

UNIVERSIDAD NACIONAL HERMILIO VALDIZÁN
FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AGRONÓMICA



**RELACIÓN ENTRE LAS CARACTERÍSTICAS DEL SUELO Y LA
CONCENTRACIÓN DE CADMIO EN LOS TEJIDOS DE LA PLANTA DE
CACAO (*Theobroma cacao* L.) EN PUMAHUASI, HUÁNUCO**

**TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE
INGENIERO AGRÓNOMO**

TESISTA

VILLANUEVA JARA PILAR KATERIN

ASESOR

Ing. M. Sc. IGNACIO CÁRDENAS SEVERO

HUÁNUCO – PERÚ

2019

DEDICATORIA

A Dios por estar conmigo y bendecirme en cada momento de mi vida.

A mis padres: Dionicia y Alberto por haberme enseñado a ser mejor persona cada día con su amor y comprensión, por estar conmigo en los buenos y malos momentos.

A mis hermanos por su apoyo incondicional y su paciencia, que me apoyaron en todo momento con sus conocimientos y su tiempo.

En memoria de mi abuela Zenobia, por apoyarme, darme fuerzas y sabios consejos.

AGRADECIMIENTO

A los agricultores que colaboraron con sus parcelas: Francisco Natividad Aparicio, Francisco Natividad Rodríguez, Jaime Zósimo Calixto.

A todos los docentes que contribuyeron en mi educación profesional en especial a aquellos que me exigieron dar lo mejor en los estudios.

A la Escuela Profesional de Ingeniería Agronómica.

Al Ing. M. Sc. Severo Ignacio Cárdenas, como asesor en el trabajo de investigación.

A los miembros del jurado: Ing. M. Sc. Liliana Vega Jara y al Ing. M. Sc. Kadir John Márquez Dávila.

A la Universidad Nacional Hermilio Valizán de Huánuco.

A la Dirección de Investigación Universitaria que hizo posible que se lleve a cabo el proyecto cacao.

Al Ing. en Recursos Naturales Renovables mención conservación de suelos y aguas, Sánchez Rodríguez Miguel, por su colaboración con los análisis de suelos y asesoramiento respectivo.

A todas aquellas personas que colaboraron directa e indirectamente e hicieron que este proyecto de investigación concluya.

RESUMEN

La investigación se realizó con el propósito de relacionar la concentración del cadmio en el sistema suelo-planta (SSP). Se eligieron tres parcelas representativas, una con manejo convencional, tradicional y orgánico respectivamente, con plantaciones de cacao cuya edad fue de ocho años. Los suelos fueron muestreados mediante la técnica del muestreo estratificado y las plantas a través del muestreo por conglomerados, la unidad de muestreo en suelos fue de 1 m² y una planta para los tejidos. Las propiedades fisicoquímicas de los suelos fueron analizadas en el laboratorio mediante métodos estándares, la concentración de cadmio total fue determinado mediante el método USEPA 3050B, la concentración del cadmio disponible empleando EDTA 0,05 M y para los tejidos de las plantas de cacao se utilizó el método por digestión. Según los resultados, la concentración de cadmio en los granos está relacionado funcionalmente con la concentración de cadmio en hojas funcionales y las hojarasca; mientras que la concentración de cadmio disponible en el suelo, tiene relación, de acuerdo a las parcelas, con MO, pH, CaCO₃, CIC, P, entre otros. Se concluye, que la concentración del cadmio en los granos de cacao supera los límites permisibles, a pesar que las concentraciones de este elemento en el suelo están por debajo de los límites máximos permisible. Se recomienda realizar otros estudios que profundice explicar la funcionalidad de la planta del cacao en la concentración del cadmio en el sistema suelo-planta-atmósfera, el fraccionamiento del Cd en el suelo y sobre la generación de tecnologías que permitan mitigar la acumulación del metal en las almendras del cacao.

Palabras claves: cadmio, cacao, granos, sistema suelo-planta.

ABSTRACT

The study was developed with the purpose of the linked the cadmium concentration in the soil-plant system (SSP). Were selected three representative of the cocoa farm, conventional, traditional and organic management, in this farms there are cocoa crops of eight years old. The soils were sampled using the stratified technique and the plants were by cluster sampling, the soil sampling unit was 1 m² and for tissue was a plant. The physicochemical properties were analyzed in the laboratory by standard methods, the concentration of total cadmium in the soil was determined by the USEPA 3050B method, the concentration of the available cadmium was determined using 0.05 M EDTA, and cadmium in cocoa plant tissues was determined for the digestion method. According to the results of the analysis, the cadmium concentration in the grains presented a functionally related with the cadmium concentration in functional leaves and dead leaves; the concentration of cadmium available in the soil, is related according to the plots with MO, pH, CaCO₃, CIC, phosphorus and others properties. It is concluded that the concentration of cadmium in cocoa beans exceeds the level, although the concentrations of this element in the soil are below the maximum levels. Due to the scope of the investigation, it is recommended to develop other studies on functionality of the cocoa plant in the concentration of the cadmium in the soil-plant-atmosphere system, and the generation of technologies for mitigate the accumulation of cadmium in cocoa beans.

Key words: cadmium, cocoa, grains, soil-plant system

ÍNDICE

DEDICATORIA	i
AGRADECIMIENTO	ii
RESUMEN	iii
ABSTRACT	iv
I. INTRODUCCIÓN	1
II. MARCO TEÓRICO	4
2.1. Fundamento teórico.....	4
2.1.1. Origen y clasificación taxonómica del cacao (<i>Theobroma cacao</i> L.)	4
2.1.1.1 Grupos genéticos del cacao	4
2.1.1.2. Requerimientos edafoclimáticos	4
2.1.2. Presencia del cadmio y de otros metales pesados en los suelos agrícolas	7
2.1.3. Origen de la contaminación del suelo por cadmio	8
2.1.3.1. Origen natural.....	8
2.1.3.2. Origen antropogénico.....	8
2.1.4. Factores que afectan la disponibilidad y movilidad del Cadmio en los suelos agrícolas.....	9
2.1.5. Dinámica de metales en el suelo.....	12
2.1.6. Ingreso, transporte y bioacumulación del Cd en las plantas	12
2.1.7. Toxicidad del cadmio en las plantas.....	13
2.1.8. Comportamiento de los metales en el sistema suelo-planta	14
2.1.9. Estrategias de tolerancia al cadmio.....	15
2.2. Antecedentes	16
2.3. Hipótesis.....	18
2.3.1. Hipótesis general.....	18
2.3.2. Hipótesis específicas	18

2.4. Variables	19
2.4.1. Operacionalización de variables	19
III. MATERIALES Y MÉTODOS	20
3.1. Tipo y nivel de investigación	20
3.2. Lugar de ejecución	20
3.2.1. Características agroecológicas	21
3.3. Población, muestra y unidad de análisis	23
3.3.1. Población	23
3.3.1. Muestra	23
3.3.1.1. Tipo de muestreo	24
3.3.2. Unidad de análisis	28
3.4. Tratamiento en estudio	28
3.5. Prueba de hipótesis	29
3.5.1. Diseño de la investigación	29
3.5.2. Datos registrados	32
3.5.3. Técnica e instrumentos de recolección y procesamiento de información	32
3.5.3.1. Técnicas e instrumentos de recolección de información 32	
3.5.3.1. Instrumentos de recolección de información	32
3.5.3.2. Procesamiento de información	33
3.6. Materiales y equipos	35
3.6.1. Materiales e insumos	35
a) Materiales	35
b) Equipos	35
c) Herramientas	35
d) Reactivos	35
3.7. Conducción de la investigación	36
3.7.1. Selección de las especies a evaluar	36

3.7.2. Análisis de laboratorio	37
3.7.2.1. Preparación de muestras de suelo y tejidos	37
3.7.2.2. Determinación de propiedades físicas y químicas del suelo.....	37
3.7.2.3. Determinación de cadmio total en el suelo por el método (USEPA 3050B).....	38
3.7.2.4. Determinación del Cadmio disponible	38
3.7.2.5. Determinación de Cd total en tejidos de cacao (grano, hoja y hojarasca).....	39
3.7.2.6. Métodos de determinación del cadmio total y disponible	39
IV. RESULTADOS	40
4.1. Concentración de cadmio en los suelos de los sistemas cacaotales (tradicional, orgánico, convencional)	40
4.2. Bioacumulación de cadmio en tejidos (granos, hojas y hojarasca) de los sistemas cacaotales	44
4.3. Dinámica del cadmio en el sistema suelo-tejido de la planta	46
V. DISCUSIÓN.....	49
5.1. Concentración de cadmio en los suelos de los sistemas cacaotales 49	
5.2. Bioacumulación de cadmio en tejidos (hojas, granos y hojarasca) de los sistemas cacaotales.....	51
5.3. Dinámica del cadmio en el sistema suelo – órganos de la planta..	52
VI. CONCLUSIONES.....	57
VII. RECOMENDACIONES	59
VIII. LITERATURA CITADA	60
ANEXOS.....	69

