mayor agregación y estabilidad. Según CALACE *et al.* (2000) la composición y estructuras del ácido húmico es más complejas que de

los ácidos fúlvicos. Según STEVENSON (1994) el ácido húmico tiene un peso molecular < 300 000

2.1.7. Humus

El humus de lombriz es un fertilizante de primer orden, protege al suelo de la erosión, siendo un mejorador de las características físico-químicas del suelo, de su estructura (haciéndola más permeable al agua y al aire), aumentando la retención hídrica, regulando el incremento y la actividad de los nitritos del suelo, y la capacidad de almacenar y liberar los nutrientes requeridos por las plantas de forma equilibrada (nitrógeno, fósforo, potasio, azufre y boro) (FERNÁNDEZ y HERNANDEZ, 2006).

El proceso de compostaje natural hasta la formación de humus requiere un tiempo considerable (años en algunos casos) que no estamos dispuestos a esperar, de modo que en el marco de la lombricultura el tiempo de compostaje al que se va a someter la materia orgánica son de 45 a 90 días. La calidad del abono (humus) a obtener se relaciona directamente con la selección (tipo) de materia orgánica, su estado, acondicionamiento y tratamiento. Una elección inadecuada nos proporcionara un alimento que las lombrices podrán mejorar, pero sin llegar al óptimo (SCHULDT, 2004).

Las lombrices pueden tomar y acumular en sus tejidos metales pesados como cadmio, mercurio, plomo, etc. cuando viven en ambientes contaminados. Puesto que las lombrices forman parte de numerosas cadenas tróficas, los animales carnívoros; dependiendo de su eficiencia en su asimilación,

pueden acumular metales pesados dando lugar a una biomagnificación (IRELAND,1983).

Las deyecciones de lombrices constituyen el llamado vermicompost, que contienen más nutrientes que el suelo original. Las lombrices no incrementan el contenido total de nutrientes en suelo, pero los hace más asimilables y acelera el reciclaje de los elementos. Se considera que la fuente de nutrientes fundamentalmente afectada por las lombrices es la materia orgánica, que incluye materia vegetal muerta, en la superficie del suelo, y también raíces y materia orgánica del suelo, así como micro fauna y microflora, en profundidad (SYERS y SPRINGETT, 1983).

El humus es una materia orgánica homogénea, amorfa, de color oscuro e inodora, es el resultado de la materia orgánica y otros componentes comidos y defecados por las lombrices, los productos finales de la descomposición del humus son las sales minerales, dióxido de carbono y amoníaco, además de ser un excelente fertilizante es un mejorador de las características físico-químicas del suelo (MORALES, 1996). El humus de lombriz contiene una concentración importante de elementos solubles orgánicos, entre los que se incluyen los humatos y los más importantes son los ácidos húmicos, fúlvicos y húmicos, y su aplicación estimula los procesos de humificación y mineralización de los residuos vegetales en el suelo (SOMARRIBA y GUZMAN, 2004).

Los investigadores, del Departamento de Ecología y Ciencias Ambientales de la Universidad de Pondicherry, en la India; explicaron que el

proceso de vermicompostaje con varias especies de lombrices permite la remediación de residuos sólidos y la utilización del compost para su uso en el cultivo de alimentos para humanos sin el riesgo de que se acumulen metales pesados en los cultivos. Ellos afirman que los gusanos pueden eliminar hasta el 75% de los diversos metales pesados de los desechos sólidos.

2.1.8. Compost

El proceso de compost es una descomposición predominantemente aeróbica y se puede dividir en 3 fases; la fase inicial de descomposición de los materiales más lábiles, tales como azúcar, proteínas y almidones. La segunda fase de temperaturas más altas, donde se degradan los materiales más recalcitrantes como celulosa y la lignina, y finalmente a la fase tercera de síntesis, donde se forman las sustancias húmicas (RESTREPO *et al.*, 2014).

Según, RESTREPO *et al.* (2014); los factores a tener en cuenta para elaborar un buen compostaje son: Humedad ideal para iniciar el proceso de compost debe estar alrededor de 40 a 55%, temperatura ideal que oscile entre 40 y 50 °C, oxígeno es aproximadamente del 5%, el pH adecuado para un compost oscila en un rango entre 6 y 8, relaciones de C/N altas ocasionan que el proceso de descomposición sea más lento y relaciones de C/N bajas hacen que se pierda Nitrogeno por falta de estructuras de carbono, que permitan que lo retengan.

LABRADOR (2001) asegura que la calidad del compost es una expresión de sus características y que esta calidad refleja que hemos obtenido

un producto orgánico estable, con un contenido elevado en sustancias húmicas, equilibrado en nutrientes, óptimo en microorganismos útiles, que presenta una granulometría idónea, así como un olor agradable y una coloración oscura y que está libre de contaminantes y de sustancias Fitotóxicas, siendo su dinámica en el suelo semejante a la de las sustancias húmicas originales.

No se debe confundir la calidad del compost con su madurez. La madurez del compost significa que los nutrientes y la energía que contienen los materiales que han contribuido al producto final han sido combinados de forma adecuada, siguiendo un proceso correcto y formando como consecuencia una masa orgánica estable. La calidad de un compost refleja su madurez, pero también refleja o incluye otras características físicas, químicas y biológicas restantes (LABRADOR, 2001). Por su parte, CEGARRA (1994) y MAZZARINO, (2005) aseguran que la calidad del compost está determinada por los materiales originales (su grado de digestión, su contenido original de nutrientes, etc.) y por el sistema de compostaje utilizado. Los autores afirman que para evaluar la calidad del compost se proponen criterios basados en la cuantificación de algunos parámetros físicos, químicos y biológicos. Estos criterios definen las características benéficas del compost y permiten recomendar su aplicación para diferentes finalidades agrícolas.

El uso de microorganismos efectivos (EM) en el compost tiene la ventaja con respecto al compost común, que su uso acelera la descomposición de la materia orgánica y neutralizan los malos olores generados en el proceso. El proceso de compostaje puede durar 1 a 2 meses dependiendo de la materia

prima utilizada. Además, los EM se reproducen en esta materia orgánica por lo que al aplicarlo al suelo estamos haciendo una inoculación de microorganismos beneficiosos (BID, 2009).

2.2. Materia orgánica del suelo y efecto en la disponibilidad del cadmio

SPOSITO (1981, 1982, 1983), HOODA y ALLOWAY (1994) indican que el contenido de materia orgánica además de pH es propiedad del suelo que afecta fuertemente la biodisponibilidad del metal pesado. Sin embargo, el efecto depende del tipo de materia orgánica presente en el suelo (DEL CASTILHO *et al.*, 1993; MANN y RITHIE, 1995). Es posible que la capacidad de los ácidos húmicos del suelo nativo para la inmovilización de Cd sea diferente de la de la preparación comercialmente disponible. Sin embargo, según KUO y BAKER (1980) existiría un incremento del cadmio soluble por efecto de la materia orgánica y este aumento de la forma soluble de Cd se atribuiría posiblemente a la disolución de materia orgánica a valores de pH más altos liberando así Cd en la solución del suelo. Se han descrito disminuciones en la disponibilidad de Cd bajo condiciones ácidas en presencia de materia orgánica (TILLER, 1988).

En los estudios realizados por HUAYNATES (2013) determinó que la concentración de cadmio en suelos del Departamento de Huánuco se encuentra en rango de 0.04 – 3.67 mg/kg, en el Departamento de Ucayali esta entre 0.49 – 4.11 mg/kg y en el Departamento de San Martín con rangos de 0.1 -1.24 mg/kg, siendo el límite máximo permisible según la OMS/FAO 0.3 mg/kg de suelo. Los estudios realizados por ZAFRA (2012), demostraron que los suelos con plantaciones de *Theobroma cacao* L. “cacao” Proveniente de la provincia de

Tocache presentan cadmio en rango de 0.15 a 0.85 ppm, las muestras de suelos de clase textural franco limoso presentaron mayor contenido de cadmio (0.38 a 0.85) frente al suelos de textura franco (0.15 a 0.34 ppm) y franco arenoso (0.27 a 0.28 ppm).

2.3. Cadmio en el suelo

Los metales pesados y los metaloides son fuertemente adsorbidos por los constituyentes coloidales orgánicos e inorgánicos del suelo. Los metales trazas se adsorben en la superficie de partículas coloidales en suelos, principalmente humus, óxidos hidratados de Fe, Mn y Al, arcillas de aluminosilicato y algunas sales escasamente solubles, como el carbonato de calcio. Estructuralmente los materiales húmicos son de alrededor de 20-30% alifáticos, 10-20% de carbohidratos y 20-40% de aromáticos. Alrededor del 20% de H está unido a O como carboxilo (H-COOH) y grupos hidróxilo ácidos (posiblemente fenólicos) (H-OH), el resto está unido directamente a C (Tipping 2002). El cadmio puede aparecer como especie catiónica: $CdCl^+$, $CdOH^+$, $CdHCO_3^+$, $CdHS^+$, y como especie aniónica: $CdCl_3^-$, $Cd(OH)_3^-$, $Cd(OH)_2$, $Cd(HS)_2$ (KABATA-PENDIA y SADURSKI, 2004).

Se ha predicho las siguientes especies de Cd en la solución de suelo: En suelo oxic, Cd^{2+} , $CdSO_4^0$ y $CdCl^+$; en suelo ácido, Cd, $CdCl^+$, $CdSO_4^0$; en suelo alcalino, $CdHCO_3^+$. En suelos con pH elevado mayor a 7.5 el cadmio formaría dos compuestos principales el $CdCO_3$, y $Cd_3(PO_4)_2$ (MATUSIK *et al.* 2008), pero en condiciones anaeróbicas, la solución de Cd en el suelo se rige por la precipitación de sulfuros (CHRISTENSEN y HUANG, 1999). La capacidad

de adsorción de la hidroapatita (Roca fosfórica) para el Cd disminuye en presencia de otros metales (Cu, Zn, Pb), debido a la sorción competitiva que el Cd presenta en la solución (CORAMI *et al.*, 2007).

2.3.1. Origen del cadmio en el suelo

El cadmio ingresa al ambiente mediante diversas fuentes tanto naturales como antropológicas. En la corteza terrestre el cadmio se encuentra en cantidades muy bajas (<1 mg/kg), sin embargo, en los suelos su contenido fluctúa entre valores menores de 1 a 3 mg/kg, la concentración de cadmio en un suelo no contaminado es inferior a 1 mg/kg. Una de las vías de incorporación antropogénica del cadmio a los suelos agrícolas es la fertilización fosfática. Las rocas fosfóricas, que son la materia prima de todos los fertilizantes fosfáticos, contienen niveles de metales pesados que varían según su origen geográfico, pero que generalmente son superiores al promedio de la corteza terrestre. Los metales permanecen en una proporción importante en los fertilizantes industriales y posteriormente son aplicados al suelo junto con el fósforo (HERRERA, 2010).

Se ha estimado que 300,000 toneladas de cadmio son liberadas al medio ambiente cada año de las cuales 4.000 a 13.000 toneladas son derivadas de las actividades humanas. Las vías naturales y antropogénicas de cadmio incluyen emisiones industriales; así como, la aplicación de fertilizantes y aguas negras en sembradíos (NAVA y MENDEZ, 2011). En la producción mundial del cadmio es de más de 20 mil toneladas /año como cadmio relativamente volátil,

se elimina en la etapa de cocción o desulfuración de todos los productos del zinc y es capturado para someterlo a un tratamiento, por lo general para obtener cadmio metálico de alta pureza como producto final (BADILLO, 2008).

2.4. Toxicidad del cadmio en las plantas

El Cd puede reducir la absorción de nitratos y el transporte de los mismos de la raíz al tallo, además de inhibir la actividad nitrato reductasa en tallos (GOUIA *et al.*, 2000). En general el Cd interfiere en la entrada, transporte y utilización de elementos esenciales (Ca, Mg, P y K) y del agua, provocando desequilibrios nutricionales e hídricos en la planta (SANDALIO *et al.*, 2001).

Las plantas han desarrollado distintas estrategias para evitar la toxicidad de metales pesados. En general, la tolerancia a metales viene determinada por la reducción del transporte del mismo al interior de la célula y/o una mayor capacidad para secuestrar estos metales. La raíz constituye una de las principales barreras de defensa mediante la inmovilización del Cd por pectinas de la pared celular. Los carbohidratos extracelulares (mucílago y calosa) de la raíz también pueden intervenir en la inmovilización del metal (BENAVIDES *et al.*, 2005).

Las plantas expuestas a suelos contaminados con cadmio presentan modificaciones en la apertura estomática, fotosíntesis y transpiración (SANDALIO *et al.*, 2001). Uno de los síntomas más extendidos de la toxicidad por cadmio es la clorosis producida por una deficiencia en hierro (BENAVIDES

et al., 2005), fosfatos o por la reducción del transporte de Mn (GOLDBOL y HUTTERMAN, 1985).

Entre los factores de la planta que pueden influir en la cantidad de cadmio absorbido se encuentran la especie, la edad y el desarrollo radicular. Algunos cultivos como lechuga, espinaca y nabo han sido considerados de alta absorción, mientras que otros como trigo, arroz, avena y trébol absorberían poco cadmio (FERGUSON, 1990). La concentración de cadmio en los tejidos vegetales puede llegar a ser varias veces superior a la presente en el suelo.

2.5. Roca fosfatada

En la naturaleza la principal fuente de fósforo inorgánico es la roca fosfórica (RF). Estas son minerales derivados del ácido ortofosfórico, conocidas con el nombre de apatitos o apatitas. Una vez que la roca se extrae de la mina, se muele y se empaca para ser aplicada directamente a los suelos cultivados. El nombre comercial “roca fosfórica” es usado por al menos 300 fosfatos de diferentes calidades en el mundo (HAMMOND y DAY, 1992).

Los principales yacimientos de fosfatos naturales en el mundo se encuentran Marruecos y otros países de África, en los Estados Unidos de América, en el Cercano Oriente y en China y en el Perú están ubicados Bayóvar, provincia de Sechura - Departamento de Piura (ZAPATA y VILLAGARCIA, 1983).

La Caracterización de las rocas fosfóricas, materiales fosfatados nativos que son de interés para los agrónomos y para la industria de fertilizantes

están formados por un complejo de minerales agrupados bajo el encabezamiento genérico de roca fosfóricas o fosforita (LEON, 1992). En diversas localidades de centro América mediante pruebas donde se aplicó roca fosfórica como fuente de fósforo indistintamente sobre suelos de los órdenes Andisoles, Inceptisoles y Ultisoles, en cultivos de ciclo corto se localizaron buenos resultados.

Una característica común se encuentra en los depósitos comerciales y es que ellos contienen uno o más minerales del grupo apatita. En depósitos marinos sedimentarios de RF, el fosfato generalmente es carbonato fluorapatita y en depósitos ígneos los fosfatos de Ca^{2+} , Fe^{2+} , Al^{3+} , y de Fe^{3+} están generalmente asociados con los apatitos (LEON, 1992).

En los lugares con reducida actividad urbana e industrial, la presencia (ingreso) del Cd al suelo es principalmente con el fertilizante (MCLAUGHLIN *et al.*, 1994). ZUG *et al.* (2019) informaron más concentración de cadmio en los granos de cacao en parcelas fertilizadas con utilización de fertilizantes fosforados y rocas fosfóricas. En contraste la roca fosfórica también es utilizada para capturar el cadmio y algunos investigadores informaron un favorable efecto de la roca fosfórica para retener Cd del suelo. AIKPOKPODION *et al.* (2012) en fundos cultivados con cacao y aplicación de la roca fosfórica antes de sembrar las semillas (cacao) en etapa de vivero. Sus resultados mostraron que se reduce los metales pesados biodisponibles del suelo se redujo, también informaron una reducción significativamente los metales pesados en la hoja.

III. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Ubicación política

La investigación se realizó en el Invernadero de la Facultad de Agronomía de la Universidad Nacional Agraria de la Selva, ubicado en el distrito de Rupa Rupa, provincia de Leoncio Prado, departamento de Huánuco.

3.2. Ubicación geográfica y zona de vida

La ubicación geográfica corresponde a las coordenadas UTM: 390448 metros E, 8970073 metros N, a una altitud de 670 m.s.n.m. El área en estudio se encuentra comprendida en la zona de vida Bosque muy húmedo, pre montano tropical (Bmh-pmt).

3.3. Materiales y equipos

3.3.1. Materiales de escritorio

- Laptop
- Formularios de registros, notas adhesivas
- Archivadores, sujetadores metálicos
- Calculadoras
- Tijeras, cúters y bolígrafos

3.3.2. Materiales de campo

- Suelo del BRUNAS (Bosque Reservado de la Universidad Nacional Agraria de la Selva)

- Humus
- Roca fosfórica
- Semilla de cacao CCN-51
- Bolsas de polietileno
- Bernier digital, regla graduada de 100 cm
- Cámara digital, GPS
- Brújula

3.3.3. Materiales de laboratorio

- Pipeta graduada de 100 microlitros
- Dosificador volumétrico
- Matraz, Fiolas, balones, probetas
- Vasos de precipitados
- matraz Erlenmeyer
- tubos de ensayos
- Lunas de reloj
- crisoles

3.3.4. Reactivos

- Ácido cítrico, fósforo (total) solución patrón (1000 ppm)
- Hidróxido de sodio (NaOH)
- Ácido clorhídrico (HCl)
- Ácido sulfúrico (H₂SO₄)
- Sulfato de cadmio Merck (3CdSO₄*8H₂O)
- Difenilamina sulfúrica, agua destilada,

3.3.5. Equipos

- Mufla con capacidad de 550 °C
- Espectrofotómetro de absorción atómica (Varian "Spectra 55B")
- Balanza electrónica con capacidad máxima de 100 gramos con precisión de 0.01 mg.
- Estufa con capacidad de 110 °C
- Espectrofotómetro ultravioleta-visible

3.3.6. Herramientas

- Pico de dos puntas
- Pala
- Machete
- Carretilla

3.4. Metodología

El estudio se realizó en condiciones de invernadero, utilizando dos kilos de sustrato (suelo, humus y roca fosfórica) con proporciones según los tratamientos (Cuadro1) mezclados en bolsas de 6 x 10 (con dos kilos en total), humedecidos a capacidad de campo y encubados durante 45 días. El día 46 se colocó una semilla pre germinada en cada tratamiento (Cuadro 1), y permaneció durante 120 días que duro el experimento.

El suelo utilizado se extrajo del banco de germoplasma de cacao - BRUNAS, de la UNAS y se llevó al secado bajo sombra por una semana, luego

fue molido, tamizado en malla de 2 mm de diámetro; antes del tamizado se limpió la malla tamiz con un cepillo plástico con el fin de no contaminar la muestra de suelo. La roca fosfórica se adquirió del mercado local, el humus de lombriz se obtuvo de la facultad de zootecnia de la UNAS (Universidad Nacional Agraria de Selva).

La concentración de cadmio total del suelo, roca fosfórica y materia orgánica (humus "vermicompos") antes de la incubación fueron 0.85, 20.575 y 0.62 ppm respectivamente. El grano (cotiledón) o semilla de cacao utilizado para el experimento también fue analizado y presentó 0.31 ppm de Cd, mientras que la cascarilla del grano del cacao presentó 0.23 ppm de cadmio.

3.4.1. Efecto de la materia orgánica y roca fosfórica en la concentración de cadmio total en el suelo

El efecto de la materia orgánica y roca fosfórica en la concentración de cadmio total (total recuperable) en el suelo, se determinó analizando la concentración de cadmio total del sustrato (suelo, humus y roca fosfórica) en cada repetición de los tratamientos (Cuadro1), realizado a los 120 días separando la planta de las bolsas que lo contenían. El suelo fue trasladado al laboratorio de suelo de la UNAS, para analizar el Cd total. Con los resultados de la concentración de Cd total en cada repetición de los tratamientos, se realizó el análisis de varianza de efectos principales y efectos simples (interacción). El Anva se determinó según el diseño experimental, cuando el Anva mostró interacción entre los efectos principales (A, B) se realizó el análisis de varianza de efectos simples (interacción, A*B). Para determinar el tratamiento que

presentó mayor concentración de cadmio total se realizó la prueba de comparación de medias Duncan.

