

**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA
LA MOLINA**

**ESCUELA DE POSGRADO
MAESTRÍA EN SUELOS**



**“LA MATERIA ORGÁNICA Y SU INTERACCIÓN CON EL
FÓSFORO EN LA ABSORCIÓN DE CADMIO POR
PLANTONES DE CACAO”**

Presentada por:

LUIS GERMÁN MANSILLA MINAYA

**TESIS PARA OPTAR EL GRADO DE
MAGISTER SCIENTIAE EN SUELOS**

Lima - Perú

2023

Document Information

Analyzed document	Tesis LMANSILLA.pdf (D164574648)
Submitted	2023-04-20 18:52:00
Submitted by	Pedro Pablo Gutierrez Vilchex
Submitter email	pgutierrez@lamolina.edu.pe
Similarity	3%
Analysis address	pgutierrez.unalm@analysis.arkund.com

Sources included in the report

SA	TESIS INTRODUCCIÓN-ANEXOS.docx Document TESIS INTRODUCCIÓN-ANEXOS.docx (D11236108)		5
SA	22.03.19.Proyecto Deysy-2019-FINAL.docx Document 22.03.19.Proyecto Deysy-2019-FINAL.docx (D49532601)		3
SA	UNU_AGRONOMIA_2022_T_SUSY_DAZA_V2.pdf Document UNU_AGRONOMIA_2022_T_SUSY_DAZA_V2.pdf (D153139910)		1
SA	UNU_AGRONOMIA_2022_T_SUSY_DAZA_V1.pdf Document UNU_AGRONOMIA_2022_T_SUSY_DAZA_V1.pdf (D153095739)		2
SA	Tesis_ Yeni Ester Calla Roque..pdf Document Tesis_ Yeni Ester Calla Roque..pdf (D114366550)		6
SA	TESINA FINAL ELIAS RIZZO.docx Document TESINA FINAL ELIAS RIZZO.docx (D110857017)		1
SA	UNU_MAESTRIA_2023_TM_LUIS-PEREZ_V1.pdf Document UNU_MAESTRIA_2023_TM_LUIS-PEREZ_V1.pdf (D157844660)		2

Entire Document

1 UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA ESCUELA DE POSGRADO MAESTRÍA EN SUELOS "LA MATERIA ORGÁNICA Y SU INTERACCIÓN CON EL FÓSFORO EN LA ABSORCIÓN DE CADMIO POR PLANTONES DE CACAO"
Presentada por: LUIS GERMÁN MANSILLA MINAYA TESIS PARA OPTAR EL GRADO DE MAESTRO MAGISTER SCIENTIAE EN SUELOS Lima - Perú 2023

2 UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA ESCUELA DE POSGRADO MAESTRÍA EN SUELOS "LA MATERIA ORGÁNICA Y SU INTERACCIÓN CON EL FÓSFORO EN LA ABSORCIÓN DE CADMIO POR PLANTONES DE CACAO"
TESIS PARA OPTAR EL GRADO DE MAESTRO MAGISTER SCIENTIAE Presentada por: LUIS GERMÁN MANSILLA MINAYA
Sustentada y aprobada ante el siguiente jurado: Mg.Sc. Luis Tomassini Vidal Dr. Oscar Loli Figueroa PRESIDENTE ASESOR
Mg.Sc. Rubén Bazán Tapia Mg.Sc. Braulio La Torre Martínez MIEMBRO MIEMBRO

**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA
LA MOLINA**

**ESCUELA DE POSGRADO
MAESTRÍA EN SUELOS**

**“LA MATERIA ORGÁNICA Y SU INTERACCIÓN CON EL FÓSFORO
EN LA ABSORCIÓN DE CADMIO POR PLANTONES DE CACAO”**

**TESIS PARA OPTAR EL GRADO DE
MAGISTER SCIENTIAE**

Presentada por:

LUIS GERMÁN MANSILLA MINAYA

Sustentada y aprobada ante el siguiente jurado:

Mg.Sc. Luis Tomassini Vidal
PRESIDENTE

Dr. Oscar Loli Figueroa
ASESOR

Mg.Sc. Rubén Bazán Tapia
MIEMBRO

Mg.Sc. Braulio La Torre Martínez
MIEMBRO

DEDICATORIA

Con mucho amor y gratitud,
a mi padre, madre y hermano
que en dulce paz descansan en el cielo.

A mi esposa e hijos, que con amor, me
impulsaron a culminar con mis aspiraciones

A mis tíos Elvira y Enrique,
Roselvina y Francisco,
Francisca y Dimas, todos ellos
que de Dios gocen, quienes me
me apoyaron durante mis estudios
universitarios.

A mis profesores de la Universidad
Nacional Agraria y miembros del jurado.

AGRADECIMIENTO

Al Doctor Oscar Loli Figueroa, profesor principal de la Universidad Nacional Agraria La Molina y asesor de la tesis, por su incondicional apoyo moral e intelectual.

A los miembros del Jurado de Tesis, Mg. Sc. Luis R. Tomassini Vidal, M.Sc. Rubén Bazán Tapia y Mg. Sc Braulio La Torre Martínez, por su colaboración en la revisión y sustentación de la tesis.

Al Dr. Sady García Bendezú, por su apoyo en la ejecución de los análisis de plantas.

Al personal de la Universidad Nacional Agraria de la Selva, por las facilidades brindadas para la ejecución de los análisis de suelos.

ÍNDICE GENERAL

I.	INTRODUCCIÓN.....	1
II.	REVISIÓN DE LITERATURA	3
2.1	Generalidades.....	3
2.2	Metales pesados: el cadmio	4
2.3	Origen de los metales pesados en los suelos.....	5
2.3.1	Origen natural: material parental.....	6
2.3.2	Origen antropogénico: fuentes de metales pesados polutantes en el suelo	7
2.4.	Contaminación de los suelos por la actividad agrícola	9
2.5.	Fertilizantes inorgánicos y orgánicos	10
2.5.2.	Estiércoles de corral.....	16
2.6.	Factores que afectan la disponibilidad del cadmio en el suelo y su absorción por las plantas	17
2.7.	Cadmio en la planta	20
2.8.	Mejora y rehabilitación de suelos contaminados con Cd	21
2.9.	Trabajos relacionados	22
III.	MATERIALES Y MÉTODOS.....	26
3.1	Lugar de ejecución.....	26
3.2.	Materiales y métodos	27
3.2.1.	Análisis de las características físico-mecánicas y químicas del suelo.....	27
3.2.2.	Componentes en estudio	27
3.2.3.	Tratamientos en estudio.....	28
3.2.4.	Diseño experimental	28
3.2.5.	Ejecución del experimento	28
3.2.5.1.	Características de los fertilizantes fosfatados	28
3.2.5.2.	Características del material orgánico	29
3.2.6.	Fase de invernadero	30
3.2.7.	Fase de laboratorio.....	31
3.2.8.	Identificación de Variables.....	32
IV.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	33
4.1.	Materia seca de la parte aérea	33
4.2.	Concentración de cadmio en la parte aérea de los plantones de cacao	36
4.3.	Extracción total de cadmio por la parte aérea	40
4.4.	Cadmio disponible en el suelo	44
V.	CONCLUSIONES.....	49
V.	RECOMENDACIONES	50

VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	51
VIII. ANEXOS	56

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1:Aporte estimado de Cd (mg/kg) a suelos agrícolas por diferentes fuentes	10
Tabla 2: Contenidos de Cd, Pb y Zn en fosforitas y fertilizantes fosfatados (ppm).....	13
Tabla 3 : Contenido de Cd total y disponible del suelo y absorción de Cd por el pasto	27
Tabla 4 : Características físico-mecánicas y químicas del suelo.....	27
Tabla 5: Descripción de los tratamientos en estudio	28
Tabla 6: Resultados de los análisis de P y Cd total en el estiércol y fertilizantes	39
Tabla 7: Resultados de los análisis del estiércol compostado	30
Tabla 8: Efecto de las fuentes fosfatadas sin aplicación de materia orgánica en el rendimiento de materia seca.....	433
Tabla 9: Efecto de las fuentes fosfatadas con aplicación de materia orgánica en el rendimiento de materia seca del cacao	355
Tabla 10: Resultados generales del rendimiento de materia seca del cacao por efecto de la aplicación de fuentes fosfatadas y materia orgánica.....	36
Tabla 11: Prueba de Duncan ($\alpha= 0.05$) del efecto de las fuentes fosfatadas sin aplicación de materia orgánica en la concentración de cadmio en plántones de cacao.....	37
Tabla 12: Prueba de Duncan ($\alpha= 0.05$) del efecto de las fuentes fosfatadas con aplicación de materia orgánica en la concentración de cadmio en la parte aérea de los plántones de cacao	38
Tabla 13: Prueba de Duncan ($\alpha=0.05$) de los resultados generales de la concentración de cadmio de la parte aérea del cacao por efecto de la aplicación de fuentes fosfatadas y materia orgánica	39
Tabla 14: Prueba de Duncan ($\alpha= 0.05$) del efecto de las fuentes fosfatadas sin aplicación de materia orgánica en la absorción total de cadmio en la parte aérea de plántones de cacao	41
Tabla 15: Prueba de Duncan ($\alpha= 0.05$) del efecto de las fuentes fosfatadas con aplicación de materia orgánica en la absorción de cadmio por la parte aérea del cacao.....	42
Tabla 16: Prueba de Duncan ($\alpha = 0.05$) del efecto de las fuentes fosfatadas y aplicación de materia orgánica en la absorción de cadmio por plántones de cacao	44
Tabla 17: Prueba de Duncan ($\alpha=0.05$) del efecto de las fuentes fosfatadas sin aplicación de materia orgánica en el Cd disponible del Suelo	45
Tabla 18: Prueba de Duncan ($\alpha= 0.05$) del efecto de las fuentes fosfatadas con aplicación de materia orgánica en el contenido de cadmio disponible del suelo.	46
Tabla 19:Prueba de Duncan ($\alpha= 0.05$) del efecto de las fuentes fosfatadas y aplicación de materia orgánica en el contenido de cadmio disponible del suelo	48

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Efecto de las fuentes fosfatadas sin aplicación de materia orgánica en el rendimiento de materia seca del cacao	34
Figura 2: Efecto de las fuentes fosfatadas con aplicación de materia orgánica en el rendimiento de materia seca del cacao	35
Figura 3: Resultados generales de la aplicación de fuentes fosfatadas y materia orgánica en el rendimiento de materia seca	36
Figura 4: Efecto de las fuentes fosfatadas sin aplicación de materia orgánica en la concentración de cadmio en la parte aérea del cacao	38
Figura 5: Efecto de las fuentes fosfatadas con aplicación de materia orgánica en la concentración de cadmio en la parte aérea del cacao.	39
Figura 6: Resultados generales de la concentración de cadmio en tejidos de la parte aérea del cacao por efecto de la aplicación de fuentes fosfatadas y materia orgánica.....	40
Figura 7: Efecto de las fuentes fosfatadas sin aplicación de materia orgánica en la absorción de cadmio en la parte aérea del cacao.....	42
Figura 8:Efecto de las fuentes fosfatadas con aplicación de materia orgánica en la absorción de cadmio por la parte aérea del cacao.	43
Figura 9: Resultados generales de la absorción de cadmio en tejidos de la parte aérea del cacao por efecto de la aplicación de fuentes fosfatadas y materia orgánica.....	44
Figura 10: Efecto de las fuentes fosfatadas sin aplicación de materia orgánica en el contenido de cadmio disponible en el suelo.....	46
Figura 11:Efecto de las fuentes fosfatadas con aplicación de materia orgánica en el contenido de cadmio disponible del suelo.....	47
Figura 12: Resultados generales del contenido de cadmio disponible del suelo por efecto de la aplicación de fuentes fosfatadas y materia orgánica	48

RESUMEN

El objetivo del estudio fue evaluar el efecto de dos fertilizantes fosfatados (superfosfato triple y fosfato diamónico) y materia orgánica (estiércol de vacuno) en la concentración y absorción de Cd por plantas de cacao y Cd disponible del suelo, se condujo un experimento en invernadero, utilizándose suelo de un inceptisol, con bajo contenido de materia orgánica y P disponible. El suelo extraído después de separar el horizonte orgánico de la colina de un cacaotal, fue secado al aire, molido y tamizado con malla de 4 mm y luego de pesar 1.5 kg en bolsas de polietileno negro, se aplicó 0 ó 5 por ciento de estiércol y 100 ó 200 ppm de P de cada fuente fosfatada, según los tratamientos, dispuestos en diseño completo al azar. Los suelos fueron bien mezclados con los fertilizantes y estiércol, humedecidos hasta su capacidad de campo y dejados en incubación por dos semanas. Luego de pregerminar semillas de cacao, se sembró una semilla por bolsa dejándose crecer por 4 meses; durante el crecimiento la humedad del suelo fue mantenida por control gravimétrico. Después del tiempo indicado, las plantas fueron cortadas al nivel del cuello, lavadas con agua de caño, luego con solución 0.03 N de HCl y enjuagadas con agua destilada, y secadas a 105 – 110 °C, para determinar su peso seco a la estufa. Luego fueron molidas para determinar su contenido de Cd total por ataque con HNO₃: HClO₄ (4:1) y leído el extracto en espectrofotómetro de absorción atómica. En el suelo se determinó el Cd disponible. Sin adición de estiércol, la concentración y absorción total de Cd en las plantas fue mayor en los tratamientos con ST y menor en el FDA mientras que la adición de estiércol incrementó significativamente el rendimiento de materia seca, la concentración y la absorción total de Cd en los tejidos vegetales de las plantas de todos los tratamientos. En relación con el Cd disponible del suelo, la materia orgánica lo incrementó en todos los tratamientos en general.

Palabra clave: cacao, cadmio, absorción, disponibilidad, inceptisol

ABSTRACT

The objective of the study was to evaluate the effects of two phosphate fertilizers (triple superphosphate and diammonium phosphate) and organic matter (cow manure) on the concentration and absorption of cadmium by cocoa plants and available Cd of the soil, was conducted an experiment in greenhouse, using soil from an inceptisol, with a low content of organic matter and available P. The soil extracted after separating the organic horizon from the hill of a cocoa plantation, was air-dried, ground and sieved with a 4 mm mesh, and after weighing 1.5 kg of soil in black polyethylene bags, 0 or 5 percent of manure and 100 or 200 ppm P of each phosphate source was applied, according to the treatments, arranged in a complete random design. Soils were well mixed with fertilizers and manure, moistened to field capacity, and left to incubate for two weeks. After pregerminating cocoa seeds, one seed per bag was sown, allowing it to grow for 4 months; during growth soil moisture was maintained by gravimetric control. After the indicated time, the plants were cut at the level of the neck, washed with tap water, then with a 0.03 N HCl solution and rinsed with distilled water and dried at 105 – 110 °C to determine their dry weight in the oven. They were then ground to determine their total Cd content by etching with HNO₃: HClO₄ (4:1) and read the extract in EAA. In the soil was determined the available Cd. Without addition of manure, the concentration and absorption of total Cd in the plants was higher in the treatments with ST and lower with the FDA, while the addition of manure significantly increased the yield of dry matter, the concentration and the total absorption of cadmium in plant tissues of all treatments. In relation to the Cd available from the soil, the organic matter increased it in all the treatments in general.

Keyword: cocoa, cadmium, absorption, availability, inceptisol

I. INTRODUCCIÓN

En los últimos 30 años, el cacao ha pasado a constituir una alternativa interesante para los agricultores de nuestra Amazonia, como cultivo sustituto de los sembríos de coca luego de las medidas gubernamentales de erradicación de este cultivo ilícito. De esta manera, se han dirigido los esfuerzos a mejorar los rendimientos del cacao que de 300 kg/ha de almendras han sido elevados hasta más de 1500 kg/ha en la zona del Alto Huallaga, gracias a la investigación agrícola dirigida a la búsqueda de clones de alto rendimiento, resistencia al ataque de plagas y enfermedades, búsqueda de mejores fuentes y niveles de abonamiento, entre otros. De esta manera, el cacao ha adquirido particular importancia por ser la principal fuente de ingresos de muchos agricultores de nuestra Amazonía por los volúmenes de exportación.

Como consecuencia, las plantaciones híbridas tradicionalmente sembradas, han sido progresivamente reemplazadas por las clonales, habiendo adquirido especial importancia el clon CCN 51 por su alto rendimiento y tolerancia a la monilia (*Moniliophthora roreri*). Del mismo modo, al escasear tierras para las nuevas plantaciones en áreas planas de suelos aluviales, la agricultura cacaotera se ha ido desplazando hacia suelos de lomadas y colinas de menor fertilidad natural, incrementándose así el interés por mayores niveles de fertilización tanto orgánica como inorgánica, así como de la aplicación de materiales encalantes.

Sin embargo, debido a los efectos que tienen sobre la salud humana los metales pesados en general y el cadmio en particular, los mercados internacionales vienen exigiendo productos alimenticios agrícolas con contenidos mínimos de estos contaminantes, por lo que nuestras exportaciones de cacao han sido observadas por los importadores por supuestamente poseer niveles de cadmio superiores a los exigidos por el mercado internacional.

Los cultivos en particular se encuentran expuestos a la contaminación por estos metales tanto en forma natural debido a la meteorización de las rocas y minerales, como por las actividades antropogénicas como la minera, industrial, agrícola, parque automotor, quema de materiales orgánicos y uso de insumos químicos. Dentro de estas actividades destaca la actividad agrícola por el uso de insumos químicos para el control de plagas y enfermedades y por la aplicación de fertilizantes.

Entre los factores de orden agrícola que se considera que influyen en la disponibilidad en el suelo, absorción y contenido de cadmio de los cultivos, se encuentran los fertilizantes principalmente fosfatados y la materia orgánica, esta última con un efecto ambivalente, es decir, que como coloide tiene un efecto benéfico al reducir la disponibilidad de dicho elemento, pero luego de su mineralización podría dejar residuos de cadmio según su procedencia. Respecto a la fertilización fosfatada, constituye otra forma de ingreso de cadmio en la cadena alimenticia por lo que resulta importante su evaluación.

Considerando ello, en el presente experimento se pretende determinar la capacidad de contaminación de los fertilizantes fosfatados de mayor uso y del efecto de la aplicación del estiércol compostado como material orgánico en la concentración de cadmio disponible del suelo y la absorción de cadmio por plántones de cacao en su etapa de vivero.

Objetivo general

Determinar la influencia de la aplicación de materia orgánica y fósforo en la disponibilidad del cadmio en el suelo y su absorción por el cacao en condiciones de vivero.

Objetivos específicos

1. Determinar el efecto de la aplicación de estiércol de vacuno y fertilizantes fosfatados, superfosfato triple y fosfato diamónico en el crecimiento de plantas de cacao.
2. Determinar la concentración y absorción total de cadmio en plantas de cacao en la etapa de vivero como consecuencia de la fertilización orgánica y fosfatada.
3. Determinar el efecto de la aplicación de materia orgánica y fertilización fosfatada sobre la disponibilidad de Cd en el suelo.

II. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1 GENERALIDADES

La llamada “Revolución Verde”, desarrollada por la década de los cincuenta, tuvo como finalidad reducir la brecha existente entre la producción de alimentos y la explosión demográfica, pero la generación de altas tasas de productividad agrícola debía hacerse sobre la base de una producción extensiva de gran escala y el uso de alta tecnología que propendiera al uso de nuevas variedades de cultivos de alto rendimiento, uso intensivo de fertilizantes químicos, agroquímicos, pesticidas, herbicidas, riegos y maquinaria agrícola entre otros, así como la ampliación de la frontera agrícola (Ceccon 2008; Huerta y Martínez 2018). Posiblemente ello condujo a la construcción de la llamada carretera “Marginal de la Selva” o “Camino de los Libertadores”, surgida por iniciativa del Pacto Sub-Regional Andino con el fin de conectar los países bolivarianos y andinos (Acuña 2000) por la década del 60, que propició el ingreso de mucha gente a poblar las tierras de la selva produciéndose cambios en los métodos de manejo de los suelos y cambio de cultivos, entre ellos el cacao. Inicialmente el cacao fue instalado en las áreas planas de suelos aluviales para luego invadir las zonas de colinas y lomadas de menor fertilidad natural y con mayores requerimientos de fertilizantes, recomendándose a la fecha para el cacao hasta más de 100 kg de P₂O₅/ha en suelos deficientes.

Por esa época se presentó uno de los mayores desastres medioambientales, que afectó gravemente la salud de los habitantes de la cuenca del río Jinzú (Japón), cuyo causante fue la contaminación de los arrozales con cadmio, según refiere Sánchez (2016), producida por el riego de los campos de arroz desde 1910 hasta 1960 con aguas residuales contaminadas con metales pesados (Cd y Zn) procedentes de minas cercanas.

La enfermedad que fue bautizada como “Itai Itai” causaba dolores articulares, osteomalacia y deterioro de la función renal. En los momentos actuales se ha determinado que el Cd es un veneno acumulativo que se almacena en los riñones, el hígado y el bazo y ha sido asociado

a diversos problemas de salud humana como insuficiencias renales, pulmonares, osteoporosis, hipertensión y cáncer prostático (Herrera 2000).

A partir de entonces, se ha puesto mucho interés en efectuar estudios relacionados con los factores que inciden en la disponibilidad y absorción de metales pesados, específicamente de cadmio, y ha conducido al establecimiento de reglas para la comercialización de productos agropecuarios, relacionadas con los contenidos máximos de metales pesados permitidos en dichos productos.

2.2 METALES PESADOS: EL CADMIO

Según Alloway (1990), el término “metales pesados” no fácilmente definido, constituye un grupo de metales y metaloides asociados con la polución y toxicidad, pero que también incluye algunos elementos (Co, Cu, Mn, Se y Zn) que son esenciales para los organismos vivientes a bajas concentraciones. Por ejemplo, según indican Mengel y Kirkby (2000) el Cd y el Zn son químicamente muy similares, pero a diferencia del Zn el Cd es tóxico para las plantas y animales. Químicamente, los metales pesados se refieren a los elementos químicos que presentan una densidad relativamente alta ($> 6 \text{ g.cm}^{-3}$). Dentro de ellos se incluyen al Pb, Cd, Hg, Ar, Ti y U, y de estos, el cadmio tiene especial importancia en la coyuntura actual. El término “elementos traza” viene haciéndose más popular pero aún no es de uso común, y se aplica a los elementos detectables en un rango de concentración de 0.01 a 100 mg.kg^{-1} .

Entre los metales pesados se encuentran más de 20 elementos que tienen relación con los seres vivos y se clasifican en dos grupos: el primero que incluye a los oligoelementos o micronutrientes esenciales para los organismos vivos como el As, B, Co, Cr, Cu, Fe, Mo, Mn, Ni y Zn pero que pueden producir efectos tóxicos cuando sobrepasan determinados niveles, y el segundo, compuesto por aquellos que no tienen una función biológica conocida y que igualmente, después de determinados niveles provocan disfunciones graves en los organismos, como es el caso del Cd, Pb, As y Hg (García y Dorronsoro 2005, citados por Rueda *et al.* 2011).

El cadmio es un mineral pesado de densidad 8.7 g.cm^{-3} cuyo nivel promedio en los suelos es de 0.35 mg/kg . No tiene ninguna función fisiológica en los vegetales, pero interfiere en

los procesos de respiración y fotosíntesis y se combina con el S de algunas enzimas produciendo daño celular. Su toxicidad produce síntomas como clorosis, arrugamiento foliar y coloraciones marrón rojizas. Según Mengel y Kirkby (2000) en Alemania se considera como nivel crítico un contenido de 3 $\mu\text{g Cd/g}$ de suelo seco al aire.

2.3 ORIGEN DE LOS METALES PESADOS EN LOS SUELOS

Alloway (1990) sostiene que diez son los elementos de mayor contenido en la corteza terrestre y que constituyen más del 99% del total de elementos; ellos son el O, Si, Al, Fe, Ca, Na, K, Mg, Ti y P, mientras que el remanente de los elementos de la tabla periódica son los llamados “elementos traza” y sus concentraciones individuales normalmente no exceden de los 1000 ppm (mg/kg) y en su mayoría no exceden de 100 ppm, aunque menas de minerales pueden presentarse y constituir fuentes comerciales de minerales. Indica, además, que los elementos traza se pueden presentar como constituyentes de los minerales primarios en las rocas ígneas, que han sido incorporados por sustitución isomórfica en los cristales en el momento de la cristalización, citando a la biotita como un portador de Cd.

Por su parte, Kabata-Pendias y Pendias (2000) y Galán y Romero (2008) indican que los suelos contienen elementos traza de varios orígenes. Los elementos LITOGÉNICOS o GEOGÉNICOS que son aquellos heredados directamente de la litósfera (material parental) en la que se formó el suelo, de la actividad volcánica o del lixiviado de la meteorización debido a procesos mecánicos, químicos y biológicos. Los elementos PEDOGÉNICOS que son también de origen litogénico, pero su concentración y distribución en el perfil del suelo y en las partículas son cambiadas debido a procesos pedogénicos. Los elementos ANTROPOGÉNICOS que son aquellos depositados en los suelos como resultado de las actividades del hombre, como la industria, minería, de la generación de energía eléctrica y centrales térmicas que usan petróleo, de la actividad agrícola y de los residuos sólidos urbanos. Hoy está claramente definido que independientemente de las formas de los metales antropogénicos en el suelo, su fitodisponibilidad es significativamente más alta que aquellos de origen pedogénico. De este modo es más probable que bajo condiciones similares de suelo, los elementos trazas litogénicos y pedogénicos serán menos móviles y biodisponibles que los antropogénicos. Los contaminantes pueden abandonar el suelo por volatilización, disolución y lixiviado o erosión y pasar a los organismos cuando pueden ser asimilables, lo que ocurre cuando se encuentran en forma soluble o disponible en el suelo.

2.3.1 Origen natural: material parental

El cadmio es un componente natural de los suelos; en la corteza terrestre su contenido es inferior al 0.1 por ciento, mientras que, en los suelos, diversos autores citan a Kabata-Pendias y Pendias (1984) quienes entre otras cosas indican que el nivel promedio de Cd total en los suelos varía entre 0.07 y 1.1 ppm, aunque pueden encontrarse niveles más elevados debido a factores antropogénicos (Herrera 2000). La composición química de la roca madre y los procesos de meteorización y pedogénesis determinan de forma natural la concentración y distribución de los metales pesados en los suelos. Como es conocido, las rocas están compuestas de diferentes minerales en concentraciones también diferentes como se aprecia en el siguiente cuadro adaptado de Ross (1994), confeccionado sólo para el cadmio y expresadas en ppm.

Rocas ígneas			Rocas sedimentarias		Rocas
Ultrabásicas	Básicas	Granito	Calcáreas	Areniscas	Metamórficas
0.12	0.13 – 0.2	0.009 - 0.2	0.028-0.1	0.05	0.2

Alloway (1990) añade que las rocas sedimentarias comprenden aproximadamente el 75% de la superficie de la tierra, y son por lo tanto más importantes que las ígneas como materiales parentales. Dentro de estas, las arcillas, lutitas y pizarras o shales tienen relativamente altas cantidades de elementos debido a su habilidad para adsorber iones, mientras que las areniscas usualmente contienen bajas concentraciones de elementos debido a que consisten principalmente de cuarzo que no tienen constituyentes traza y tienen poca capacidad para adsorber metales.

Como resultado de la pedogénesis se forma el perfil del suelo diferenciándose los horizontes por el color, textura, estructura, materia orgánica, entre otros. Las propiedades y composición de la capa arable son de gran importancia por ser la parte del perfil que contiene la mayoría de la masa radicular; este horizonte Ap de los suelos agrícolas es el que recibe los materiales orgánicos, fertilizantes y que también son contaminados por la deposición atmosférica y es la capa donde se concentran elementos como As, Cd, Cu, Hg, Pb, Sb y Zn mientras que en los horizontes más bajos se encuentran el Al, Fe, Mg, Ni y otros, asociados con arcillas translocadas y óxidos hidratados (Alloway 1990).

De esta manera, debido a procesos naturales de meteorización este metal pesado es liberado al suelo; sin embargo, su contenido en este puede incrementarse a niveles tóxicos debido a los factores antes mencionados. Según Alloway (1990), los suelos derivados de rocas ígneas tendrían contenidos de 0.1 a 0.3 ppm, los de rocas metamórficas entre 0.1 a 1 ppm y los de rocas sedimentarias entre 0.3 y 11 ppm de Cd, aunque en general podría esperarse que la mayoría de los suelos contengan menos de 1 ppm, excepto aquellos contaminados o desarrollados sobre materiales parentales con cantidades anómalas de Cd.

2.3.2 Origen antropogénico: fuentes de metales pesados polutantes en el suelo

Como es de suponer, dentro del perfil del suelo este metal tiende a estar presente en más altas concentraciones en el horizonte superficial, como reflejo de los ingresos por deposición atmosférica, fertilizantes orgánicos e inorgánicos o también por contaminación por aguas de los ríos como podría suceder con los suelos aluviales del Alto Huallaga, cuyas aguas provienen de las alturas de Cerro de Pasco pudiendo traer consigo los relaves de la industria minera. El relativamente alto contenido de humus de los horizontes superficiales también contribuye a su capacidad de adsorción.

Según Alloway (1990), poco es lo que conoce sobre la distribución de Cd dentro del perfil, pero añade que en Alfisols se hallaron concentraciones de 0.39 ppm Cd en los horizontes superficiales y 0.23 ppm en los horizontes subsuperficiales. El mismo autor señala que algunas de las fuentes contaminantes de metales pesados en los suelos son: la polución atmosférica por vehículos motorizados, la quema de combustibles fósiles y producción de cenizas, que resultan en la dispersión de muchos elementos en el aire cubriendo grandes áreas, los fertilizantes y pesticidas agrícolas que incluyen a los fertilizantes fosfatados, fungicidas, insecticidas y herbicidas, estiércoles y lodos de depuradoras. Además, menciona a la dispersión de desechos urbanos e industriales, emisión de gases y desechos de las industrias metalúrgicas que son transportados por el aire y aguas de los ríos, entre otros.

El Cd de origen antropogénico generalmente presente en los horizontes superficiales es más disponible que el proveniente de la meteorización de las rocas, pero su absorción por las plantas depende del factor suelo y cultivo. Así, los factores y condiciones del suelo que favorezcan su movilidad también facilitarán su absorción por las plantas, mientras que las

que contribuyan a su retención por la matriz del suelo disminuirán su disponibilidad (Herrera 2000).

1. Polución atmosférica. Las concentraciones de Cd en el aire varían de 1 a 50 mg/m³, dependiendo de la distancia de las fuentes de emisión, como las actividades industriales y mineras, como las de hierro y acero, fabricación de baterías, de productos químicos como fármacos, pigmentos, tintes y pintura, tema no investigado en nuestro país y la generación de energía eléctrica y centrales térmicas que usan petróleo (Galán y Romero 2008). No menos importante en los cultivos, por lo menos en zonas cacaoteras, son los aportes aéreos de polvo y vapores provenientes de la industria y la emisión de humo por vehículos motorizados, las incineraciones municipales y quema de rastrojos, habiéndose encontrado altos niveles de Cd en suelos urbanos y cercanos a vías de fuerte tránsito automotor debido a la contaminación por los neumáticos, los aceites lubricantes y combustibles (Lavado *et al.* 1998, citados por Herrera 2000).

2. Lodos de depuradora. A partir de las aguas residuales urbanas se obtienen lodos que, por su contenido de nutrientes y altos niveles de materia orgánica, pueden ser usados en la fertilización de cultivos. Estas aguas residuales que incluyen excretas humanas, productos domésticos y efluentes industriales contienen metales pesados dentro de los cuales se incluye al Cd, y en ellas se ha encontrado en Europa y Norte América, un amplio rango de concentración de este metal que varía de 1 a 3650 mg/kg en la materia seca y que es el que genera más riesgos ambientales. Obviamente, existen muchos factores que van a determinar la concentración de Cd en las aguas residuales que es muy variable (Alloway 1990; Herrera 1990).

3. Residuos domésticos y desechos industriales. Según Galán y Romero (2008), aproximadamente el 10 por ciento de la basura está compuesta por metales (baterías, pilas), y su entierro puede contaminar las aguas subterráneas mientras que la incineración de materiales que contienen metales puede contaminar la atmósfera. En los momentos actuales, los residuos domésticos acumulados por las municipalidades están siendo utilizados para la preparación

de compost para uso agrícola, lo que puede conducir a un incremento de la polución si no se controla la calidad de ellos.

4. Industrias metalúrgicas. Alloway (1990) manifiesta que las industrias metalúrgicas pueden contribuir a la polución del suelo en varias formas: por la emisión de humos y polvos conteniendo metales, los que son transportados por el aire y depositados en los suelos y la vegetación; por efluentes que pueden contaminar los suelos cuando inundan los cursos de agua y por la creación de basureros de los cuales los metales pueden ser lavados.

5. Actividad agrícola. Dentro de las actividades agrícolas se puede considerar el riego con aguas contaminadas, la fertilización con fertilizantes inorgánicos y orgánicos y aplicación de pesticidas, herbicidas y escorias, los cuales contienen metales pesados como impurezas de los constituyentes activos.

2.4. CONTAMINACIÓN DE LOS SUELOS POR LA ACTIVIDAD AGRÍCOLA

La actividad agrícola y pecuaria también causan contaminación o incremento de la concentración natural de cadmio en el suelo y en cuya distribución participan agentes hídricos y eólicos. Dentro de la actividad agrícola, se considera que particular importancia tienen la aplicación de pesticidas y la fertilización orgánica e inorgánica.

Sobre la materia orgánica, las nuevas corrientes ecológicas han conducido al uso cada vez mayor de estas enmiendas por los agricultores, debido a sus efectos positivos en la mejora de las características físicas, químicas y biológicas de los suelos con el consecuente incremento de los rendimientos agronómicos. Sin embargo, estos efectos podrían verse mermados por el contenido de contaminantes principalmente de lodos y compost preparados con residuos sólidos urbanos o industriales contaminados. De este modo, se indica que la materia orgánica puede tener efectos opuestos sobre la disponibilidad del Cd: puede acomplejarlo, facilitar su movilidad en el suelo y al mineralizarse, dejar al metal en forma más disponible para las plantas (Herrera 2000).

2.5. FERTILIZANTES INORGÁNICOS Y ORGÁNICOS

La aplicación de fertilizantes en general también podría causar incremento de la concentración de metales pesados hasta niveles tóxicos en el suelo, desde que ellos pueden contener residuos de metales pesados como impurezas y quedar disponibles para las plantas (Prieto *et al.* 2009). En la Tabla 1 se puede apreciar los aportes de Cd de diferentes fuentes agrícolas, reportados por diversos autores.

Tabla 1: Aporte estimado de Cd (mg/kg) a suelos agrícolas por diferentes fuentes

Fertilizantes fosfatados	0.1 – 170	0.1 – 170	
Fertilizantes nitrogenados	0.05 – 8.5	0.05 – 8.5	
Fitosanitarios	-----	1.38 – 1.94	
Estiércoles	0.1 – 0.8	0.3 – 0.8	
Basura compostada	0.01 - 100	-----	
Lodos de aguas residuales	< 1 – 3410	2 – 1500	
Guano bovino			0.43 – 0.44
Guano de pollo			0.25 – 0.36
Guano de cerdo			0.43 – 0.68
Fuente bibliográfica	(*)	(**)	(***)

(*) Alloway (1990); Kabata-Pendias y Pendias (1984) citado por Alloway (1990)

(**) Sánchez (2003) citado por Rueda *et al.* (2011)

(***) Diferentes fuentes mencionadas en Eurich-Menden *et al.* (1996)

2.5.1. Fertilizantes fosfatados

Una de las vías de incorporación de Cd a los suelos agrícolas lo constituye la fertilización fosfatada; con relación a ellos, según se reemplacen uno, dos o tres hidrogeniones en el ácido fosfórico, por iones Ca, los fosfatos reciben los nombres de fosfatos monocálcicos, dicálcicos y tricálcicos, además de los amoniacales, los cuales difieren en solubilidad. Los fosfatos monocálcicos, son fosfatos bastante solubles siendo los más conocidos el superfosfato triple y el superfosfato simple, que se comercializan granulados. Los fosfatos bicálcicos, son muy poco solubles en agua, son más solubles al citrato de amonio y muy poco solubles a pH neutro; las escorias Thomas y los fosfatos Rhenania son del tipo bicálcico; el primero corresponde a un subproducto de la siderurgia, estas fuentes deberían aplicarse en suelos con pH menor de 6,0 y se recomienda que este tipo de fosfato menos soluble no sea aplicado de forma localizada. Los fosfatos tricálcicos, son fosfatos insolubles

en agua y solubles en medios ácidos y son adecuados para ser aplicados en suelos con pH menor de 5.5 y con baja suma de bases. Los huesos molidos, que en el pasado fueron usados como fuente fosfatada, son fosfatos tricálcicos. Las rocas fosfóricas, de uso en la agricultura, están constituidas de hidroxiapatitas. La acidez del suelo permite solubilizar la roca, que naturalmente es muy poco soluble y normalmente se comercializa como polvo fino para mejorar su reactividad con el suelo. Las rocas fosfóricas no son recomendables para cultivos anuales, pero se recomiendan especialmente para cultivos permanentes debido a que su efecto no es inmediato por su baja solubilidad. Existen diversas fuentes de rocas fosfóricas, como la de Sechura de Perú, la de Bahía Inglesa de Chile y la de Carolina del Norte de USA.