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1: Operacionalización de variables.	19
Cuadro 2: Población de plantas de cacao.	23
Cuadro 3: Muestras del sistema del cultivo de cacao	24
Cuadro 4: Características de las parcelas de cacao estudiadas	29
Cuadro 5: Variables observadas para el estudio de la dinámica del cadmio en el sistema suelo-planta de cacao	32
Cuadro 6: Métodos de determinación de Cd total Cd disponible suelos cacaotales y tejidos de cacao	39
Cuadro 7: Estadísticos descriptivos de las características fisicoquímicas de los suelos de las parcelas de cacao.	41
Cuadro 8: Significancia de T pareada para las propiedades fisicoquímicas de los suelos.	42
Cuadro 9: ANAVA de la concentración de Cd a nivel de transectos y profundidades de tres parcelas.	43
Cuadro 10: Estadísticos descriptivos de las características de los tejidos (grano, hoja y hojarasca) de las parcelas de cacao.	45
Cuadro 11: Coeficientes de correlación entre la concentración del Cd en el sistema suelo-planta y las características de las profundidades de los suelos de 0-30 cm y de 30 – 60 cm.	48

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Mapa de ubicación de las parcelas de estudio.	22
Figura 2: Detalles del muestreo del suelo por transecto.	25
Figura 3: Muestreo de suelo por profundidad de 0- 0.30 m y 0.30-0.60 m a una distancia de 0.35 m del tallo.	26
Figura 4: Muestreo de hojas.	27
Figura 5: Muestreo de hojarasca.	27
Figura 6: muestreo de mazorcas.	28
Figura 7: Concentración de Cd total en suelos en tres sistemas de manejo en profundidades (0-60 cm).	44
Figura 8: CdDS (Cadmio disponible del suelo), CdH (Cadmio en hojas), CdHo (Cadmio en hojarasca) y CdG (Cadmio en granos) en parcelas de cacao tradicional, orgánico y convencional.	46

I. INTRODUCCIÓN

El cacao (*Theobroma cacao* L.) es uno de los cultivos comerciales más importantes del trópico, principalmente porque produce semillas que son utilizados en la fabricación de chocolate (Garg 2017). La producción mundial de cacao en grano se concentra principalmente en los continentes de África y América. Según la FAO (2019), en el mundo se produce alrededor de 5 201 108 toneladas; siendo los países con mayor producción en el 2017, Costa de Marfil (2 034 000 toneladas), Ghana (883 652 toneladas), Indonesia (659 776 toneladas) y Nigeria (32 8263 toneladas); y en América, destacan Brasil con una producción de 235 809 toneladas y Ecuador con 205 955.

En el Perú, la diversidad genética del cacao cultivado es alta, ya que se cultivan el 60% de las variedades existentes en el mundo, entre ellos destacan los cacaos finos, por su sabor y aroma, que le otorga competitividad al producto (Villavicencio 2019). La producción de cacao en grano viene incrementándose desde hace 10 años, creciendo a una tasa promedio de 15,6 % anualmente, por ejemplo, en el año 2018 la producción fue de 135 300 toneladas, con un incremento de 11,0 % en relación al 2017, debido a las mayores cosechas registradas en las regiones de Piura, Pasco, Ucayali y Cajamarca (MINAGRI, 2019). El 93% de la producción se concentra en las regiones de San Martín 46, 293 t. (42%), Junín 21, 400 t. (19%), Cusco 10,789 t. (9%), Ucayali 8, 622 t. (8%), Huánuco 6,491 t. (6%), Ayacucho 5,544 t. (5%) y Amazonas 4,218 t. (4%). Huánuco, conjuntamente con las regiones de Ucayali y San Martín son las regiones con mayor expansión, porque el cacao es un cultivo estratégico para la producción alternativa al cultivo de coca (Mendoza 2018).

Sin embargo, existe una preocupación en la cadena de comercio del cacao a nivel mundial, debido a la presencia de Cd en las semillas, un insumo

básico de la industria del chocolate, el cual es una amenaza para la sostenibilidad de la competitividad de la cadena del cacao en el Perú. El cadmio (Cd) es un elemento que se moviliza a través de agua y aire, y en el organismo humano se acumula en los riñones e hígado y es responsable de enfermedades graves, ya que es tóxico y de alta permanencia (Villavicencio 2019). Desde el primero de enero del 2019, en la Unión Europea (UE) está vigente el Reglamento N° 488/2014, que establece los límites máximos de Cd que varía de 0,10 a 0,80 mg/kg para cuatro tipos de productos específicos de cacao y chocolate (Diario Oficial de la Unión Europea 2014), mientras que según Ramírez et al. (2017), la Organización Mundial del Cacao (ICCO) restringe las exportaciones cuando la concentración de Cd en almendras supera 0,6 mg/kg.

En las parcelas del cacao, es importante conocer la dinámica del metal desde la perspectiva del sistema suelo-planta-atmósfera para generar conocimiento que permitan orientar estrategias (Florida *et al.* 2018) y tecnologías conducentes a la obtención de almendras de cacao que cumplen con los estándares del comercio internacional en cuanto al contenido del Cd. Bajo esta perspectiva, se realizó un estudio sobre la dinámica del Cd en el marco del concepto sistema suelo-planta (SSP).

El SSP es un sistema abierto (Bonadeo y Cantero 2011) donde el Cd se moviliza desde el suelo a la planta y en este hasta el grano, pero también hay ingresos del metal al suelo por reciclaje de órganos de la planta de cacao, incorporaciones mediante fertilización e incluso con la escorrentía, así como salidas a través de la comercialización de granos. El estudio se realizó en tres parcelas del centro poblado de Huamancoto de la provincia de Leoncio Prado, donde los agricultores mostraron predisposición e interés con la investigación. Entre los aportes de la investigación para el manejo del Cd en los sistemas

cacaoteros, se resaltan la información para los actores de la cadena sobre su contenido en almendras y en el SSP y promover su mitigación.

Objetivos

Objetivo general

Analizar las relaciones entre la concentración del cadmio en el sistema suelo-planta de cacao y las propiedades fisicoquímicas de los suelos de las plantaciones de cacao (*Theobroma cacao* L.) en Pumahuasi, Huánuco.

Objetivos específicos

1. Explicar las asociaciones entre las concentraciones de cadmio y las propiedades fisicoquímicas de los suelos de las plantaciones de cacao (*Theobroma cacao* L.) en la localidad de Huamancoto, Pumahuasi, Huánuco.
2. Explicar las concentraciones de cadmio en los tejidos de hoja, hojarasca y granos de las plantas de cacao (*Theobroma cacao* L.) en las parcelas cacaoteras de la localidad de Huamancoto, Pumahuasi, Huánuco.
3. Analizar la relación funcional de la dinámica del cadmio en los sistemas suelo-planta de las plantaciones de cacao (*Theobroma cacao* L.) en la localidad de Huamancoto, Pumahuasi, Huánuco.

II. MARCO TEÓRICO

2.1. Fundamento teórico

2.1.1. Origen y clasificación taxonómica del cacao (*Theobroma cacao* L.)

El origen del cacao, es aún controversial. Algunos autores, como Motamayor *et al.* (2002), mencionan que el cacao es un árbol nativo originario de las regiones tropicales húmedas de América Latina, entre América del Sur y América Central, mientras que Thomas *et al.* (2012) indican que el cacao es originario de la cuenca del Amazonas, pero resalta que habría sido domesticado en Mesoamérica. El cacao cultivado pertenece al Orden Malvales, Familia Esterculiaceae, Género *Theobroma* (Cuatrecasas 1964), la cual cuenta con más de 22 especies (Arvelo *et al.* 2017).

2.1.1.1 Grupos genéticos del cacao

Según la genotipificación, de 1241 accesiones de cacao provenientes de América Latina, realizada por Motamayor *et al.* (2008) existen 10 grupos genéticos: Marañón, Curaray, Iquitos, Nanay, Contamana, Amelonado, Purús, Nacional y Guayana. La mayoría de estos grupos estarían presentes en territorio peruano (Marañón, Curaray, Iquitos, Nanay y Contamana).