3.4.2. Definir el efecto de la materia orgánica y roca fosfórica en la concentración de cadmio disponible en el suelo

El efecto de la materia orgánica y roca fosfórica en la concentración de cadmio disponible (extraíble en EDTA) en el suelo, se determinó analizando la concentración de cadmio disponible del sustrato (suelo, humus y roca fosfórica) en cada repetición de los tratamientos (Cuadro1), es decir de la misma muestra de suelo donde se analizó el cadmio total. Con los resultados de la concentración de Cd disponible en cada repetición de los tratamientos, se realizó el análisis de varianza de efectos principales y efectos simples (interacción). El Anva se determinó según el diseño experimental, cuando el Anva mostró interacción entre los efectos principales (A, B) se realizó el análisis de varianza de efectos simples (interacción, A*B). Para determinar el tratamiento con mayor concentración de cadmio disponible se realizó la prueba de comparación de medias Duncan.

3.4.3. Determinar el mejor nivel de la materia orgánica sobre la roca fosfórica en la menor absorción de cadmio en hojas de plántones de cacao

Para determinar el mejor nivel de la materia orgánica sobre la roca fosfórica en la menor absorción de cadmio en hojas de plántones de cacao, se analizaron la concentración de cadmio total en las hojas de las plantas de cacao (sin tallo) en cada repetición de los tratamientos (Cuadro1). Las muestras de

hojas se tomaron a los 120 días después de la siembra de la semilla, y fue analizado en el laboratorio de suelo de la UNAS. Con los resultados de la concentración de Cd total foliar en cada repetición de los tratamientos, se realizó el análisis de varianza de efectos principales y efectos simples (interacción). El Anva de efectos simples se realizó según el diseño experimental, y la prueba de comparación de Duncan (0.05) de los efectos simples (A*B) determinaron el mejor nivel de la materia orgánica sobre la roca fosfórica que reduce la absorción de Cd en las hojas de cacao.

3.4.4. Correlación y regresión de los niveles de Cd de la roca fosfórica, materia orgánica con el cadmio absorbido por la hoja del cacao

El análisis de correlación y regresión fue separado en dos grupos, **(1)** correlación y regresión entre los niveles del cadmio de la roca fosfórica con el Cd de la hoja del cacao en cada nivel de M.O (0, 5, 10 y 15 %) y **(2)** Correlación y regresión entre la materia orgánica (niveles) y cadmio de las hojas de cacao en cada nivel de Cd (0.0, 1.5, 3.0 y 4.5 ppm) de la roca fosfórica.

(1) La correlación y regresión entre los niveles del cadmio de la roca fosfórica con el Cd de la hoja del cacao en cada nivel de materia orgánica se determinó a través del análisis de regresión lineal simple y correlación con el método de los mínimos cuadrados (CALZADA, 1970), considerando variable dependiente (y) al Cd en la hoja y variable independiente (x) al Cd (0.0, 1.5, 3.0 y 4.5 ppm) de la roca fosfórica, en cada nivel de materia orgánica (0, 5, 10 y 15 %) por lo tanto se obtuvo una figura para cada nivel de materia orgánica. Este

análisis se realizó con la concentración del cadmio en la hoja de cacao con 120 días después de la siembra. **(2)** La correlación y regresión entre la materia orgánica (niveles) y cadmio de las hojas de cacao en cada nivel de Cd (0.0, 1.5, 3.0 y 4.5 ppm) de la roca fosfórica se determinó a través del análisis de regresión lineal simple y correlación con el método de los mínimos cuadrados (CALZADA, 1970), considerando variable dependiente (y) al Cd en la hoja y variable independiente (x) a la materia orgánica (0, 5, 10 y 15 %) en cada nivel de Cd (0.0, 1.5, 3.0 y 4.5 ppm) de roca fosfórica, por lo tanto se obtiene una figura para cada nivel de Cd de la roca fosfórica. Este análisis se realizó con la concentración del cadmio en la hoja de cacao con 120 días después de la siembra.

3.5. Análisis de cadmio total en el suelo método (USEPA 3050)

- Seleccionar la muestra del suelo de un tamaño de partícula 2 mm.
- Pesar 2 gr de suelo (repetir hasta completar 3 muestras).
- Añadir 10 mL de HNO₃ 1:1
- Calentar a 95 ° c por 5 minutos.
- Dejar enfriar y añadir 5 mL de HNO₃ c.
- Repetir una vez y dejar reducir la solución hasta 5 mL.
- Dejar enfriar y añadir 2 mL de agua destilada y 3 mL de H₂O₂.
- Al cesar la efervescencia añadir 1 mL de H₂O₂.
- Repetir hasta que no se observe efervescencia.
- Añadir 5 mL de HCL c. Y 10 mL de agua desionizada.
- Calentar por 15 min y dejar enfriar.
- Filtrar por gravedad.

- Aforo a 50 mL con agua destilada.
- Almacenar y mantener refrigerado

3.6. Análisis de Cd total de la roca fosfórica

- Pesar 4 gr de roca fosfórica en un Erlenmeyer de 125 mL.
- Añadir 2.5 mL de ácido nítrico y 12.5 mL de ácido perclórico
- Dejar en plancha de ingestión por 6 horas hasta que se vuelva un color lechoso
- Filtra en una fiola de 100 mL y enrazar hasta aforo
- Lectura

3.7. Cadmio total en la planta método (digestión húmeda)

- Pesar 0.500 g de tejido vegetal y colocar dentro de frascos, resistentes a calor, y de 50 mL de capacidad.
- Adicionar 5mL de la solución nítrica – perclórica.
- Colocar sobre la plancha de calentamiento y elevar gradualmente la temperatura hasta 175°C.
- Dejar en digestión por 1 hora y 30 minutos.la solución se vuelve clara.
- Remover el frasco y adicionar 15 mL de 0.1 NHCL.
- Agitar el frasco para disolver las cenizas
- Filtrar la solución.

3.8. Cadmio disponible en el suelo (soluble en EDTA), según GONZALES (1986)

- Pesar 5 gr de suelo en un vaso de 50mL.
- Añadir 20 mL de solución extractante EDTA pH 7.
- Agitar por 15 minutos
- Finalmente filtrar en un tubo de ensayo

3.9. Tratamientos en estudio

El estudio se realiza con la aplicación de cuatro dosis de roca fosfórica (factor A) y materia orgánica (factor B). El Cuadro 1 muestra los pesos de la roca fosfórica utilizado en este estudio que fueron calculado previo análisis de cadmio el mismo que fue 20.575. No se consideró la concentración natural inicial de cadmio de la materia orgánica (0.62 ppm) del suelo (0.85 ppm) por considerarse que la proporción disponible no sería significativo

Factor A : niveles de roca fosfórica (ppm Cd)

- a₁ : 0
- a₂ : 1.5
- a₃ : 3.0
- a₄ : 4.5

Factor B : niveles de materia orgánica (proporción)

- b₁ : 0
- b₂ : 5%
- b₃ : 10%
- b₄ : 15%

Cuadro 1. Descripción de los tratamientos.

Trat	Clave	Descripción de los tratamientos, concentración de Cd y M.O que tendrá la bolsa con dos kilos de suelo		Descripción de los tratamientos, con el peso empleado para cada tratamiento			Peso total del sustrato (g)
		Cd (ppm) de la roca fosfórica	Materia orgánica (%)	Suelo (g)	Roca fosfórica (g)	Materia orgánica (g)	
T1	a1b1	0	0	2000.0	0	0	2000.0
T2	a1b2	0	5	1900.0	0	100	2000.0
T3	a1b3	0	10	1800.0	0	200	2000.0
T4	a1b4	0	15	1700.0	0	300	2000.0
T5	a2b1	1.5	0	1854.2	145.8	0	2000.0
T6	a2b2	1.5	5	1754.2	145.8	100	2000.0
T7	a2b3	1.5	10	1654.2	145.8	200	2000.0
T8	a2b4	1.5	15	1554.2	145.8	300	2000.0
T9	a3b1	3.0	0	1708.4	291.6	0	2000.0
T10	a3b2	3.0	5	1608.4	291.6	100	2000.0
T11	a3b3	3.0	10	1508.4	291.6	200	2000.0
T12	a3b4	3.0	15	1408.4	291.6	300	2000.0
T13	a4b1	4.5	0	1611.2	388.8	0	2000.0
T14	a4b2	4.5	5	1511.2	388.8	100	2000.0
T15	a4b3	4.5	10	1411.2	388.8	200	2000.0
T16	a4b4	4.5	15	1311.2	388.8	300	2000.0

3.10. Diseño experimental

Para el presente trabajo de investigación se empleará el Diseño completamente al azar (DCA), en tres repeticiones con arreglo factorial, 4A X 4B. Para las comparaciones entre los tratamientos se utilizará la prueba de comparación de medias Duncan, con un nivel de significación ($\alpha = 0.05$), desarrollado en el esquema del ANVA (Cuadro 2)

Modelo aditivo lineal:

$$Y_{ijk} = \mu_i + A_i + B_j + (AB)_{ij} + E_{ijk}$$

Dónde:

Y_{ijk} = Respuesta del i-eximo tratamiento en el j-eximo repetición.

μ = Efecto de la media general.

t_i = Efecto del i-eximo tratamiento

ϵ_{ij} = Efecto aleatorio del error experimental del i-eximo tratamiento en la j-eximo repetición.

Para:

$i = 1, 2, 3$ mezclas de la materia orgánica

$j = 1, 2, 3$ repeticiones

Cuadro 2. Esquema del análisis de variancia (ANVA).

F. Var	Gl	SC	CM	FC	F tab
Trat	T-1	<i>SCT</i>	CM Trat	CM_{Trat}/CM_{error}	$F(gl_{trat}, gl_{ee})$
A	a-1	SCA	CMA	CMA/CM_{error}	
B	b-1	SCB	CMB	CMB/CM_{error}	
AB	(a-1) (b-1)	SCAB	CMAB	$CMAB/CM_{error}$	
error	(r-1) (ab-1)	SCe	CMe		
Total	abr-1				

IV. RESULTADOS

4.1 Efecto de la materia orgánica y roca fosfórica en la presencia de cadmio total en el suelo.

Los resultados de la concentración del cadmio total en el suelo según tratamientos; cuatro niveles de rocas fosfórica (4 A) con cuatro niveles de materia orgánica (5, 10, 15 %) (4 B) se presenta adjunto en anexo (Cuadro 19). Según la prueba de F del análisis de varianza no se encontró diferencias estadísticas en el factor B (niveles de materia orgánica (t/ha), y en la interacción fuentes orgánicas (3A) con 3 niveles de materia orgánica (%) (A*B), sin embargo las diferencias estadísticas fue altamente significativa para los niveles de la roca fosfórica (factor A) (Cuadro 3), es decir las dosis de roca fosfórica calculados como fuente de cadmio (1.5, 3.0 y 4.5 ppm) presentaron diferencias estadísticas altamente significativas.

Cuadro 3. ANVA del cadmio total en suelo.

Ft. Variación	GI	SC	CM	Fcal	Ftab		
					5%	1%	
Tratamiento	15	40.233	2.682	18.062	1.992	2.655	**
Niv. Cd, RF (A)	3	39.762	13.254	89.253	2.901	4.459	**
Niv. M.O % (B)	3	0.194	0.065	0.435	2.901	4.459	ns
A *B	9	0.277	0.031	0.207	2.189	3.021	ns
Error	32	4.752	0.149				
Total	47	44.985					

CV=28.77

4.1.1. Efecto principal de la materia orgánica y roca fosfórica en la presencia de cadmio total en el suelo.

Según la prueba de Duncan ($p < 0.05$) de la concentración de cadmio total en el suelo del factor A, es decir empleando la roca fosfórica como contaminante (factor A) (Cuadro 4), estadísticamente fue menor la concentración de Cd total en el suelo con la aplicación de 1.5 ppm de Cd, y mayor con la aplicación de 4.5 ppm; evidenciándose que el incremento con dosis altas de roca fosfórica aplicado al suelo y después de un periodo de 4 meses; mostro mayor presencia de Cd total en el suelo. El testigo sin aplicación de roca fosfórica presento menor concentración de Cd total en el suelo.

Según la prueba de Duncan ($p < 0.05$) de la concentración de Cd total del suelo, es decir con la aplicación de los niveles de materia orgánica (factor B) (Cuadro 4), no presentó diferencias estadísticas, es decir, no hubo diferencias en la concentración de Cd total en el suelo con las dosis de M.O aplicados

Cuadro 4. Duncan del cadmio total en el suelo para el efecto (efecto principal), de las dosis de la RF y niveles de materia orgánica.

Factores	Medias	n		
A. Niveles de Cd con RF (ppm)				
4.5	2.520	12	a	
3.0	1.896	12	b	
1.5	0.696	12		c
0.0	0.246	12		d
B. Niveles de M.O (%)				
b ₃ (10%)	1.404	12	a	
b ₁ (0%)	1.401	12	a	
b ₄ (15%)	1.279	12	a	
b ₂ (5%)	1.272	12	a	

Letras diferentes en las columnas, representan diferencias estadísticas significativas ($P < 0.05$)

Según la prueba de Duncan ($p < 0.05$) de la concentración de cadmio total en el suelo para los tratamientos; cuatro niveles de rocas fosfórica (4 A) con cuatro niveles de materia orgánica (5, 10, 15 %) (4 B) (Cuadro 4), la menor concentración de cadmio total en el suelo fue sin la aplicación de roca fosfórica en los cuatro niveles de materia orgánica, y fue mayor la presencia de cadmio con las dosis más altas de roca fosfórica, También observado en el Cuadro 5.

Cuadro 5. Duncan del cadmio total en el suelo para los tratamientos.

Niveles de Cd con RF (A) (ppm)	Niveles de M.O (A) (%)	Medias	n	Significación
4.5	15	2.70	3	a
4.5	10	2.68	3	a
4.5	5	2.42	3	a b
4.5	0	2.27	3	a b
3,0	15	1.93	3	b
3,0	10	1.93	3	b
3.0	5	1.89	3	b
3.0	0	1.83	3	b
1.5	15	0.75	3	c
1.5	10	0.75	3	c
1.5	0	0.69	3	c
1.5	5	0.60	3	c
0	0	0.30	3	c
0	10	0.25	3	c
0	15	0.23	3	c
0	5	0.21	3	c

Letras diferentes en las columnas, representan diferencias estadísticas significativas ($P < 0.05$)

La concentración del Cd total en el suelo fue menor sin la aplicación de roca fosfórica (0 ppm Cd) en todos los niveles de M.O, y fue mayor con 4.5 ppm de Cd (roca fosfórica) también en todos los niveles de M.O (Figura 1a). Con la aplicación de 1.5 ppm de cadmio la correlación es positiva, es decir al incrementarse la dosis de materia orgánica se incrementa la concentración de

cadmio, por lo tanto, la materia orgánica estaría contribuyendo a la retención del cadmio (Figura 1b).

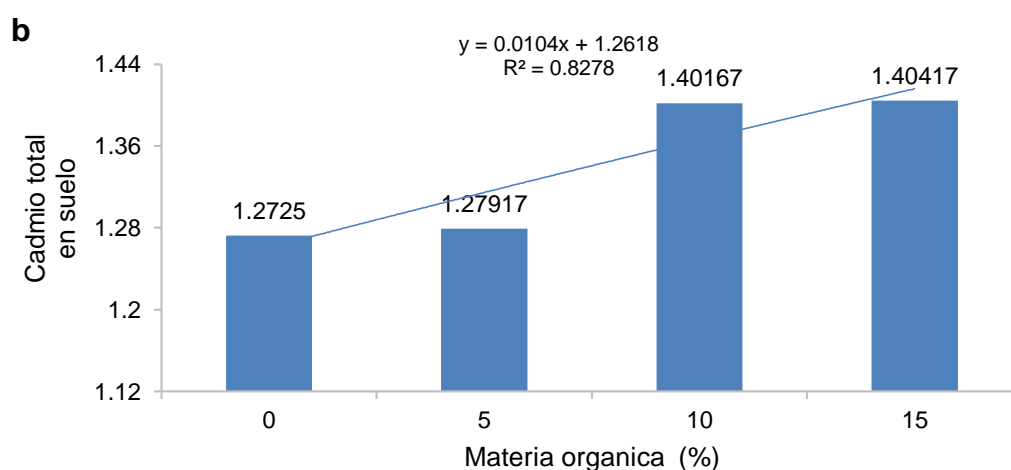
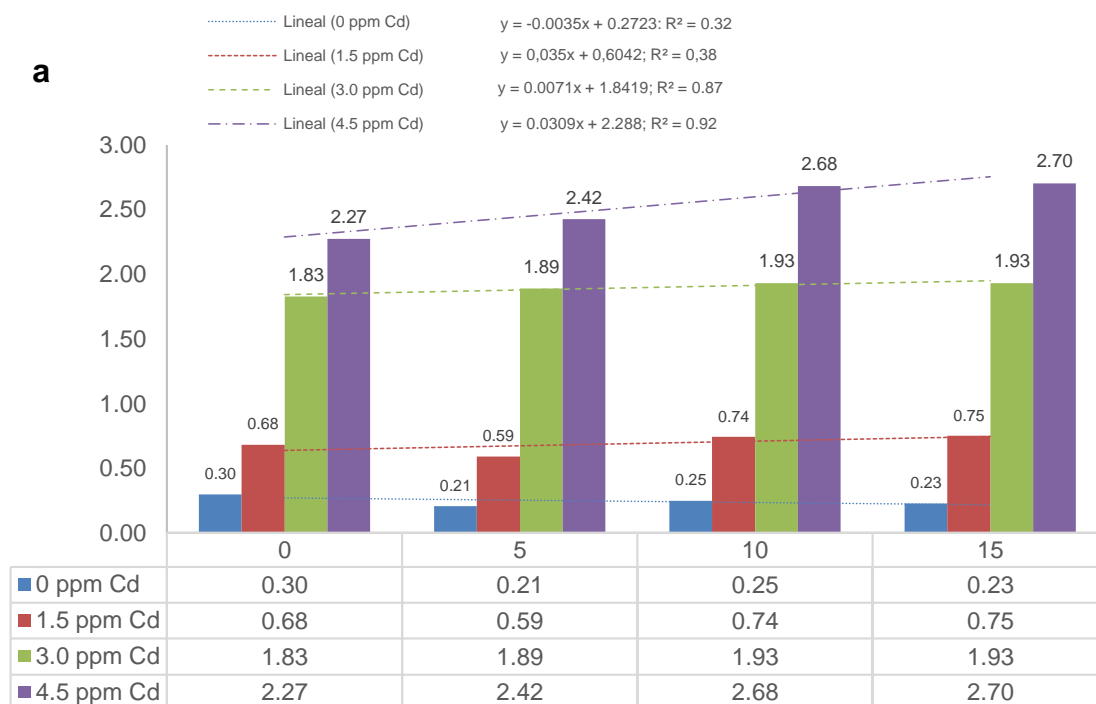


Figura 1. Concentración de Cd total en suelo, en cada nivel de M.O y roca fosfórica (Cd) (a). incremento del Cd total en cada nivel de M.O (b).

4.2 Efecto de la materia orgánica y roca fosfórica en la presencia de cadmio disponible en el suelo.

Los resultados de la concentración del cadmio disponible en el suelo según tratamientos; 4 niveles de roca fosfórica (4 A) con cuatro niveles de materia orgánica (5, 10, 15 %) (4 B) se presenta adjunto en anexo (Cuadro 20).

Según la prueba de F del análisis de varianza no se encontró diferencias estadísticas significativas (ns) en el factor B (niveles de materia orgánica (t/ha), y en la interacción niveles de roca fosfórica (3A) con los tres niveles de materia orgánica (%) (A*B). Sin embargo, se observa diferencias estadísticas altamente significativa para los niveles de la roca fosfórica (factor A) en los efectos principales (Cuadro 6), es decir las dosis de roca fosfórica calculados como fuente de cadmio (1.5, 3.0 y 4.5 ppm) presentaron diferencias estadísticas altamente significativas sobre la concentración de cadmio disponible en el suelo, que permaneció con plantas de cacao durante 120 días.

Cuadro 6. ANVA de cadmio disponible en el suelo.

Ft. Variación	Gl	SC	CM	Fcal	Ftab (5%)		
					5%	1%	
Tratamiento	15	1.127	0.075	58.820	1.992	2.655	**
Niv. Cd, RF (A)	3	1.115	0.372	290.947	2.901	4.459	**
Niv. M.O % (B)	3	0.002	0.001	0.412	2.901	4.459	ns
A * B	9	0.011	0.001	0.914	2.189	3.021	ns
Error	32	0.041	0.001	.			
Total	47	1.168					

C.V : 11.3 %

4.2.1. Efecto principal de materia orgánica y roca fosfórica en la presencia de cadmio disponible en el suelo.

Según la prueba de Duncan ($p < 0.05$) de la concentración de Cd disponible en el suelo del factor A, es decir empleando la roca fosfórica como contaminante (factor A) (Cuadro 7), estadísticamente fue menor la concentración de cadmio disponible en el suelo con la aplicación de 1.5 ppm de Cd, y mayor con aplicación de 4.5 ppm, similar al Cd total (Cuadro 4); evidenciándose que el incremento con dosis altas de roca fosfórica aplicados al suelo y después de un periodo de 4 meses; mostro mayor presencia de Cd disponible en el suelo. El testigo que sin roca fosfórica a_1 (0.0 ppm Cd) presento estadísticamente menor concentración de Cd disponible en el suelo.