Dentro de los fertilizantes fosfatados de mayor uso en las condiciones del trópico húmedo se encuentran:

a. Roca fosfórica.- Es la materia prima para la fabricación de otros fertilizantes fosfatados y su mineral componente es la apatita ($\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{F}, \text{OH}, \text{Cl})_2$), que puede tomar diferentes nombres (fluorapatita, hidroxiapatita, cloroapatita o carbonatoapatita) según su composición. Su contenido de P varía entre 20 y 30 por ciento de P_2O_5 y es recomendada para suelos ácidos por su reacción alcalina y baja solubilidad que le permite liberar el P lentamente de modo que en suelos fijadores de P existe menos peligro de ser fijado rápidamente. El tratamiento de las fosforitas con ácidos inorgánicos permite obtener los diferentes fertilizantes fosfatados, superfosfato simple, superfosfato triple y fosfato mono y di amónico que son los más utilizados a nivel mundial (Villanueva, s.f.). Una característica de la roca fosfórica aplicada al suelo es que no incrementa significativamente el contenido de fósforo disponible, debido a su disolución lenta, que es estimulada por la actividad rizosférica de la planta, especialmente de las leguminosas. En suelos ácidos se recomienda aplicar fosfatos de baja reactividad mientras que, en suelos de reacción neutra a moderadamente alcalina, se pueden utilizar fertilizantes fosfatados solubles, los cuales deben ser aplicados en dosis bajas. Las plantas absorben el fósforo en la forma de iones ortofosfato y por lo tanto las fuentes de fósforo aplicadas al suelo suelen ir en forma de ortofosfatos o deben ser transformados a estas formas para que las raíces los puedan absorber.

b. Fosfatos amoniacales.- Son fosfatos altamente solubles en agua, pero su capacidad de ser fijados por el suelo es más retardada que en el caso de los monocálcicos, debido a que al solubilizarse se libera amonio que incrementa el pH alrededor del gránulo, favoreciendo así

una mayor disponibilidad inicial de fósforo para la planta, pero pasado cierto tiempo, igualmente el fósforo liberado será retenido por el suelo. Entre los fosfatos amoniacales se pueden destacar el fosfato diamónico y el fosfato monoamónico (Sierra 2016), que se obtienen de la reacción del amoníaco con el ácido fosfórico.

El Fosfato monoamónico (12 – 61 – 0) es un fertilizante completamente soluble en agua que lo hace un fertilizante ideal para la fertirrigación y aplicación foliar. Facilita la absorción del P nativo del suelo debido a que el NH_4^+ baja el pH de la zona de la raíz mejorando la disponibilidad del P. Es el más usado y de mejor comportamiento agronómico para cultivos y frutales.

El Fosfato diamónico es un fertilizante complejo con 18 por ciento N y 46 por ciento de P_2O_5 , que presenta alta solubilidad lo que asegura una rápida respuesta a la fertilización; este fertilizante tiene inicialmente una reacción alcalina pero luego tiene reacción residual ácida aunque la alcalinidad inicial en suelos alcalinos como efecto de la liberación de NH_3 puede ser dañino para las raíces de las plantas especialmente en esos suelos (pH mayor de 7) (Sierra 2016); por ello, la aplicación de fertilizantes amoniacales pueden ser potenciales acidificantes del suelo. McGowen *et al* (2001) encontraron que la aplicación de FDA redujo el pH del suelo lo que incrementaría la solubilidad y movilidad de los metales; para ello incubaron suelos con FDA (220 g/kg) por 6 meses y luego de medir el pH en agua (1:1) encontraron que los valores de pH disminuyeron de 7.1 a 6.5. Contradictoriamente, la misma cita indica que el tratamiento fue efectivo en la inmovilización del Cd, Pb y Zn.

c. Superfosfato Triple y Superfosfato Simple.- El superfosfato triple se obtiene a partir de la roca fosfórica tratada con ácido fosfórico, mientras que el llamado superfosfato normal se hace a partir de la roca fosfórica con ácido sulfúrico. Ninguno de los dos se recomienda para fertirrigación ya que presentan una fracción insoluble en agua que obstruye los goteros. Se debe evitar su uso en suelos con carbonatos. El superfosfato simple es ligeramente más insoluble y contiene más azufre. Su reacción con el suelo es muy rápida, es decir, se fija por el suelo muy rápidamente, ya que genera ácido fosfórico alrededor del gránulo, produciéndose la fijación con los materiales predominantes en el suelo, como óxidos de hierro y aluminio o los carbonatos pasando a formas menos solubles. El fósforo es el macronutriente que presenta los contenidos más bajos en la solución del suelo, llegando normalmente a menos de 0,3 mg/l (Sierra 2016).

Como se mencionó antes, una de las vías de incorporación de Cd a los suelos agrícolas lo constituye la fertilización fosfatada y como se sabe, las rocas fosfóricas que son la materia prima de todos los fertilizantes portadores de P, contienen niveles de metales pesados que varían según su origen geográfico (Herrera 2000). Las relativamente altas cantidades de Cd de hasta 170 ppm, encontradas en las fosforitas usadas para la fabricación de fertilizantes, según Alloway (1990), los convierten en una fuente importante de contaminación, aunque dicho contenido puede tener una fuerte variación dependiendo del origen de las fosforitas e incluso dentro de un mismo depósito las concentraciones pueden variar. Menciona, por ejemplo, que en USA, fertilizantes hechos de la roca fosfatada de Florida conteniendo menos de 10 ppm Cd aportaron 0.3 a 1.2 g Cd/ha/año a los suelos en experimentos de largo plazo, mientras que los manufacturados con depósitos de fosforita del oeste conteniendo en promedio 174 ppm Cd contribuyeron con 100 g Cd/ha/año en ensayos de 36 años en California; concluye en que la concentración del metal en el suelo se elevó de 0.07 ppm en el testigo a 1 ppm en las parcelas fertilizadas. Según Mengel y Kirkby (2000), se ha encontrado que el contenido de Cd en las rocas fosfatadas varía ampliamente, desde 0.3 hasta 84 ppm en rocas de diferentes países, mientras que Kabata-Pendias y Pendias (2000) reportan contenidos de 0.01 – 100 ppm Cd en las fosforitas en general (Tabla 2).

Tabla 2: Contenidos de Cd, Pb y Zn en fosforitas y fertilizantes fosfatados (ppm)

Metal	Fosforitas	Fertilizantes fosfatados
Cd	0.01 – 100	7 – 170
Pb	1 – 1000	7 – 225
Zn	4 – 345	50 – 1450

Adaptado de Kabata-Pendias y Pendias (2000)

Marti *et al.* (2002), cuantificaron los niveles de metales pesados (Cd y Pb) en 44 fertilizantes de uso común en Mendoza (Argentina); los análisis se hicieron con HCl p.a. 1:5, moliendo los fertilizantes hasta convertirlos en polvo impalpable. Los resultados fueron los siguientes:

Fertilizante	Contenido de Cd (ppm)
Superfosfato Triple (0 – 46 – 0)	27.7 - 30.30
FDA	3.60 - 6.33
Nitrogenados	0.9-3.3
Fertirriego	0.483

Como se ve, los fertilizantes fosfatados presentaron los mayores contenidos de Cd, y entre estos fue el Superfosfato Triple el que tuvo los mayores valores en comparación con el FDA, mientras que en los nitrogenados las concentraciones fueron muy similares entre sí y muy inferiores a las de los fosfatados. En los fertilizantes para fertirriego sus contenidos fueron muy bajos debido probablemente a su elevada pureza. En cuanto al FDA, dos de sus muestras tuvieron contenidos muy altos: 26.8 ppm.

Roberts (2014) refiere que en el SFS producido por reacción de la RF con ácido sulfúrico y SPT producido por acidulación de la RF con ácido fosfórico, todo el Cd de la RF es transferido al SS y ST. De acuerdo con la fuente de RF, el SS puede contener de 2 a más de 40 mg/kg y el ST puede contener de menos de 10 a más de 100 mg Cd/kg. Los fosfatos de amonio son producidos a partir de ácido fosfórico y dependiendo de la fuente de RF, su contenido de Cd puede variar de menos de 1 a más de 100 mg/kg.

Rodríguez *et al.* (2014), determinaron el contenido de metales pesados en nueve fuentes de nutrientes usadas en agroecosistemas orgánicos y convencionales: Lombricompost (LC), Compost (C), Nitrato chileno (NCh), Roca Fosfórica (RF), Urea (U), Nitrato de Calcio (NC), Fosfato Di Amónico (FDA), Superfosfato Triple (ST) y Sulfato de Potasio (SP). Los resultados mostraron que el FDA, ST, RF y LC poseyeron las más altas concentraciones de Cd, mientras que la Urea, NC y SP obtuvieron las concentraciones más bajas. Sin embargo, estimaron que el lombricompost sería el material que más elementos traza incorpora al suelo cuando se toma como referencia la aplicación de 100 kg de N/ha. Los contenidos de Cd fueron:

Cadmio	LC	C	NCh	RF	U	NC	DAP	SPT	SP
mg/kg	0.46	0.21	< 0.01	4.48	< 0.01	< 0.01	3.7	8.7	< 0.01

Dentro de los fertilizantes se considera que los fosfatados serían los principales contaminantes, debido a que la roca fosfórica, materia prima de ellos, contienen cantidades de Cd que varían entre 8 y 500 ppm (Laegreid *et al.* 1999 citados por Bonomelli *et al.* 2003), aunque el P aplicado como reactivo en forma de fosfato di hidrógeno de potasio (KH₂PO₄) disminuyó el contenido de Cd disponible en suelos de Venezuela (Sánchez *et al.* 2022).

Villanueva(s/f) cita a Valenzuela (2001) quien determinó el contenido de Cd de 69 embarques de fertilizantes fosfatados comercializados en Chile habiendo determinado que los fertilizantes con mayores contenidos de Cd fueron los fosfatos procedentes de México y Venezuela, encontrando valores de 11.3 y 12.4 ppm para el FDA, 12.3 ppm para el FMA y 26 ppm para el ST.

Mortvedt y Osborn (1982) citados por Mengel y Kirkby (2000) encontraron que el aumento de las dosis de fertilizantes fosfatados resultó en mayores contenidos de Cd en los granos de trigo y maíz y que la absorción y disponibilidad de fosfatos decreció según la siguiente secuencia: $\text{Cd}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 > \text{CdHPO}_4 > \text{Cd}_3(\text{PO}_4)_2$.

Bonomelli *et al.* (2003) evaluaron el efecto de la fertilización fosforada en el contenido de Cd en suelos de Chile, aplicando P en forma de Superfosfato triple en dosis suficiente como para alcanzar el nivel de 30 ppm P que consideraron un valor con el que se obtienen máximos rendimientos en los cultivos y suelos utilizados. Encontraron que la aplicación de P tuvo un efecto estadísticamente significativo en la concentración de Cd disponible en los suelos estudiados. En el suelo Inceptisol, el Cd disponible se incrementó de 0.11 a 0.128 ppm, en el Alfisol, de 0.021 a 0.041 ppm, en el Andisol aumentó de 0.029 a 0.081 mientras que, en el Ultisol, hallaron que la fertilización fosfatada triplicó la concentración de Cd en el suelo respecto al Testigo, de 0.010 a 0.033 ppm, observando también que el 37 por ciento del Cd aplicado como fertilizante quedó disponible, mientras que en el Alfisol fue de 77 por ciento.

Loganathan *et al.* (1997) condujeron un estudio para evaluar el efecto de 10 años de aplicación anual de 30 kg P/ha/año de cuatro tipos de fertilizantes con diferentes solubilidades y contenidos de Cd. Finalizado el experimento se determinó el contenido de Cd total y disponible (extraído con CaCl_2 0.01 M) del suelo y Cd total en las plantas de pasto. En la siguiente Tabla se puede apreciar que la Roca Fosfatada de Carolina del Norte y el Superfosfato Simple fueron los que más propiciaron la concentración de Cd en el pasto.

Contenido	Superf. Simple	RF Carolina	RF Jordania	FDA
P ₂ O ₅ por ciento	20.6	30	32	45.8
Cd total (µg g ⁻¹)	32	41	5	10

Asimismo, diez años de fertilización fosfatada causaron un marcado incremento en el contenido de Cd del suelo superficial. Como se apreciará en la Tabla 3, el Cd total del suelo fue significativamente más alto en los tratamientos con SPS y RFCN comparados con el Testigo, la RFJ y FDA. El Cd disponible fue más alto con el SPS que con el Testigo y los otros tratamientos. Los análisis químicos de Cd del pasto no mostraron diferencias significativas en el segundo año del ensayo, pero en el octavo y décimo año, las parcelas fertilizadas con SPS y RFCN tuvieron contenido de Cd más altos que los otros tratamientos.

Tabla 3: Contenido de Cd total y disponible del suelo y absorción de Cd por el pasto

Análisis (ppm)	Testigo	Superfosf. Simple	RF Carolina	RF Jordania	FDA
Cd total	0.188	0.327	0.280	0.178	0.207
Cd disp.	0.010	0.018	0.012	0.009	0.011
Absorción	572	935	888	616	704

Loganathan *et al.* (1997)

Resultados aparentemente contradictorios presentan algunos investigadores como McGowen *et al.* (2001), quienes reportan que fosfatos solubles como el Fosfato diamónico, probaron una efectiva inmovilización de metales pesados en suelos contaminados con hornos de fundición; indican que la aplicación de 2300 ppm P fue efectiva en la inmovilización de Cd, Pb y Zn provenientes de los suelos contaminados en comparación con el testigo y afirman que la inmovilización de metales pesados usando FDA puede ser un método efectivo para reducir la solubilidad y movilidad de los metales, ya que es barato y comercialmente disponible en grandes cantidades como fertilizante. El mismo autor cita a Vangronsveld y Cunningham (1988) quienes manifiestan que la inmovilización química es una técnica de remediación que implica la adición de químicos a suelos contaminados para reducir la solubilidad de metales a través de la adsorción y precipitación, acción que sería menos costosa que la excavación y llenado de suelos superficiales contaminados.

2.5.2. Estiércoles de corral

Se han reportado valores de 0.3 – 1.8 mg Cd/kg en la materia seca de estiércoles de corral, por lo que aplicaciones anuales altas de 35 t/ha de peso fresco de estiércol constituyeron una fuente más significativa de Cd en experimentos de largo plazo en Rothamsted que la suma de los fertilizantes fosfatados y la deposición atmosférica, y según Herrera (2000), la materia

orgánica puede tener efectos opuestos sobre la disponibilidad del Cd. La fracción soluble puede acomplejarlo, facilitar su movilidad y luego de su mineralización, dejar al metal en forma más disponible, mientras que la fracción orgánica más resistente a la mineralización puede retenerlo en forma no disponible para las plantas.

2.6. FACTORES QUE AFECTAN LA DISPONIBILIDAD DEL CADMIO EN EL SUELO Y SU ABSORCIÓN POR LAS PLANTAS

En el suelo, se indica que los factores que influyen en la movilización de metales pesados en general son el contenido de Cd en el suelo, el pH, potencial redox, composición iónica de la solución del suelo, la capacidad de intercambio iónico, presencia de carbonatos, materia orgánica, textura, entre otros (Prieto *et al.* 2009).

a. Contenido de Cd del suelo

Aunque diversas características del suelo pueden afectar la disponibilidad del Cd, Alloway (1990) considera que la cantidad total del elemento en el suelo es uno de los mayores factores que afectan el contenido de Cd en las plantas. Cita a Kabata-Pendias y Pendias (1984) que reportan datos que muestran que el Cd en tallos de papa y granos de cebada tuvieron una relación lineal ascendente con el Cd del suelo, mientras que en hojas de espinaca la relación fue logarítmica. El mismo autor también cita a Alloway (1986) quien también encontró que el Cd total estuvo estrechamente correlacionado con los contenidos de Cd en la parte comestible de repollo, zanahoria, lechuga y rábano creciendo en 50 diferentes suelos contaminados. Indica también que el origen del Cd de la fuente contaminante también puede afectar su biodisponibilidad, ya que el Cd de las fuentes de contaminación inorgánicas, como las fundiciones mineras, tienden a ser más fácilmente acumuladas por los vegetales que los lodos.

b. pH

El pH del suelo es el factor más determinante de la disponibilidad del Cd en el suelo, debido a que afecta todos los mecanismos de adsorción y la especiación de metales en la solución del suelo (Alloway 1990). Afirma este autor, que la absorción del Cd está inversamente relacionada con el pH del suelo citando a Page *et al.* (1981) quienes reportaron que el contenido de Cd de hojas de acelga se incrementó por factores entre 2 y 3.9 cuando el pH del suelo fue reducido de 7.4 a 4.5; lo inverso se reportó para arroz cuando el pH se

incrementó de 5.5 a 7.5. También cita a Anderson y Nilsson (1974) que encontraron que la adición de CaO a los suelos redujo la absorción de Cd por un forraje debido al incremento en el pH y a la competencia entre los iones Ca y Cd. Con el incremento de la acidez, el incremento de la actividad de Cd es debido en parte a la adsorción reducida en los coloides debido a la disminución de las cargas negativas dependientes del pH.

Esta razón inversa entre la absorción de Cd por las plantas y el pH tiene relación con el incremento de la capacidad de adsorción de Cd de los suelos al incrementarse el pH; Alloway (1990) cita a Christensen (1984) quien mostró que la adsorción de Cd en suelos francos y arenosos se incrementó por un factor de 3 por cada unidad de incremento de pH entre 4 y 7.7. Kirkham (2006) también indica que el pH y la materia orgánica son dos factores importantes en el control de la disponibilidad del Cd, y que el pH es el factor más importante ya que se ha encontrado que conforme el pH del suelo disminuye, el Cd en las plantas se incrementa. Reacciones en las que se originen productos ácidos o disminución del pH, favorecerán la disponibilidad del Cd, como son la aplicación de ciertos fertilizantes y materia orgánica (Herrera 2000).

Según Kirkham (2006), pH y materia orgánica son dos de los factores del suelo más importantes que controlan la disponibilidad del Cd. El pH es uno de los factores más importantes, sino el más importante en el control de la absorción por las plantas. Cita a varios autores que encontraron que conforme el pH disminuye, la cantidad de Cd en las plantas se incrementa, existiendo una relación lineal inversa entre el pH y la absorción de Cd por las plantas.

c. Capacidad de adsorción de los suelos

También menciona Alloway (1990) que el contenido de Cd en las plantas es inversamente proporcional a la CIC de los suelos en los que crecen, aunque esta relación es poco clara debido a que la CIC es sólo uno de los varios mecanismos de adsorción que afectan la solubilidad del Cd, ya que aun cuando los óxidos hidratados no contribuyen mucho a la CIC a pH bajo, ellos adsorben específicamente considerables cantidades de Cd. En cuanto a la materia orgánica, por ejemplo, también es un factor que determina la CIC de los suelos, adsorbe metales pesados también por formación de complejos, pero después de su mineralización, los elementos son liberados a la solución del suelo incrementando su concentración disponible y su absorción por las plantas. El autor cita a Mahler *et al.* (1978)

quienes hallaron relación no consistente entre la CIC y el contenido de Cd en hojas de lechuga y pasto. Podría concluirse entonces en que la CIC por sí misma, no es un parámetro apropiado para indicar la habilidad del suelo para adsorber metales como el Cd.

d. Condiciones redox

El arroz es el único cultivo alimenticio que puede crecer en condiciones de reducción en arrozales inundados y también en condiciones de oxidación cuando los arrozales son drenados. También se cultiva en condiciones de secano. Se ha mostrado que el arroz creciendo bajo condiciones de reducción acumula mucho menos Cd que cuando se siembra en condiciones de oxidación. Ello se atribuye a la formación de CdS en suelos anóxicos y cuando el sulfuro es oxidado se produciría alguna acidificación que contribuirá a la disponibilidad del Cd.

e. Carbonatos

Alloway (1990) cita a Alloway *et al.* (1988) quienes mostraron que los suelos que contienen CaCO_3 libre pueden adsorber Cd y reducir su biodisponibilidad. Se ha encontrado que la calcita tuvo una alta afinidad por el Cd y dio una isoterma de adsorción lineal a bajas concentraciones de Cd, pero a altas concentraciones de Cd predominó la precipitación del CdCO_3 . La quimisorción de Cd a bajas concentraciones fue considerada que implicaba el reemplazamiento del Ca por el Cd en la superficie de los cristales de calcita.