2.1.1.2. Requerimientos edafoclimáticos

a) Altitud

El cacao crece mejor en las zonas tropicales cultivándose desde el nivel del mar hasta los 800 metros de altitud. Sin embargo, en latitudes cercanas al ecuador las plantaciones desarrollan normalmente en mayores altitudes que van del orden de los 1,000 a 1,400 msnm. La altitud no es un factor determinante como lo son los factores climáticos y edafológicos en una plantación de cacao. Observándose valores normales de fertilidad, temperatura, humedad, precipitación, viento y energía solar, la altitud constituye un factor secundario (Gonzales 2008).

b) Temperatura

MINAGRI (2003) reporta que este factor influye en el crecimiento del cacao, en la floración y fructificación, así como en la obtención de brotes foliares normales y bien repartidos a lo largo del año. La temperatura media anual óptima debe ser alrededor de 24°C. La temperatura media de las mínimas diarias debe ser superior a 18°C. El principal efecto de bajas temperaturas se manifiesta en la velocidad del crecimiento vegetativo, desarrollo del fruto y, en menor grado, en la intensidad de floración. Por otro lado, las temperaturas extremas muy altas pueden provocar alteraciones fisiológicas en el árbol por lo que es un cultivo que debe estar bajo sombra para que los rayos solares no incidan directamente y se incremente la temperatura.

c) Precipitación

La cantidad de lluvia adecuada para el cacao está entre los 1,500 y 3,500 mm/año, con una distribución no menos de 150 mm/mes. Se considera como un límite seco para el cacao la isoyeta de 1,220 mm/año, con periodo seco no mayor de tres meses, Según INTA (2009).

d) Viento

Según Gonzáles (2008), es el factor determinante de evapotranspiración del agua en la superficie del agua y de la planta. En el cultivo de cacao queda muy difícil separar el efecto de los vientos de la radiación solar ya que el sombrero interfiere, profundamente, en estos dos factores. El viento provoca una caída prematura de la hoja con su consecuente defoliación posiblemente a causa de la pérdida excesiva de agua y daño mecánico. Los vientos continuos pueden provocar una desecación, muerte y caída de las hojas; en zonas cacaoteras es preciso el empleo de cortavientos para evitar daños en las plantas, estos cortavientos suelen estar formados por distintas especies arbóreas (frutales o madereras), que se disponen alrededor de los árboles de cacao. En plantaciones donde la velocidad del viento es de

4 m/s y con muy poca sombra, es frecuente observar defoliaciones fuertes. Comparativamente, en regiones con velocidades de viento del 1 a 2 m/s no se observa dicho problema.

e) Luminosidad

López *et al.* (2015) mencionan que la luz es importante para el desarrollo, la morfología y la fisiología del cacao, especialmente para la fotosíntesis, la cual ocurre a baja intensidad aun cuando la planta este a plena exposición solar; en éste último los efectos de la radiación solar pueden considerarse bajo dos aspectos principales, los efectos térmicos y los de iluminación. El grado de luz que la planta debe recibir está relacionado, a la edad de la plantación, a la disponibilidad de agua y humedad ambiental, y al estado nutrimental del suelo. Además, el efecto de la luminosidad puede ser regulado mediante una adecuada distribución de los árboles de sombra y del manejo mediante la poda tanto de los árboles de sombra como de los de cacao. En plantaciones jóvenes, menores de cinco años, el cacao requiere de un 30% de luminosidad; en plantaciones adultas, conforme la planta crece y desarrolla una copa densa que favorece el autosombreamiento, las necesidades de luminosidad aumentan a un 50 a 75%. Es importante tomar en cuenta que la luz directa del sol ocasiona daños a la planta de cacao, por lo que debe evitarse el establecimiento de cacaotales a plena exposición solar o con un sombreamiento deficiente.

f) Suelos

El cacao puede ser cultivado en diferentes tipos de suelo, pero generalmente necesita suelos profundos, livianos y ricos en nutrientes. Los suelos deben tener una buena capacidad de retención de agua y no contener capas impermeables. Las inundaciones son toleradas por las plantas sólo hasta un cierto punto. Los suelos permeables arcillo-arenosos son ideales, con 50 % arena, entre 30 a 40 % arcilla, 1 a 2 % limo y una proporción

relativamente alta de materia orgánica (mayores a 3,5 %). Las plantas de cacao toleran un pH del suelo de 5,0 – 7,5 y óptimos entre 6,5 – 7,5 lo que significa que toleran suelos ligeramente ácidos a ligeramente alcalinos. En suelos muy ricos en nutrientes pueden tolerar también valores de pH más bajos. Valores de suelo y nutrientes ideales son una relación C: N de >9 y una relación N: P 1,5 de ca. Una disponibilidad de fósforo de 8 ppm y una concentración suficiente de micronutrientes como calcio (8 ppm), potasio (0,24 ppm) y magnesio (2 ppm) para un buen crecimiento (Dostert *et al.* 2011).

2.1.2. Presencia del cadmio y de otros metales pesados en los suelos agrícolas

El cadmio, pertenece al Grupo II B de la Tabla Periódica, es un metal de color blanco brillante, dúctil, maleable y resistente a la corrosión (Traina 1999). Las principales fuentes del contenido de Cd en suelos de uso agrícola son las emisiones atmosféricas, las incorporaciones de fertilizantes y las contaminaciones accidentales (minería, industria, corrosión de estructuras metálicas galvanizadas). En tanto, la concentración total del Cd en el suelo comprende la contribución del material parental más las incorporaciones de fuentes externas, principalmente desde la actividad antropogénica (Alloway y Steinnes 1999); mientras que el Cd disponible varía en tamaño y carga, viene a ser la forma química presente en la solución del suelo, el cual puede ser en forma de cationes hidratados libres o adsorbidos en los complejos inorgánicos y orgánicos, así como los coloides inorgánicos, como la arcilla, u orgánicos, como el humus; es decir, es el Cd biodisponible para las plantas del cacao, móvil y capaz de reaccionar químicamente en el suelo (Helmke 1999).

Según García y Dorronsoro (2019) los metales pesados son aquellos elementos que tienen una densidad igual o superior a 5 g/cm³, cuando está en forma elemental, o cuyo número atómico es superior a 20 (excluyendo los metales alcalinos y alcalinos térreos). Se encuentran en la corteza terrestre menores a 0,1% y casi siempre menos del 0,01%. Dentro de los metales

pesados se encuentran dos grupos, los oligoelementos, tales como, As, B, Co, Cr, Cu, Mo, Mn, Ni, Fe, Se y Zn; y los que no cumplen ninguna función biológica, entre ellos el Cd. Los primeros, son requeridos en pequeñas cantidades por la planta y son necesarios durante su ciclo de vida, pero cuando superan ciertos umbrales se vuelven tóxicos, mientras que los del segundo grupo, en determinadas cantidades provocan disfunciones, tienen la propiedad de acumularse en los organismos vivos.

2.1.3. Origen de la contaminación del suelo por cadmio

2.1.3.1. Origen natural

La disponibilidad del Cd en la capa superficial del suelo puede deberse a procesos mecánicos, químicos, o biológicos. Por tanto, este metal puede originarse de la roca madre liberados por meteorización, también puede originar debido a las cenizas volcánicas y lixiviadas de mineralizaciones, los denominados como geogénicos (Torres 2018). Cuando el Cd se meteoriza, se concentra en el suelo y de allí pueden ser absorbidas por las plantas, incluso hasta concentraciones que les pueden causar efectos tóxicos, y acumularse en órganos que son utilizados para la alimentación de los consumidores, donde también pueden causar toxicidad (Abanto 2016).

2.1.3.2. Origen antropogénico

a) Origen por medio de las actividades mineras y refinería

La industria minera es una de las actividades económicas de mayor tradición contaminante, la cual es mayoritariamente metálica y se dedica principalmente a la producción de cadmio. Esta actividad tiene un alto impacto ambiental, ya que afecta desde el subsuelo hasta la atmósfera, incluyendo suelos y cuerpos de agua. Debido al procesamiento de los recursos minerales, se han generado grandes cantidades de residuos sólidos, líquidos y gaseosos que han ocasionado una gran cantidad de sitios contaminados (Monge-Amaya *et al.* 2008).

b) Origen por medio de agua de riego y productos químicos

Según Cuenca (2012), la utilización de fertilizantes, principalmente sintéticos, constituye un riesgo de contaminación por metales pesados a los acuíferos subterráneos, concretamente cuando sus aplicaciones se realizan sin la orientación técnica, como el balance de nutrientes. Estas aguas contaminadas luego son utilizadas para el riego de los cultivos. La fertilización fosforada es uno de las principales fuentes del Cd, porque la principal materia prima de estos fertilizantes es la roca fosfórica, constituidos principalmente por apatita, que contiene fósforo y Cd, este último en cantidades que varían entre 8 y 500 mg/kg (Bonomelli *et al.* 2003). Algunas plaguicidas, (aquellas de acción fúngica) también contaminan por Cd a los suelos agrícolas y al acuífero (Martí *et al.* 2008).