Según la prueba de Duncan ($p < 0.05$) de la concentración de cadmio disponible en el suelo del factor B, es decir con la aplicación de los niveles de materia orgánica (factor B) (Cuadro 7), no presento diferencias estadísticas, es decir, no hubo diferencias estadísticas en la concentración de cadmio disponible en el suelo con las dosis de materia orgánica aplicados.

Cuadro 7. Duncan del cadmio disponible en el suelo por efecto de la RF y materia orgánica.

Factores	Medias	n			
A. Niveles de Cd con RF (ppm)					
a_4 (4.5)	0.478	12	a		
a_3 (3.0)	0.417	12		b	
a_2 (1.5)	0.292	12			c
a_1 (0.0)	0.079	12			d
B. Niveles de M.O (%)					
b_3 (10)	0.326	12	a		
b_1 (0)	0.315	12	a		
b_4 (15)	0.313	12	a		
b_2 (5)	0.311	12	a		

Letras diferentes en las columnas, representan diferencias estadísticas significativas ($P < 0.05$)

Sin embargo, se observa diferencias numéricas, con menor presencia de cadmio disponible en la dosis más baja de materia orgánica (5 %) y mayor cadmio en las dosis 3% y vuelve a bajar con 4 % M.O, la Figura 2 muestra la tendencia donde se observa que inicialmente con la dosis baja de materia orgánica sube el cadmio disponible, pero incrementarse la M.O a partir de 10 % tiende a bajar, la correlación no es significativa (0.1702).

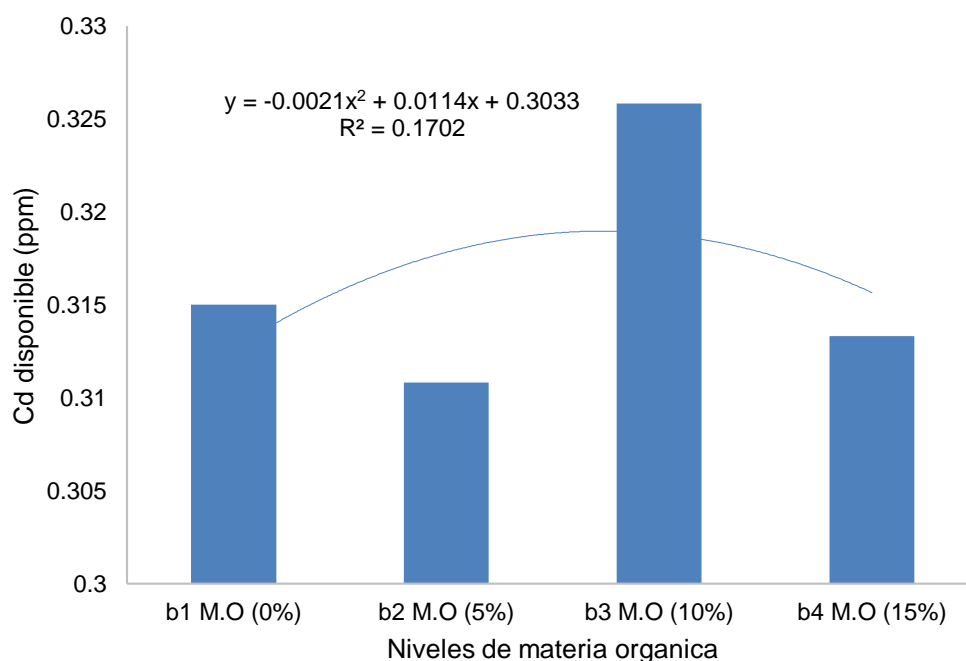


Figura 2. Concentración de cadmio disponible en el suelo por efecto de la materia orgánica.

4.2.2. Efectos simples de las interacciones de materia orgánica con la roca fosfórica en la presencia de cadmio disponible en el suelo

Según la prueba de F del análisis de varianza de efectos simples (Cuadro 8), el factor A (niveles de cadmio) muestra diferencias estadísticas altamente significativas (**) con b₁, b₂, b₃, b₄, es decir con 0, 5, 10, 15 % de

materia orgánica (M.O) respectivamente. El factor B (niveles de Cd de la RF) muestra diferencias estadísticas con a_2 (5% M.O), a_3 (10% M.O), a_4 (15% M.O) y no significativa con a_1 (0 % M.O)

Cuadro 8. ANVA de efectos simple del Cd disponible.

F.V.	gl	SC	CM	Fc	Ft		
					5%	1%	
A en b1	3	3.3254	1.108	867.888	2.90	4.46	**
A en b2	3	2.5467	0.849	664.64	2.90	4.46	**
A en b3	3	4.7071	1.569	1228.496	2.90	4.46	**
A en b4	3	6.5199	2.173	1701.630	2.90	4.46	**
B en a1	3	0.0023	0.001	0.590	2.90	4.46	NS
B en a2	3	0.0832	0.028	21.722	2.90	4.46	**
B en a3	3	0.0581	0.019	15.154	2.90	4.46	**
B en a4	3	13.0472	4.349	3405.180	2.90	4.46	**
Error experimental	32	0.0409	0.001		1,80	2.32	

El Cuadro 9, muestra la prueba de Duncan ($p < 0.05$) para el efecto simple de las interacciones niveles de RF (Cd) con los niveles de M.O, sobre el contenido de Cd disponible del suelo a 120 días de instalado, donde los efectos simples de A en b1; efecto de los niveles de RF (Cd) sobre 0 % de materia orgánica aplicados, muestra que la interacción a_4b_1 con a_3b_1 fueron estadísticamente superior a la interacción a_2b_1 con a_1b_1 , es decir con la mayor dosis de cadmio 4.5 ppm (RF)(a_4) y sin aplicación de materia orgánica la presencia del cadmio disponible (0.443 ppm) en el suelo fue mayor. A en b1

muestra una correlación positiva es decir al incrementarse los niveles de cadmio se incrementa también el cadmio disponible en el suelo (Figura 3a).

Cuadro 9. Prueba de Duncan para el efecto simple de las interacciones niveles de RF(Cd) sobre los niveles de M.O, en el contenido de Cd disponible a 120 días de instalado.

Niveles de Cd con RF (A) (ppm)	Niveles de M.O (A) (%)	Clave	Cd total en hojas (ppm)	Significancia
Efectos simples de A en b1; efecto de los niveles de RF (Cd) sobre 0 % de materia orgánica aplicado				
4.5 ppm	0%	a4b1	0.443	a
3.0 ppm	0%	a3b1	0.437	a
1.5 ppm	0%	a2b1	0.313	b
0.0 ppm	0%	a1b1	0.067	b
Efectos simples de A en b2; efecto de los niveles de RF (Cd) sobre 5 % de materia orgánica aplicado				
4.5 ppm	5%	a4b2	0.480	a
3.0 ppm	5%	a3b2	0.393	b
1.5 ppm	5%	a2b2	0.290	c
0.0 ppm	5%	a1b2	0.080	d
Efectos simples de A en b3; efecto de los niveles de RF (Cd) sobre 10 % de materia orgánica aplicado				
4.5 ppm	10%	a4b3	0.507	a
3.0 ppm	10%	a3b3	0.420	a
1.5 ppm	10%	a2b3	0.290	b
0.0 ppm	10%	a1b3	0.087	c
Efectos simples de A en b4; efecto de los niveles de RF (Cd) sobre 15 % de materia orgánica aplicado				
4.5 ppm	15%	a4b4	0.480	a
3.0 ppm	15%	a3b4	0.417	a
1.5 ppm	15%	a2b4	0.273	b
0.0 ppm	15%	a1b4	0.083	c

Letras diferentes en las columnas, representan diferencias estadísticas significativas ($P < 0.05$)

El Cuadro 10 muestra la prueba de Duncan del efecto simple de la interacción de los niveles de M.O sobre los niveles de RF(Cd), en la concentración de Cd disponible a 120 días de instalado. Según la prueba de Duncan ($p < 0.05$) para el efecto simple de las interacciones de los niveles de M.O con los niveles de RF(Cd), sobre el contenido de Cd disponible a 120 días de instalado (Cuadro 10). Los efectos simples de B en a1; efecto de los niveles de M.O sobre sobre 0 ppm de RF (Cd) no muestra diferencias estadísticas, es decir las interacciones a4b1 con a3b1, a2b1 y a1b1, fueron estadísticamente similar, sin embargo, se observa diferencias numéricas. Esta diferencia numérica muestra que a mayor materia orgánica menor es la concentración de cadmio disponible en el suelo (Figura 4a, 10a).

Los efectos simples de B en a2; efecto de los niveles de M.O (b1, b2, b3, b4) sobre sobre 1,5 ppm de RF (a2) en el contenido de cadmio disponible en el suelo, no se diferenciaron estadísticamente, sin embargo, numéricamente fue menor la presencia de cadmio disponible cuando se incrementa los niveles de materia orgánica (Cuadro 10, Figura 4b, 10b)

La interacción B en a1, B en a2, B en a3 y B en a4 no mostraron diferencias estadísticas, sin embargo si muestran diferencias numéricas (Cuadro 10), estas diferencias numéricas muestran que al incrementarse los niveles de materia orgánica de 0, 5, 10 y 15 % (M.O:suelo) en las dosis de cadmio (1.5 y 3.0 ppm) se reduce la concentración de Cd disponible en el suelo (Figura 4b, 4c, 10b, 10c), y con 4.5 ppm se incrementa el cadmio (Figura 4d, 10d)

Cuadro 10. Duncan del efecto simple de la interacción de los niveles de M.O sobre los niveles de RF(Cd), en la concentración de Cd disponible a 120 días de instalado.

Niveles de M.O (A) (%)	Niveles de Cd con RF (A) (ppm)	Clave	Cd disponible (ppm)	Significación
Efectos simples de B en a1; efecto de los niveles de M.O sobre sobre 0 ppm de RF aplicado				
10 %	0 ppm	b3a1	0.08667	a
15 %	0 ppm	b4a1	0.08333	a
10 %	0 ppm	b2a1	0.08000	a
0 %	0 ppm	b1a1	0.06667	a
Efectos simples de B en a2; efecto de los niveles de M.O sobre sobre 1,5 ppm de RF aplicado				
0%	1.5 ppm	b1a2	0.3133	a
5%	1.5 ppm	b2a2	0.2900	a
10%	1.5 ppm	b3a2	0.2900	a
15%	1.5 ppm	b4a2	0.2733	a
Efectos simples de B en a3; efecto de los niveles de M.O sobre sobre 3,0 ppm de RF aplicado				
0%	3.0 ppm	b1a3	0.43667	a
5%	3.0 ppm	b2a3	0.42000	a
10%	3.0 ppm	b3a3	0.41667	a
15%	3.0 ppm	b4a3	0.39333	a
Efectos simples de B en a4; efecto de los niveles de M.O sobre sobre 4,5 ppm de RF aplicado				
0%	4.5 ppm	b1a4	0.50667	a
5%	4.5 ppm	b2a4	0.4800	a
10%	4.5 ppm	b3a4	0.4800	a
15%	4.5 ppm	b4a4	0.44333	a

Letras diferentes en las columnas, representan diferencias estadísticas significativas ($P < 0.05$)

La comparación de Duncan ($p < 0.05$) de todos los tratamientos (Cuadro 11) muestra que el tratamiento dos (T2), presento la menor concentración de cadmio disponible en el suelo, según fue incrementándose los niveles de cadmio, la concentración de cadmio disponible en el suelo también se incrementó.

Cuadro 11. Duncan del Cd disponible entre todos los tratamientos.

Tratamiento	Descripción de los tratamientos		Medias	n	Significación		
	Niveles de Cd con RF (A) (ppm)	Niveles de M.O (A) (%)					
T15	a4 (4.5)	b3 (10)	0.51	3	a		
T16	a4 (4.5)	b4 (15)	0.48	3	a	b	
T14	a4 (4.5)	b2 (5)	0.48	3	a	b	
T13	a4 (4.5)	b1 (0)	0.44	3	a	b	c
T9	a3 (3.0)	b1 (0)	0.44	3		b	c
T11	a3 (3.0)	b3 (10)	0.42	3		b	c
T12	a3 (3.0)	b4 (15)	0.42	3		b	c
T10	a3 (3.0)	b2 (5)	0.39	3			c
T5	a2 (1.5)	b1 (0)	0.31	3			d
T7	a2 (1.5)	b3 (10)	0.29	3			d
T6	a2 (1.5)	b2 (5)	0.29	3			d
T8	a2 (1.5)	b4 (15)	0.27	3			d
T3	a1 (0)	b3 (10)	0.09	3			e
T4	a1 (0)	b4 (15)	0.08	3			e
T2	a1 (0)	b2 (5)	0.08	3			e
T1 (Testigo)	a1 (0)	b1 (0)	0.07	3			e

Letras diferentes en las columnas, representan diferencias estadísticas significativas ($P < 0.05$)

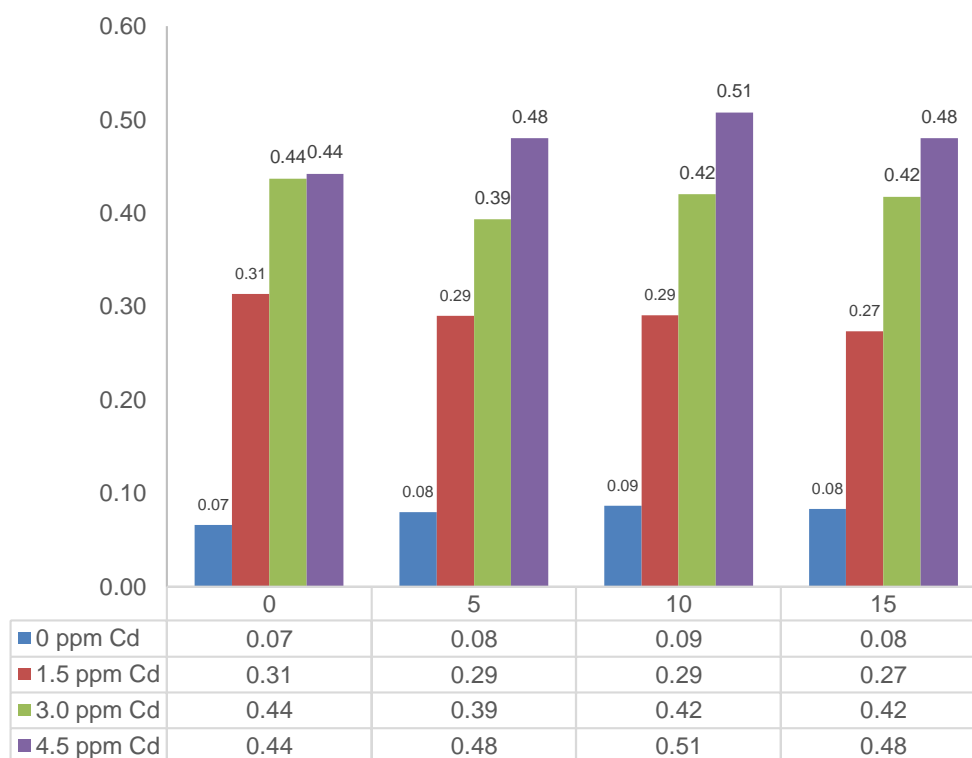


Figura 3. Concentración del cadmio disponible en suelo por efecto de los niveles de RF y materia orgánica.

La Figura 4 muestra el efecto de la RF en cada nivel de materia orgánica en la concentración de Cd disponible del suelo, expresados como análisis de regresión y correlación. Se evidencia una correlación positiva y significativa entre los niveles de cadmio aplicado con la concentración de cadmio disponible de suelo, en cada nivel de materia orgánica.

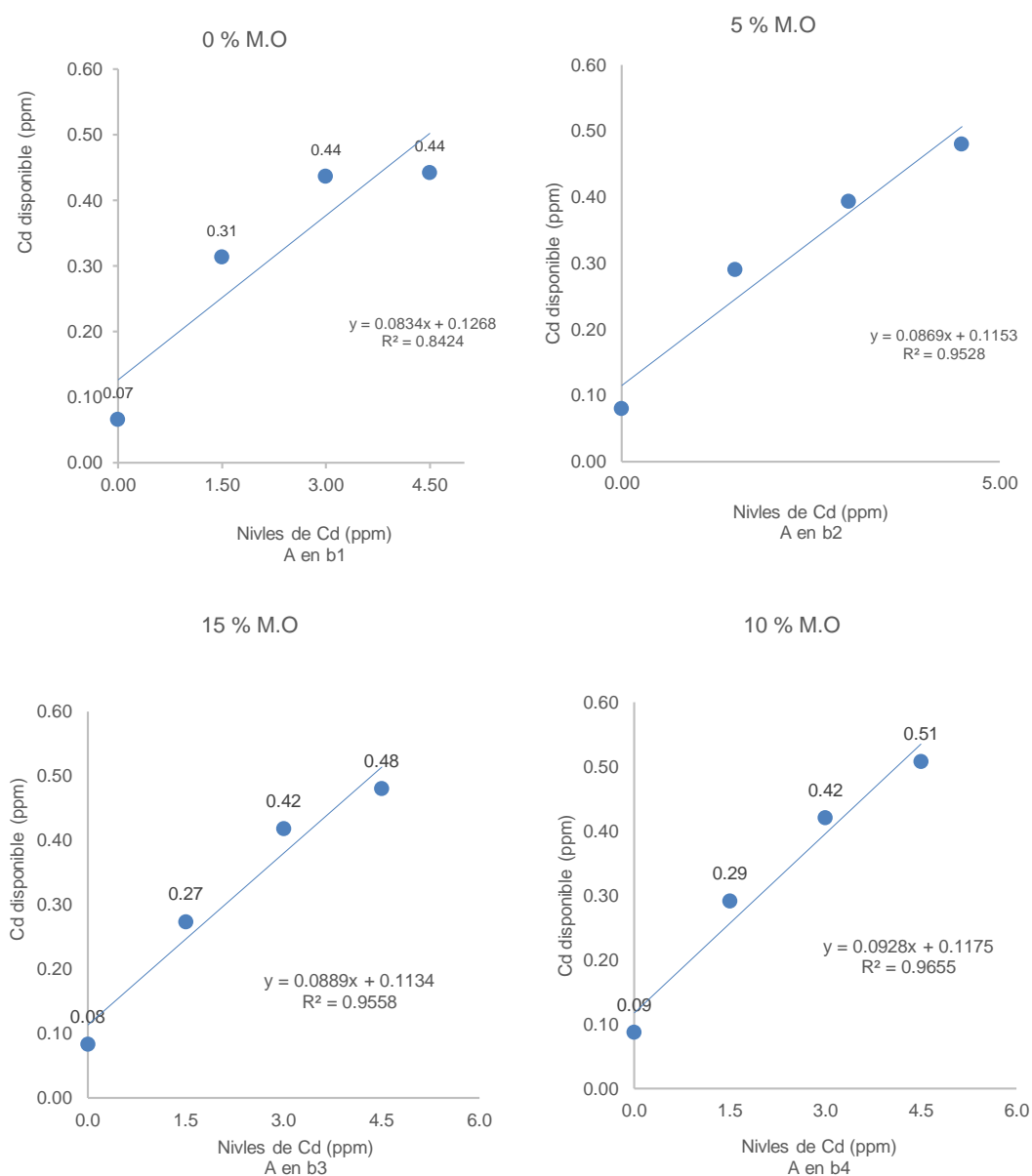


Figura 4. Efecto de los niveles de RF en cada nivel de materia orgánica en la concentración de cadmio disponible del suelo.

La Figura 5 muestra el efecto de la materia orgánica expresado en correlación y regresión en cada nivel de RF en la concentración de cadmio disponible del suelo, evidenciándose una correlación negativa con la aplicación de 1.5 y 3.0 ppm de cadmio de la roca fosfórica.