En relación con la adición de carbonatos, Contreras *et al.* (2005) en el estado de Miranda en Venezuela, establecieron un ensayo de invernadero para evaluar el efecto de dos fuentes de Ca en dos suelos, Entisol e Inceptisol. Las fuentes de Ca fueron el CaCO_3 (400 y 800 kg/ha) y el CaCl_2 (600 y 1200 kg/ha) y el cultivo indicador fue el cacao. El objetivo fue evaluar la absorción de Cd por las plantas y el Cd total e intercambiable en los suelos. Los resultados indicaron que en ambos suelos disminuyó la absorción de Cd por las plantas al aplicar CaCO_3 mientras que el Cd intercambiable disminuyó. Con el CaCl_2 la tendencia se mantuvo, pero el efecto fue de menor intensidad. Cabe mencionar que la concentración de Cd foliar en el Testigo fue de 75 mg.kg^{-1} en el suelo denominado Cumbo y que se redujo a 39 mg.kg^{-1} con la aplicación de 800 kg de caliza mientras que con el CaCl_2 la reducción fue hasta 45.67 mg.kg^{-1} , valores que consideraron demasiado altos.

Cuenca (2012), evaluó el efecto de la aplicación de materia orgánica y fuentes no carbonatadas de calcio en un suelo previamente contaminado artificialmente con 50 y 100 ppm de Cd y halló que la aplicación de Ca redujo la absorción de Cd por plantas de maíz. Igualmente, halló que la aplicación de materia orgánica (compost) condujo a una mayor extracción de Cd por las plantas, atribuyendo ello al mayor desarrollo y peso seco de las plantas que condujo a una menor concentración del metal en ellas. El Cd foliar en las plantas se incrementó de 0.442 a 0.864 mg Cd/planta mientras que en las raíces varió de 1.279 a 4.943 mg Cd/planta en los tratamientos sin Ca.

f. Efecto de otros elementos en el suelo

Excesos de Cu, Ni, Se, Mn y P pueden reducir la absorción de Cd por las plantas. La situación con el Zn es menos clara y parece depender del contenido de Cd en el suelo; se ha encontrado que el Zn tiene un efecto antagónico sobre la absorción de Cd en suelos con bajas concentraciones de Cd y un efecto sinérgico o ninguno con altos contenidos. Según Mengel y Kirkby (2000) la disponibilidad del Cd depende mucho del pH y de la presencia de otros cationes como el Ca y el Zn en particular, que deprimen la absorción de Cd.

2.7. CADMIO EN LA PLANTA

Entre los factores de la planta que influyen en la absorción de Cd están el genotipo, la edad y la distribución dentro de ella. Las especies y variedades difieren ampliamente en su habilidad para absorber, acumular y tolerar metales pesados según Alloway (1990). Cultivos como lechuga, espinaca, apio y repollo, tendieron a acumular altas concentraciones de Cd y son considerados como de alta absorción mientras que el maíz, la papa, vainitas, trigo, arroz y avena son de baja absorción. Sin embargo, diferentes cultivares dentro de una especie pueden diferir ampliamente en su tolerancia.

La concentración del elemento también difiere según el órgano que se trate y generalmente la secuencia es raíces > tallo > hojas > frutas > semilla. Se sabe que el Cd es fácilmente trasladado a la parte aérea después de su absorción por las raíces. Alloway (1990) cita a McLean (1976) quien mostró que el Cd estuvo presente en más altas concentraciones en las raíces que en otros órganos de avena, soya, alfalfa, maíz y tomate, pero ninguno de ellos se cultiva para consumir sus raíces. Sin embargo, en lechuga, zanahoria, tabaco y papa, los contenidos fueron más altos en las hojas.

2.8. MEJORA Y REHABILITACIÓN DE SUELOS CONTAMINADOS CON Cd

Para suelos que ya han sufrido contaminación por metales pesados y específicamente cadmio, Alloway (1990) indica que su reducción o remoción puede efectuarse de diferentes formas:

- Por la remoción del suelo contaminado o por su recubrimiento con una capa delgada de material no contaminado, asegurando que las raíces no lleguen al suelo subyacente, y la capilaridad y/o evaporación no eleve Cd soluble a la zona radicular.
- Reducción del contenido de Cd por lavado con ácidos o quelatos cuidando de no contaminar la tabla de agua.
- Encalado hasta pH 7 para reducir la biodisponibilidad, que es el tratamiento más comúnmente usado.
- Incrementando la capacidad de adsorción del suelo por adición de materia orgánica.
- Inundando para crear condiciones de reducción, lo que es apropiado sólo para el caso de arroz.
- Sembrando cultivos no alimenticios o alimentos para ganado.

Sobre el tema, Kirkham (2006) en una revisión sobre el efecto de los factores del suelo, hiperacumulación y enmiendas en suelos contaminados, respecto al uso de enmiendas para el control de la disponibilidad del Cd, señala los siguientes materiales: fósforo, subproductos industriales, sedimentos orgánicos de estuarios y canales de desagüe (muck), silicio, zinc y cloruros. Respecto al fósforo indica que es una de las enmiendas más utilizadas para retener los metales pesados y que su adición al suelo es la base de un proceso patentado para reducir la biodisponibilidad de metales, desde que se ha observado considerable cantidad de fosfatos en el drenaje de suelos; la patente establece que la fuente preferida de P es la roca fosfatada, fosfatos alcalinos y alcalino-térreos, fosfatos de amonio, ácido ortofosfórico y superfosfatos. En cuanto a los sub productos industriales señala a fosfoyeso, yeso rojo y dolomita, para incrementar la capacidad de adsorción en suelos ácidos, indicando al mismo tiempo que estos materiales no reducen las concentraciones de metales, sino que incrementan los mecanismos de atenuación que controlan la movilidad y biodisponibilidad de los metales. Sobre los sedimentos orgánicos de grano fino (muck) que se acumulan en estuarios y canales indica que también pueden ser aplicados a los suelos habiéndose realizado ya algunos experimentos. Respecto a la aplicación de silicio manifiesta que este elemento incrementa

la resistencia de las plantas a la toxicidad por Cd; cita a Shi *et al.* (2005) quienes hicieron crecer arroz en hidroponía bajo niveles tóxicos de Cd y hallaron que el Si alivió la toxicidad que relacionaron con la reducción en su absorción, indicando asimismo que el Cd se acumuló en las raíces y restringió el transporte a la parte aérea. La aplicación de Zn también lo considera una medida, debido a que ambos cationes son químicamente similares y por lo tanto tienen similar comportamiento en su absorción, indicando que las plantas generalmente toman más Cd si el contenido de Zn es bajo. Y finalmente, recomienda la aplicación de cloruros.

2.9. TRABAJOS RELACIONADOS

He y Singh (1993), en experimento de invernadero investigaron la distribución y absorción de Cd por plantas de Ryegrass (*Lolium multiflorum* L.) influenciados por la materia orgánica y tipo de suelo. Los niveles de materia orgánica (turba) añadida fueron 0, 20, 40, 80, 160 y 320 g/kg. El Cd fue analizado por extracción secuencial. La fracción intercambiable del suelo determinada con $MgCl_2$ 1 M se incrementó, mientras que la fracción enlazada a los óxidos de Fe y Mn disminuyó con el incremento de los niveles de materia orgánica en los tres suelos (arenoso, franco arenoso y franco arcilloso). Los rendimientos de rye grass no fueron afectados por la materia orgánica, pero las concentraciones de Cd disminuyeron con el incremento de las cantidades de materia orgánica añadidas. El Cd en la planta correlacionó negativamente con la CIC y se redujo al incrementarse el nivel de materia orgánica añadida en el suelo arenoso y franco arcilloso. En cualquier nivel de materia orgánica, la disminución en la concentración de Cd del pasto fue en el orden arenoso > franco arenoso > franco arcilloso. La materia orgánica utilizada tuvo un contenido total de Cd de 0.088 mg/kg que consideraron pequeña y que por lo tanto no contribuyó mucho en el contenido de Cd total en los suelos mientras que el fertilizante comercial utilizado tenía 27 mg Cd/kg. La fracción intercambiable de Cd se incrementó significativamente con el incremento de la materia orgánica, especialmente en el suelo arenoso, de 26.9 a 53.6 ppm, y de 56.3 a 65.5 ppm en el suelo franco arcilloso. El Cd enlazado a la materia orgánica contrariamente se redujo de 19.2 a 14.3 en el arenoso y de 7 a 5.7 en el franco arcilloso.

Sánchez *et al.* (2011), en suelos de Venezuela previamente contaminados con 250 ppm Cd en forma de cloruro de Cd, aplicaron 50 y 150 ppm P y los incubaron por 32 días para finalmente determinar el Cd disponible con EDTA 0.05M, pH 7 (relación suelo:extractante

1:2). Los resultados mostraron que hubo una mayor disponibilidad de Cd en los suelos sin aplicación de P que en aquellos en los que se aplicó P. Al final del experimento, el Cd disponible se redujo en uno de los suelos de 34 ppm en el tratamiento sin P a 30 ppm en el tratamiento con 150 ppm P.

Analizando los resultados de este experimento, resultan hasta cierto punto contradictorios, pues si existe actualmente temor por la fertilización fosfatada es porque se sabe que son fuente de contaminación.

Huamani *et al.* (2012), evaluaron los contenidos de Cd y Pb en suelos y hojas de cacao en las regiones de Huánuco y Ucayali en muestras tomadas de 22 parcelas del llamado cacao orgánico. En Huánuco, encontraron valores promedio de 0.53 ppm de Cd disponible y 3.02 ppm de Pb disponible mientras que en las hojas los contenidos fueron de 0.21 y 0.58 ppm respectivamente. En Ucayali, el rango de variación del Cd disponible fue de 0.31 a 1.52 ppm mientras que en el caso de Pb fue de 1.07 a 6.83 en tanto que en las hojas el rango fue de 0.17 a 0.33 ppm para el Cd y de 0.49 a 0.64 ppm para el Pb.

Abanto (2016), evaluando el efecto del FDA y RF en suelos alcalinos de pH 7.72 y 7.77, halló una alta superioridad del FDA sobre la RF con aplicación de 200 ppm P en el rendimiento de materia seca del maíz en condiciones de invernadero. Del mismo modo, mayor absorción de Cd se presentó con el FDA, tanto en la parte aérea como radicular, extrayendo 0.02119 mg Cd/planta cuando aplicó 200 ppm P, mientras que con la RF extrajo 0.01275 mg Cd/planta. La concentración de Cd en los tejidos vegetales fue de 0.00095 y 0.0017 ppm Cd respectivamente. Es decir, la RF concentró más Cd debido probablemente a su menor desarrollo.

Arévalo *et al.* (2017) realizaron un estudio para evaluar la distribución y acumulación de metales pesados en 70 plantaciones de cacao de 10 a 15 años de edad en 8 departamentos del país productores de cacao y hallaron que las concentraciones de Cd en todas las muestras estuvieron por debajo del nivel crítico utilizado, aunque los mayores valores los encontraron en las plantaciones de Amazonas, Tumbes y Piura. Las concentraciones foliares de Cd variaron de 0.23 en Cuzco a 2.5 ppm en Tumbes mientras que en las almendras fueron de 0.17 ppm en Cuzco y 1.78 en Tumbes. Comparativamente, Huamani *et al.* (2012) reportaron valores más bajos, pero dentro del rango encontrado en este estudio, mientras que Sodré *et*

al. (2001) en Brasil y Ramtahal *et al.* (2016) en Trinidad y Tobago reportaron valores más altos. Desde que no existe consenso en cuanto a los límites críticos para hojas y semillas a nivel mundial, se usó los valores óptimos y límites críticos establecidos por Sodré *et al.* (2001), Broadley *et al.* (2012) y Kabata-Pendias (2011) para evaluar los datos del presente estudio. Para almendras se usó el valor crítico de 0.8 U_g/g establecido por la comunidad europea que se hace efectiva desde el 1 de enero de 2019, como máximo permisible para chocolate con 50% de cacao sólido. Para hojas se utilizó una concentración normal de 0.2 µg/g según Kabata-Pendias (2011).

Chávez (2020) evaluó el efecto de fuentes y niveles de materia orgánica en la absorción de Cd por almendras de cacao. En cuanto al efecto de las fuentes de materia orgánica, no halló diferencias de significación entre el efecto de la aplicación de Residuos de Poda y Cosecha de Cacao (RPCC), Estiércol de Vacuno (EV) y Compost Municipal (CM) aunque sí diferencias numéricas: RPCC con 0.40 ppm Cd, EV con 0.41 ppm y CM con 0.49 ppm Cd. Con relación a los niveles de materia orgánica, la aplicación de 25 y 50 t de MO/ha produjeron una concentración de Cd en los granos de 0.415 ppm y 0.426 ppm respectivamente, pero con la aplicación de 100 t/ha la concentración fue de 0.504 ppm Cd. En cuanto al Cd total del suelo entre niveles de aplicación, los valores variaron de 0.910 a 0.92 ppm Cd total sin diferencias entre ellos y en relación con el Cd disponible, no se encontraron diferencias importantes, variando de 0.162 ppm con la aplicación de 50 t/ha a 0.180 ppm en el tratamiento testigo, no hallándose tampoco tendencia alguna.

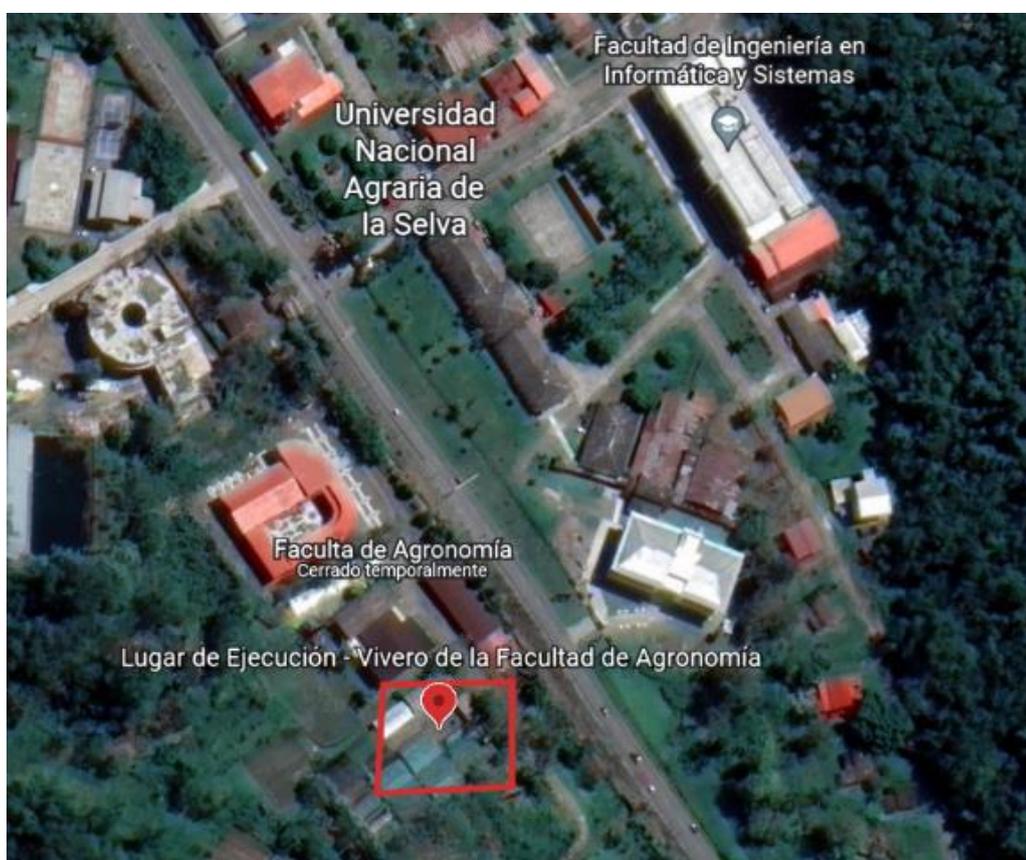
En cuanto a los niveles máximos permisibles, Cárdenas (2012) cita a García y Dorronsoro (2005) quienes indican que el Comité Mixto OMS – FAO (1992) fija como máximo valor permisible de Cd total de los suelos en 3 ppm, mientras que en el caso del Cd disponible es de 0.99 ppm. En 20 parcelas de agricultores del Alto Huallaga pertenecientes a la Cooperativa Agraria Industrial Naranjillo, Cárdenas (2012) evaluó las características físico-químicas de los suelos y el contenido de Cd disponible en el suelo y Cd total en hojas y semillas de cacao. El pH de los suelos varió de 4.11 (extremadamente ácido) hasta 7.34 (ligeramente alcalino). El contenido de Cd disponible varió de 0.35 a 1.82 ppm con un promedio de 0.66 ppm y considerando un límite máximo permisible de 0.99 ppm, sólo 3 parcelas de las 20 analizadas, sobrepasaron dicho límite. A nivel foliar, encontró que el Cd total varió de 0.76 ppm hasta 9.27 ppm y habiéndose establecido el límite máximo permisible

de 0.5 ppm, todas las parcelas evaluadas sobrepasaron dicho límite, atribuyendo ello a las actividades antropogénicas.

III. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 LUGAR DE EJECUCIÓN

El trabajo de investigación se desarrolló en el vivero de la Facultad de Agronomía de la Universidad Nacional Agraria de la Selva – Tingo María, ubicada entre los 75° 53' 00" Longitud Oeste y 09° 18' 00" Latitud Sur. La ubicación geográfica es la siguiente:



Región : Huánuco
Provincia : Leoncio Prado.
Distrito : Rupa Rupa.
Localidad : Tingo María.

Coordenadas UTM : 0390543 m. E
8970026 m. N
Altitud : 668 msnm.

3.2. MATERIALES Y MÉTODOS

3.2.1. Análisis de las características físico-mecánicas y químicas del suelo

Se extrajo suelo del horizonte sub superficial de un Inceptisol del Bosque Reservado de la UNAS, cuyo análisis se muestra en la Tabla 4. Se trata de un suelo derivado de areniscas y como se observa, fue de clase textural arcillosa, extremadamente ácido a muy fuertemente ácido, con bajo contenido de materia orgánica, N total, P y K disponibles y alto porcentaje de acidez cambiabile.