2.1.4. Factores que afectan la disponibilidad y movilidad del Cadmio en los suelos agrícolas

El pH: factor principal que interviene en la disponibilidad y movilidad del Cd. La acidez del suelo hace más disponible el Cd ya que al disminuir el pH mejora la solubilidad de los metales y la absorción por las raíces. A pH menores de seis el cadmio se adsorbe débilmente en la materia orgánica, arcillas y óxidos; mientras que a pH mayores de siete o en suelos alcalinos el cadmio no es móvil, ya que puede precipitarse con CaCO_3 , o precipitar como CdCO_3 , y por lo tanto, la adsorción del Cd se incrementa rápidamente pero depende de las características del suelo (Sánchez y Casermeiro 2016, Tantalean 2017, Roca 2019), por ejemplo, en suelos oxisoles la adsorción y desorción del Cd es mayor cuanto más alto es el pH del suelo (Tantalean 2017).

Capacidad de intercambio catiónico. Cuanto mayor es la CIC del suelo, mayor será su capacidad para fijar metales (Sánchez 2017, Cárdenas 2012). El poder de adsorción depende de su valencia y el radio iónico

hidratado; a mayor tamaño y menor valencia, quedarán menos fuertemente retenidos.

Precipitación de los metales. Las reacciones de precipitación y dilución dependen del producto de solubilidad del sólido en el agua. Los iones metálicos en la solución suelo pueden precipitar con un agente químico, generalmente aniones como fosfato, carbonato o sulfato. También pueden precipitar como hidróxidos al reaccionar con los iones oxidrilos presentes en la solución. Las precipitaciones de los metales normalmente son mayores en suelos alcalinos y calcáreos porque favorecen una baja solubilidad de estos metales o hay pocos sitios de adsorción específica. La precipitación del cadmio es poco probable que ocurra en suelos neutros y ácido, excepto cuando hay altas concentraciones de carbonatos, sulfatos o fosfatos (Cárdenas 2012).

Complejación y quelación. La complejación de metales comprende la unión del ion metálico con compuestos orgánicos e inorgánicos (Cárdenas 2011). La quelación implica inmovilizar un ion metálico con compuestos de bajo peso molecular para crear un complejo o una molécula químicamente estable. El ácido oxálico es capaz de inmovilizar iones metálicos para formar sales de oxalato en forma de cristales disminuyendo la solubilidad y disponibilidad en el medio (Huaynates 2013).

Potencial redox. En condiciones de oxidación la solubilidad del Cd disminuye al aumentar el pH; pero en medio ácido, la solubilidad es menor en condiciones reductoras que en oxidantes, probablemente debido a la formación de sulfuros y complejos organominerales insolubles (Sánchez y Casermeiro 2016).

Salinidad. El aumento en salinidad puede incrementar la movilización de metales pesados por dos mecanismos. Primero, los cationes asociados con las sales Na y K pueden reemplazar a metales pesados en lugares de

adsorción, y el otro, es que los aniones cloruro pueden formar complejos solubles estables con metales pesados tales como Cd, Zn y Hg (García y Dorrnsoro 2019).

Calcio. La presencia de altas concentraciones de Ca en los suelos puede reducir la absorción del Cd por las plantas, debido a que existe una competencia iónica entre ellos. De la misma manera, la alta concentración del Cd y Cu puede reducir la absorción de calcio y bajar la concentración de este elemento a nivel de raíces hojas y frutos de las plantas. Por lo tanto, el efecto competitivo del calcio y las consecuencias fisiológicas y químicas de un incremento del pH del suelo, disminuye la absorción del Cd por las raíces de las plantas de un cultivo (Abanto 2016).

Carbonatos. Tienen un papel importante en la retención y solubilidad de los metales en el suelo, al proporcionar sitios superficiales para las interacciones con los metales pesados, adsorción o reacciones de precipitación. Hay estudios, que evidencian la existencia de una correlación positiva entre la concentración de Cd y el contenido de carbonatos en los suelos calcáreos naturales, sin cultivar ni contaminar, lo que sugiere que los carbonatos son importantes en la acumulación del Cd en dichos suelos, básicamente por la gran afinidad de este metal por los carbonatos. En estos suelos, por lo tanto, predominarán los carbonatos de Cd precipitados (Cárdenas 2012).

Materia orgánica (MO). Los componentes de la MO proporcionan sitios para la adsorción de metales, tales como grupos carboxílicos, fenólicos, alcohólicos, enólicos-OH y grupos aminos, pudiendo ser la principal fuente de la capacidad de intercambio catiónico en las capas superficiales del suelo. La MO puede retener a los metales tanto por su CIC como su capacidad de quelante (Abanto 2016). La toxicidad de los metales pesados se potencia en gran medida por su fuerte tendencia a formar complejos organometálicos, lo

que facilita su solubilidad, disponibilidad y dispersión. La estabilidad de muchos de estos complejos frente a la degradación por los organismos del suelo es una causa muy importante de la persistencia de la toxicidad, pero también la presencia de abundantes quelatos puede reducir la concentración de otros iones tóxicos en la solución del suelo (García y Dorrosoro 2019).

Textura de los suelos. Tiene gran importancia en la retención de los metales debido a la capacidad de adsorción de las arcillas, ya que los suelos arcillosos retienen más metales por adsorción o en el complejo de cambio de los minerales de la arcilla. Por el contrario, los arenosos carecen de capacidad de fijación y puede contaminarse el nivel freático. Cada mineral de la arcilla tiene unos determinados valores de superficie específica y de descompensación eléctrica. Cuanto mayor es la superficie activa de un filossilicato, mayores son sus posibilidades de adsorber metales (Galán y Romero 2008, Cárdenas 2012).

2.1.5. Dinámica de metales en el suelo

El suelo es un medio de interface entra la biosfera, la litosfera, la hidrósfera y la atmosfera, por lo tanto, es un receptor de los metales pesados; es decir es una estación de transito de estos contaminantes. Los metales, en el suelo, pueden ser retenidos por mucho tiempo y no ser degradados y de esta manera se puede convertir en elementos contaminantes. Pero también, pueden ser tan móviles que se incorporen a los demás medios y luego a las redes tróficas donde generan problemas de intoxicación (Roca s.f).

2.1.6. Ingreso, transporte y bioacumulación del Cd en las plantas

Según Rodríguez *et al.* (2008), no existen mecanismos de entrada específico para el Cd en las plantas. Las proteínas responsables de la entrada de cadmio a las células son: el transportador específico de Ca LCT1 y la proteína IRT1, perteneciente a la familia de transportadores de Zn y Fe (ZIP). Otra familia transportadora es la Nramp, localizada en la membrana de la

vacuola, que probablemente tendría la función de movilizar el metal en el organismo de la planta más no en el ingreso por la raíz. Dentro de la célula, el Cd puede coordinarse con ligandos de S como glutatión (GSH) o fitoquelatinas (PCs) y ácidos orgánicos como el citrato. Otras posibles moléculas responsables de la quelación del cadmio son pequeñas proteínas ricas en cisteína denominadas metalotioneínas (MTs). De esta forma, los complejos Cd-ligando pueden ser transportados al interior de la vacuola o a otras células.

La bioacumulación del Cd en la planta es preferentemente en la raíz, secuestrada en la vacuola de las células, y solo una pequeña parte es transportada a la parte aérea de la planta concentrándose en tallos, hojas, frutos y semillas. Otro posible mecanismo de llegada del Cd en la vacuola es mediante un cotransportador de $\text{Cd}^{2+}/\text{H}^{+}$ ubicado en la membrana de la misma. Los transportadores de cationes CAX, implicados en el transporte de calcio a la vacuola, también transportan el Cd. Una vez en la raíz, el cadmio puede pasar al xilema a través del apoplasto y/o a través del simplasto formando complejos (Rodríguez *et al.* 2008).

2.1.7. Toxicidad del cadmio en las plantas

Los mecanismos de su toxicidad del cadmio aún no se conocen completamente. El Cd interfiere en la entrada, transporte y utilización de elementos esenciales (Ca, Mg, P y K) y del agua, provocando desequilibrios nutricionales e hídricos en la planta. El Cd también reduce la absorción de nitratos y el transporte de los mismos de la raíz al tallo, además de inhibir la actividad nitrato reductasa en tallos. Las plantas expuestas a suelos contaminados con este metal presentan modificaciones en la apertura estomática, fotosíntesis y transpiración. La clorosis, los enrollamientos de las hojas y el retraso del crecimiento son los síntomas principales y fácilmente visibles de la toxicidad del Cd en las plantas, producida por una deficiencia de

hierro, fósforo o por reducción del transporte de Mn (Benavides *et al.* 2005, Rodríguez *et al.* 2008).

2.1.8. Comportamiento de los metales en el sistema suelo-planta

El SSP se encuentra sujeto a contaminantes, y a pérdidas, mediante lixiviación, erosión y volatilización. La incorporación de los metales pesados a las plantas se produce fundamentalmente desde el suelo, a través de las raíces, y está influenciado por varios factores como, el tipo de suelo, la temperatura, pH, aireación, condiciones redox y fertilización, la especie vegetal, el momento del desarrollo y el sistema radicular, entre otros. Aparte de la absorción que tiene lugar por las raíces, las plantas también pueden incorporar cantidades significativas de algunos elementos a través de la absorción foliar. Una vez que los iones metálicos han sido absorbidos, pueden moverse por toda la planta. Este movimiento depende del tipo de metal, del órgano y edad de la planta. La proporción en que estos elementos son movilizados en el interior de las plantas disminuye según el siguiente orden: Cd>B>Zn>Cu>Pb (Roca s.f.).