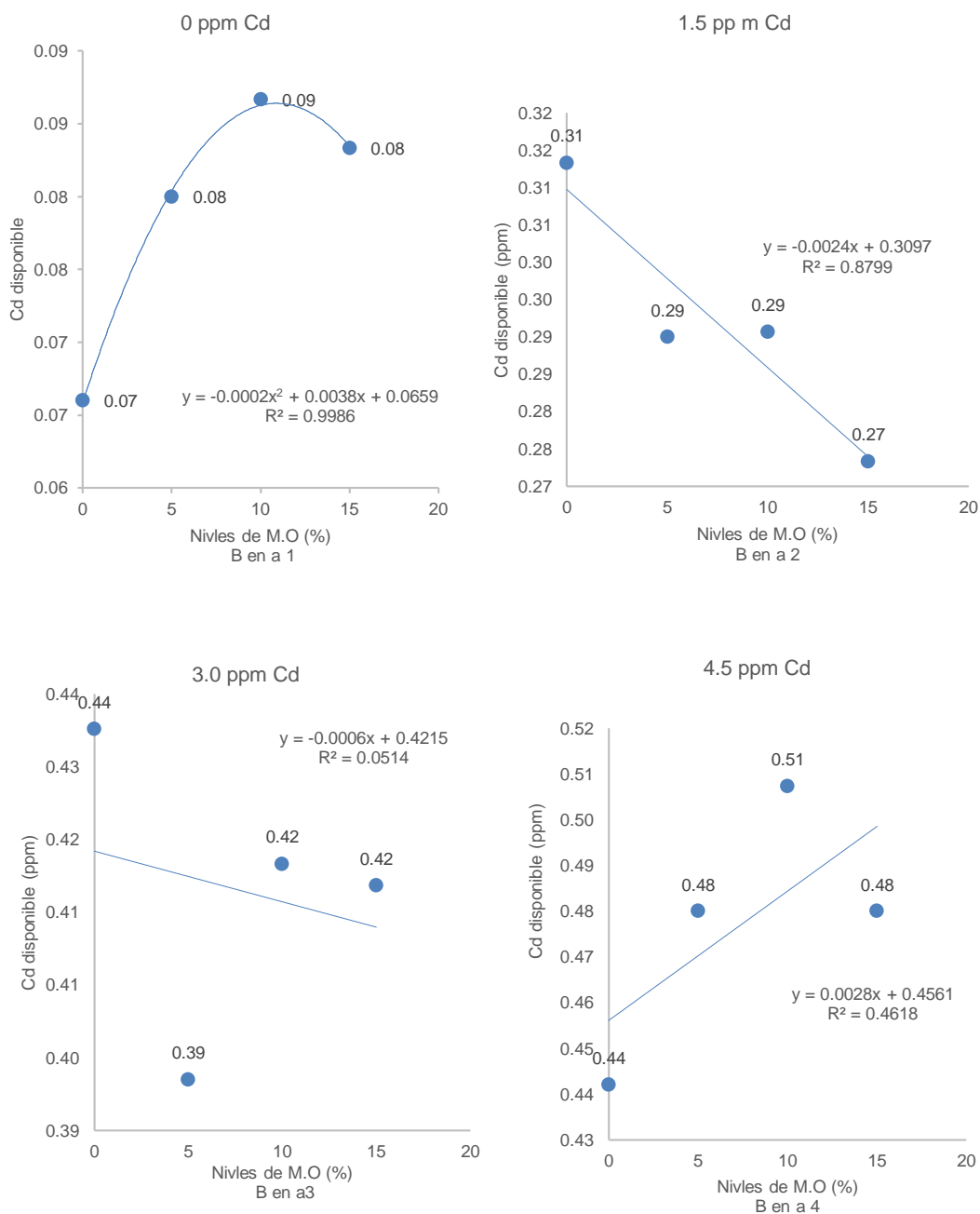


Figura 5. Efecto de los niveles de la materia orgánica en cada nivel de RF en la concentración de cadmio disponible del suelo.

4.3 Concentración de cadmio en hojas de plantones de cacao por efecto de la materia orgánica y roca fosfórica.

Los resultados de la concentración del cadmio total en la hoja según tratamientos; cuatro niveles de rocas fosfórica (4 A) con cuatro niveles de materia orgánica (5, 10, 15 %) (4 B) se presenta adjunto en anexo (Cuadro 21). Según la prueba de F del análisis de varianza (Cuadro 12), se encontró diferencias estadísticas altamente significativas en el factor A (niveles de la roca fosfórica), y factor B (niveles de materia orgánica (t/ha). es decir, las dosis de roca fosfórica calculados como fuente de cadmio (1.5, 3.0 y 4.5 ppm de Cd) presentaron diferencias estadísticas altamente significativas por lo tanto al menos una dosis de roca fosfórica (Cd) aplicado al suelo con plantones de cacao en invernadero ha producido un efecto diferente en la presencia y/o adsorción de cadmio en las hojas del cacao. Los niveles de la materia orgánica también presentaron efectos distintos en la absorción del cadmio.

La interacción A*B; fuentes orgánicas (3A) con 3 niveles de materia orgánica (%) no presento diferencias estadísticas, es decir la mezcla de la roca fosfórica con la materia orgánica en sus niveles no afectaron la absorción de cadmio estadísticamente diferenciados, sin embargo, se observa diferencias numéricas (Cuadro 12), sin embargo, se incluye un análisis, discusión y revisión de acuerdo a las diferencias numéricas en los efectos simples o de interacción y tendencias según análisis de correlación encontrados.

Cuadro 12. ANVA de cadmio total en hojas de cacao.

Ft. Variación	Gl	SC	CM	Fcal	Ftab (5%)		
					5%	1%	
Tratamiento	15	88.723	5.915	28.690	1.992	2.655	**
Niv. Cd, RF (A)	3	80.839	26.946	130.702	2.901	4.459	**
Niv. M.O % (B)	3	4.339	1.446	7.016	2.901	4.459	**
A*B	9	3,545	0.394	1.911	2.189	3.021	ns
Error	32	6.597	0.206				
Total	47	95.321					

4.3.1. Efecto principal de la materia orgánica y roca fosfórica en la concentración de cadmio total en hojas de cacao.

Según la prueba de Duncan ($p < 0.05$) de la concentración de cadmio total en las hojas de cacao del factor A, es decir empleando la roca fosfórica como contaminante (factor A) (Cuadro 13), estadísticamente fue menor la concentración de cadmio en la hoja con la aplicación del menor nivel, es decir con 1.5 ppm de Cd (a_2), y mayor con la aplicación de con la dosis más alta 4.5 ppm (a_4), similar al cadmio total y cadmio disponible (Cuadro 4, 7).

El Cuadro 13 evidencia que al incrementar la dosis de roca fosfórica en niveles muy altos aplicados al suelo después de un periodo de 4 meses produce la presencia de cadmio en las hojas de los plantones de cacao, es decir que a mayor dosis de Cadmio aplicado al suelo mayor fue la presencia (concentración) del Cd en las hojas del cacao (CCN-51) conducidos en etapa de vivero.

Cuadro 13. Duncan de la concentración de cadmio total en hojas por efecto de la RF (A), y materia orgánica (B).

Niveles de Cd con RF (A) (ppm)	Medias	n	Significación	
4.5 (a ₄)	3.669	12	a	
3.5 (a ₃)	2.908	12		b
1.5 (a ₂)	2.337	12		c
0.0 (a ₁)	0.180	12		d

Según la prueba de Duncan ($p < 0.05$) de la concentración de cadmio en las hojas de los plántones de cacao del B, es decir con la aplicación de los niveles de materia orgánica (factor B) (Cuadro 14), la aplicación de 0 y 5% de M.O presentaron estadísticamente superior concentración de cadmio en la hojas, mientras que los niveles 10 y 15 %M.O estadísticamente presentaron menor concentración de cadmio. Evidenciándose que al incrementarse las dosis de materia orgánica se reduce la presencia del cadmio en las hojas de los plántones de cacao a los 120 días de instalado el experimento.

Cuadro 14. Duncan de la concentración de cadmio total en hojas por efecto de la materia orgánica en la.

Niveles de M.O (B) (%)	Medias	n	Significación	
0 (b ₀)	2.680	12	a	
5 (b ₁)	2.600	12	a	b
10 (b ₂)	2.200	12		b c
15 (b ₃)	1.850	12		c

Letras diferentes en las columnas, representan diferencias estadísticas significativas ($P < 0.05$)

4.3.2. Efectos simples de las interacciones de materia orgánica con la roca fosfórica en la presencia de cadmio total en hojas de cacao

Según la prueba de F del análisis de varianza de efectos simples del cadmio total en las hojas (Cuadro 15), el factor A (niveles de cadmio) muestra diferencias estadísticas altamente significativas (**) con b₁, b₂, b₃, b₄, es decir con 0, 10, 15 % de materia orgánica (M.O) respectivamente. El factor B (niveles de Cd de la RF) solo muestra diferencias estadísticas altamente significativo con a₄ (15% M.O), mientras que con a₁ (0% M.O), a₂ (5%) y a₃ (10 % M.O) fue no significativo.

Cuadro 15. ANVA de efectos simples del cadmio total en hojas.

F.V.	gl	SC	CM	Fc	Ft		
					5%	1%	
A en b1	3	33254	1108	5.377	2.90	4.46	**
A en b2	3	2.5467	0.849	4.118	2.90	4.46	*
A en b3	3	4.7071	1.569	7.610	2.90	4.46	**
A en b4	3	6.5199	2.173	10.542	2.90	4.46	**
B en a1	3	0.0023	0.001	0.004	2.90	4.46	NS
B en a2	3	0.0832	0.028	0.135	2.90	4.46	NS
B en a3	3	0.0581	0.019	0.094	2.90	4.46	NS
B en a4	3	13.0472	4.349	21.095	2.90	4.46	**
error	32	6.5973	0.206		1.80	2.32	

El Cuadro 16 presenta la prueba de Duncan para el efecto simple de las interacciones niveles de RF(Cd) con los niveles de M.O sobre el contenido de Cd en hojas a 120 días de instalado. Según la prueba de Duncan ($p < 0.05$) para el efecto simple de las interacciones niveles de RF(Cd) con los niveles de M.O, sobre el contenido de Cd total en hojas a 120 días de instalado (Cuadro 16), donde los Efectos simples de A en b₁; efecto de los niveles de RF (Cd) sobre 0 % de materia orgánica aplicados, muestra que la interacción a₄b₁ fue estadísticamente superior, en segundo lugar a₃b₁, es decir con la mayor dosis de cadmio (4.5 ppm en a₄) sin la aplicación de materia orgánica, la presencia (concentración) del cadmio total en la hoja (4.63 ppm) fue estadísticamente mayor. A en b₁ muestra una correlación positiva, es decir al incrementarse los niveles de cadmio se incrementa también el cadmio en las hojas de los plantones de cacao (Figura 7a)

Los efectos simples de A en b₂; efecto de los niveles de RF (Cd) sobre 5 % de materia orgánica aplicado, fue estadísticamente superior la interacción a₄b₂ sobre a₃b₂, a₂b₂ y a₁b₂ es decir la dosis más alta de cadmio (4.5) ppm sobre el sustrato a proporción 5 % M.O (M.O: suelo) presentó estadísticamente mayor concentración de Cd total (3.95 ppm) en las hojas (Cuadro 16) resultado similar que A en b₂. A en b₂ muestra una correlación positiva, es decir al incrementarse los niveles de cadmio se incrementa también el cadmio en las hojas de los plantones de cacao (Figura 7b).

Cuadro 16. Prueba de Duncan para el efecto simple de las interacciones niveles de RF(Cd) con los niveles de M.O sobre el contenido de Cd en hojas a 120 días de instalado.

Niveles de Cd con RF (A) (ppm)	Niveles de M.O (A) (%)	Clave	Cd total en hojas (ppm)	Significancia
Efectos simples de A en b1; efecto de los niveles de RF (Cd) sobre 0 % de materia orgánica aplicado				
4.5 ppm	0%	a4b1	4.63	a
3.0 ppm	0%	a3b1	3.11	b
1.5 ppm	0%	a2b1	2.76	b
0 ppm	0%	a1b1	0.24	c
Efectos simples de A en b2; efecto de los niveles de RF (Cd) sobre 5 % de materia orgánica aplicado				
4.5 ppm	5%	a4b2	3.95	a
3.0 ppm	5%	a3b2	3.01	b
1.5 ppm	5%	a2b2	2.29	b
0 ppm	5%	a1b2	0.19	c
Efectos simples de A en b3; efecto de los niveles de RF (Cd) sobre 10 % de materia orgánica aplicado				
4.5 ppm	10%	a4b3	3.51	a
3.0 ppm	10%	a3b3	2.95	a
1.5 ppm	10%	a2b3	2.18	b
0 ppm	10%	a1b3	0.17	c
Efectos simples de A en b4; efecto de los niveles de RF (Cd) sobre 15 % de materia orgánica aplicado				
4.5 ppm	15%	a4b4	2.59	a
3.0 ppm	15%	a3b4	2.56	a
1.5 ppm	15%	a2b4	2.12	a
0 ppm	15%	a1b4	0.12	b

Letras diferentes en las columnas, representan diferencias estadísticas significativas ($P < 0.05$)

Según la prueba de Duncan ($p < 0.05$) para el efecto simple de las interacciones de los niveles de M.O con los niveles de RF(Cd), sobre el contenido de Cd en hojas a 120 días de instalado (Cuadro 17). Los Efectos simples de B

en a₁; efecto de los niveles de M.O sobre sobre 0 ppm de Cd de RF, no muestra diferencias estadísticas, es decir las interacciones b₄a₁ con b₃b_a1, b₂a₁ y b₁a₁, fueron estadísticamente similar, sin embargo, se observa diferencias numéricas, esta diferencia numérica muestra que a mayor materia orgánica menor es la concentración de cadmio en las hojas, estos resultados son similares a la interacción B en a₁ del cadmio disponible presentados en el Cuadro 10.

B en a₁ (Cuadro 17) muestra una correlación negativa, es decir al incrementarse los niveles de materia orgánica aplicados al suelo se reduce el cadmio en las hojas de los plántones de cacao, con elevado coeficiente de determinación de $R^2 = 0.99$, sin embargo el coeficiente de regresión es muy bajo (-0.0073x) es decir la pendiente es muy bajo; el coeficiente de regresión quiere decir por cada unidad que se incrementa la materia orgánica se reducirá el cadmio en las hojas del cacao en 0.0073 % (Figura 8a).

Los efectos simples de B en a₂; efecto de los niveles de M.O (b₁, b₂, b₃, b₄) sobre sobre 1,5 ppm de RF (a₂) sobre el contenido de cadmio en la hoja de plántones de cacao, no se diferenciaron estadísticamente, sin embargo, numéricamente fue menor la presencia de cadmio en las hojas cuando se incrementa los niveles de materia orgánica (Cuadro 12, 13). B en a₂ muestra una correlación negativa (Figura 8b).

La interacción B en a₁, B en a₂, y B en a₃ no mostraron diferencias estadísticas, sin embargo si muestran diferencias numéricas que expresan una ligera tendencia (Cuadro 17). Al incrementarse los niveles de materia orgánica

en el sustrato preparado se reduce el cadmio en la hoja (Cuadro18, Figura 6) en todos los niveles de cadmio de la roca fosfórica.

Cuadro 17. Prueba de Duncan para el efecto simple de las interacciones de los niveles de M.O con los niveles de RF(Cd) sobre el contenido de Cd en hojas a 120 días de instalado.

Niveles de M.O (A) (%)	Niveles de Cd con RF (A) (ppm)	Clave	Cd total en hojas (ppm)	Significancia
Efectos simples de B en a1; efecto de los niveles de M.O sobre sobre 0 ppm de RF aplicado				
0%	0 ppm	b1a1	0.24	a
5%	0 ppm	b2a1	0.19	a
10%	0 ppm	b3a1	0.17	a
15%	0 ppm	b4a1	0.12	a
Reducción de cadmio			0.24-0.12= 50%	
Efectos simples de B en a2; efecto de los niveles de M.O sobre sobre 1,5 ppm de RF aplicado				
0%	1.5 ppm	b1a2	2.76	a
5%	1.5 ppm	b2a2	2.29	a
10%	1.5 ppm	b3a2	2.18	a
15%	1.5 ppm	b4a2	2.12	a
Reducción de cadmio			$(2.76-2.12)/2.76*100 = 23\%$	
Efectos simples de B en a3; efecto de los niveles de M.O sobre sobre 3,0 ppm de RF aplicado				
0%	3.0 ppm	b1a3	3.11	a
5%	3.0 ppm	b2a3	3.01	a
10%	3.0 ppm	b3a3	2.95	a
15%	3.0 ppm	b4a3	2.56	a
Reducción de cadmio			$(3.11-2.56)/3.11*100= 18\%$	
Efectos simples de B en a4; efecto de los niveles de M.O sobre sobre 4,5 ppm de RF aplicado				
0%	4.5 ppm	b1a4	4.63	a
5%	4.5 ppm	b2a4	3.95	a
10%	4.5 ppm	b3a4	3.51	b
15%	4.5 ppm	b4a4	2.59	c
Reducción de cadmio			$(4.63-2.59)/4.63*100= 44\%$	

Letras diferentes en las columnas, representan diferencias estadísticas significativas (P<0.05)

Cuadro 18. Duncan del cadmio total en hojas de todos los tratamientos.

Niveles de Cd con RF (A) (ppm)	Niveles de M.O (A) (%)	Medias	n	Significación					
4.5	0	4.63	3	a					
4.5	5	3.95	3	a	b				
4.5	10	3.51	3		b	c			
4.5	0	3.11	3			c	d		
3,0	5	3.01	3			c	d	e	
3,0	10	2.95	3			c	d	e	f
3.0	0	2.76	3			c	d	e	f
3.0	15	2.59	3				d	e	f
1.5	15	2.56	3				d	e	f
1.5	5	2.29	3				d	e	f
1.5	10	2.18	3					e	f
1.5	15	2.12	3						f
0	0	0.24	3						g
0	5	0.19	3						g
0	10	0.17	3						g
0	15	0.12	3						g

Letras diferentes en las columnas, representan diferencias estadísticas significativas ($P < 0.05$)

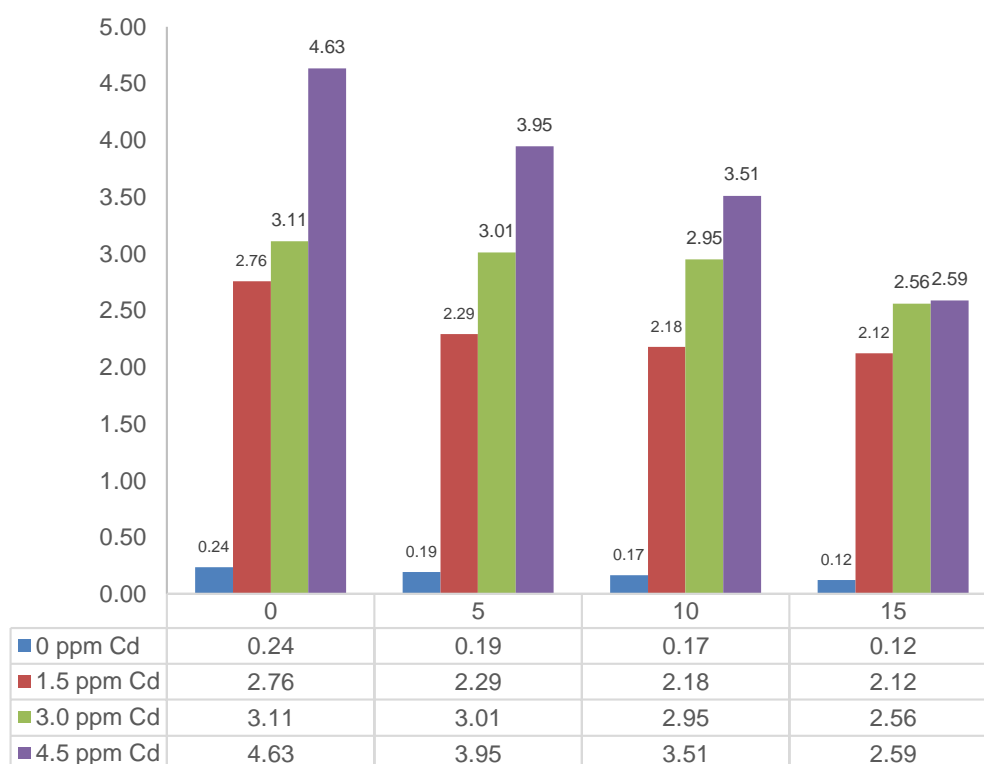


Figura 6. Concentración del cadmio total en hojas de cacao por efecto de los niveles de RF y materia orgánica.

4.4 Correlación y regresión entre los niveles de roca fosfórica y materia orgánica con el cadmio absorbido por la planta de cacao.