Tabla 4: Características físico-mecánicas y químicas del suelo

Característica	Unidades	Valor	Método
Textura: Arena	%	37.56	Bouyoucos
Limo	%	17.56	
Arcilla	%	44.88	
Clase textural		Arcilloso	
pH Suelo:Agua (1:1)		4.42	Potenciómetro
Materia orgánica	%	1.58	Walkley – Black
N total	%	0.08	% MO x 0.05
P disponible	ppm	4.63	Olsen modificado
K disponible	ppm	78.47	Acetato de NH ₄ 1N pH 7
CIC efectiva	cmol (+)/kg	10.38	Suma de cationes
Ca cambiabile	cmol (+)/kg	2.97	KCl 1N, EAA
Mg cambiabile	cmol (+)/kg	0.51	KCl 1N, EAA
Al + H cambiabile	cmol (+)/kg	6.90	Yuan
Sat. Acidez Cambiabile	%	66.50	AC(%) = (Al+H)100/CIC

Fuente: Laboratorio de Análisis de Suelos, Plantas y Ecotoxicología. UNAS

3.2.2. Componentes en estudio

A. Cultivo indicador

- Cacao (*Theobroma cacao* L.) clon CCN 51. Los frutos correspondieron al Banco de Germoplasma de la Facultad de Agronomía de la UNAS.

B. Fuentes y niveles de aplicación

- Fuentes de P: Superfosfato triple
Fosfato diamónico

- Niveles de P: 100 ppm P
200 ppm P
- Estiércol de vacuno: 0 por ciento
5 por ciento

3.2.3. Tratamientos en estudio

Los tratamientos en estudio se presentan en la Tabla 5. Con el fin de completar los 3 elementos mayores primarios, se adicionó 200 ppm de N y K a los tratamientos con excepción del Testigo Absoluto, como se muestra en el mismo cuadro.

Tabla 5: Descripción de los tratamientos en estudio

Clave	Niveles de P (ppm)		Niveles de Estiércol (%)	Aplicación complementaria (ppm)
	S. Triple	F.D.A.		
T1	0	0	0	0
T2	0	0	0	NK
T3	0	0	5	NK
T4	100	0	0	NK
T5	200	0	0	NK
T6	0	100	0	NK
T7	0	200	0	NK
T8	100	0	5	NK
T9	200	0	5	NK
T10	0	100	5	NK
T11	0	200	5	NK

3.2.4. Diseño experimental

Se aplicó el diseño completamente al azar (DCA), con 11 tratamientos y cuatro repeticiones, que hicieron un total de 44 unidades experimentales (u.e.)

Para la comparación de medias se aplicó la prueba de Duncan ($\alpha=0.05$).

Modelo aditivo lineal:
$$\gamma_{ij} = \mu + \alpha_i + \epsilon_{ij}$$

3.2.5. Ejecución del experimento

3.2.5.1. Características de los fertilizantes fosfatados

Para efectuar la aplicación de los fertilizantes se tomaron muestras y llevaron al laboratorio para su análisis de Cd. Las muestras fueron secadas a 40 °C por dos horas y luego se molieron en mortero de ágata. La determinación del P y Cd total en los fertilizantes se realizó de

acuerdo con el protocolo descrito por Arévalo et al. (2017), mediante digestión ácida nítrico-perclórica.

- Se pesó 0.5 g de muestra en un matraz de vidrio de 125 mL.
- Se añadió 10 ml de una solución de HNO₃ y HClO₄ en una relación 4:1.
- Luego se realizó la digestión por aproximadamente 180 minutos a 300 °C.
- La muestra digerida, se filtró a través de papel filtro Whatman N° 20 y se enrasó a 25 ml en una fiola de vidrio.
- Luego se realizaron las lecturas de Cd en el espectrofotómetro de emisión óptica con plasma acoplado inductivamente (ICP OES).
- La determinación del P total se hizo en el mismo extracto utilizado para el Cd total, y las lecturas se hicieron en el espectrofotómetro de luz visible, mediante la técnica del Metavanadato.
- Los resultados se muestran en la Tabla 6.

Tabla 6: Resultados de los análisis de P y Cd total en el estiércol y fertilizantes

Producto	P total	Cd total
FDA	39.00 % P ₂ O ₅	3.795 ppm Cd
SPT	45.32 % P ₂ O ₅	14.715 ppm Cd
Estiércol	1.15 % P ₂ O ₅	1.885 ppm Cd

Los valores reportados corresponden a los análisis efectuados en el Laboratorio de Suelos de la UNAS; se observa que en el caso del FDA el contenido de P₂O₅ difiere mucho de lo reportado.

3.2.5.2. Características del material orgánico

Se utilizó estiércol de vacuno en proceso de descomposición procedente del establo de la Facultad de Zootecnia de la UNAS y cuyos resultados de sus análisis se muestran en la Tabla 7.

Tabla 7: Resultados de los análisis del estiércol compostado

Característica	Unidad	Valor	Método
Humedad	%	26.30	Gravimétrico
Materia orgánica	%	57.79	Gravimétrico
Cenizas	%	15.91	Gravimétrico
pH		7.45	Potenciómetro, 1:1 en H ₂ O
N	%	2.74	Kjeldahl
P	%	1.153	Vía seca – Meta vanadato
K	%	5.97	Vía seca – EAA
Ca	%	1.941	Vía seca – EAA
Mg	%	2.585	Vía seca – EAA
Cd	ppm	1.885	Vía húmeda – EAA
Zn	ppm	636	Vía seca – EAA

Otros: Úrea (46 por ciento de N), Cloruro de potasio (60 por ciento de K₂O)

3.2.6. Fase de invernadero

a. Muestreo y análisis del suelo: se recolectó suelo del bosque reservado de la UNAS, eliminando la capa superficial por su alto contenido de materia orgánica en diferentes estados de descomposición. El suelo presentaba bajo contenido de P disponible y materia orgánica y era de textura fina. Luego de secado a temperatura ambiente y tamizado con malla de 4 mm se tomó una muestra de 1 kg que se molió y tamizó con malla de 2 mm para su análisis.

b. Instalación del experimento: calculadas las cantidades de fertilizantes N, P y K y pesado el suelo en bolsas negras de 2 kg de capacidad, se aplicaron los fertilizantes fosfatados y el compost, según los tratamientos, mezclándolos bien con el suelo. Luego fueron humedecidos hasta aproximadamente el 80 por ciento de su capacidad de campo, estado en que permanecieron en incubación durante 1 semana. En previsión de la muerte de plantas, se duplicó el número de bolsas (2 bolsas/repetición) para uniformizar las unidades experimentales.

c. Obtención y tratamiento de las semillas de cacao: se extrajeron las semillas de mazorcas maduras recientemente cosechadas de cacao (clon CCN 51) y luego de eliminar el mucílago frotándolas con aserrín, se hicieron pre germinar en bandejas con aserrín con 30%

de humedad aproximadamente, durante 4 a 5 días hasta la emisión de la radícula. Una vez que las radículas alcanzaron un tamaño de 1 a 5 mm, se sembraron las semillas en las bolsas con la radícula hacia abajo (una semilla por bolsa) donde permanecieron durante 4 meses, que es el tiempo que normalmente tarda un plantón para llegar al estado de injertación o traslado al campo definitivo. Una muestra de las semillas se utilizó para efectuar su determinación de Cd total, obteniéndose el extracto por vía húmeda mediante el ataque con la mezcla binaria nítrico-perclórica. El N y K se aplicaron en solución una vez que se hizo la siembra de las semillas y las plántulas emergieron. Durante la etapa de invernadero, se mantuvo la humedad de los suelos en el 80 por ciento de su capacidad de campo que se controló gravimétrica y periódicamente.

3.2.7. Fase de laboratorio

a. Análisis de suelos: antes de la instalación del experimento se realizó el análisis de caracterización por los métodos de rutina (Tabla 4) y Cd total (digestión con mezcla $\text{HNO}_3 + \text{HClO}_3$) y disponible (EDTA 0.05 M; pH 7; relación suelo:extractante 1:2).

b. Análisis de fuentes de P: adquiridos los fertilizantes fosfatados, se analizaron sus contenidos de P total, así como de cadmio total y cuyos resultados se mostraron en la Tabla 6.

c. Análisis de cadmio disponible del suelo: finalizado el experimento se determinó en cada repetición el contenido de Cd disponible según lo descrito por Ramtahal *et al.* (2015):

- Se pesó 5 g de suelo en un vaso de 50 mL.
- Se añadió 20 ml de EDTA 0.05 M y se agitó por 120 minutos.
- Se centrifugó por 10 minutos a 2000 rpm.
- Se filtró con papel Wathman N° 20.
- Obtenido el extracto, las lecturas se realizaron en el espectrofotómetro de emisión óptica con plasma acoplado inductivamente (ICP OES).

d. Análisis de tejidos: cosechadas las plantas cortándolas a la altura del cuello, se pesaron y lavaron con agua de caño, agua acidulada (HCl 0.1 N) y agua destilada y luego de oreadas se llevaron en bolsas de papel a la estufa a 65 – 70 °C, durante 24 horas para determinar el peso seco de las plantas. Luego se analizó el contenido de Cd total de la parte

aérea por digestión húmeda con solución nítrico perclórica en la Universidad Nacional Agraria La Molina.

3.2.8. Identificación de Variables

a. Materia seca de la parte aérea. Se cosecharon las plantas cortándolas al nivel del cuello y se lavaron primero con agua de caño para eliminar el polvo, luego con agua acidulada (HCl 0.03N) y se enjuagaron con agua destilada, para luego secarlas en estufa (105-110 °C) durante 24 horas.

b. Concentración de cadmio de la parte aérea. La obtención del extracto de los tejidos se hizo por vía húmeda (mezcla binaria nítrico-perclórica) y la determinación del Cd por Espectrofotometría de Absorción Atómica en el Laboratorio de Suelos, Plantas y Fertilizantes de la UNALM.

c. Contenido de cadmio total de la parte aérea. Se determinó multiplicando el peso de materia seca de cada unidad experimental por la concentración hallada.

d. Contenido de cadmio disponible del suelo al final del experimento. El Cd disponible se determinó con EDTA 0.05 M, pH 7, relación suelo: extractante 1:4, según se describió previamente.

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. MATERIA SECA DE LA PARTE AÉREA

Los resultados correspondientes al rendimiento de materia seca de la parte aérea, se presentan en las Tablas 8 al 10 y Figuras 1 al 3, mientras que los análisis estadísticos se presentan en el Anexo (Tabla 20). Los análisis estadísticos mostraron alta significación estadística entre tratamientos y un coeficiente de variación de 3.04 por ciento, lo que indica una excelente homogeneidad de los resultados experimentales.

Tabla 8: Efecto de las fuentes fosfatadas sin aplicación de materia orgánica en el rendimiento de materia seca.

Tratamientos	Materia seca (g)	Significación ($\alpha= 0.05$)		
ST - 200	3.651	a		
ST - 100	3.468	a		
FDA - 200	3.187	b		
T + NK	3.061	b	c	
FDA - 100	2.894		c	d
Testigo Absoluto	2.836			d

En la Tabla 8 y Figura 1 se puede apreciar el efecto de las fuentes fosfatadas aplicadas solas y a dos niveles, observándose un mejor efecto del superfosfato triple (ST) sobre el FDA, en sus dos niveles, lo que se atribuiría al alto contenido de P hidrosoluble del superfosfato triple. En el caso del fosfato diamónico (FDA) su menor efecto entre los dos fertilizantes a ambos niveles, se podría atribuir al probable efecto acidificante del NH_4^+ que podría estar afectando la solubilidad del P aportado con el fertilizante si se suma a ello la acidez del suelo. Se observa también falta de significación estadística entre el nivel bajo de FDA y el Testigo con NK, así como entre el FDA y el Testigo Absoluto, indicando que la aplicación de 100 ppm no resultó significativa para propiciar un mayor desarrollo de la planta. Resultado diferente fue encontrado por Abanto (2016) en un suelo alcalino en cultivo

de maíz, quien halló una alta superioridad del FDA sobre la RF, ambos con 200 ppm P, lo que se podría atribuir al poco efecto que tienen las fosforitas en suelos alcalinos, en los que no se recomienda su aplicación debido a su bajo producto de solubilidad en esas condiciones.

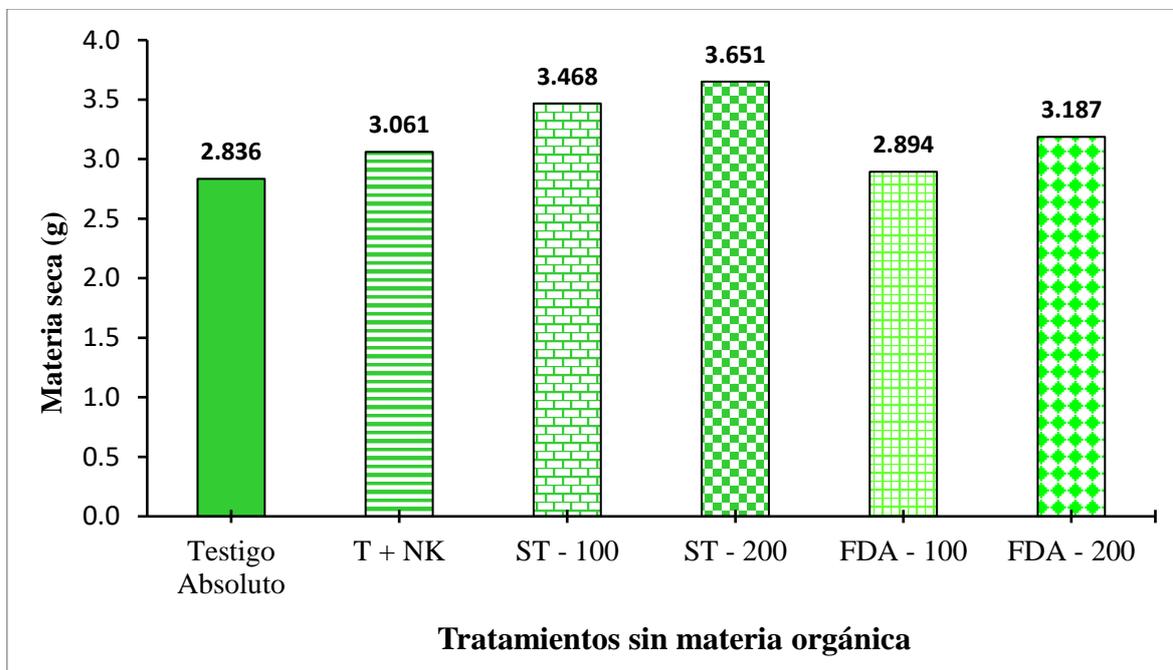


Figura 1: Efecto de las fuentes fosfatadas sin aplicación de materia orgánica en el rendimiento de materia seca del cacao

En la Tabla 9 se muestra la Prueba de Duncan del efecto de la materia orgánica sobre la eficiencia de las fuentes fosfatadas, observándose la importante influencia que tiene la materia orgánica en la producción de materia seca, ya que uno de los tratamientos testigo con materia orgánica al que no se le aplicó P sobresalió con diferencias estadísticas significativas sobre la mayoría de los tratamientos con materia orgánica. Ello se debería a que la materia orgánica no sólo es importante por los nutrientes que aporta sino también por su efecto en las propiedades físicas y biológicas del suelo. En términos generales, independientemente de los niveles de aplicación, hubo un mayor efecto de ella sobre el FDA que sobre el ST.

Tabla 9: Efecto de las fuentes fosfatadas con aplicación de materia orgánica en el rendimiento de materia seca del cacao

Tratamiento	Promedio	Significación ($\alpha= 0.05$)
T+NK+MO	5.438	a
FDA - 200 + MO	5.018	b
FDA - 100 + MO	4.826	c
ST - 200 + MO	4.563	d
ST - 100 + MO	4.549	d

Estos resultados se pueden apreciar en la Figura 2, en la que se nota un mejor efecto del fosfato diamónico sobre el superfosfato triple cuando se aplicó la materia orgánica. Igualmente se puede apreciar su importante acción sobre el Testigo, debido al bajo contenido de materia orgánica del suelo utilizado en el experimento.

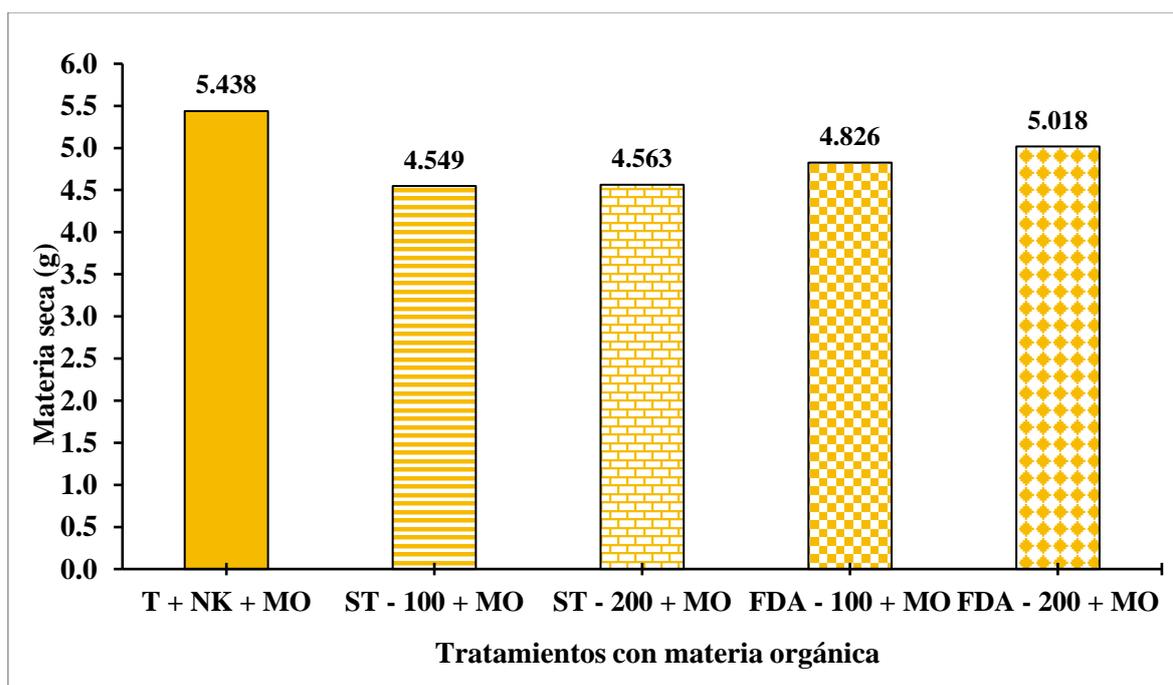


Figura 2: Efecto de las fuentes fosfatadas con aplicación de materia orgánica en el rendimiento de materia seca del cacao

En la Tabla 10 y Figura 3 se presentan los resultados generales donde claramente se puede observar la influencia de la materia orgánica en el rendimiento de materia seca. Se aprecia que todos los tratamientos que llevaron materia orgánica ocuparon los primeros lugares, incluyendo al Testigo + MO, efecto que ya se reportó en muchos trabajos de investigación

y que se atribuyen al mejoramiento de las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo.

La Prueba de Duncan nos muestra que todos los tratamientos que llevaron materia orgánica ocuparon los primeros lugares, incluyendo a los tratamientos testigo.