Los metales pesados incorporados al suelo, pueden seguir cuatro vías:

- Quedar retenidos en la solución del suelo o bien, fijados por adsorción, complejación y/o precipitación.
- Ser absorbidos por las plantas e incorporarse a las cadenas tróficas.
- Pasar a la atmósfera por volatilización.
- Movilizarse a las aguas superficiales o subterráneas.

Una vez que los contaminantes se incorporan al suelo ocurre una serie de procesos físicos, químicos y biológicos que establecen los efectos que éste puede causar, no solo sobre el sistema, sino también sobre el resto de compartimentos ambientales y la cadena trófica. Para evaluar el impacto de contaminación del sistema suelo-planta por Cd se deben conocer la dinámica del metal en dicho sistema; es decir, cómo se origina en el suelo, su entorno,

los modelos que rigen su comportamiento y su transferencia a las plantas (transformación, retención y transporte).

2.1.9. Estrategias de tolerancia al cadmio

Las plantas han desarrollado estrategias para evitar la toxicidad de metales pesados. Una primera barrera contra el estrés por Cd, que opera principalmente a nivel de la raíz, puede ser la inmovilización de Cd por la pectina de la pared celular y los carbohidratos extracelulares (mucílago, calosa). La acumulación de los metales en los tricomas de la superficie foliar también es un mecanismo de inmovilización y defensa celular, sin embargo, la importancia de estos mecanismos puede variar de acuerdo con la concentración de Cd, las especies, el tiempo de exposición, etc. Evitando que los iones de Cd entren al citosol a través de la acción de la membrana plasmática, eso significa que la exclusión de iones de las paredes celulares de las plantas podría representar teóricamente el mejor mecanismo de defensa (Benavides *et al.* 2005, Rodríguez *et al.* 2008).

La acumulación del metal en los tricomas de la superficie foliar también es un mecanismo de inmovilización y defensa celular, otro mecanismo consiste en la reducción del transporte o aumento de la extrusión del Cd por transportadores de cationes de la membrana plasmática. Una vez dentro de la célula, el Cd, puede ser secuestrado por ácidos orgánicos, aminoácidos, fitoquelatinas y metalotioneínas, y posteriormente compartimentalizados en la vacuola para prevenir su toxicidad. Las fitoquelatinas constituyen uno de los principales mecanismos de defensa frente a metales pesados. Su síntesis tiene lugar a partir del glutatión y se induce en presencia de metales pesados. Plantas que sobreexpresan la enzima fitoquelatina sintasa muestran una mayor tolerancia frente al Cd. Otras posibles moléculas responsables de la acumulación del cadmio son las metalotioneínas (MTs) (Rodríguez *et al.* 2008).

2.2. Antecedentes

La presencia de cadmio en las almendras de cacao por encima de los límites permisibles, representa un problema para la industria cacaotera y por lo tanto también es un problema real para los agricultores de cacao del Perú porque es altamente tóxico que produce efectos nocivos en suelos, plantas, microorganismos y seres humanos (Rodríguez, 2017). El abordaje de este problema amerita de estudios desde el enfoque integral, como la determinación de la concentración del cadmio en el sistema suelo-planta. Existen estudios bajo este enfoque, en el Perú y en otros países de América Latina. En el Perú se realizaron estudios para la determinación de la concentración de cadmio total y disponible en los suelos según las normas establecidas para el estudio de suelos.

Las plantas toman el cadmio a partir de formas disponibles de este elemento en el suelo (Rodríguez, 2017); por ejemplo, Sánchez y Rengifo (2017) estudiaron la concentración de cadmio en suelos, follaje y almendra en las plantaciones de cacao de cuatro localidades de las provincias de Leoncio Prado y Tocache, ubicadas en la región Huánuco y San Martín respectivamente, cuyos resultados revelan que la concentración de cadmio en los suelos están por debajo de los límites máximos permisibles, la mayor concentración de cadmio en el follaje y la almendra se da en la etapa fenológica de plena fructificación (cinco a 10 años de edad) y que existe una asociación positiva entre la concentración de cadmio en las almendras y las hojas.

Tantalean y Huauya (2017) estudiaron la concentración de cadmio en dos tipos de suelos (aluvial y residual) y en tejidos de plantas de cacao (raíces, hojas, ramas, cáscara y almendra) de las parcelas ubicadas en Ramal de Aspuzana, del distrito de Nuevo Progreso, provincia de Tocache, San Martín y en Jacintillo, del distrito de Rupa Rupa, provincia de Leoncio Prado,

Huánuco), los resultados evidencian que la concentración del cadmio es mayor en el suelo aluvial y entre los tejidos de la planta es mayor en las ramas.

Huamani-Yupanqui *et al.* (2012), realizaron un estudio correlacional de Pearson entre el contenido de Pb y Cd disponible en el suelo con variables foliares (P, Mg, Ca, Zn, Cd, Pb) y del suelo arena, arcilla y potasio, con muestras de 22 parcelas de cacao (17 de la región Huánuco y cinco de la región Ucayali), cuyos resultados muestran que la concentración promedio de cadmio en los suelos (0,53 ppm) y hojas (0,21 ppm) son bajos. Por su parte, Cárdenas (2012) señala que los suelos de las parcelas de cacao de la región Huánuco, ubicadas en las riberas de los ríos Huallaga y Tulumayo, presentan concentraciones de cadmio de 1,82 y 1,63 ppm respectivamente y que estos incluso son más altos en las épocas secas de mayo y agosto, con promedios de 1,28 y 2,57 ppm respectivamente. Según el estudio realizado por Candelaria *et al.* (2016), la cáscara de cacao puede ser utilizado satisfactoriamente para la remoción de metales pesados de aguas residuales.

En 10 parcelas de cacao ubicadas en la Provincia de Santo Domingo de los sáchilas, Ecuador, mediante la técnica instrumental de absorción atómica acoplada con horno de grafito, fue determinada una concentración de 0.35 mg/kg de cadmio en las almendras de cacao, cuando lo permisible es de 0.05 mg/kg (Acosta y Pozo 2013). En Colombia, en las parcelas de cacao de los municipios de Nilo y Yacopi, luego de una caracterizaron de los niveles del cadmio en suelo, hojarasca, hoja y almendra de cacao; encontraron una alta variabilidad de la distribución del cadmio en los suelos y plantas entre los municipios y dentro de las parcelas, pero los niveles son superiores a los reportados en Ecuador, Perú y Honduras; también detectaron altas correlaciones del nivel de cadmio en la almendra con las formas disponibles entre los 0-30 cm del suelo (fases intercambiable, carbonatos, materia orgánica y óxidos de Mn) que representa a su vez el cadmio en la almendra.

2.3. Hipótesis

2.3.1. Hipótesis general

Existen asociaciones entre la concentración del cadmio en los sistemas suelo-planta de cacao y las propiedades físicoquímicas de los suelo en las parcelas de cacao (*Theobroma cacao* L.) en Pumahuasi, Huánuco.

2.3.2. Hipótesis específicas

1. Las concentraciones de cadmio en el suelo están asociados a las propiedades físicoquímicas de los suelos de las parcelas de cacao (*Theobroma cacao* L.) en la localidad de Huamancoto, Pumahuasi, Huánuco.
2. Existen diferentes niveles de concentraciones de cadmio en los tejidos de hoja, hojarasca y granos de las plantas de cacao (*Theobroma cacao* L.) de las parcelas cacaoteras de la localidad de Huamancoto, Pumahuasi, Huánuco.
3. Existe relación funcional en la dinámica del cadmio en los sistemas suelo-planta de cacao (*Theobroma cacao* L.) en la localidad de Huamancoto, Pumahuasi, Huánuco.

2.4. Variables

2.4.1. Operacionalización de variables

En el cuadro siguiente se presenta las variables estudiadas, así como sus dimensiones e indicadores.

Cuadro 1. Operacionalización de variables.

Variable	Variables	Dimensiones	Indicadores
Independiente	Suelo	Profundidades: 0 – 30 cm., 30 – 60 cm.	mg/kg (ppm)
		Concentración de Cd: total y disponible	
Dependiente	Planta	Concentración de Cd en tejidos de cacao	mg/kg (ppm)
Interviniente	Modelo de manejo	Tradicional	Prácticas agronómicas
		Orgánico	
		Convencional	

Fuente: elaboración propia.

III. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Tipo y nivel de investigación

Tipo de investigación

Se realizó un estudio no experimental, es decir, un estudio observacional, en el marco del enfoque de la investigación cuantitativa (Hernández, Fernández y Baptista, 2014). Se observaron datos de las concentraciones de Cd y de las propiedades fisicoquímicas de tres suelos, de uso actual en la producción de cacao, categorizados según modelo de manejo (tradicional, orgánico y convencional) y la bioacumulación de dicho elemento en los tejidos de los órganos funcionales (hojas y granos) y muertos (hojarasca) de las plantas de cacao de ocho años de edad.

Nivel de investigación

El estudio fue de alcance exploratorio, descriptivo y correlacional (Hernández, Fernández y Baptista, 2014). En el SSP, se describió la concentración del Cd en el componente suelo y la bioacumulación del elemento metálico en el componente planta; luego se realizaron estudios relacionales entre las concentraciones de Cd y las propiedades fisicoquímicas de los suelos, así como la concentración del elemento metálico en el suelo con la bioacumulación en las hojas, granos y la hojarasca del sistema planta.

3.2. Lugar de ejecución

La investigación se realizó en el centro poblado de Huamancoto, que pertenece a Pumahuasi, capital del distrito de Daniel Alomía Robles, cuya ubicación política y la posición geográfica es el siguiente:

Ubicación política:

Región : Huánuco
Provincia : Leoncio prado
Distrito : Daniel Alomía Robles
Centro poblado : Huamancoto

Posición geográfica:

Altitud : 664 msnm
Latitud Sur : -09° 12' 25.07"
Longitud Oeste : -75° 56' 17.04"

3.2.1. Características agroecológicas

Según Villanueva (2008), Huamancoto pertenece a un Bosque muy Húmedo Sub Tropical (bmh-ST), temperaturas que oscilan desde los 18 a 28 °C, precipitaciones frecuentes que superan los 200 mm/h, temperaturas que oscilan entre 18° y 28° y una precipitación promedio de 3 200 mm anual. En la Figura 1 se presenta el mapa de ubicación de las parcelas donde se realizó el estudio.

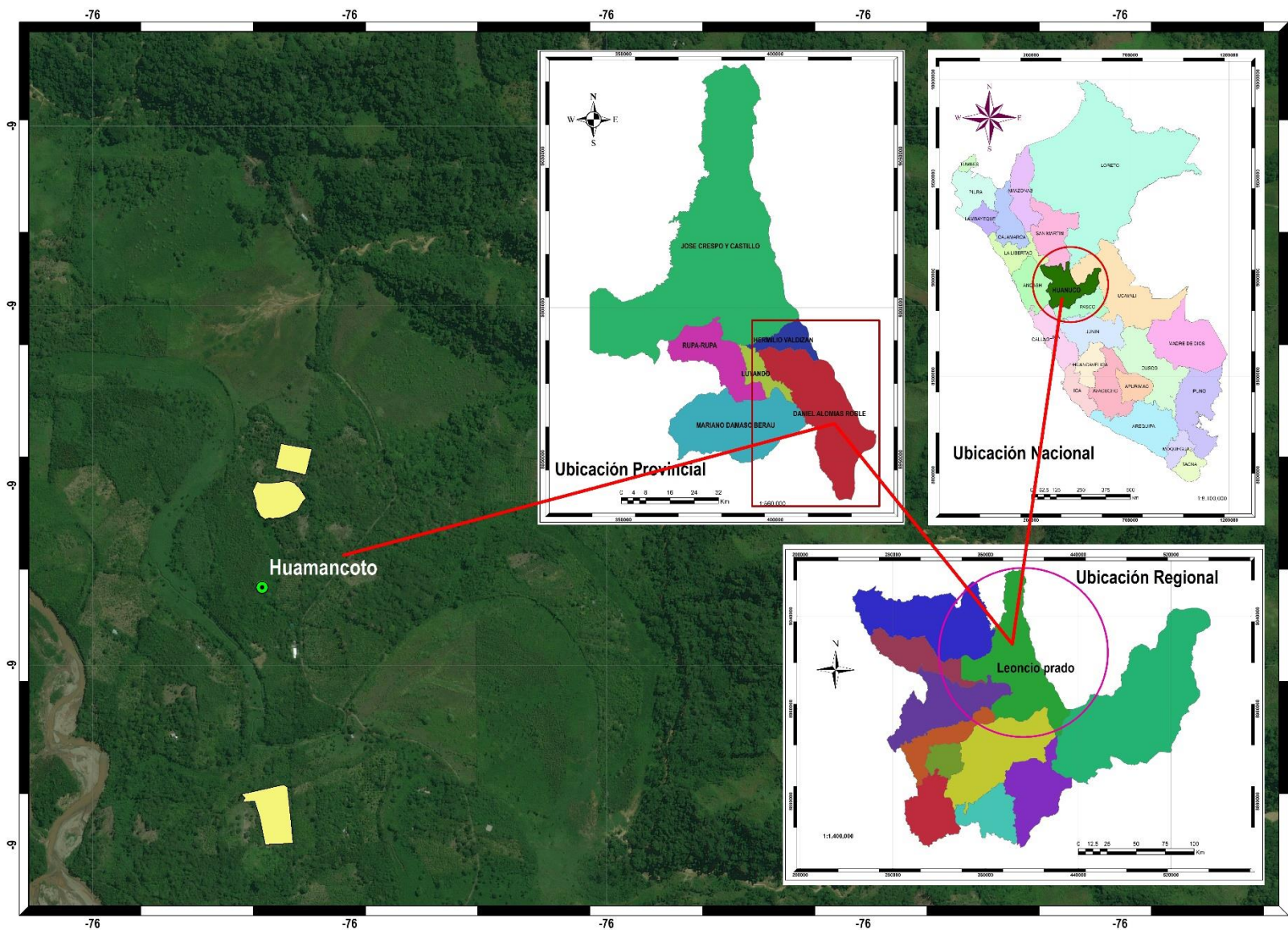


Figura 1. Mapa de ubicación de las parcelas de estudio.

3.3. Población, muestra y unidad de análisis

3.3.1. Población

La población de las plantas de cacao, estuvo conformado de la siguiente manera:

Cuadro 2. Población de plantas de cacao.

Parcela	Área (m ²)	Población de plantas
Tradicional	9017	1002
Orgánico	4526	503
Convencional	7648	850

Fuente: elaboración propia.

3.3.1. Muestra

Las muestras fueron obtenidas independientemente para las observaciones de la concentración de Cd en suelos y en los tejidos de los órganos de las plantas. Cada una de las parcelas fueron subdivididas en cuatro transectos, un transecto es una secuencia de suelos sobre la base de la gradiente (Zavala *et al.* 2014) para explorar y describir la concentración de Cd entre las áreas exploradas por las plantas de cacao, así como para conocer la estructura interna de los perfiles de los suelos (Laporte y Morales 1994) y su relación funcional con las concentraciones de Cd. Las muestras de los suelos fueron tomadas a dos profundidades (0 – 30 cm y 30 – 60 cm) adaptando la metodología de Rodríguez (2017). Los muestreos de los órganos de las plantas fueron realizados con base a lo establecido por MINAGRI (2019) y EIP IICA (2019). En el cuadro siguiente se presentan los detalles de las muestras tomadas para los estudios:

Cuadro 3. Muestras del sistema del cultivo de cacao

Muestra	Dimensión	Transecto	N° agujeros /número de plantas	Muestra de campo	muestras enviado a laboratorio
Suelo	0-30 cm	4	10	0.5 kg/muestra	200 g
	30-60 cm			0.5 kg/muestra	
Planta	Grano	4	5	1 mazorca/planta	20 g
	Hoja			4 hojas/plata	
	Hojarasca			20g/planta	

Fuente: elaboración propia.