La Figura 7 muestra las correlaciones positivas y significativas entre los niveles de cadmio de la roca fosfórica y cadmio en las hojas de cacao en 0 % de materia orgánica, es decir sin la aplicación de materia orgánica (Figura 7a), en cinco % de materia orgánica (Figura 7b), con 10 % de materia orgánica (c), 15 % de materia orgánica (Figura 7c).

4.4.1. Correlación entre los niveles de cadmio de la roca fosfórica con el cadmio en las hojas de cacao en cada nivel de M.O (0, 5, 10 y 15 %)

La correlación entre los niveles de cadmio aplicado al suelo y cadmio en las hojas de cacao, sin materia orgánica (0 % de M.O) fue significativa y positiva, es decir al incrementarse los niveles de cadmio en el suelo, se incrementa también el cadmio en las hojas de los plantones de cacao, con un coeficiente de determinación de $R^2 = 0.9193$, y coeficiente de correlación $r=0.96$, con la ecuación de regresión lineal que mejor se ajusta a los valores evaluados ($y_{(Cd\text{ hoja})}=0.9029X_{(Cd\text{ ppm})}+0.6527$), de acuerdo a este modelo matemático y al coeficiente de regresión, por cada unidad que se incrementa en los niveles de cadmio en suelo, se incrementará el cadmio en la hoja en 0.9029 ppm (Figura 7a).

La correlación entre los niveles de cadmio aplicado al suelo y cadmio en las hojas de cacao, con cinco % de materia orgánica (5 % de M.O) fue significativa y positiva, es decir al incrementarse los niveles de cadmio en el

suelo, se incrementa también el cadmio en las hojas de los plántones de cacao, con un coeficiente de determinación de $R^2 = 0.9393$, y coeficiente de correlación $r=0.97$, con la ecuación de regresión lineal que mejor se ajusta a los valores evaluados ($y_{(Cd \text{ hoja})}=0.7987X_{(Cd \text{ ppm})}+0.5631$), de acuerdo a este modelo matemático y al coeficiente de regresión, por cada unidad que se incrementa en los niveles de cadmio en suelo, se incrementará el cadmio en la hoja en 0.5631 ppm (Figura 7b).

La correlación entre los niveles de Cd aplicado al suelo y Cd foliar (cacao), con diez % de materia orgánica (M.O) fue significativa y positiva, es decir al incrementarse los niveles de Cd en el suelo, se incrementa también el Cd en las hojas de los plántones de cacao, con un coeficiente de determinación de $R^2 = 0.9095$, y coeficiente de correlación $r=0.95$, con la ecuación de regresión lineal que mejor se ajuste ($y_{(Cd \text{ hoja})}=0.7196X_{(Cd \text{ ppm})}+0.5809$), de acuerdo a este modelo matemático y al coeficiente de regresión, por cada unidad que se incrementa en los niveles de cadmio en suelo, se incrementará el cadmio en la hoja en 0.7196 ppm (Figura 7c).

La correlación entre los niveles de cadmio aplicado al suelo y cadmio en las hojas de cacao, con 15 % de materia orgánica (15 % de M.O) fue significativa y positiva, es decir al incrementarse los niveles de cadmio en el suelo, se incrementa también el cadmio en las hojas de los plántones de cacao, con un coeficiente de determinación de $R^2 = 0.7471$, y coeficiente de correlación $r=0.86$, con la ecuación de regresión lineal que mejor se ajusta a los valores

evaluados ($y_{(\text{Cd hoja})} = 0.5222X_{(\text{Cd ppm})} + 0.674$), y sugiere que por cada unidad que se incrementa en los niveles de Cd en suelo, se incrementará el Cd en la hoja en 0.5222 ppm (Figura 7d).

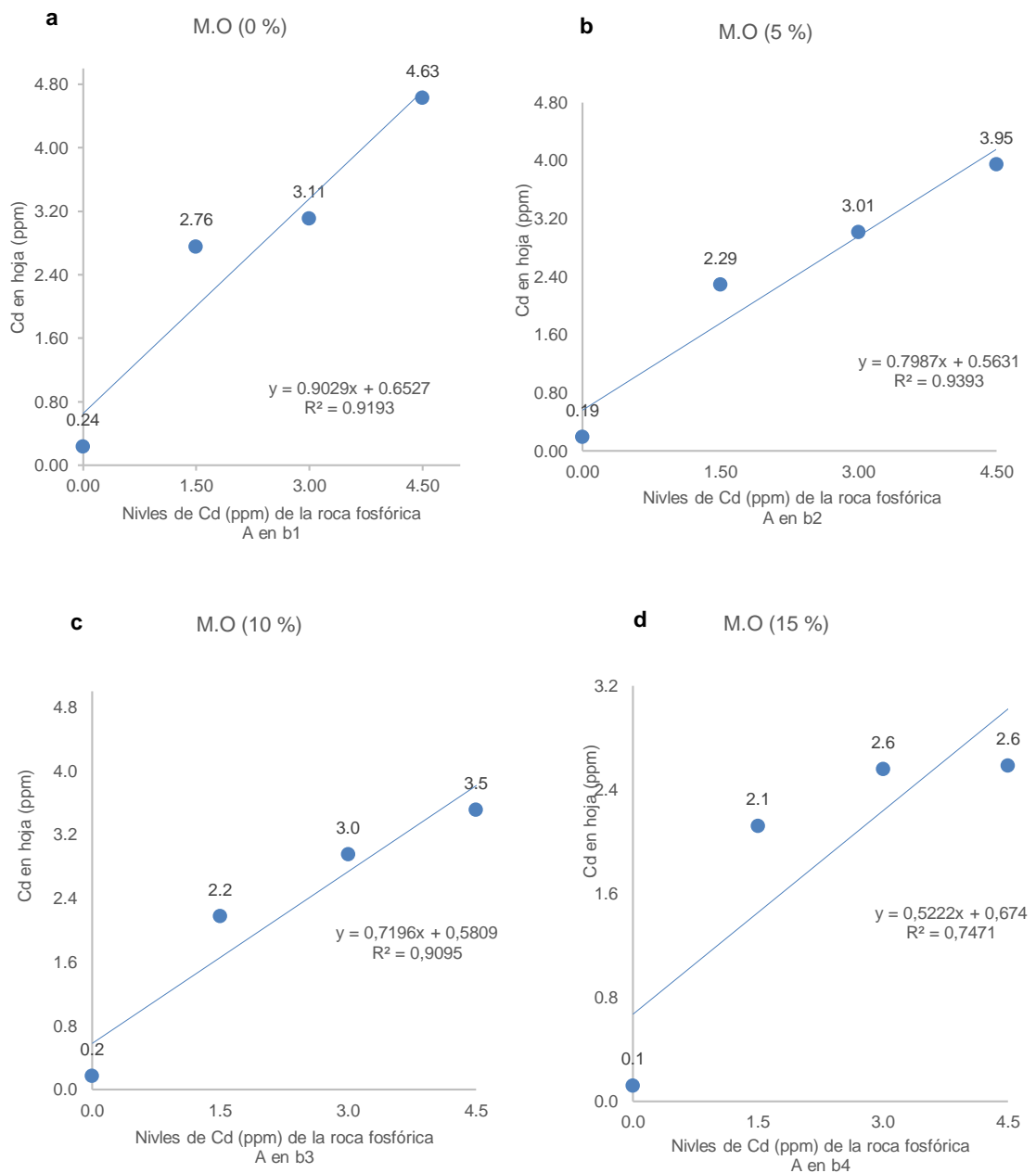


Figura 7. Correlación entre los niveles de cadmio de la roca fosfórica y cadmio en las hojas de cacao.

4.4.2. Correlación y regresión entre la materia orgánica (niveles) y cadmio de las hojas de cacao en cada nivel de Cd (0.0, 1.5, 3.0 y 4.5 ppm) de la roca fosfórica.

La Figura 8 muestra las correlaciones negativas y significativas entre los niveles de materia orgánica y cadmio en las hojas de cacao con la aplicación de 0 ppm de cadmio, es decir sin la aplicación de cadmio al suelo (Figura 8a), con la aplicación de 1.5 ppm de cadmio (Figura 8b), con la aplicación de 3.0 ppm de cadmio (Figura 8c), y con la aplicación de 4,5 ppm de cadmio (Figura 8d).

La correlación entre los niveles de materia orgánica aplicado al suelo y cadmio en las hojas de cacao, con 0 ppm de cadmio (0.0 ppm de Cd) fue significativa y negativo es decir correlación inverso, por lo tanto al incrementarse los niveles de materia orgánica en el suelo, se reduce el cadmio en las hojas de los plántones de cacao, con un coeficiente de determinación de $R^2 = 0,9918$, y coeficiente de correlación $r=0.996$, con la ecuación de regresión lineal que mejor se ajusta a los valores evaluados ($y_{(Cd\text{ hoja})}=-0.0073X_{(M.O)}+0.235$), de acuerdo a este modelo matemático y al coeficiente de regresión (pendiente), por cada unidad que se incrementa en los niveles de materia orgánica en suelo, se reducirá el cadmio en la hoja en 0.0073 ppm (Figura 8a).

El índice (coeficiente) de regresión (0.0073) es numéricamente bajo, que posiblemente indicaría mínima reducción del cadmio, aunque el coeficiente de correlación sea altamente significativo ($r=0.9918$), por lo tanto, prestamos más atención al coeficiente de regresión lineal.

La correlación entre los niveles de materia orgánica aplicado al suelo y cadmio en las hojas de cacao, con 1.5 ppm de cadmio (1.5 ppm de Cd) fue significativa y negativo es decir correlación inverso, por lo tanto al incrementarse los niveles de materia orgánica en el suelo, se reduce el cadmio en las hojas de los plantones de cacao, con un coeficiente de determinación de $R^2=0.8117$, y coeficiente de correlación $r=0.90$, con la ecuación de regresión lineal que mejor se ajusta a los valores evaluados ($y_{(Cd\text{ hoja})}=-0.0403X_{(M.O)}+2.6387$), de acuerdo a este modelo matemático y al coeficiente de regresión (pendiente), por cada unidad que se incrementa en los niveles de materia orgánica en suelo, se reducirá el cadmio en la hoja en 0.0403 ppm (Figura 8b).

El índice (coeficiente) de regresión (0.0403) es numéricamente bajo, que posiblemente indicaría mínima reducción del cadmio, aunque el coeficiente de correlación sea altamente significativo ($r=0.9$), por lo tanto, considerando el mismo criterio que en la Figura 8a, prestamos más atención al coeficiente de regresión lineal.

La correlación entre los niveles de materia orgánica aplicado al suelo y cadmio en las hojas de cacao, con 3.0 ppm de cadmio (3.0 ppm de Cd) fue significativa y negativo es decir correlación inverso, por lo tanto al incrementarse los niveles de materia orgánica en el suelo, se reduce el cadmio en las hojas de los plantones de cacao, con un coeficiente de determinación de $R^2=0.8399$, y coeficiente de correlación $r=0.916$, con la ecuación de regresión lineal que mejor se ajusta a los valores evaluados ($y_{(Cd\text{ hoja})}=-0.0342X_{(M.O)}+3.1642$), de acuerdo a

este modelo matemático y al coeficiente de regresión (pendiente), por cada unidad que se incrementa en los niveles de materia orgánica en suelo, se reducirá el cadmio en la hoja en 0.342 ppm (Figura 8c).

La correlación entre los niveles de materia orgánica aplicado al suelo y cadmio en las hojas de cacao, con 4.5 ppm de cadmio (4.5 ppm de Cd) fue significativa y negativo es decir correlación inverso, por lo tanto al incrementarse los niveles de materia orgánica en el suelo, se reduce el cadmio en las hojas de los plantones de cacao, con un coeficiente de determinación de $R^2=0.9819$, y coeficiente de correlación $r=0.99$, con la ecuación de regresión lineal que mejor se ajusta a los valores evaluados ($y_{(Cd\text{ hoja})}=-0.1315X_{(M.O)}+4.655$), de acuerdo a este modelo matemático y al coeficiente de regresión (pendiente), por cada unidad que se incrementa en los niveles de materia orgánica en suelo, se reducirá el cadmio en la hoja en 0.1315 ppm (Figura 8d).

El índice (coeficiente) de regresión (0.1315) es numéricamente mayor, y posiblemente indicaría una mayor reducción del cadmio, por lo tanto, la materia orgánica en el nivel más alto de cadmio (4.5 ppm) presento mayor reducción del Cd que en 0.0, 1.5 y 3.0 ppm de cadmio aplicado.

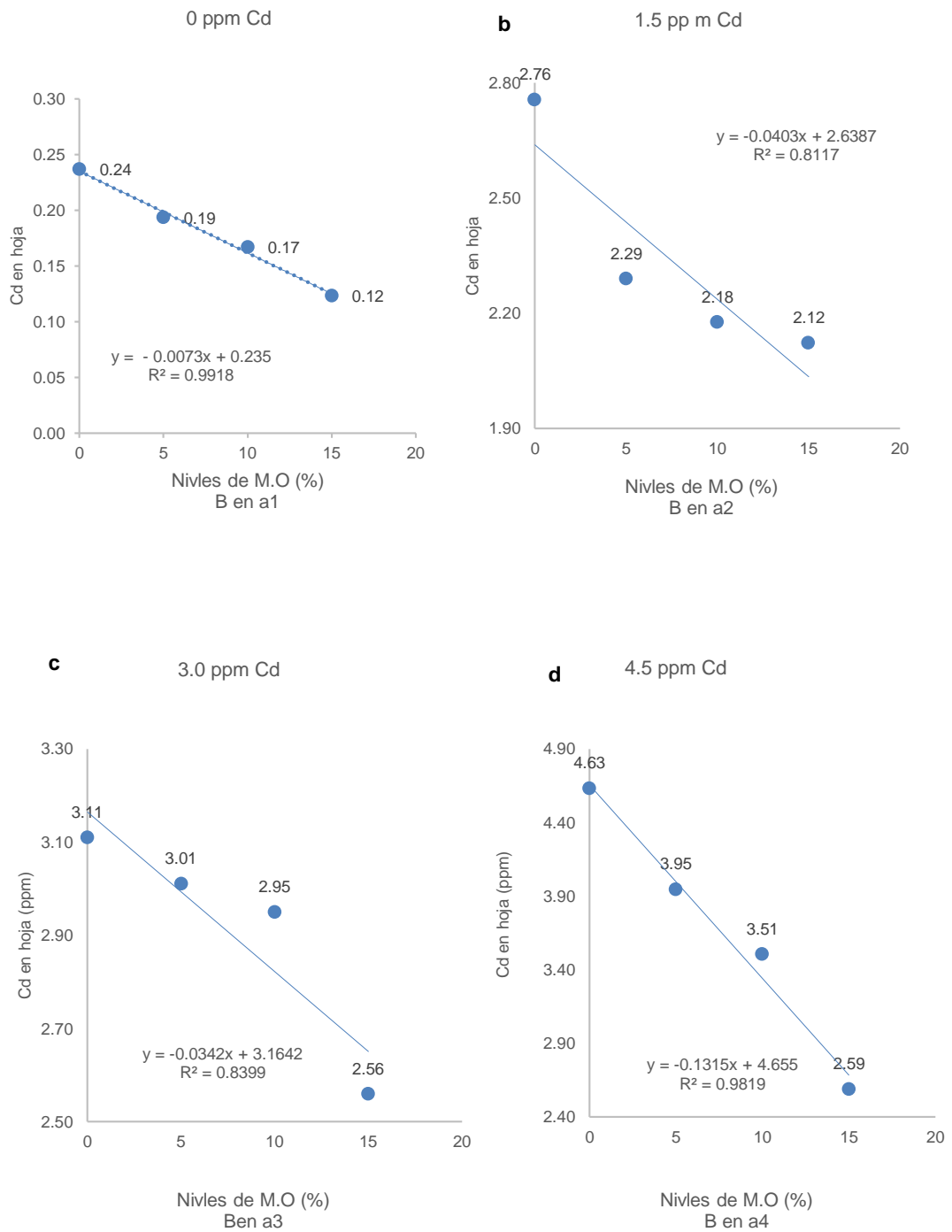


Figura 8. Correlación entre los niveles de materia orgánica y cadmio en la de cacao.

V. DISCUSIÓN

5.1. Efecto de la materia orgánica y roca fosfórica en la presencia de cadmio total en el suelo.

Las dosis de roca fosfórica calculados como fuente de cadmio (1.5, 3.0 y 4.5 ppm) presentaron diferencias estadísticas altamente significativas (Cuadro 3) es decir al menos una dosis de roca fosfórica (Cd) aplicado al suelo con plantones de cacao en invernadero ha producido un efecto diferente en la presencia y/o adsorción de cadmio total en el suelo. Mientras que las dosis de materia orgánica no afecto la presencia del cadmio total en el suelo. Al no haber efecto de interacción solo se discutirá Efecto principal y no se discutirá el el efecto simple de la interacción de la materia orgánica y roca fosfórica en la presencia de cadmio total en el suelo.

5.1.1. Efecto principal de la materia orgánica y roca fosfórica en la presencia de cadmio total en el suelo.

Estadísticamente fue menor la concentración de cadmio total en el suelo con la aplicación de 1.5 ppm de Cd, y mayor con la aplicación de 4.5 ppm (Cuadro 4); evidenciándose que el incremento con dosis altas de roca fosfórica aplicados al suelo y después de un periodo de 4 meses; mostro mayor presencia de cadmio total en el suelo. El testigo que no se aplicó roca fosfórica presento menor concentración de Cd total en el suelo.

Estos resultados coinciden con HUAMANI *et al.* (2019) que reportaron menor concentración de cadmio total en el suelo con la aplicación del nivel más bajo de cadmio (1.5 ppm) y mayor con la aplicación de las dosis más altas (3.0, 4.5 ppm). ACOSTA (2014) evaluó el efecto de dosis de sulfato de Cd y reporto mayor acumulación de cadmio en las plántulas de cacao con las dosis mayores de cadmio que aplico a las plantas. ABANTO (2016) reporto el efecto de la roca fosfórica en la presencia de cadmio en el maíz y con mayor extracción con el fosfato diamonico. Según BONOMELLI *et al.* (2003) el uso de fertilizantes fosforados puede aportar cadmio a los cultivos.

No hubo diferencias en la concentración de cadmio total en el suelo con las dosis de materia orgánica aplicados (Cuadro 4), sin embargo, se observa diferencias numéricas con mayor presencia de Cd total en la dosis más alta de materia orgánica (Figura 1a, 1b), esto se explicaría por la retención del Cd por la materia orgánica, es decir el Cd estaría siendo capturado posiblemente por las sustancias húmicas formando complejos insolubles y estables. Los compuestos de carbono con carga negativa de la M.O del suelo estarían reteniendo al Cd. La incorporación de la materia orgánica al suelo estaría formando ácidos fúlvicos, ácidos húmicos y humina; estas sustancias húmicas tienen la capacidad de retener metales como el Cd por sus grupos funcionales carboxílico, hidroxilos, fenoles, coincidiendo con BRAVO *et al.* (2014) que concluyeron que los ácidos húmicos y OTTOS (2017) ácidos fúlvicos de la M.O presentaron mayor retención del Cd por enlaces fuertes formados con los grupos carboxílicos y fenólicos.

Varios mecanismos están involucrados en la reducción de Cd disponible en el suelo, principalmente relacionado con la variación del pH, estas formas son, sorción, precipitación, complejación reacción química de óxido reducción, y La formación de ligandos metal-orgánicos son los procesos principales que afectan la disponibilidad de Cd (HOUBEN *et al.*, 2012). En el suelo, el Cd se puede encontrar en diferentes formas y complejos y su presencia fundamentalmente depende de las características del suelo, estos son, material parental, materia orgánica, óxidos, otras formas orgánicas, estos relacionados con el pH del suelo (SIMMLER, 2012).

La enmienda de la materia orgánica afecta significativamente la disponibilidad de Cd en el suelo al traer cambios en las propiedades fisicoquímicas del suelo como el pH, la CE y la concentración de macro y micro nutrientes (KHAN *et al.*, 2014). La materia orgánica da lugar a las formas humificadas que minimizan la biodisponibilidad de los metales por adsorción generando complejos estables con las sustancias humicas (SHUMAN, 1999).