Tabla 10: Resultados generales del rendimiento de materia seca del cacao por efecto de la aplicación de fuentes fosfatadas y materia orgánica

Tratamiento	Promedio	Significación (a= 0.05)		
T + NK + MO	5.438	a		
FDA - 200 + MO	5.018	b		
FDA - 100 + MO	4.826	b		
ST - 200 + MO	4.563		c	
ST - 100 + MO	4.549		c	
ST - 200	3.651		d	
ST - 100	3.468		d	
FDA - 200	3.187			e
T + NK	3.061			e f
FDA - 100	2.894			f g
Testigo Absoluto	2.836			g

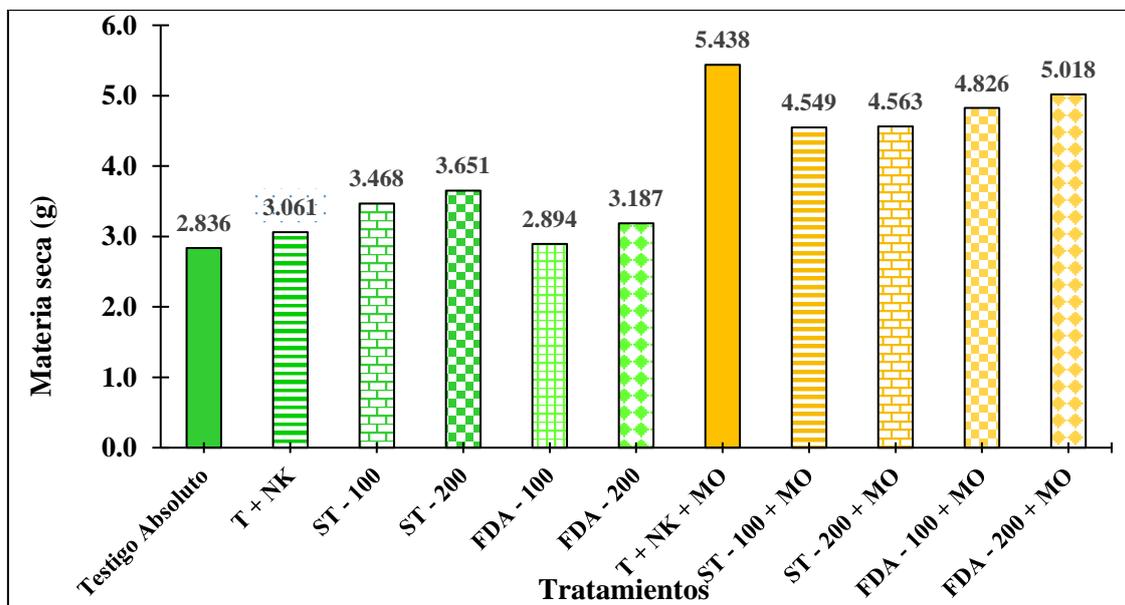


Figura 3: Resultados generales de la aplicación de fuentes fosfatadas y materia orgánica en el rendimiento de materia seca

4.2. CONCENTRACIÓN DE CADMIO EN LA PARTE AÉREA DE LOS PLANTONES DE CACAO

Los análisis estadísticos (Tabla 21 del Anexo) mostraron alta significación estadística en todas las fuentes de variación, en lo referido a los fertilizantes fosfatados sin aplicación de materia orgánica, con aplicación de materia orgánica y entre tratamientos testigos sin materia orgánica y con materia orgánica. El coeficiente de variación obtenido fue de 14.77 por ciento pudiendo considerarse como un valor aceptable para este tipo de experimentos.

En lo referente a los tratamientos sin aplicación de materia orgánica, como se aprecia en la Prueba de Duncan de la Tabla 11 y Figura 4, la concentración de Cd se incrementó de 0.135 ppm en el tratamiento Testigo Absoluto hasta 0.373 ppm en el tratamiento con ST 100 lo que se atribuiría necesariamente al Cd absorbido por efecto de la fertilización (N, P, K).

Tabla 11: Prueba de Duncan ($\alpha= 0.05$) del efecto de las fuentes fosfatadas sin aplicación de materia orgánica en la concentración de cadmio en plantones de cacao

Tratamiento	Concentración de Cd (ppm)	Significación
ST - 100	0.3725	a
ST - 200	0.3475	a
FDA - 100	0.2975	a
T + NK	0.2875	a
FDA - 200	0.2875	a
Testigo Absoluto	0.135	b

Se aprecia en la mencionada Figura 4, que el tratamiento con ST en su primer y segundo nivel fueron los que concentraron mayor cantidad de Cd en los tejidos de las plantas, en relación a los tratamientos con FDA y Testigo con NK, sin diferencias estadísticas entre ellos, pero sí estadísticamente superiores al Testigo Absoluto.

El ST en sus dos niveles, fueron los que contribuyeron más en el incremento de la concentración del metal pesado en las plantas de cacao.

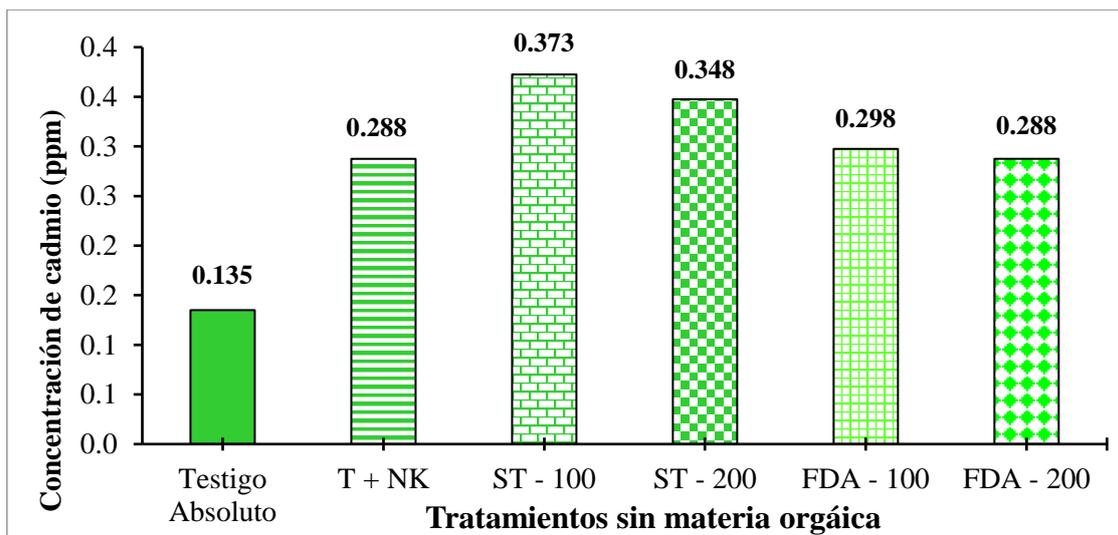


Figura 4: Efecto de las fuentes fosfatadas sin aplicación de materia orgánica en la concentración de cadmio en la parte aérea del cacao

En la Tabla 12 y Figura 5 se presentan los resultados de la concentración de Cd en los tratamientos con materia orgánica observándose que el tratamiento con mayor concentración de Cd fue el tratamiento Testigo, lo que guardaría cierta relación con el rendimiento de materia seca, es decir, que a mayor rendimiento mayor absorción.

Entre los fertilizantes fosfatados, el ST en ambos niveles originó una mayor concentración del elemento debido probablemente a su mayor solubilidad. En cuanto al FDA la concentración de Cd fue menor que en los otros tratamientos.

Tabla 12: Prueba de Duncan ($\alpha= 0.05$) del efecto de las fuentes fosfatadas con aplicación de materia orgánica en la concentración de cadmio en la parte aérea de los plántones de cacao

Tratamiento	Concentración de cadmio (ppm)	Significación
T+NK+MO	0.690	a
ST-100+MO	0.575	b
ST - 200 + MO	0.533	b c
FDA-100+MO	0.518	b c
FDA - 200 + MO	0.448	c

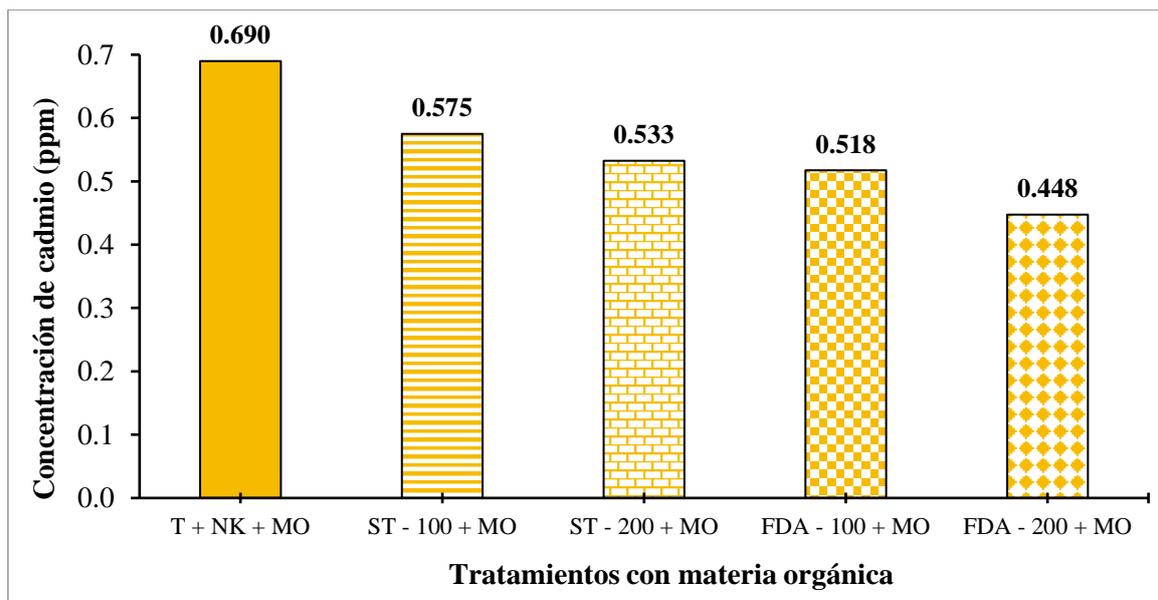


Figura 5: Efecto de las fuentes fosfatadas con aplicación de materia orgánica en la concentración de cadmio en la parte aérea del cacao

Los resultados generales de la concentración de Cd en los plantones de cacao se presentan en la Tabla 13 y Figura 6.

En términos generales se observa que todos los tratamientos que llevaron materia orgánica ocuparon los primeros lugares y hasta superaron estadísticamente (con una excepción) a aquellos que no llevaron este material lo que se podría explicar por el mayor crecimiento de las plantas.

Tabla 13: Prueba de Duncan ($\alpha=0.05$) de los resultados generales de la concentración de cadmio de la parte aérea del cacao por efecto de la aplicación de fuentes fosfatadas y materia orgánica

Tratamiento	Concentración de Cd (ppm)	Significación
T + NK + MO	0.690	a
ST - 100 + MO	0.575	b
ST - 200 + MO	0.533	b c
FDA - 100 + MO	0.518	b c
FDA - 200 + MO	0.448	c d
ST - 100	0.373	d e
ST - 200	0.348	d e
FDA - 100	0.298	e
T + NK	0.288	e
FDA - 200	0.288	e
Testigo Absoluto	0.135	f

La Figura 6 muestra con más claridad que comparando sólo las fuentes fosfatadas sin aplicación de materia orgánica el FDA concentró menos Cd que el ST. Observando los tratamientos con materia orgánica, se aprecia en general una menor concentración en los tratamientos que llevaron el mayor nivel de P, lo que probablemente se atribuiría a un efecto de dilución. Asimismo, se aprecia que todos los tratamientos que llevaron materia orgánica presentaron una mayor concentración de Cd en los tejidos.

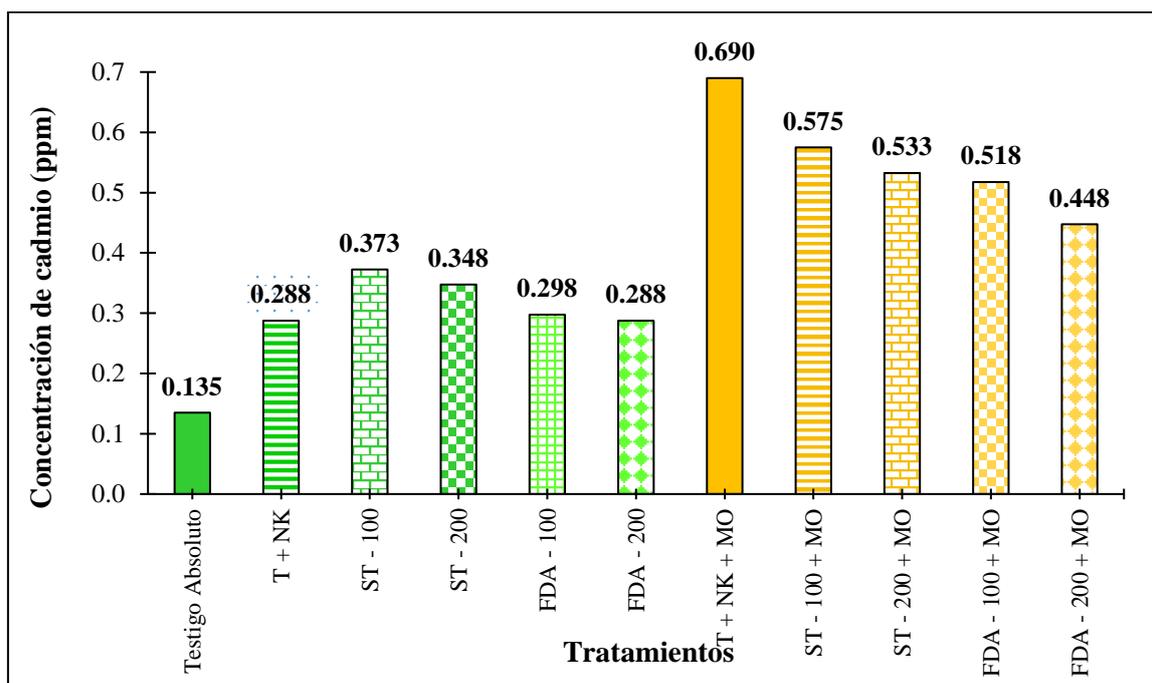


Figura 6: Resultados generales de la concentración de cadmio en tejidos de la parte aérea del cacao por efecto de la aplicación de fuentes fosfatadas y materia orgánica

Comparativamente, Cárdenas (2012) en 20 parcelas de agricultores del Alto Huallaga pertenecientes a la Cooperativa Agraria Industrial Naranjillo, evaluó el Cd total en hojas y semillas de cacao, encontrando que a nivel foliar el Cd total varió de 0.76 ppm hasta 9.27 y habiéndose establecido el límite máximo permisible de 0.5 ppm, todas las parcelas evaluadas sobrepasaron dicho límite, atribuyendo ello a las actividades antropogénicas, pero en nuestro caso solamente el tratamiento Testigo + NK + MO sobrepasó dicho límite.

4.3. EXTRACCIÓN TOTAL DE CADMIO POR LA PARTE AÉREA

En la Tabla 14 y Figura 7 se presentan los resultados de la absorción de Cd por las plantas de cacao sin aplicación de materia orgánica. Se observa que entre fuentes fosfatadas el ST dio lugar a mayores valores de absorción que el FDA en términos generales, no observándose

diferencias estadísticas entre niveles de aplicación en cada fuente. Esta mayor absorción con el ST podría atribuirse a su mayor efecto en el crecimiento de las plantas.

Tabla 14: Prueba de Duncan ($\alpha= 0.05$) del efecto de las fuentes fosfatadas sin aplicación de materia orgánica en la absorción total de cadmio en la parte aérea de plántones de cacao

Tratamiento	Extracción de Cd (mg/planta)	Significación	
ST - 100	1.288	a	
ST - 200	1.265	a	b
FDA - 100	0.912	a	b
T + NK	0.881	a	b
FDA - 200	0.865		b
Testigo Absoluto	0.382		c

Como se mencionó anteriormente respecto al rendimiento de materia seca, Abanto (2016), evaluando el efecto del FDA y RF en suelos alcalinos, halló una alta superioridad del FDA sobre la RF en el rendimiento de materia seca del maíz. Del mismo modo, mayor absorción de Cd se presentó con el FDA, tanto en la parte aérea como radicular, extrayendo 0.02119 mg Cd/planta, mientras que la RF extrajo 0.01275 mg/planta, lo que equivaldría a concentraciones de 0.95 y 1.7 ppm Cd respectivamente. Es decir, la RF concentró más Cd debido probablemente a su menor desarrollo, lo que Mengel y Kirkby (2000) llaman “efecto de dilución”; a esta conclusión se llega desde que el rendimiento de materia seca fue de 22.31 g con el FDA y 7.5 g con la RF. El contenido de Cd de los fertilizantes utilizados por Abanto (2016) fue de 5.83 ppm en la RF y 10.06 ppm en el FDA, mientras que, en nuestro caso, el FDA contenía 3.795 ppm Cd.

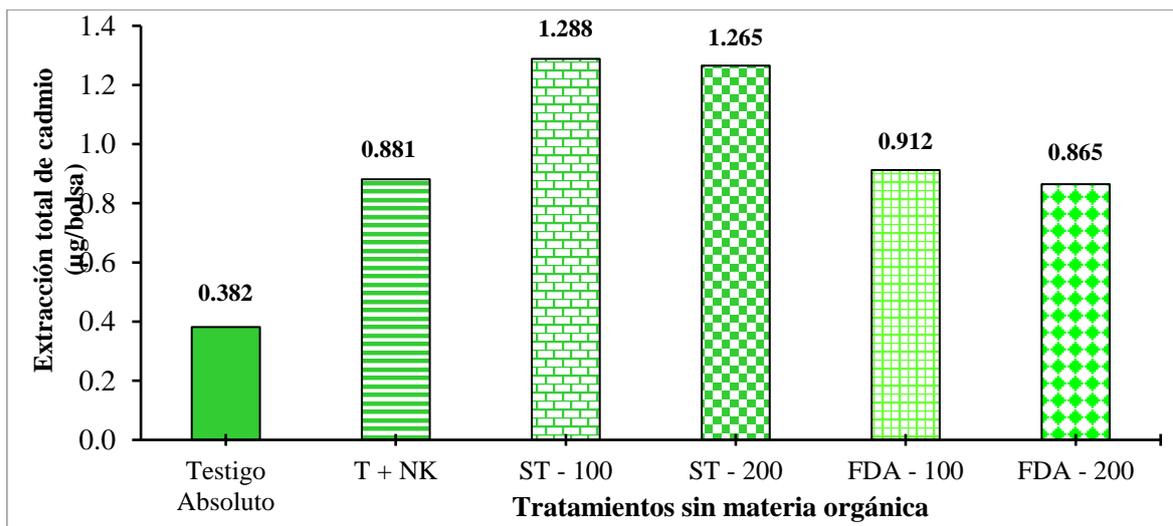


Figura 7: Efecto de las fuentes fosfatadas sin aplicación de materia orgánica en la absorción de cadmio en la parte aérea del cacao

En los tratamientos con aplicación de materia orgánica, como se aprecia en la Tabla 15 y Figura 8, estadísticamente no hubo diferencias de significación entre las fuentes fosfatadas, siendo más bien evidente el efecto de la materia orgánica en el tratamiento Testigo con NK (T+NK+MO), no hallándose explicación para este hecho.