3.3.1.1. Tipo de muestreo

El muestreo de suelo se realizó mediante las técnicas del muestreo estratificado y por conglomerado (Di Renzo et al. 2009), para suelos y para tejidos respectivamente. Para el muestreo de suelos se fijaron cuatro transectos en cada parcela (uno por estrato), las muestras fueron obtenidas mediante la técnica de muestreo aleatorio simple en zig-zag sobre la línea transecto (Bautista *et al.* 2011); los primeros puntos de muestreo fueron ubicados aleatoriamente en cada transecto y los siguientes nueve puntos fueron establecidos a siete metros a la diagonal de esta línea, dependiendo de la naturaleza de la parcela. En cada punto se realizaron muestreos a dos profundidades, utilizando barrenos muestreadores de 60 cm de longitud, hasta los 30 cm de la superficie y luego entre 30 – 60 cm de profundidad, y se colectaron 120 g. de suelo en cada punto y para cada profundidad,

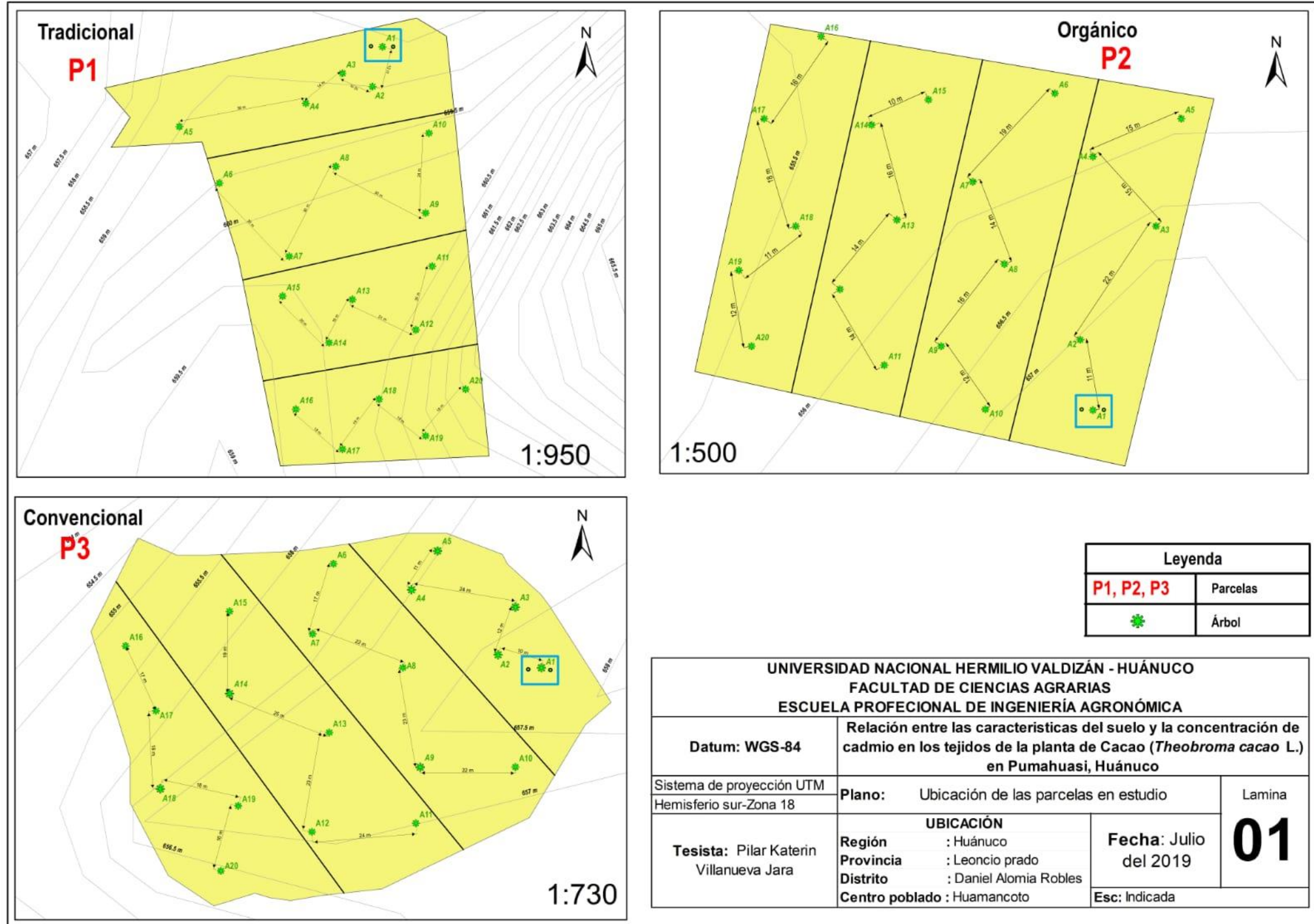


Figura 2. Detalles del muestreo del suelo por transecto.

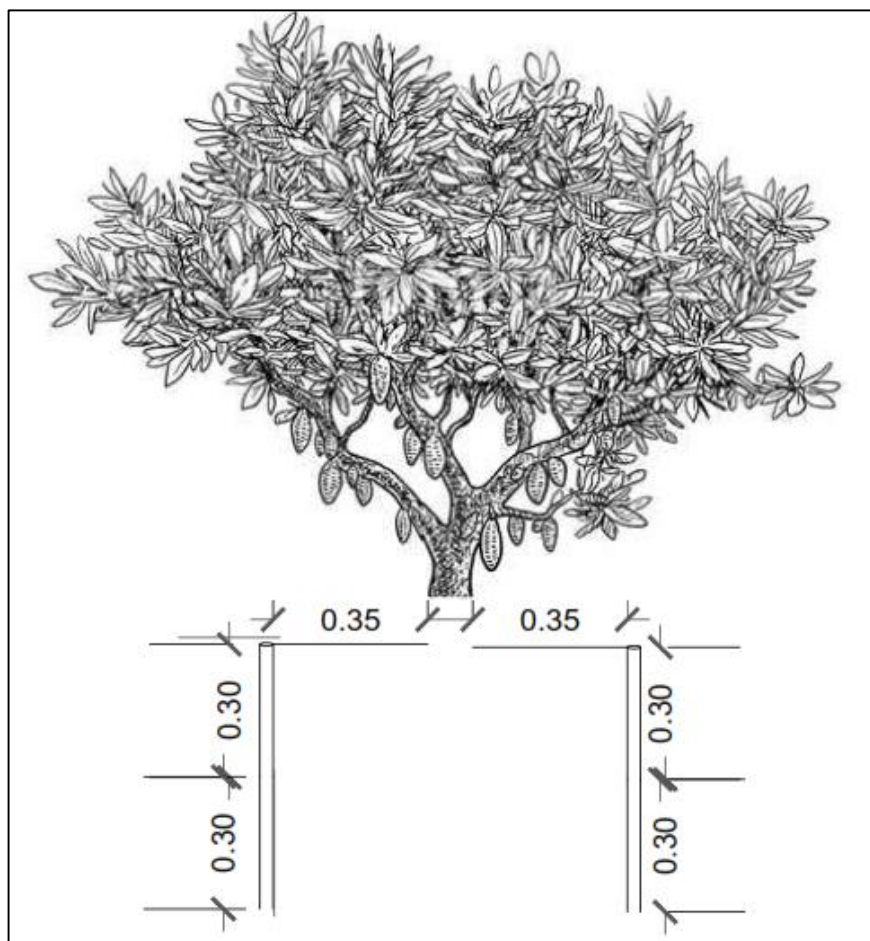


Figura 3. Muestreo de suelo por profundidad de 0- 0.30 m y 0.30-0.60 m a una distancia de 0.35 m del tallo.

El muestreo de hojas se realizó del árbol ubicado en cada punto de muestreo de suelos. En total se muestrearon cuatro hojas de la parte media del árbol (uno por cada cuadrante: este, oeste, norte y sur) y teniendo en cuenta que la hoja está madura. Los granos fueron muestreados de una mazorca, en madurez fisiológica, por árbol. Las hojarasca fueron muestreadas también de cada punto de muestreo de suelos, sobre la proyección de la copa del árbol, en este caso se tomaron 20 gramos de hojas secas (de color marrón) por punto. En la siguiente figura se presentan los detalles del muestreo de órganos (hoja, grano y hojarasca).

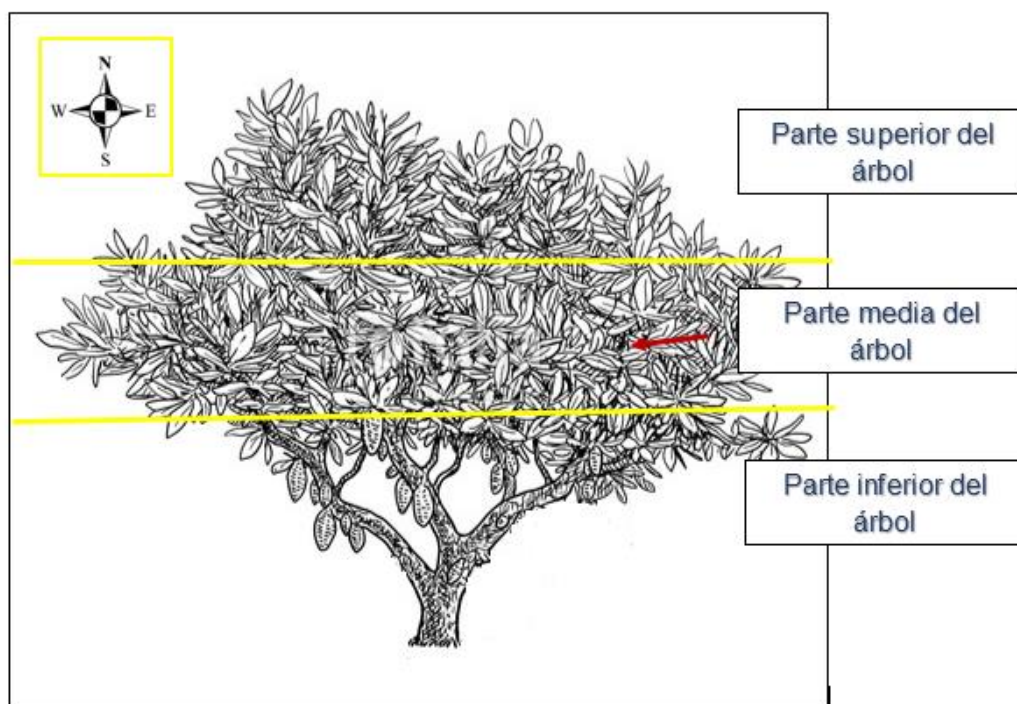


Figura 4. Muestreo de hojas.