La incorporación de materiales orgánicos al suelo, mejora la inmovilización de Cd a través de reacciones de adsorción, estas aumentan la retención de Cd al aumentar la carga superficial (CLARK *et al.*, 2007). Sin embargo, la concentración de Cd en el suelo no disminuye con el uso de de la materia orgánica, pero reduce su biodisponibilidad. Además la materia orgánica tiene compuestos de aluminio y fosfatos, que retienen metales pesados (BROWN *et al.*, 1998). La materia orgánica transforma el Cd soluble en fracción de enlace orgánico, reduciendo así la absorción (HAN-SONG *et al.*, 2010)

Este resultado coincide con HUAMANI *et al.*, 2019 que reportaron el incremento del cadmio total en el suelo con las dosis más altas de materia orgánica. Según SANTOSF (2005) el carbono es principal componente de la MOS y forma moléculas de alta reactividad. RON (2004) indica que el AF contienen más grupos carboxílicos (-COOH) e hidroxilos (-COH), y fenólicos generando un compuesto químicamente más reactivo, con doble CIC (con capacidad de intercambio anicónico y catiónico) que el AH. ÖZKARAOVA y BEKBÖLE (2010) indican que los grupos funcionales, carboxílicos, hidroxílicos y fenólicos de los AH adsorben metales.

TÈNE (2016), reportó más de 60 elementos entre minerales en el ácido húmico, BENITES *et al.* (2003) determinó que la humina (HUM) está fuertemente asociación a los minerales como el Cd. La materia orgánica aplicada al suelo habría incrementado el pH, y la CIC dando lugar a la formación de complejos insolubles del cadmio. Según HONG *et al.* (2009) en Ph alto hay formación de CaCO_3 y Ca(OH)_2 reduciendo el Cd soluble.

También es posible que los exudados orgánicos de los plantones de cacao contribuyeron a la retención del cadmio en presencia de la materia orgánica. Según YANG *et al.* (2010) la rizosfera generalmente con materia orgánica puede afectar la especiación de los metales pesados en los suelos contaminados formando complejos organometálicos. LIZARAZO (2001) las sustancias húmicas son fuente de carbono, e incrementa la población microbiana del suelo.

La menor concentración de cadmio total en el suelo fue sin la aplicación de roca fosfórica en los cuatro niveles de materia orgánica, y fue mayor la presencia de cadmio con las dosis más altas de roca fosfórica (Cuadro 5), por lo tanto es posible que la aplicación de altas dosis de rocas fosfatadas incrementen los niveles de Cd del suelo.

La menor concentración de Cd total en el suelo sin aplicación de roca fosfórica (0 ppm Cd) en todos los niveles de M.O, y mayor concentración con el nivel más alto, 4.5 ppm de Cd (roca fosfórica) también en todos los niveles de M.O (Figura 1a), sugiere un efecto contaminante de la roca fosfórica mínimo sobre el suelo. La correlación positiva entre los niveles de materia orgánica y cadmio total del suelo (Figura 1b) sugiere que existió retención del cadmio por efecto de materia orgánica, por lo tanto la incorporación de materia orgánica hasta un 10 % (p/v) sobre el suelo ayuda a retener (adsorber) el Cd reduciéndose su biodisponibilidad. Dosis más altas del 10 % podrían ser innecesarias y dosis menores también podrían ser insuficientes. Sin embargo estos resultados efectos deberían estudiarse en condiciones de campo, para tener datos más reproducibles a la realidad.

5.2. Efecto de la materia orgánica y roca fosfórica en la presencia de cadmio disponible en el suelo.

El efecto significativo de la roca fosfórica (1.5, 3.0 y 4.5 ppm) aplicado en dosis alta (al suelo) en vivero en el incremento de la concentración de Cd en el suelo (Cuadro 6), se explica por la interacción de las propiedades

del suelo y posible presencia de cadmio de la roca fosfórica potencialmente biodisponible. Por lo tanto, la concentración del cadmio natural de la roca fosfórica se habría solubilizado por efecto de los exudados orgánicos de la planta y actividad microbiana en la rizosfera, generando la biodisponibilidad del cadmio, con características potenciales para su bioacumulación por las plantas de cacao, sin embargo, esta liberación sería muy bajo que solo se observaría en dosis exageradas de roca fosfórica.

Con aplicaciones de dosis agronómicas aproximadamente 200 kilos por hectárea de roca fosfórica serían poco probable generar contaminación por Cd, se tendría que aplicar durante muchos años para generar un efecto contaminante significativo.

5.2.1. Efecto principal de materia orgánica y roca fosfórica en la presencia de cadmio disponible en el suelo.

La menor concentración de cadmio disponible estadísticamente significativo ($p < 0.05$) en el suelo con la aplicación de 1.5 ppm de Cd, y mayor con la aplicación de 4.5 ppm (Cuadro 7), similar al cadmio total evidencia un incremento del Cd disponible y se explicaría por la dosis alta de roca fosfórica aplicados al suelo y después de un periodo de 4 meses. La aplicación de 5 % de materia orgánica, presentó menor concentración numéricamente de cadmio disponible explicado por una posible solubilidad del cadmio por efecto de la materia orgánica en dosis altas, la descomposición de la M.O puede generar ácidos lo que solubiliza los minerales presentes.

El testigo que no se aplicó roca fosfórica a₁ (0.0 ppm Cd) presento estadísticamente menor concentración de Cd disponible en el suelo. La presencia del Cd en el testigo (b₁) se explica por el aporte del suelo y semilla que tenia inicialmente Cd, explicado en el Cd total. Estos resultados coinciden con HUAMANI *et al.* (2019) que determinaron menor concentración de cadmio disponible (extraíble en EDTA) en el suelo con aplicación del nivel más bajo de Cd (1.5 ppm) y mayor con la aplicación de las dosis más altas (3.0, 4.5 ppm) usando sulfato de cadmio como contaminante, en vivero después de 5 meses.

La aplicación de los niveles de materia orgánica (factor B) (Cuadro 7), no presento diferencias estadísticas, es decir, no hubo diferencias estadísticas en la concentración de cadmio disponible en el suelo con las dosis de materia orgánica aplicados. Sin embargo, se observa diferencias numéricas, con menor presencia de cadmio disponible en la dosis más baja de materia orgánica (5 %) y mayor cadmio en las dosis 3% y vuelve a bajar con 4 % M.O, resultado que coincide con lo informado por NATIVIDAD (2016) quien reportó resultados que sugirieron que el cadmio del sustrato no fue retenido (inmovilizado) por la materia orgánica, y posiblemente se precipitó y perdió con el agua o fue bioacumulado por la planta de cacao.

La tendencia con variación ligera numérica, donde se observa que la aplicación del 15 % de materia orgánica presenta menor concentración de cadmio disponible (Figura 2) sugiere que existe una ligera (no significativo) efecto de la materia orgánica para reducir la concentración de cadmio disponible del

suelo, inicialmente con la dosis baja de materia orgánica sube el cadmio disponible, pero al incrementarse la M.O a partir de 15 % tiende a bajar.

Por lo tanto, la dosis más alta de materia orgánica está reduciendo la presencia del cadmio disponible. CHÁVEZ *et al.* (2016) en Ecuador en suelos cacaoteros redujo el cadmio disponible con la aplicación de vermicompost, Según CLARK *et al.* (2007) la M.O orgánica, disminuye la biodisponibilidad de cadmio en suelo, ANTIADIS y ALLOWAY (2002), KHAN *et al.* (2014) reportaron que la materia orgánica disuelto del suelo presenta ligandos naturales y reducen significativamente la disponibilidad del cadmio de la solución del suelo.

5.2.2. Efectos simples de las interacciones de materia orgánica con la roca fosfórica en la presencia de cadmio disponible en el suelo.

La diferencia estadística significativa en todas las interacciones de los niveles de roca fosfórica y materia orgánica a acepción de B en a1 (Cuadro 8) se explicaría por un efecto de las propiedades físicas químicas y biológicas de la materia orgánica sobre la solubilización de la roca fosfórica además de la actividad microbiana y el efecto de la rizosfera de la planta de cacao durante los 120 días en el vivero.

Los efectos simples de A en b2 (Cuadro 9); efecto de los niveles de RF (Cd) sobre 5 % de materia orgánica aplicado, fue estadísticamente superior la interacción a4b2 sobre a3b2, a2b2 y a2b2 es decir la dosis más alta de cadmio (4.5) ppm sobre el sustrato a proporción 5 % M.O (M.O:suelo) presentó estadísticamente mayor concentración de cadmio disponible (0.480 ppm) en el

suelo. A en b₂ muestra una correlación positiva es decir al incrementarse los niveles de cadmio se incrementa también el cadmio disponible en el suelo (Figura 3a), La interacción A en b₁, A en b₂, A en b₃ y A en b₄ mostraron que a al incrementarse la dosis de cadmio (1.5, 3, 4.5 ppm) se incrementa el cadmio disponible en el suelo (Cuadro 9, Figura 3,9). La interacción de a₄ (4.5 ppm Cd) con b₁, b₂, b₃ y b₄ fueron estadísticamente superior, mientras que los testigos que no recibieron roca fosfórica (Cd) presentaron las concentraciones más bajas de cadmio disponible (Cuadro 9, 10). Además, la correlación entre los niveles de cadmio aplicado y el cadmio disponible encontrado en el suelo fue positivo en todos los niveles de M.O (Figura 3a,3b,3c,3d). En ningún nivel de materia orgánico se ha logrado reducir el Cd disponible de forma estadística y significativo, esto se explicaría por la dosis muy elevada de roca fosfórica aplicado.

Los efectos simples de B en a₂ (Cuadro 10), efecto de los niveles de M.O (b₁, b₂, b₃, b₄) sobre sobre 1,5 ppm de RF (a₂) en el contenido de cadmio disponible en el suelo, no se diferenciaron estadísticamente, sin embargo, numéricamente fue menor la presencia de cadmio disponible cuando se incrementa los niveles de materia orgánica (Cuadro 10, Figura 4b, 10b).

La interacción B en a₁, B en a₂, B en a₃ y B en a₄ no mostraron diferencias estadísticas, sin embargo si muestran diferencias numéricas (Cuadro 10), estas diferencias numéricas muestran que al incrementarse los niveles de materia orgánica de 0, 5, 10 y 15 % (M.O:suelo) en las dosis de cadmio (1.5 y 3.0 ppm) se reduce la concentración de Cd disponible en el suelo (Figura 4b, 4c,

10b, 10c), y con 4.5 ppm se incrementa el cadmio (Figura 4d, 10d). Excluyendo el nivel cero de cadmio (a1), la interacción de b4 (4.5 ppm Cd) con a2, a3 y a4 presentaron numéricamente menor concentración de cadmio disponible. La materia orgánica ha reducido el cadmio disponible en 12.9, 9.9 y 13 % con 1.5, 3.0 y 4.5 ppm Cd (Cuadro 10), el Cd disponible se ha reducido y posiblemente ha pasado a formar parte del Cd total, y estaría fuertemente retenido en la materia orgánica del suelo, Resultados similares obtuvieron LIU *et al.* (2009) con la aplicación de compost redujeron en 50 % el Cd disponible, HAN-SONG *et al.* (2010) encontraron la reducción de la biodisponibilidad del Cd con la adición de gallinaza al suelo, CHAVEZ *et al.* (2016) reportó la reducción significativa del cadmio disponible en plantaciones de cacao con aplicación de vermicompost, HAN-SONG *et al.* (2010) reportó la reducción del Cd disponible con aplicación de gallinaza al suelo.

ANTIADIS y ALLOWAY (2002), CLARK *et al.* (2007) reportaron que los ligandos de la materia orgánica aumentan la retención de Cd, para HAMON *et al.* (1995) estos ligandos son moléculas orgánicas con carga negativa que retiene (adsorbe) el Cd. Según HAN-SONG *et al.* (2010) la materia orgánica, del suelo retiene el cadmio disponible (intercambiable) formando moléculas de carácter orgáno-minerales. MATUSIK *et al.* (2008) el cadmio formaría compuestos de carbonato de cadmio y fosfato de cadmio CdCO_3 , y $\text{Cd}_3(\text{PO}_4)_2$ en pH elevado. PINAMONTI *et al.* (1997) en Italia demostraron que el compost (incluye cortezas de álamo) no causó ningún aumento significativo en los niveles de metales entre el cadmio y plomo en el suelo y sugieren su aplicación a corto

y mediano plazo. SHUMAN (1999) distingue que la materia orgánica humidificada reduce el Cd disponible por adsorción y formación de complejos muy estables con las sustancias húmicas del suelo. HUAYNATES (2013) en Tingo María determino que el guano de isla en el rango de 500 a 1500 g/planta tienen el mismo efecto positivo de reducir el cadmio.

5.3. Concentración de cadmio en hojas de plántones de cacao por efecto de la materia orgánica y roca fosfórica.

Los niveles de roca fosfórica calculados como fuente de cadmio (1.5, 3.0 y 4.5 ppm de Cd) mostraron diferencias estadísticas significativas, en la concentración de Cd en la hoja del cacao (Cuadro 12) lo que sugiere un incremento de la concentración del cadmio total en las hojas del cacao en vivero (120 días), por una posible solubilización de la roca fosfórica por aplicarse en grandes cantidades. Los niveles de la materia orgánica aplicado, mezclando con la roca fosfórica y suelo también presentaron efectos distintos en la absorción del cadmio, con una posible reducción de la bioacumulación de Cd por el cacao, la diferencia estadística de cada nivel se discute con los resultados de la comparación de Duncan en los siguientes párrafos.

La interacción (A*B) no significativa de las fuentes orgánicas (3A) con 3 niveles de materia orgánica (%) sugiere que la mezcla de la roca fosfórica con la materia orgánica en sus niveles no afectaron la absorción de cadmio, por lo tanto la mezcla de la roca fosfórica con la materia orgánica en los niveles estudiados no afectaron la absorción de cadmio de las plantas de cacao, sin embargo, los resultados mostraron diferencias numéricas (Cuadro 12), y permitió

realizar el análisis de los efectos simples o de interacción y evaluar las tendencias en cada nivel de los factores y elegir el mejor tratamiento, para reducir la concentración de Cadmio en la hoja de plantas de cacao en fase de vivero.

5.3.1. Efecto principal de la materia orgánica y roca fosfórica en la presencia de cadmio total en hojas de cacao.

La menor la concentración de cadmio en la hoja ($p < 0.05$) con la aplicación del menor nivel de Cd (1.5 ppm) (a_2) de la roca fosfórica y mayor Cd en la hoja con la aplicación de la dosis más alta 4.5 ppm (a_4) (Cuadro 13) sugiere un incremento de la concentración de Cd en la hoja al incrementarse los niveles de la roca fosfórica. Resultado que se explicaría por la posible solubilización del Cd de la roca y posterior bioacumulación por la planta de cacao con 120 días de edad, solubilización inducida por un sobre encallamiento con la roca fosfórica (RF). Para alcanzar 4.5 ppm de Cd con una roca fosfórica con 20,575 ppm de Cd para un kilo de suelo requiere aplicarse aproximadamente 388 gramos de roca fosfórica.

El testigo que no se aplicó roca fosfórica a_1 (0.0 ppm Cd) presentó estadísticamente menor concentración de cadmio en las hojas (Cuadro 13). La presencia del cadmio en las hojas en el testigo se explicaría por la presencia de cadmio natural del suelo utilizado en el experimento que fue 0.85 ppm de Cd y además la semilla presentó 0.31 ppm y su cascarilla 0.23 ppm de cadmio. ACOSTA (2014) encontró en plantones de cacao en vivero en Tingo María presencia de cadmio al incrementar la dosis contaminante. HUAMANI *et al.*

(2019) reportan que al incrementar la dosis del Cd se incrementa el Cd en los plántones de cacao.

La menor concentración de cadmio en las hojas, con el incremento de los niveles de materia orgánica estadísticamente diferenciados (Cuadro 14), evidencia un efecto favorable de la M.O para reducir la absorción (bioacumulación) de Cd por el cacao, a los 120 días de instalado el experimento.

La menor presencia de cadmio en hojas con las mayores dosis de M.O se explicaría por la retención (adsorción del cadmio sobre las sustancias húmicas de la materia orgánica), es decir se habría producido la captura del cadmio por las sustancias húmicas (ácidos húmicos, ácidos fúlvicos y huminas) de la materia orgánica, el cadmio habría formado compuestos insolubles y/o fuertemente retenido en moléculas complejas en forma insoluble, además también es posible que la materia orgánica aporte Zinc y Magnesio que podrían impedir que el cadmio fuese absorbido por las plantas por competencia, Edison (S/F), citado por NATIVIDAD (2013) quien determinó que la concentración de cadmio en el tejido disminuye cuando se incrementa la concentración de materia orgánica, PINAMONTI *et al.* (1997) reportó que la M.O no causa aumento del Cd en plantas.

HUAMANI *et al.* (2012) concluyó que existiría posible competencia entre el cadmio con el calcio, magnesio y zinc en el suelo que afectaría la absorción del Cd por las raíces de la planta. sin embargo, el testigo sin roca fosfórica (Cd) también presentó Cd en la hoja y se explica por la presencia de

cadmio natural en el suelo, abono orgánico, y semilla de cacao utilizado en el experimento.

5.3.2. Efectos simples de las interacciones de materia orgánica con la roca fosfórica en la presencia de cadmio total en hojas de cacao

La diferencia estadística ($p < 0.05$) mostrada en el Anva de efectos simples (Cuadro 15) solo en los niveles de B en (a1, a2, a3), sugiere que los niveles de la materia orgánica no tendrían efectos significativos sobre la aplicación de altas dosis de roca fosfórica aplicado en el suelo. Mientras que las diferencias estadísticamente significativo en todas las demás interacciones se explicarían por un efecto de adsorción de la materia orgánica atribuido a las sustancias húmicas que lo conforman.

Las diferencias estadísticas según la prueba de Duncan ($p < 0.05$) de los efectos simples (Cuadro 16) de A en b₂; efecto de los niveles de RF (Cd) sobre 5 % de materia orgánica aplicado, fue estadísticamente superior la interacción a₄b₂ sobre a₃b₂, a₂b₂ y a₁b₂ es decir la dosis más alta de cadmio (4.5) ppm sobre el sustrato a proporción 5 % M.O (M.O:suelo) presentó estadísticamente mayor concentración de Cd total (3.95 ppm) en las hojas (Cuadro 16) resultado similar que A en b₂. A en b₂ muestra una correlación positiva, es decir al incrementarse los niveles de cadmio se incrementa también el cadmio en las hojas de los plantones de cacao (Figura 7b). La interacción A en b₁, A en b₂, A en b₃ y A en b₄ mostraron que a al incrementarse la dosis de cadmio (1.5, 3, 4.5 ppm) se incrementa el cadmio total en las hojas (Cuadro 16)

con una correlación directa positiva, con alto coeficiente de determinación (Figura 7a, b, c, d). La interacción de a4 (4.5 ppm Cd) con b1, b2, b3 y fueron estadísticamente superior, mientras que los testigos que no recibieron RF (Cd) presentaron concentraciones más bajas de cadmio en las hojas (Cuadro 16, 13).

Las diferencias estadísticas según la prueba de Duncan ($p < 0.05$) de los efectos simples de las interacciones de los niveles de M.O con los niveles de RF(Cd), sobre el contenido de Cd en hojas a 120 días de instalado (Cuadro 17) se explica por la capacidad adsorción del Cd por la M.O en el suelo. Los Efectos simples de B en a1; efecto de los niveles de M.O sobre sobre 0 ppm de Cd de RF, no muestra diferencias estadísticas, es decir las interacciones b4a1 con b3ba1, b2a1 y b1a1, fueron estadísticamente similar, sin embargo, se observa diferencias numéricas, esta diferencia numérica muestra que a mayor aplicación de materia orgánica menor es la concentración de cadmio en las hojas, estos resultados son similares a la interacción B en a₁ del cadmio disponible presentados en el Cuadro 11.

B en a₁ muestra una correlación negativa, es decir al incrementarse los niveles de materia orgánica aplicaos al suelo se reduce el cadmio en las hojas de los plantones de cacao, con elevado coeficiente de determinación de $R^2 = 0.99$, sin embargo el coeficiente de regresión es muy bajo (-0.0073x) es decir la pendiente es muy bajo; el coeficiente de regresión quiere decir por cada unidad que se incrementa la materia orgánica se reducirá el cadmio en las hojas del cacao en 0.0073 % (Figura 8a).

Los efectos simples de B en a_2 ; efecto de los niveles de M.O (b_1, b_2, b_3, b_4) sobre sobre 1,5 ppm de RF (a_2) sobre el contenido de cadmio en la hoja de plántones de cacao, no se diferenciaron estadísticamente, sin embargo, numéricamente fue menor la presencia de cadmio en las hojas cuando se incrementa los niveles de materia orgánica (Cuadro 17, 18). B en a_2 muestra una correlación negativa (Figura 8b).