Tabla 15: Prueba de Duncan ($\alpha= 0.05$) del efecto de las fuentes fosfatadas con aplicación de materia orgánica en la absorción de cadmio por la parte aérea del cacao

Tratamiento	Extracción total de Cd (µg/bolsa)	Significación
T+NK+MO	3.755	a
ST-100+MO	2.616	b
FDA - 100 + MO	2.495	b
ST - 200 + MO	2.435	b
FDA -200+MO	2.248	b

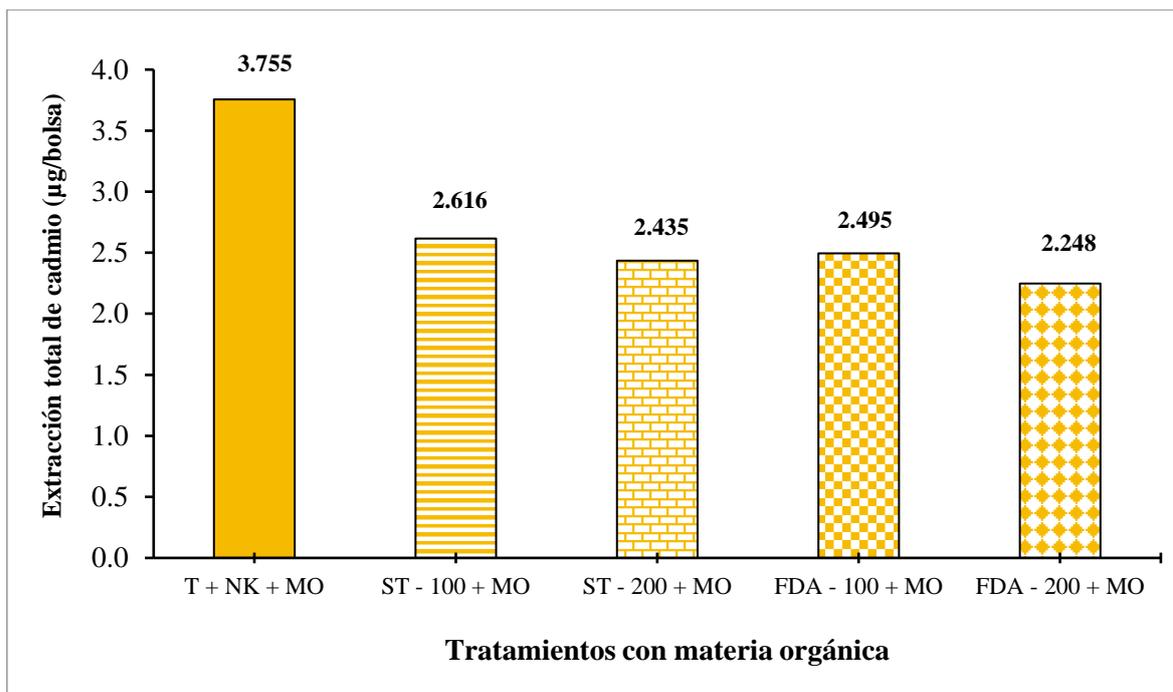


Figura 8: Efecto de las fuentes fosfatadas con aplicación de materia orgánica en la absorción de cadmio por la parte aérea del cacao

La prueba de Duncan de los resultados generales de la influencia de la materia orgánica y fertilizantes fosfatados en la absorción de Cd se presenta en la Tabla 16 y Figura 9. Se observa que todos los tratamientos que llevaron el material orgánico ocuparon los primeros lugares en la absorción de Cd por los plántones de cacao, debido probablemente al efecto importante que tiene la materia orgánica en la mejora de las propiedades físicas, químicas y biológicas y por lo tanto en el crecimiento de las plantas. Resulta indudable que este mayor crecimiento haya provocado la mayor absorción de todos los nutrientes esenciales y con ellos de este metal pesado, incluyendo a los tratamientos testigo. Resultados similares reporta Cuenca (2012) en el cultivo de maíz, atribuyendo ello al mayor desarrollo y peso seco de las plantas. A diferencia del presente experimento los resultados de Cuenca (2012) mostraron que el mayor desarrollo vegetativo condujo a una menor concentración del metal en las plantas.

Tabla 16: Prueba de Duncan ($\alpha = 0.05$) del efecto de las fuentes fosfatadas y aplicación de materia orgánica en la absorción de cadmio por plantones de cacao

Tratamiento	Extracción total de Cd	
	($\mu\text{g}/\text{bolsa}$)	Significación
T + NK + MO	3.755	a
ST - 100 + MO	2.616	b
FDA - 100 + MO	2.495	b
ST - 200 + MO	2.435	b
FDA - 200 + MO	2.248	b
ST - 100	1.288	c
ST - 200	1.265	c d
FDA - 100	0.912	c d
T + NK	0.881	c d
FDA - 200	0.865	d
Testigo Absoluto	0.382	e

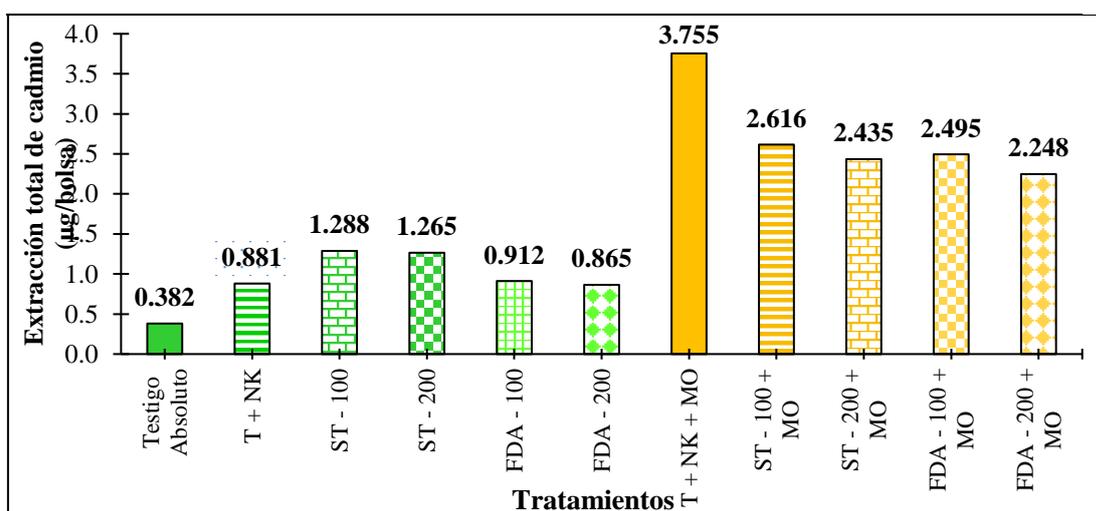


Figura 9: Resultados generales de la absorción de cadmio en tejidos de la parte aérea del cacao por efecto de la aplicación de fuentes fosfatadas y materia orgánica

4.4. CADMIO DISPONIBLE EN EL SUELO

En el suelo se determinó el Cd disponible cuyos resultados se presentan en las Tablas 17 al 19 y Figuras 10 al 12.

La prueba de Duncan de la Tabla 17 y la Figura 10, nos muestran el efecto de los fertilizantes fosfatados sin aplicación de materia orgánica en la disponibilidad de Cd en el suelo. Se observa que el ST en sus dos niveles y el FDA en su nivel más alto superaron estadísticamente al FDA en su nivel bajo, que fue el que aportó menos Cd disponible,

comparando los tratamientos con fertilizantes fosfatados. Entre los tratamientos Testigo, no hubo diferencias estadísticas, aunque numéricamente el testigo con NK presentó mayor disponibilidad de Cd, debido probablemente al Cd aportado por la Urea y KCl.

Tabla 17: Prueba de Duncan ($\alpha=0.05$) del efecto de las fuentes fosfatadas sin aplicación de materia orgánica en el Cd disponible del Suelo

Tratamiento	Cadmio disponible (ppm)	Significación
ST - 200	0.0253	a
ST - 100	0.0235	a
FDA - 200	0.0191	a
FDA - 100	0.0166	b
T + NK	0.0147	b
Testigo Absoluto	0.0138	b

Los resultados obtenidos guardaron cierta similitud con los de Bonomelli *et al.* (2003), quienes al aplicar 30 ppm P en forma de ST, encontraron que el Cd disponible se incrementó de 0.11 a 0.128 ppm en un Inceptisol, de 0.021 a 0.041 ppm en el Alfisol, de 0.029 a 0.081 en el Andisol mientras que, en el Ultisol, hallaron que la fertilización fosfatada triplicó la concentración de Cd en el suelo respecto al Testigo, de 0.010 a 0.033 ppm.

Estos resultados, difieren de los obtenidos por Sánchez *et al.* (2011), quienes reportan que aplicando hasta 150 ppm P en forma de fosfato dihidrógeno de potasio, en suelos previamente contaminados con 250 ppm Cd, el Cd disponible disminuyó en los suelos. Como se menciona en la Revisión de Literatura, los resultados de este experimento, son hasta cierto punto contradictorios, pues si existe actualmente temor por la fertilización fosfatada es porque se sabe que son fuente de contaminación.

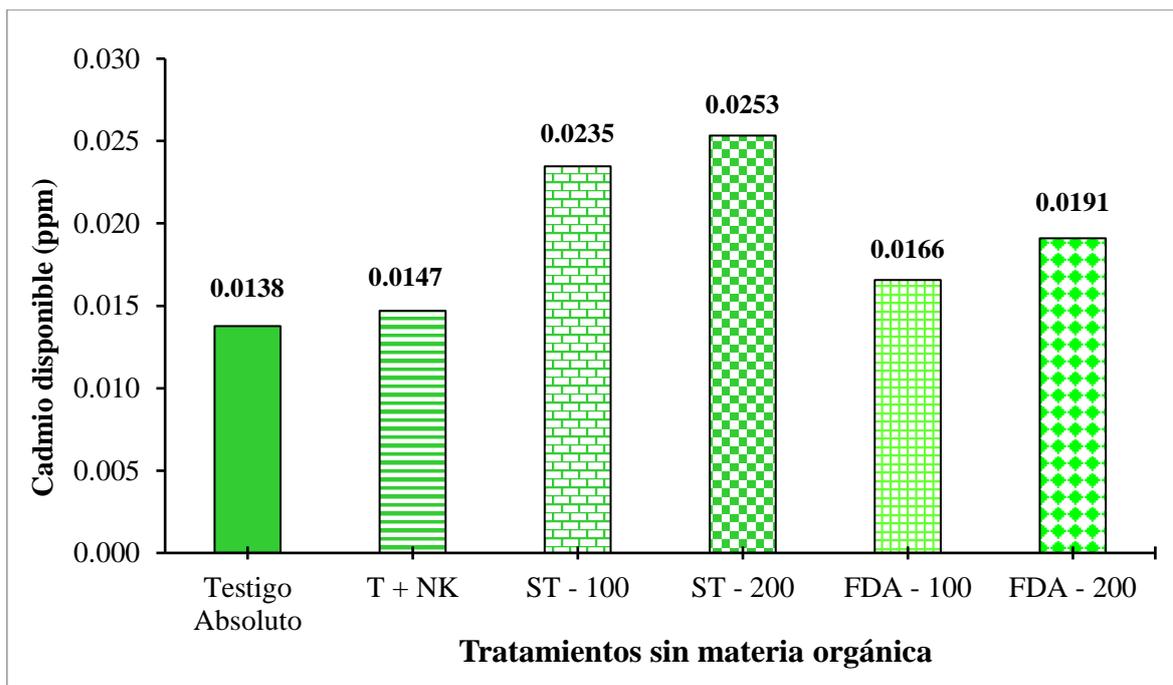


Figura 10: Efecto de las fuentes fosfatadas sin aplicación de materia orgánica en el contenido de cadmio disponible en el suelo

Con aplicación de materia orgánica, los resultados de Cd disponible del suelo se presentan en la Tabla 18 y Figura 11. Se observa que estadísticamente, con una sola excepción (T+NK+MO), no se encontraron diferencias entre los tratamientos, pero numéricamente, con los niveles más altos de aplicación de P se alcanzaron mayores contenidos de Cd disponible en las tres fuentes fosfatadas, lo que resulta lógico, y sumado a ello el aporte de la materia orgánica.

Tabla 18: Prueba de Duncan ($\alpha= 0.05$) del efecto de las fuentes fosfatadas con aplicación de materia orgánica en el contenido de cadmio disponible del suelo

Tratamiento	Cadmio disponible (ppm)	Significación
FDA - 200 + MO	0.0272	a
ST - 200 + MO	0.0271	a
ST - 100 + MO	0.0247	a
T + NK + MO	0.0240	a b
FDA - 100 + MO	0.0216	b

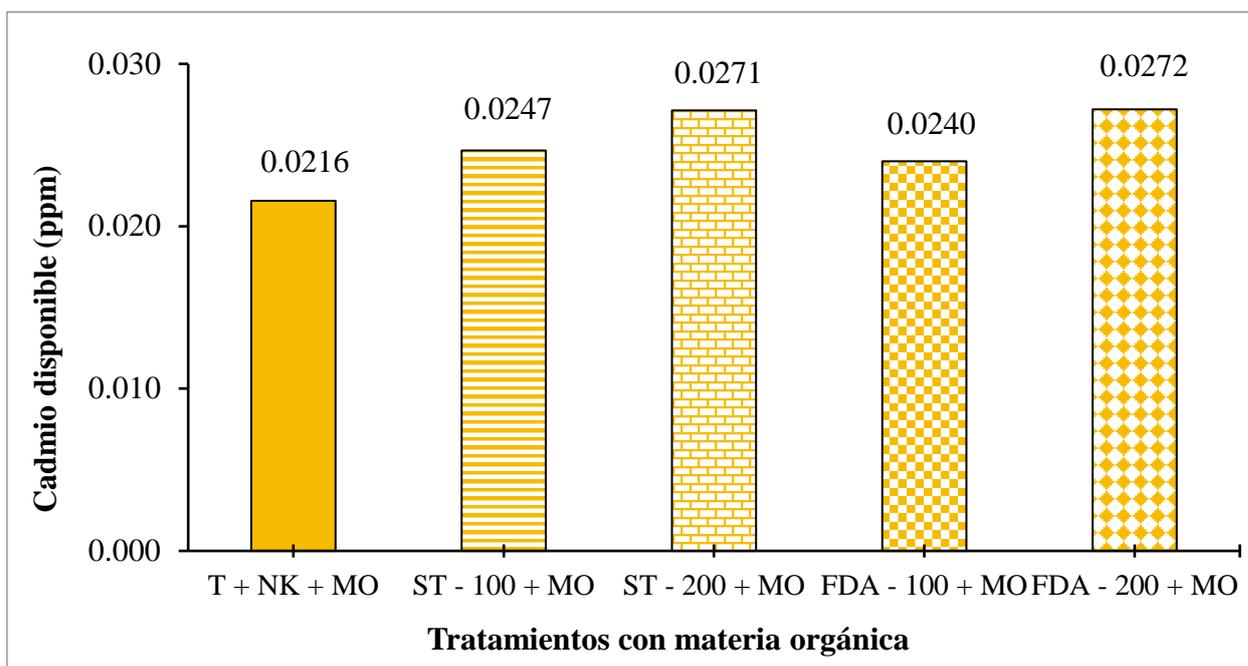


Figura 11: Efecto de las fuentes fosfatadas con aplicación de materia orgánica en el contenido de cadmio disponible del suelo

Los resultados generales del contenido de Cd disponible del suelo se presentan en la Tabla 19 y Figura 12, donde se observa una gran variabilidad entre tratamientos. Es de destacar que en el caso del FDA-200+MO produjo 0.0324 ppm Cd disponible, que en comparación con el tratamiento con FDA-200 produjo 0.0240, diferencia que se debería al aporte de la materia orgánica. Igualmente, si comparamos el ST-200+MO (0.0271 ppm) con el ST-200 (0.0227 ppm) hay una diferencia que se atribuiría también a la aplicación de materia orgánica.

Tabla 19: Prueba de Duncan ($\alpha= 0.05$) del efecto de las fuentes fosfatadas y aplicación de materia orgánica en el contenido de cadmio disponible del suelo

Tratamiento	Cadmio disponible (ppm)	Significacion (a= 0.05)			
FDA - 200 + MO	0.0272	a			
ST - 200 + MO	0.0271	a	b		
ST - 200	0.0253	a	b	c	
ST - 100 + MO	0.0247	a	b	c	
FDA - 100 + MO	0.0240	a	b	c	
ST - 100	0.0235	a	b	c	
T + NK + MO	0.0216	a	b	c	d
FDA - 200	0.0191		b	c	d
FDA - 100	0.0166			c	d
T + NK	0.0147				d
Testigo Absoluto	0.0138				d

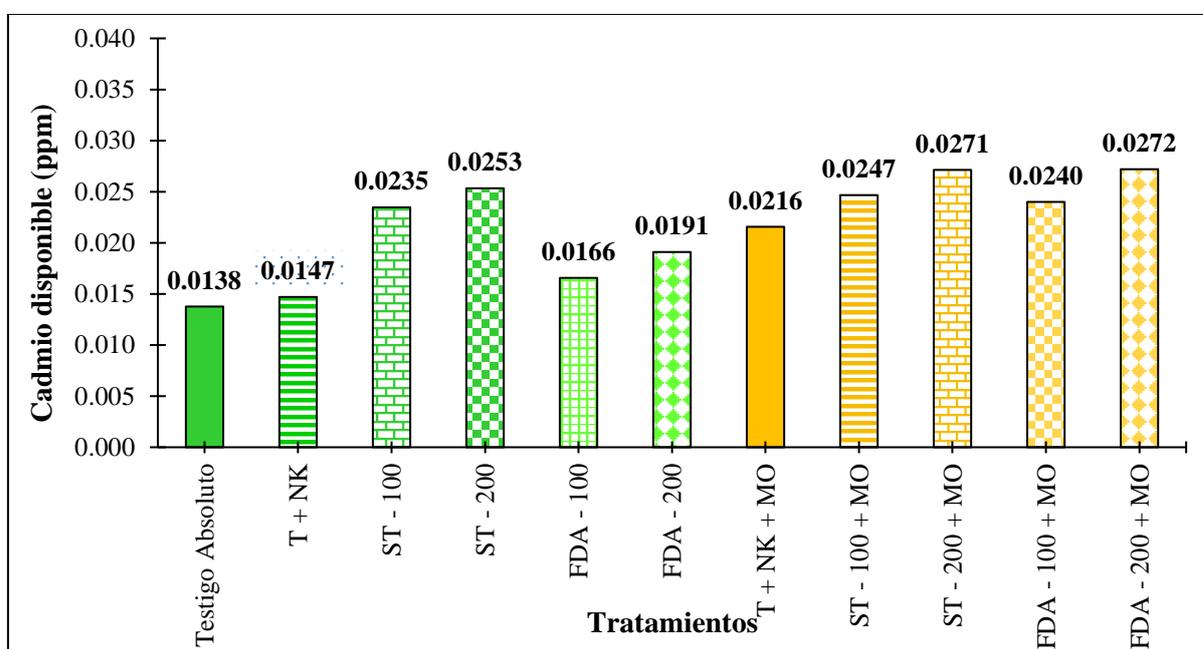


Figura 12: Resultados generales del contenido de cadmio disponible del suelo por efecto de la aplicación de fuentes fosfatadas y materia orgánica

Cárdenas (2012) halló en 20 parcelas de agricultores de la misma zona geográfica, que el contenido de Cd disponible varió de 0.35 a 1.82 ppm con un promedio de 0.66 ppm y considerando un límite máximo permisible de 0.99 ppm, sólo 3 parcelas de las 20 analizadas, sobrepasaron dicho límite, mientras que, en nuestro caso, los contenidos de Cd disponible fueron mucho menores.