La interacción B en a_1 , B en a_2 , y B en a_3 no mostraron diferencias estadísticas, sin embargo si muestran diferencias numéricas (Cuadro 17), estas diferencias numéricas muestran que al incrementarse los niveles de materia orgánica de 0, 5, 10 y 15 % (M.O:suelo) se reduce la concentración de cadmio en las hojas del cacao. La materia orgánica ha reducido el cadmio en las hojas de plántones de cacao en 50, 23, 18 y 44 % con aplicación de 0.0, 1.5, 3.0 y 4.5 ppm Cd, empleándose roca fosfórica como fuente de cadmio (Cuadro 17).

La interacción B en a_4 ; efecto de los niveles de M.O sobre sobre 4,5 ppm de RF aplicado (a_4), mostró que la interacción b_4a_4 fue estadísticamente menor que b_3a_4, b_2a_4, b_1a_4 , es decir que la aplicación de la dosis más alta de materia orgánica (15 %) (b_4) sobre a_4 (4,5 ppm Cd) ha reducido en 44 % (significativamente) la concentración de cadmio en las hojas de plántones de cacao (Cuadro 17). B en a_4 presenta una correlación negativa (Figura 8d), es decir presenta una pendiente negativa, este resultado sugiere que el nivel más alto de materia orgánica como humus aplicado (15 %) presentó un alentador efecto en la reducción de cadmio en su dosis más alta (4 ppm).

5.4. Correlación y regresión entre los niveles de roca fosfórica y materia orgánica con el cadmio absorbido por la planta de cacao.

La correlación positiva y significativo existente entre los niveles de cadmio de la roca fosfórica utilizado en el sustrato y cadmio en las hojas de cacao (Figura 7a, b, c, d), se explicaría porque la dosis (peso y concentración de Cd) de la roca fosfórica fue exageradamente alto (Cuadro 1) que saturó el sustrato.

5.4.1. Correlación entre los niveles de cadmio de la roca fosfórica con el cadmio en las hojas de cacao en cada nivel de M.O (0, 5, 10 y 15 %)

La correlación positiva obtenida entre los niveles de cadmio (de la roca fosfórica) aplicado al suelo y la concentración de Cd en las hojas de cacao, sugiere que el Cd de la roca fosfórica aplicado (preparación del sustrato) se ha solubilizado y fue absorbido (bioacumulado) por la planta de cacao (120 días) (Figura 7a, 7b,7c). Sin embargo, la absorción fue menor cuando el sustrato fue llevado a 15 % de materia orgánica, observándose con el menor coeficiente de regresión (0.522) (Cuadro 7d).

Resultado similar fue informado por MOLDERS y MERTENS (2013), NZIGUHEBA y SMOLDERS (2008) quienes sugirieron que el uso de fertilizantes fosfatados altos en Cd es considerado generalmente como una principal fuente de ingreso de Cd al suelo. AIKPOKPODION *et al.* (2012) en suelos con cultivo de cacao aplicó roca fosfórica (20, 40 y 60 g por kg de suelo) antes de sembrar

grano de cacao en masetas. Los resultados mostraron que el Cu, Pb biodisponible en el suelo y en la hoja se redujo.

BONOMELLI *et al.* (2003) evaluaron el efecto de la fertilización fosforada sobre la concentración de Cadmio disponible en cuatro tipos de suelos de Chile. Los dos tratamientos fueron el testigo sin fertilización, superfosfato triple (SFT). Los suelos se incubaron en estufa durante un periodo de 90 días, y los resultados demostraron que la aplicación de SFT en dosis agronómica, utilizando fertilizante, tuvo un efecto estadísticamente significativo sobre la concentración de Cd disponible en los suelos.

Sin embargo, la aplicación de rocas fosfóricas con mínima concentración de cadmio puede utilizarse para la reducir la disponibilidad del cadmio de suelos contaminados. SESHADRI *et al.* (2015) sugiere un grupo amplio de fuentes de fosfatos (rocas fosfóricas) producidas en distintas regiones del mundo para inmovilizar del cadmio biodisponible o potencialmente soluble (intercambiable) del suelo, y reducir la biodisponibilidad y la bioacumulación del cadmio por las plantas de cacao.

Sin embargo es importante replicar estudios con aplicación de roca fosfórica en condiciones de campo en cacao en fase de producción, los factores ambientales como la precipitación pueden afectar significativamente estos resultados, además la interacción del humus y la roca fosfórica con los microorganismos presentes en el suelo y posibles efectos de los exudado orgánicos en la zona radicular de las plantas arvenses.

5.4.2. Correlación y regresión entre la materia orgánica (niveles) y cadmio de las hojas de cacao en cada nivel de Cd (0.0, 1.5, 3.0 y 4.5 ppm) de la roca fosfórica.

La correlación negativa obtenida entre los niveles de materia orgánica (mezcla en sustrato) con la concentración de Cd en las hojas de cacao, sugiere que la materia orgánica ha reducido la biodisponibilidad del Cd en el suelo reflejándose una menor concentración de Cd en la hoja del cacao (con 120 días) a mayor dosis de materia orgánica en condiciones de vivero, sin embargo, la reducción es mínimo (pendiente) observado en valores bajos del coeficiente de regresión (Figura 8b, 8c,8d). La reducción del cadmio disponible del suelo se explicaría por la carga negativa de las sustancias húmicas de la materia orgánica, estas sustancias tienen alta capacidad de intercambiar y retener iones inmovilizándolos y evitando se la planta lo absorba.

Resultado similar fue informado por GUZMÁN (2019), OTTOS (2019) en vivero (cacao CCN-51) con 4 meses aproximadamente, informaron una reducción de la concentración del Cd en las hojas con el incremento de la materia orgánica, sin embargo, la reducción no fue significativo. CONTRERAS (2018) también en un estudio en condiciones de vivero al contaminar el sustrato con cadmio y aplicar materia orgánica (gallinaza) informó una reducción de la bioacumulación del cadmio en el cacao. Es decir, la planta de cacao por efecto de la aplicación de la materia orgánica redujo la absorción del cadmio del suelo. Todos los estudios coinciden en las sustancias húmicas como principales componentes con alta capacidad de inmovilizar Cd del suelo.

VI. CONCLUSIONES

La concentración del cadmio total del suelo fue mayor (no disponible) con las dosis más altas de materia orgánica, y mayor con el incremento de los niveles de la roca fosfórica.

Se ha reducido la concentración del Cd disponible al incrementarse los niveles de materia orgánica del suelo. Y se incrementa al aumentar las dosis de roca fosfórica.

Al incrementarse la materia orgánica se reduce la concentración del cadmio en las hojas del cacao. La menor concentración de cadmio en las hojas fue con 15 % de materia orgánica (b₄) sobre 1.5 ppm de cadmio (a₂)

La correlación entre los niveles de Cd de la roca fosfórica y cadmio foliar (cacao) fue positiva. Y negativa entre los niveles de materia orgánica y cadmio foliar (cacao), disminuyendo el Cd en la hoja con dosis más alta de M.O aplicado.

La aplicación de la roca fórica en dosis agronómicas sobre el cacao, (periodo de tiempo corto), no produciría contaminación por cadmio en el suelo.

VII. RECOMENDACIONES

Aplicación de niveles altos de materia orgánica previa evaluación en plantaciones de cacao en producción.

Para reducir la absorción del Cadmio por las hojas de cacao, incluir fuentes orgánicas (materia orgánica) mezclado con la roca fosfórica bajo en Cd.

Replicar el experimento en cacaotales en producción, incluyendo un suelo aluvial, residual

Evaluar el efecto de enmiendas orgánicas en la concentración de cadmio en almendras del cacao en producción.

Evaluar la residualidad de las fuentes orgánicas aplicadas en el cultivo de cacao superior a tres campañas productivas.

VIII. ABSTRACT

ORGANIC MATTER AND PHOSPHORIC ROCK IN THE CONTENT OF SOIL CADMIUM AND COCOA PLANTS

The study was carried out between May and September 2017, at the National Agrarian University of La Selva, Leoncio Prado-Huánuco. The objectives were: i) To determine the effect of organic matter (OM) and phosphoric rock (RF) in the presence of total cadmium (Cd) in the soil, (ii) To define the effect of OM and RF in the presence of Cd available in the soil, (iii) Determine the best level of OM over RF in the least absorption of Cd in leaves of cocoa plants (iiii) Correlation between RF and OM levels with the foliar Cd of cocoa. With a complete randomized design, in factorial arrangement: Cd levels of the phosphoric rock (0.0 1.5, 3.0 and 4.5 ppm Cd), and M.O (0, 5, 10,15%). A pre-germinated cocoa seed (CCN-51) was placed in bagged substrate the RF and incubated M.O (45 days); cocoa plants were evaluated after 120 days. The results show that the concentration of total Cd in the soil was higher with the highest doses of organic matter (immobilized Cd) and RF. The concentration of available Cd increases with the highest dose of Cd (RF), and decreases with increasing levels of organic matter. By increasing the doses of M.O, the concentration of Cd in the cocoa leaf is reduced; the lowest concentration of cadmium in the cocoa leaves was with 15% organic matter (b4) over 1.5 ppm cadmium (a2). The correlation was negative and significant between the levels of organic matter and cadmium in the

cocoa leaves, decreasing the Cd in the leaf with the highest dose of M.O applied. The incorporation of the phosphoric rock applied in agronomic doses on the cocoa, in a short period of time, would not produce a cadmium contamination in the soil.

Keywords: Cadmium, absorption, adsorption, organic matter.

IX. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABANTO, M. 2016. Fuentes fosfatadas en dos suelos en la concentración de cadmio foliar en maíz bajo condiciones de invernadero. Lima, Perú. Tesis del Ingeniero Agrónomo de la Universidad Agraria la Molina. 108 p.
- ACOSTA, A. 2014. Efecto del Sulfato de Cadmio en la germinación y el crecimiento de plántulas de cacao (*Theobroma cacao* L.). *Investigación y Amazonía* 2013; 3 (1): 20-29.
- ANTIADIS, V; ALLOWAY, BJ. 2002. The role of dissolved organic carbon in the mobility of Cd, Ni and Zn in sewage sludge-amended soils. *Environ. Pollut.* 117, 515–521.
- ARÉVALO, E; OBANDO, ME; ZÚÑIGA, LB; ARÉVALO, CO; BALIGAR, V; HE, Z. 2017. Heavy Metals in soils of cocoa plantations (*Theobroma Cacao* L.) in three regions of Peru. *Science of the Total Environment* pp 792–800.
- AIKPOKPODION, P; LAJIDE, L; y AIYESANMI, F. 2012. In Situ Remediation Activities of Rock Phosphate In Heavy-Metal Contaminated Cocoa Plantation Soil In Owena, South Western, Nigeria. *Global Journal of Environmental Research* 6 (2): 51-57.

- BADILLO, J. 2008. Transporte de cadmio en suelo y en el ambiente. cap. 12., p.129.
- BALDOTTO, MA; BALDOTTO, LE. 2014. Ácidos húmicos Ceres vol.61 supl . Viçosa Brasil..<http://dx.doi.org/10.1590/0034-737x2014 61000011>.
- BAYER, C. Y MIELNICZUK, J. 1999. Dinâmica e função da matéria orgânica. In: Santos, G.A.; Camargo, F.A.O. (Ed.). Matéria orgânica do solo: fundamentos e caracterização. Porto Alegre: Gênese, p.9-26.
- BENAVIDES, M.P.2005. La toxicidad por cadmio en las plantas. Revista Brasileña de Fisiología Vegetal 17: 21-34.
- BENITES, VM; MADARI, B; MACHADO, PL. 2003. Extração e fracionamento quantitativo de substâncias húmicas do solo: Um procedimento simplificado e de baixo custo. Brasília, Embrapa, Brasil. 7 p. (Comunicado Técnico 16).
- BENDECK, M. 2003. Origen y formación del humus. En: Memorias Seminario Materiales Orgánicos en la Agricultura. Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo, Comité Regional de Antioquia. Medellín. CD-Room. 9 p.
- BID. 2009. Manual Práctco de Uso de EM. Edición N° 1. Uruguay. 37p.
- BONOMELLI, C; BONILLA, C; VALENZUELA, 2003. Efecto de la fertilización fosforada sobre el contenido de cadmio en cuatro suelos de Chile. Pesq. agropec. bras., Brasília, v. 38, n. 10, p. 1179-1186.
- BRAVO, I; ARBOLEDA, C; Y MARTÍN, F. 2014. Efecto de la calidad de la materia orgánica asociada con el uso y manejo de suelos en la

retención de cadmio, en sistemas altoandinos de Colombia. *Acta Agronómica*. 63 (2) 2014, p 164-174.

BROWN, S.L., CHANEY, R.L., ANGLE, J.S., RYAN, J.A., 1998. The phytoavailability of cadmium to lettuce in long-term biosolids-amended soils. *J. Environ. Qual.* 27 (5), 1071–1078.

CALACE, N; FURLANI, G; PETRONIO, BM; PIETROLETTI, M. 2000. Sedimentary humic and fulvic acids: Structure, molecular weight distribution and complexing capacity. *Annali di Chimica*, 90:25-34.

CALZADA, B. 1970. *Métodos estadísticos para la investigación*. Ed. Jurídico. Lima, Perú. 643 p.

CALZADA, B. 1970. *Métodos estadísticos para la investigación*. Ed. Jurídico. Lima, Perú. 643 p.

CANELLAS, LP; SANTOS, GA.; AAMARAL-SOBRINHO; NMB. 1999. Reações da matéria orgânica. In: Santos, G.A.; Camargo, F.A.O. (Eds). *Fundamentos da matéria orgânica do solo: ecossistemas tropicais e subtropicais*. Gênese, Porto Alegre, Rio Grande do Sul, p. 69-90.

CÁRDENAS, A. 2012. Presencia de cadmio en algunas parcelas de cacao orgánico de la cooperativa agraria industrial Naranjillo, Tingo María, Perú. Tesis Ingeniero Agrónomo. Universidad Nacional Agraria de la Selva. Huánuco. Perú. 96 p.

CEGARRA, J. 1994. *Compostaje de Desechos Orgánicos y Criterios de Calidad del Compost*. Programa Universitario de Ciencia y Tecnología Agropecuaria (PUI) (Ed.). En: *Memorias Curso Master Internacional*

Aprovechamiento de Residuos Orgánicos. Palmira, Valle del Cauca, Colombia: Universidad Nacional de Colombia, Sede Palmira.

- CHAVEZ, E; STOFFELLA, F; MYLAVARAPU, R; BALIGAR, V. 2016. Chemical speciation of cadmium: An approach to evaluate plant available cadmium in Ecuadorian soils under cacao production. *Chemosphere* 150 (1) 57-62. DOI 10.1007/s 11356-016-6931-7
- CLARK, GJ; DODGSHUN, N; SALE, P; TANG, C. 2007. Changes in chemical and biological properties of a sodic clay subsoil with addition of organic amendments. *Soil Biol. Biochem.* 39 (11), 2806–2817.
- CORAMI, A; MIGNARDI, S; FERRINI, V. 2007. Copper and zinc decontamination from single- and binary-metal solutions using HYDROXYAPATITE; *J. HAZARD. MATER.* 146, 164–170.
- CONCEIÇÃO, PC; BOENI, M. BAYER, C; DIECKOW, J; SALT, JC. 2015. Eficiência de Soluções Densas no Fracionamento Físico da Matéria Orgânica do Solo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v39:490-497. DOI: 10.1590/0 1000683rbcS20140447
- DEL CASTILHO, P; CHARDON, WJ; SALOMONS, W. 1993 Influence of cattle manure application on the solubility of Cd, Cu and Zn in a manured, acidic loamy-sand soil. *J. Environ. Qual.* 22, 689-697.
- DICK, DP; MARTINAZZO, R. 2006. Matéria orgânica em ambientes terrestres e aquáticos: compartimentos, composição e reações. In: Poletto, C.; Merten, G. H. (Org.) *Qualidade dos Sedimentos*. Porto Alegre: ABRH, cap. 4, p. 65-80.

- DUCHAUFOR, P. 1982. Pedology: pedogenesis and classification. London: George Allen y Unwin, 187 p.
- FAO, 2002. Captura de carbono en los suelos para un mejor manejo de la tierra. Basado en el trabajo de Michael Robert. Institut national de Recharge Agronomique. Organización de la Naciones Unidas para la Agricultura y la alimentación, Paris Francia. 62p.
- FASSBENDER, H. y BORNEMISZA, E. 1987. Química de suelos con énfasis en Suelos de América Latina. 2^{da} Ed. IICA. San José-Costa Rica. 420 p.
- FERGUSON, J. E. 1990. Los metales pesados: Química, impacto ambiental y efectos en la salud. Pergamon Press, Sydney.
- FERNÁNDEZ, V, HERNÁNDEZ, X. 2006. Producción de abono orgánico a partir de heces ovinas en Palma Gorda, Hidalgo. Cultivo de lombriz roja para producción de abono orgánico.
- GOLDBOL, D.L., HUTTERMAN, A. 1985. Efecto del zinc, cadmio y mercurio en la elongación de las raíces de Picea abies (Karst.) Plántulas y el significado de estos metales en bosques muerte regresiva. La contaminación del medio ambiente 38: 375-381.
- GONZALES, S. 1986. Contenido natural de metals pesados extraibles con EDTA en suelos del Valle Aconcagua. 5 p. Agr. Tec. 46 (3): 323-327
- GOUIA, H. 2000. Efectos del cadmio sobre la actividad de la nitrato reductasa y sobre otras enzimas de la vía de asimilación de nitratos en el frijol. Fisiología y Bioquímica Vegetal 38: 629-638.

- GUZMAN, J. 2019. Efecto de la materia orgánica en la reducción del cadmio en el suelo y en plántulas de cacao (*Theobroma cacao* L.) en vivero. Tesis, Ingeniero Agrónomo. Universidad Nacional Agraria de la Selva. Tingo María, Perú. 136p.
- HAMON, R; HOLM, S; LORENZ, S; MCGRATH; CHRISTENSEN, T. 1995. Metal uptake by plants from sludge-amended soils: Caution is required in the plateau interpretation. *Plant Soil* 216:53–64.
- HAMMOND, L. L. and DAY, D. P. 1992. El fosfato de roca de normalización y calidad del producto, en: A.T Bachik y A. Baddin, eds. Procediendo de un Taller sobre la fuente de fosfato de suelo ácido en las zonas tropicales húmedas de Asia. pp 73-89. Kuala Lumpur, Malasia Sociedad de la Ciencia del Suelo.
- HAN-SONG, C; HUANG, Q; LI-NA, L; PENG, C; LIANG,W; MING, L. 2010. Poultry manure compost alleviates the phytotoxicity of soil cadmium: influence on growth of pakchoi (*Brassica chinensis* L.). *Pedosphere* 20 (1), 63–70p.
- HERRERA, T. s.d. La contaminación con cadmio en suelos agrícolas. [En línea]:Academia,(http://www.academia.edu/7195023/LACONTAMINACION_CON_CADMIO_EN_SUELOS_AGRICOLAS_Cadmium_contamination_in_agricultural_soils, 6 de Set).
- HOODA, PS. Y ALLOWAY, BJ. 1994. The plant availability and DTPA extractability of trace metals in sludge-amended soils. *Sci. Total Environ.* 149:39–51.
- HONG, CO; GUTIERREZ, J; YUN, SW; LEE, YB; YU, C; KIM, PJ. 2009 Heavy metal contamination of arable soil and corn plant in the vicinity

of a zinc smelting factory and stabilization by liming. Arch Environ Contam Toxicol 56:190–200

Houben D, Pircar J, Sonnet P. 2012. Heavy metal immobilization by cost-effective amendments in a contaminated soil: effects on metal leaching and phytoavailability. J Geochem Explor 123:87–94

Huaynates, J. 2013. Efecto de la materia orgánica en la absorción de cadmio por el suelo, en la localidad de Supte. Tesis Ing. RNR-Mención conservación de suelos y agua. Tingo Maria, Perú. Universidad Nacional Agraria de la Selva. 111 p.

Huamani, HA; HUAUYA, MA; MANSILLA, LG; FLORIDA, N; NEIRA, GN. 2012. presencia de metales pesados en cultivo de cacao (*Theobroma cacao* L.) orgánico. Acta agronómica 61 (4):339-344.

HUAMANI, HA. 2019. Informe INFORME S/N -2019-AHY/FONDECYT/UNAS. INFORME FINAL DE “ESTRATEGIAS TECNOLOGICAS PARA REDUCIR EL CONTENIDO DE CADMIO EN SUELOS Y ALMENDRAS DE CACAO”. 38p.

Ireland, P. 1983. Heavy metal uptake and tissue distribution in earthworms. En Earthworm Ecology, J.E. Satchell ed. Chapman and Hall, London, 247-265 P.

Kabata-Pendias A; Sadurski W. 2004. Trace elements and compounds in soil. In: Elements and Their Compounds in the Environment, 2 eds. E. Merian, M. Anke, M. Ihnat, M. Stoepler, 79–99, Wiley-VCH, Weinheim.

- KANG, S; AMARASIRIWARDENA, D; VENEMAN, P; XING, B. 2003. Characterization Of Ten Sequentially Extracted Humic Acids And A Humin From A Soil In Western Massachusetts. *Soil Science*. Vol. 168, No. 12. 880–887
- KHAN, S; REID, BJ; LI, G; ZHU, YG. 2014. Application of biochar to soil reduces cancer risk via rice consumption: a case study in Miaoqian village, Longyan, China. *Environ. Int.* 68, 154–161
- KONOVA M. 1966. Soil organic matter: its nature, its role in soil formation, and soil fertility. Pergamon, New York, USA.
- KUO S AND BAKER A S 1980 Sorption of copper, zinc and cadmium by some acid soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 44, 969-975.
- LABRADOR, J. 2001. La materia orgánica en los agrosistemas (Ministerio de agricultura, pesca y alimentación ed.). Ediciones Mundi Prensa. Madrid, España.
- LEON L, A. 1992. Empleo de la roca fosfórica en la fertilización de los cultivos en Colombia. Primer seminario Nacional sobre uso de roca fosfóricas en agricultura. Temuco-Chile p. 79-82-83-84.
- LIU, L; CHEN, H; CAI, P; LIANG, W; HUANG, Q. 2009. Immobilization and phytotoxicity of Cd in contaminated soil amended with chicken manure compost. *J. Hazard. Mater.* 163 (2), 563–567.
- LIZARAZO, LM. 2001. Insidencia de sustancias húmicas comerciales sobre microorganismos del suelo. Tesis doctoral. Facultad de Ciencias. Universidad de Alicante.

- MCLAUGHIN, M. L., PALMER, L. T., TILLER, K. G., BEECH, T. A., and Smart, M. K. 1994. Increased soil salinity causes elevated cadmium concentrations in field-grown potato tubers, *J. Environ. Qual*
- MANN, S Y RITHIE, G. 1995. Forms of cadmium in sandy soils after amendment with soils of higher fixing capacity. *Environmental Pollution* 8 (1): 23-29.
- MATUSIK, J; BAJDA, T; MANECKI, M. 2008. Immobilization of aqueous cadmium by addition of phosphates. *J. Hazard. Mater.* 125:1332–1339.
- MAZZARINO, M. 2005. Aprovechamiento Integral de Residuos orgánicos en el n.o. De Patagonia. Quintral, Bariloche, Argentina: Grupo de Suelos del CRUB, Universidad.
- NAVA-RUÍZ C, MÉNDEZ-ARMENTA M.2011. Efectos neurotóxicos de metales pesados (cadmio, plomo, arsénico y talio). *ArchNeurocien. (Mex)*. 2011; 16(3):140-147.
- NZIGUHEBA, G., SMOLDERS, E., 2008. Inputs of trace elements in agricultural soils via phosphate fertilizers in European countries. *Sci. Total Environ.* 390, 53–57.
- ÖZKARAOVA. GE; BEKBÖLET, M. 2010. Zinc release by humic and fulvic acid as influenced by pH, complexation and DOC sorption. *Geoderma*, 159,131138. doi: 10.1016/j.geoderma.2010.07.004.
- OTTOS, 2019. Fraccionamiento Densimétrico y Químico de la Materia Orgánica Asociado al Cadmio en Suelos Cacaoteros en la Provincia de Leoncio Prado. Tingo María Perú, 109 p.

- PETTIT, RE. 2012. Organic matter, humus, humate, humic acid, fulvic acid and humin: their importance in soil fertility and plant health. College Station, Texas, United States: Texas A&M University.
- PICCOLO, A. 2001. The supramolecular structure of humic substances. *Soil Science*, 166:810-832.
- PINAMONTI, G; STRINGARI, G; ZORZI, G. 1997. The use of compost: its effects on heavy metal levels in soil and plants. *Resources, Conservation and Recycling* 21(1) 129-143
- RESTREPO, J., GOMEZ, J., ESCOBAR, R. 2014. Utilización de los residuos orgánicos en la agricultura. *Grafitextos*. Cali, Colombia. 20 p.
- RODRÍGUEZ, FR. 2009. Evaluación de cuatro bioestimulantes comerciales en el desarrollo de plantas injertadas de cacao (*Theobroma cacao* L.) cultivar nacional [Tesis]. Riobamba: Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.
- RON, AP. 2004. Ácidos húmicos y fúlvicos de origen orgánico en el crecimiento de plántula de tomate (*Lycopersicon esculentum* mill.) en invernadero [Tesis]. Buenavista, Saltillo, Coahuila, México. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro
- SANDALIO, L.M. 2001. Los cambios inducidos por cadmio en el crecimiento y el metabolismo oxidativo de las plantas de guisantes. *Revista de Botánica Experimental* 52: 2115-2126
- SANTOS, CA. 2005. Matéria orgânica de Argissolo vermelho e Latossolo Bruno sob diferentes sistemas de manejo e sob vegetação nativa:

distribuição em frações físicas, qualidade e sorção do herbicida atrazina. 2005. 196 f. Tese (Doutorado em Agronomia) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

SCHNITZER, M; KODAMA, H; RIPMEESTER, JA. 1991. Determination of the aromaticity of humic substances by X-ray diffraction analysis. *Soil Science Society American Journal*, Madison, v.55, p.745-750

SCHULDT, M. 2004. El alimento de las lombrices. *Lombricultura fácil*. 35-48 p.

SESHADRI, B. 2015. Phosphorus–cadmium interactions in paddy soils, *Geoderma* 2015. <http://dx.doi.org/10.1016/j.geoderma.2015.11.029>

SHUMAN, M. 1999. Effect of organic waste amendments on zinc adsorption by two soils. *Soil Sci.* 164 (3), 197–205.

SIMMLER, M. 2012. In situ fixation of cadmium in New Zealand pastureland using lignite as a fixing additive. Lincoln: Lincoln University.

SMOLDERS, E. y MERTENS, J. 2013. Cadmium. In: Alloway, B.J. Ed. *Heavy Metals in Soils* vol. 22. Springer, Netherlands, pp. 283–311.

STEVENSON, FJ. 1982. *Humus chemistry*. New York, John Willey & Sons, 1982. 443p.

STEVENSON, FJ. 1994. *Humus chemistry: genesis, composition, reactions*. New York, John Wiley, 496 p.

SYERS, J.K., Craswell, E.T., 1995. Role of soil organic matter in sustainable agricultural systems. In: Lefroy, R.D.B., Blair, G.J., Craswell, E.T. (Eds.), *Soil Organic Matter Management for Sustainable Agriculture: a Workshop Held in Ubon, Thailand, 24-26/08/1994*, pp. 7–143.

- SYERS, K. y SPRLNGETT, A. 1983. Earthworm ecology in grassland soils.
En *Earthworm Ecology*, J.E. Satchell. Ed. Chapman and Hall, London,
pp. 67-83.
- TENE, WR. 2016. Efecto de bioestimulantes en fréjol (*Phaseolus vulgaris* L.)
Tesis. En el cantón el guabo, provincia el oro. Guayaquil: Universidad
Estatad de Guayaquil. 89 p.
- TILLER, K. 1989. Heavy metals in soils and their environmental significance.
Advances in soilscience. 9: 113-142.
- YANG, J; HU, S; CHEN, X; YU, M; LIU, J; LI, H; SHEN, C; SHI, J; CHEN, Y.
2010. Transformation of lead solid fraction in the rhizosphere of
Elsholtzia splendens: The importance of organic matter. *Water, Air,
and Soil Pollution* 205: 333–342.
- ZAPATA, F. y S. VILLAGARCIA. 1983. Manual de uso de fertilizantes. U.N.A.
La Molina. Lima, Perú. 104 p.
- ZUG, K. L.; HUAMANÍ, H; MEYBERG, F; CIERJACKS, J. S; CIERJACKS, A.
(2019). Cadmium Accumulation in Peruvian Cacao (*Theobroma cacao*
L.) and Opportunities for Mitigation. *Water, Air, & Soil Pollution*, 230.

X. ANEXO

Cuadro 19. Cadmio total del suelo a 120 días después de la emergencia.

Tratamiento	Clave	Descripción		R1	R2	R3	Suma	Promedio
		Niveles de Cd con RF (A) (ppm)	Niveles de M.O (A) (%)					
1	a1b1	0	0	0.20	0.45	0.25	0.90	0.30
2	a1b2	0	5	0.25	0.16	0.21	0.62	0.21
3	a1b3	0	10	0.23	0.31	0.21	0.75	0.25
4	a1b4	0	15	0.23	0.21	0.24	0.68	0.23
5	a2b1	1.5	0	0.55	0.78	0.73	2.05	0.68
6	a2b2	1.5	5	0.98	0.43	0.38	1.78	0.59
7	a2b3	1.5	10	0.78	0.73	0.73	2.23	0.74
8	a2b4	1.5	15	1.48	0.38	0.40	2.25	0.75
9	a3b1	3.0	0	1.65	1.43	2.41	5.49	1.83
10	a3b2	3.0	5	2.51	1.68	1.48	5.67	1.89
11	a3b3	3.0	10	2.04	1.82	1.93	5.79	1.93
12	a3b4	3.0	15	1.98	2.41	1.41	5.80	1.93
13	a4b1	4.5	0	1.96	2.90	1.96	6.82	2.27
14	a4b2	4.5	5	2.24	2.91	2.12	7.27	2.42
15	a4b3	4.5	10	3.34	2.39	2.31	8.04	2.68
16	a4b3	4.5	15	3.21	2.36	2.54	8.11	2.70

Cuadro 20. Cadmio disponible a 120 días después de la emergencia.

Tratamiento	Clave	Descripción		R1	R2	R3	Suma	Promedio
		Niveles de Cd con RF (A) (ppm)	Niveles de M.O (A) (%)					
1	a1b1	0	0	0.05	0.06	0.09	0.20	0.07
2	a1b2	0	5	0.09	0.06	0.09	0.24	0.08
3	a1b3	0	10	0.09	0.09	0.08	0.26	0.09
4	a1b4	0	15	0.08	0.09	0.08	0.25	0.08
5	a2b1	1.5	0	0.29	0.34	0.31	0.94	0.31
6	a2b2	1.5	5	0.29	0.29	0.29	0.87	0.29
7	a2b3	1.5	10	0.29	0.30	0.28	0.87	0.29
8	a2b4	1.5	15	0.29	0.27	0.26	0.82	0.27
9	a3b1	3.0	0	0.46	0.44	0.41	1.31	0.44
10	a3b2	3.0	5	0.40	0.39	0.39	1.18	0.39
11	a3b3	3.0	10	0.40	0.38	0.48	1.26	0.42

12	a3b4	3.0	15	0.43	0.41	0.41	1.25	0.42
13	a4b1	4.5	0	0.46	0.46	0.41	1.33	0.44
14	a4b2	4.5	5	0.48	0.47	0.49	1.44	0.48
15	a4b3	4.5	10	0.51	0.52	0.49	1.52	0.51
16	a4b3	4.5	15	0.58	0.35	0.51	1.44	0.48

Cuadro 21. Cadmio total en hojas a 120 días después de la emergencia.

Tratamiento	Clave	Descripción		R1	R2	R3	Promedio	
		Niveles de Cd con RF (A) (ppm)	Niveles de M.O (A) (%)					
1	a1b1	0	0	0.28	0.19	0.24	0.71	0.24
2	a1b2	0	5	0.31	0.13	0.14	0.58	0.19
3	a1b3	0	10	0.21	0.14	0.15	0.50	0.17
4	a1b4	0	15	0.13	0.12	0.12	0.37	0.12
5	a2b1	1.5	0	2.85	2.61	2.81	8.27	2.76
6	a2b2	1.5	5	1.63	2.40	2.84	6.87	2.29
7	a2b3	1.5	10	2.28	2.26	1.99	6.53	2.18
8	a2b4	1.5	15	2.36	1.81	2.20	6.37	2.12
9	a3b1	3.0	0	3.29	2.89	3.15	9.33	3.11
10	a3b2	3.0	5	3.01	3.11	2.91	9.03	3.01
11	a3b3	30	10	2.99	3.01	2.85	8.85	2.95
12	a3b4	3.0	15	2.59	2.14	2.95	7.68	2.56
13	a4b1	4.5	0	5.48	4.21	4.21	13.90	4.63
14	a4b2	4.5	5	3.68	2.95	5.21	11.84	3.95
15	a4b3	4.5	10	3.26	4.28	2.98	10.52	3.51
16	a4b3	4.5	15	3.04	2.09	2.64	7.77	2.59

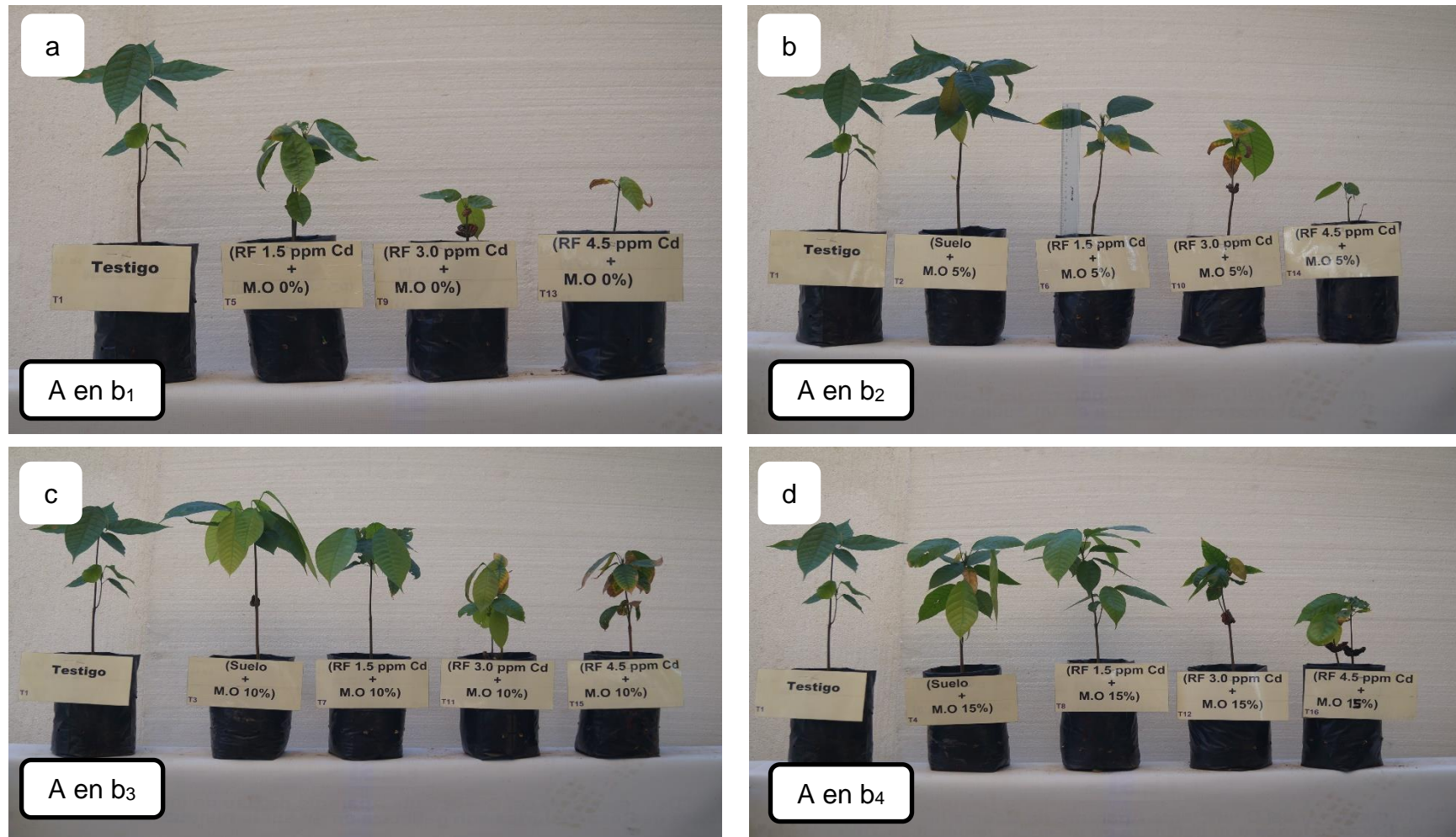


Figura 9. Efecto de los niveles de cadmio (RF) sobre los niveles de M.O aplicado, en el contenido de Cd disponible a 120 días de instalado.

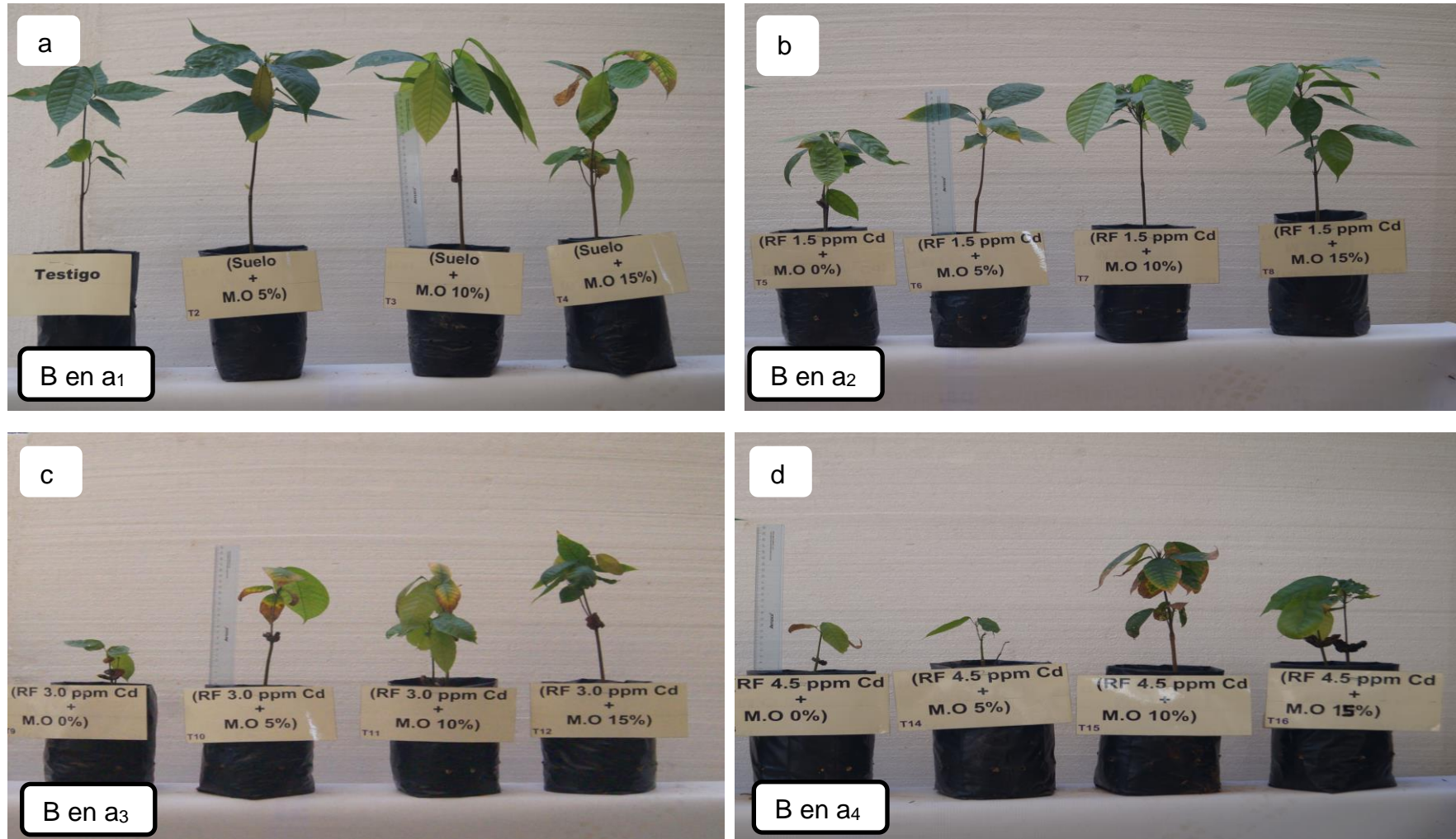


Figura 10. Efecto de los niveles de M.O sobre los niveles de RF(Cd) aplicado, en el contenido de Cd disponible a 120 días de instalado.