V. CONCLUSIONES

1. En el rendimiento de materia seca, el superfosfato triple superó significativamente al FDA en los dos niveles de aplicación, cuando no se aplicó materia orgánica. La aplicación de estiércol hizo que el FDA alcanzara más altos rendimientos que el ST en sus dos niveles. Todos los tratamientos en los que se aplicó estiércol, alcanzaron los primeros lugares en forma significativa, incluyendo al Testigo con NK.
2. En relación a la concentración de cadmio en la parte aérea de los plantones, cuando no se aplicó estiércol, el ST produjo mayor concentración del metal que el FDA aunque no hubo significación estadística entre las fuentes fosfatadas excepto con el Testigo Absoluto, La concentración de Cd en los tejidos con aplicación de los fertilizantes varió de 0.2875 a 0.3725 ppm, estadísticamente superior al Testigo Absoluto que alcanzó 0.1359. Con aplicación del estiércol la concentración de Cd se incrementó en todos los tratamientos, incluyendo los tratamientos Testigo, variando de 0.448 hasta 0.690 ppm. Comparando los fertilizantes, el ST siguió ocupando los primeros lugares.
3. En la extracción total de Cd por la parte aérea, cuando no se aplicó estiércol, no hubo diferencias de significación entre las fuentes fosfatadas, alcanzando valores de 0.865 hasta 1.307 $\mu\text{g}/\text{bolsa}$, aunque los mayores valores correspondieron al ST. La aplicación de materia orgánica produjo los mayores valores (2.248 a 3.755 $\mu\text{g}/\text{bolsa}$) de extracción de Cd por la parte aérea del cacao incluyendo al tratamiento testigo que extrajo la mayor cantidad de Cd.
4. En cuanto al cadmio disponible, sin aplicación de estiércol, el ST alcanzó mayores valores que el FDA en ambos niveles. Con aplicación de materia orgánica en los tratamientos con fertilizantes fosfatados, el FDA en su nivel más alto y el ST en sus dos niveles alcanzaron los mayores valores. El tratamiento Testigo también alcanzó nivel alto de disponibilidad de Cd al aplicarse materia orgánica. En general, la aplicación de estiércol de vacuno como fuente de materia orgánica, incrementó los niveles de Cd disponible del suelo.

V. RECOMENDACIONES

1. Efectuar trabajos similares con diversos productos orgánicos puros determinando su aporte de cadmio.
2. Determinar el aporte de cadmio de diferentes fertilizantes y su transformación o dinámica en el suelo

VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Abanto, M. 2016. Fuentes fosfatadas en dos suelos en la concentración de cadmio foliar en maíz bajo condiciones de invernadero. 2016. Tesis Ing° Agr°. UNA – La Molina.

Acuña, G. 2000. Invertir hoy para el desarrollo del mañana. La carretera marginal de la selva. Revista Venezolana de Análisis de Coyuntura VI (1):327-332.

Alloway, B. 1990. Heavy metals in soils. John Wiley & Sons, Inc. N.Y. 339p.

Arévalo, E., Arévalo C.O., Baligar, V.C. y He, Z.L. 2017. Heavy metal accumulation in leaves and beans of cacao (*Theobroma cacao* L.) in major cacao growing regions in Perú. Science of the Total Environment, 605, 792-800.

Bonomelli, C., Bonilla, C. y Valenzuela, A. 2003. Efecto de la fertilización fosforada sobre el contenido de cadmio en cuatro suelos de Chile. Pesquisa Agropecuaria Brasileira 38(10):1179-1186. En línea: www.scielo.br.

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.

Ceccon, E. 2008. La Revolución Verde: tragedia en dos actos. Ciencias 1(91):21-29. Universidad Nacional Autónoma de México. En: Redalyc. Sistema de Información Científica. Red de Revistas Científicas de América Latina, el Caribe, España y Portugal.

Contreras, F., Herrera, T. e Izquierdo, A. (2005). Efecto de dos fuentes de carbonato de calcio (CaCO₃) sobre la disponibilidad de cadmio para plantas de cacao (*Theobroma cacao* L.) en suelos de Barlovento, estado Miranda. Venesuelos 13:52-63. En línea: www.venesuelos.org.ve

Cuenca, E. 2012. Efecto de la materia orgánica y fuentes de calcio en la toxicidad de cadmio en maíz (*Zea mays* L.). Tesis MSc. Especialidad de Suelos. UNA La Molina. Lima. Perú.

Chávez, J. 2020. “Efecto de Fuentes y tres niveles de materia orgánica, en la reducción de la absorción de Cadmio en almendras de cacao en Leoncio Prado”. Tesis Maestría en Ciencias Agrícolas. UNAS. Tingo María

Galán, E. y Romero, A. 2008. Contaminación de Suelos por Metales Pesados. *Macia* 10: 48-60.

García, I. y Dorronsoro, C. 2011. Tecnología de Suelos. Tema 15. Contaminación por Metales Pesados. Disponible en <http://edafología.ugr.es/conta/tema15/introd.htm>.

He, Q. B., & Singh, B. R. (1993). Effect of organic matter on the distribution, extractability and uptake of cadmium in soils. *Journal of soil science*, 44(4), 641-650.

Herrera, T. 2000. La contaminación con cadmio en suelos agrícolas. Venesuelos. Revista de la Sociedad Venezolana de la Ciencia del Suelo y del Instituto de Edafología de la Facultad de Agronomía de la Universidad Central de Venezuela. Vol. 8. N° 1 y 2. En línea: www.saber.ucv.ve

Huamaní, H., Huauya, M., Mansilla, L., Florida, N., Neira, G. 2012. Presencia de metales pesados en cultivo de cacao (*Theobroma cacao* L.) orgánico. *Acta Agronómica* 61(4):339-344.

Huerta, K. y Martínez, A. 2018. La Revolución Verde. *Revista Iberoamericana de y Cambio Climático* 4(8):1040-1052.

Kabata-Pendias, A. y Pendias, H. 2000. Trace Elements in Soils and Plants. Third Edition. CRC Press. Boca Raton

Kirkham, M.B. 2006. Cadmium in Plants on Polluted Soils: Effects of Soil Factors, Hyperaccumulation and Amendments. *Science Direct. GEODERMA* 137:19-32.

Loganathan, P., Hedley, M., Gregg, P. y Currie, L. 1997. Effect of phosphate fertilizer type on the accumulation and plant availability of cadmium in grassland soils. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 47:169-178.

Marti, L., N., Bulba, J. y Cavagnaro, M. 2002. Metales pesados en fertilizantes fosfatados, nitrogenados y mixtos. *Rev. FCA UNCuyo*. Tomo XXXIV, N° 2. https://bdigital.uncu.edu.ar/objetos_digitales/2829/martiagrarias2-34-02.pdf

McGowen, S.L., Basta, N.T. and Brown, G.O. 2001. Use of Diammonium Phosphate to Reduce Heavy Metal Solubility and Transport in Smelter-Contaminated Soil. *J. Environm. Qual.* 30:493-500.

McLaughlin, M.J. and Singh, B.R. 1999. *Cadmium in Soil and Plants*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, London.

Mengel, K. y Kirkby, E. 2000. *Principios de Nutrición Vegetal*. International Potash Institute. Basel. Switzerland

Oliveira, C. de, Amaral-Sobrinho, N., Mazur, N. y Soares-Dos Santos, F. 2003. Solubilidad de cadmio y zinc en suelos agrícolas tratados con lodo residual enriquecido. (En línea) *Terra Latinoamericana* Vol. 21 N° 3 (citado 2013-03-11). Disp. en internet. <http://redalyc.uaemex.mx/src/inicio/ArtPdfRed.jsp?iCve=57321306> ISSN 1870-9982.

Prieto, J., Gonzales, C., Román, A. y Prieto, F. 2009. Contaminación y fitotoxicidad en Bioeconomía plantas por metales pesados provenientes de suelos y agua. *Tropical and subtropical Agroecosystems* 10(1):29-44. Redalyc. Sistema de Información Científica. Disponible en <http://redalyc.uaemex.mx>

Ramtahal, G., Chang Yen, I., Ahmad, N., Bekele, I., Bekele, F., Maharaj, K. y Harrynanan, L. 2015. Prediction of soil cadmium bioavailability to cacao (*Theobroma cacao* L.) using single-step extraction procedures. *Communications in soil science and plant analysis* 46(20):2585-2594.

Roberts, T. 2014. Cadmium and Phosphorous Fertilizers: The Issues and the Science. Science Direct. Procedia Engineering 83:52-59. Disponible online www.sciencedirect.com

Rodríguez, J., Alcalá, J., Hernández, A., Rodríguez, H., Ruiz, F., García, J. y Díaz, P. 2014. Elementos traza en fertilizantes y abonos utilizados en agricultura orgánica y convencional. Revista mexicana de Ciencias Agrícolas 5(4):695-701.

Ross, S. 1994. Sources and forms of potentially toxic metals in soil-plant systems. En: Toxic metals in soil-plant systems. Pp. 3-25.

Rueda, G., Rodriguez, J. y Madriñán, R. 2011. Metodologías para establecer valores de referencia de metales pesados en suelos agrícolas. Perspectivas para Colombia. Acta Agronómica 60(3):203-218. www.revistas.unal.edu.co.

Sánchez B, G. 2016. Ecotoxicología del Cadmio. Facultad de Farmacia. Universidad Complutense

Sánchez, N., Rivero, C. y Martínez, Y. 2011. Cadmio disponible en dos suelos de Venezuela: efecto del fósforo. Revista INGENIERÍA UC 18(2):7-14. Univ. de Carabobo. Valencia, Venezuela. [www:revistaing uc.edu.ve](http://www.revistaing uc.edu.ve) Redalyc.

Sierra, C. 2016. Fuentes Fertilizantes Fosfatados, ¿Cuál es la mejor para mi suelo? El Mercurio. En: <https://www.elmercurio.com/campo/noticias/análisis/2016/07/14fuentes-fertilizantes-fosfatadas-cual-es-la-mejor-fuente-fosfatada-para-mi-suelo.aspx>

Traina, S.J. 1999. The Environmental Chemistry of Cadmium. In: M.j. Laughlin & B.R. Singh Cadmium in Soil and Plants

Villanueva, L. (s.f.). Evaluación del impacto de los fertilizantes fosfatados en la acumulación de Cadmio en suelos cultivados con maíz (*Zea mays*). Tesis M.Sc. Gestión y Planificación Ambiental. Universidad de Chile.

Zasoski, R.J. and Burau, R.G. 2015. A rapid nitric-perchloric acid digestion method for multi-element tissue analysis. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*. <http://tandfonline.com/loi/lcss20>.

VIII. ANEXOS

Tabla 20. Análisis de varianza del rendimiento de materia seca de la parte aérea de los plantones de cacao

ANVA

F. DE VARIACION	GL	SC	CM		Fcal	Ftab
Tratamientos	10	35.63138	3.5631	AS	245.95	2.13; 2.91
Sin M.O	5	2.07661	0.4153	AS	28.67	2.50; 3.63
Con M.O	4	2.17615	0.5440	AS	37.55	2.66; 3.95
Sin M.O vs Con M.O	1	31.37862	31.3786	AS	2165.96	4.14; 7.47
Error Experimental	33	0.47808	0.0145			
Total	43	36.10945				

CV = 3.04%

Tabla 21. Análisis de varianza de la concentración de Cd en la parte aérea de los plantones de cacao

ANVA

F. DE VARIACION	GL	SC	CM		Fcal	Ftab
Tratamientos	10	1.02865	0.1029	AS	28.288	2.13; 2.91
Sin M.O	5	0.13672	0.0273	AS	7.520	2.50; 3.63
Con M.O	4	0.12825	0.0321	AS	8.817	2.66; 3.95
Sin M.O vs Con M.O	1	0.76368	0.7637	AS	210.013	4.14; 7.47
Error Experimental	33	0.12000	0.0036			
Total	43	1.14865				

CV = 14.77%

Tabla 22. Análisis de varianza de la absorción de Cd por la parte aérea de los plantones de cacao

F. DE VARIACION	GL	SC	CM		Fcal	Ftab
Tratamientos	10	SC	4.2414	AS	66.595	2.13; 2.91
Sin M.O	5	42.41390	0.4389	AS	6.892	2.50; 3.63
Con M.O	4	2.19472	1.4363	AS	22.552	2.66; 3.95
Sin M.O vs Con M.O	1	5.74528	34.4739	AS	541.284	4.14; 7.47
Error Experimental	33	34.47389	0.0637			
Total	43	2.10174				

CV = 14.50%

Tabla 23. Análisis de varianza del contenido de Cd disponible del suelo

F. DE VARIACION	GL	SC	CM		Fcal	Ftab
Tratamientos	10	0.0007054	0.0000705	AS	3.524	2.13; 2.91
Sin M.O	5	0.0003726	0.0000745	AS	3.723	2.50; 3.63
Con M.O	4	0.0002401	0.0000600	S	2.999	2.66; 3.95
Sin M.O vs Con M.O	1	0.0000927	0.0000927	S	4.631	4.14; 7.47
Error Experimental	33	0.0004403	0.0000200			
Total	43	0.0011457				

CV = 20.72%

Tabla 24. Resultados generales del rendimiento de materia seca

Tratamiento		1	2	3	4	Suma	Prom
1	Testigo Absoluto	2.93	2.89	2.80	2.72	11.34	2.836
2	T + NK	3.08	3.07	3.04	3.06	12.24	3.061
4	ST - 100	3.31	3.50	3.51	3.55	13.87	3.468
5	ST - 200	3.99	3.43	3.59	3.60	14.60	3.651
6	FDA - 100	2.95	2.78	2.90	2.94	11.58	2.894
7	FDA - 200	3.24	3.26	3.17	3.07	12.75	3.187
						76.39	3.183
3	T + NK + MO	5.26	5.71	5.40	5.39	21.75	5.438
8	ST - 100 + MO	4.60	4.53	4.53	4.54	18.19	4.549
9	ST - 200 + MO	4.76	4.43	4.52	4.55	18.25	4.563
10	FDA - 100 + MO	4.74	4.92	4.81	4.84	19.30	4.826
11	FDA - 200 + MO	5.14	4.96	4.98	4.99	20.07	5.018
						97.58	4.879
	Totales	43.999	43.479	43.246	43.241	173.96	3.954

Tabla 25. Resultados generales de la concentración de cadmio en la parte aérea de los
plantones de cacao

Tratamientos		1	2	3	4	Suma	Prom
1	Testigo Absoluto	0.14	0.11	0.12	0.17	0.54	0.135
2	T + NK	0.33	0.34	0.22	0.26	1.15	0.288
4	ST - 100	0.44	0.33	0.37	0.35	1.49	0.373
5	ST - 200	0.31	0.34	0.38	0.36	1.39	0.348
6	FDA - 100	0.27	0.21	0.27	0.44	1.19	0.298
7	FDA - 200	0.25	0.27	0.23	0.40	1.15	0.288
						6.91	0.288
3	T + NK + MO	0.73	0.74	0.64	0.65	2.76	0.690
8	ST - 100 + MO	0.63	0.53	0.52	0.62	2.30	0.575
9	ST - 200 + MO	0.60	0.49	0.47	0.57	2.13	0.533
10	FDA - 100 + MO	0.52	0.43	0.60	0.52	2.07	0.518
11	FDA - 200 + MO	0.50	0.39	0.43	0.47	1.79	0.448
						11.05	0.553
	Totales	4.720	4.180	4.250	4.810	17.96	0.408

Tabla 26. Resultados generales de la absorción total de cadmio por la parte aérea de los
plantones de cacao

Tratamientos		1	2	3	4	Suma	Prom
1	Testigo Absoluto	0.410	0.318	0.336	0.462	1.526	0.382
2	T + NK	1.016	1.044	0.669	0.796	3.525	0.881
4	ST - 100	1.458	1.155	1.297	1.243	5.153	1.288
5	ST - 200	1.236	1.165	1.366	1.295	5.062	1.265
6	FDA - 100	0.811	0.881	0.730	1.228	3.649	0.912
7	FDA - 200	0.797	0.584	0.783	1.295	3.459	0.865
						22.374	0.932
3	T + NK + MO	3.842	4.224	3.453	3.502	15.020	3.755
8	ST - 100 + MO	2.895	2.402	2.355	2.813	10.465	2.616
9	ST - 200 + MO	2.857	2.169	2.123	2.592	9.741	2.435
10	FDA - 100 + MO	2.463	2.115	2.885	2.517	9.980	2.495
11	FDA - 200 + MO	2.570	1.936	2.142	2.344	8.992	2.248
						54.198	2.710
	Totales	20.353	17.993	18.140	20.087	76.572	1.740

Tabla 27. Resultados generales del contenido de cadmio disponible del suelo

Tratamientos		1	2	3	Suma	Prom
1	Testigo Absoluto	0.0133	0.0133	0.0147	0.0413	0.0138
2	T + NK	0.0173	0.0213	0.0187	0.0573	0.0191
4	ST - 100	0.0253	0.0240	0.0211	0.0704	0.0235
5	ST - 200	0.0293	0.0267	0.0200	0.0760	0.0253
6	FDA - 100	0.0107	0.0147	0.0187	0.0441	0.0147
7	FDA - 200	0.0160	0.0253	0.0307	0.0720	0.0240
					0.3611	0.0201
3	T + NK + MO	0.0227	0.0240	0.0180	0.0647	0.0216
8	ST - 100 + MO	0.0213	0.0307	0.0220	0.0740	0.0247
9	ST - 200 + MO	0.0200	0.0307	0.0307	0.0814	0.0271
10	FDA - 100 + MO	0.0147	0.0160	0.0190	0.0497	0.0166
11	FDA - 200 + MO	0.0270	0.0213	0.0333	0.0816	0.0272
					0.3514	0.0234
Totales		0.2176	0.2480	0.2469	0.7125	0.0216

Tabla 28. Cantidades de fertilizantes y materia orgánica aplicados

Clave	Niveles de P ₂ O ₅ (mg/bolsa)			Niveles de compost (g)	Suelo (g)	Aplicación Complementaria
	Fuentes de Fósforo					
	S. Triple	F.D.A.	R.F.			
T1	0	0	0	0	1500	0
T2	0	0	0	75	1425	0
T3	0	0	0	0	1500	+ NK
T4	0	0	0	75	1425	+ NK
T5	766	0	0	0	1500	+ NK
T6	1533	0	0	0	1500	+ NK
T7	0	750	0	0	1500	+ NK
T8	0	1500	0	0	1500	+ NK
T9	0	0	1500	0	1500	+ NK
T10	0	0	3000	0	1500	+ NK
T11	766	0	0	75	1425	+ NK
T12	1533	0	0	75	1425	+ NK
T13	0	750	0	75	1425	+ NK
T14	0	1500	0	75	1425	+ NK
T15	0	0	1500	75	1425	+ NK
T16	0	0	3000	75	1425	+ NK