Figura 05. Muestreo de hojarasca.



Figura 6. Muestreo de mazorcas.

3.3.2. Unidad de análisis

La unidad de análisis fue la planta de cacao, donde se observaron las concentraciones de cadmio en el SSP, los datos de la concentración de Cd fueron expresados en mg/kg.

3.4. Tratamiento en estudio

En la investigación no se utilizó ningún tratamiento porque no se administró ningún estímulo respecto la variable dependiente (Hernández, Fernández y Baptista, 2014). En el Cuadro 4 se presentan las características de las parcelas cacaotales estudiados.

Cuadro 4. Características de las parcelas de cacao estudiadas.

Parcela	Modelo de manejo	Características
01	Tradicional	Edad de la plantación: 08 años Variedad: CCN51 Relieve del suelo: plano Uso de agroquímicos: ninguno Podas: mantenimiento y fitosanitario Periodo de cosecha: 3 veces al mes (mayo y junio).
02	Orgánico	Edad de la plantación: 08 años Variedad: CCN51 Relieve del suelo: plano Fuentes de nutrientes: Compost y biol Frecuencia de abonamiento: 3 veces/año. Podas: mantenimiento y fitosanita Periodo de cosecha: 3 veces al mes (mayo y junio).
03	Convencional	Edad de la plantación: 08 años Variedad: CCN51 Relieve del suelo: plano Uso de agroquímicos: fertilizantes sintéticos. Frecuencia de abonamiento: 3 veces/año. Podas: mantenimiento y fitosanitario Periodo de cosecha: 3 veces al mes (mayo y junio).

Fuente: propietarios de las parcelas de cacao estudiados.

3.5. Prueba de hipótesis

3.5.1. Diseño de la investigación

Para los fines de la investigación, se han identificado tres parcelas, de cacao con las características representativas de la zona de estudio, cuyos detalles fueron descritas en la sección 3.4. En estas parcelas se describieron la dinámica del cadmio en el marco del concepto sistema suelo-planta. Se observaron las concentración de Cd en los suelos y la bioacumulación de este metal en los tejidos de los órganos de la planta de cacao, también se han observado los datos de las propiedades fisicoquímicas de los suelos. Los datos observados fueron organizados en una base y analizados mediante estadísticos descriptivos, análisis de correlaciones (estadístico de Pearson),

análisis de la varianza (ANAVA) y análisis de regresión, mediante la técnica de mínimos cuadrados.

El estudio de la concentración de Cd total y Cd disponible en el suelo, se realizó mediante un ANAVA, para probar la hipótesis alterna de que los promedios de la concentración del Cd son diferentes en las parcelas, así como en los transectos dentro de las parcelas, cuyo modelo matemático es el siguiente:

$$Y_{ij} = \mu + P_i + P_i(T_{ij}) + \varepsilon_{ij}$$

Donde:

Y_{ij} = concentración de cadmio.

μ = media general.

P_i = efecto de parcela.

T_j = efecto del transecto dentro de la parcela.

ε_{ij} = efecto del error aleatorio de muestreo.

El estudio de la dinámica del cadmio en el SSP, también se realizó mediante un ANAVA cuyo modelo aditivo lineal es:

$$Y_{ij} = \mu + P_i + P(S)_{ij} + \varepsilon_{ij}$$

Análisis de regresión múltiple. Se realizó para establecer la relación funcional de la bioacumulación del Cd en los granos de cacao con respecto a las concentraciones de este metal en el SSP. La hipótesis alterna probada en los análisis de regresión lineal fue $\alpha \neq 0$ y $\beta \neq 0$ y en el caso del análisis de regresión múltiple fue $\alpha \neq 0$ y $\beta_1 \neq 0$, $\beta_2 \neq 0$... $\beta_n \neq 0$. Las ecuaciones de las regresiones adoptadas fueron:

Regresión lineal simple:

$$Y = \alpha + \beta X + \varepsilon$$

Donde:

X= Variable regresora.

Y = Concentración de cadmio disponible en los suelos.

α = punto de intersección con la recta de ajuste.

β = pendiente

ε = error aleatorio del modelo de regresión.

Regresión lineal múltiple:

$$Y = \alpha + \beta_1 X + \beta_2 X + \dots + \beta_n X + \varepsilon$$

Donde:

Y = Concentración de cadmio en las semillas de cacao.

α = punto de intersección con la recta de ajuste.

X = Variables regresoras.

β_1, β_2 y β_n = pendientes de la ecuación de regresión.

ε = error de ajuste del modelo de regresión.

Donde:

Y_{ij} = concentración de cadmio

μ = media general

P_i = efecto de parcela

S_j = efecto del sistema suelo-tejido de planta

ε_{ij} = efecto del error aleatorio de muestreo

3.5.2. Datos registrados

En el cuadro siguiente se presenta las variables observadas en el estudio.

Cuadro 5. Variables observadas para el estudio de la dinámica del cadmio en el sistema suelo-planta de cacao.

Suelos			
Cadmio total (mg/kg)	Cadmio disponible (mg/kg)	Propiedades físicas	Propiedades químicas
Tejidos de cacao			
Grano Cadmio total (mg/kg)	Hoja Cadmio total (mg/kg)	Hojarasca Cadmio total (mg/kg)	

Fuente: elaboración propia.

3.5.3. Técnica e instrumentos de recolección y procesamiento de información

3.5.3.1. Técnicas e instrumentos de recolección de información

- a) **Técnicas de investigación documental o bibliográfica:** se utilizó el fichaje para construir el marco teórico y la bibliografía.
- b) **Técnicas de campo:** se empleó la observación, el cual permitió recolectar los datos directamente del campo experimental.

3.5.3.1. Instrumentos de recolección de información

a) Instrumentos y equipos de campo

- Libretas de campo
- Fichas de registro o de localización

b) Instrumentos de gabinete

- Microsoft Excel
- Programa de procesador de datos InfoStat, versión 2018e.
- Calculadora

- Libreta de gabinete
- Papel bond de 75 gr
- Sobres manila A4

a) Materiales de gabinete

- Lápiz para registros de datos.
- Libreta de campo para registros de datos.
- Lapiceros para registros de datos.

b) Materiales de campo

- Cintas de plástico color amarillo para identificación de árboles.
- Bolsas de polietileno para muestras de hoja, hojarasca, suelo.
- Marcador para identificación de las muestras.
- Bolsas de yute

c) Fichas textuales o de transcripción

- Fichas de resumen
- Fichas de comentario

3.5.3.2. Procesamiento de información

La elaboración de las bases de datos y los criterios de análisis fueron realizados con base a las necesidades de la investigación. Se tomó como referencia las consideraciones teóricas de Di Rienzo *et al.* (2009) y InfoStat (2008). La secuencia de la gestión de la información se describe a continuación.

Observación. Consistió en el registro de los valores aleatorios de las variables estudiadas, que culminó con la verificación de la calidad de los datos.

Elaboración de la base de datos. Los datos observados de las variables aleatorias, fueron organizados en una base, compatible para ser procesados con el software estadístico InfoStat.

Análisis descriptivo. Consistió en estimar los estadísticos descriptivos y de correlación con la finalidad de realizar una descripción y las asociaciones de las características de los suelos con relación a la dinámica del cadmio en el sistema suelo-planta de cacao.

Análisis inferencial. Consistió en realizar los ANAVAs mencionadas en la sección 3.5.1, previamente se verificaron el cumplimiento de los supuestos. Estos análisis fueron realizados con la finalidad de inferir sobre la concentración del cadmio en los suelos estudiados, así como en el sistema suelo-planta de cacao.

Análisis de correlación. Se realizó los análisis de correlaciones mediante el estadístico de Pearson entre todas las variables observadas en el SSP. La hipótesis estadística alterna probada en dichos análisis fue $p \neq 0$. Para los fines de este estudio se han considerado asociaciones entre variables superiores a $p = 0.68$.

Análisis de regresión. Se adoptó el modelo de regresiones lineales y múltiples para el estudio de la relación funcional de la dinámica del cadmio en el SSP de cacao. En el primer caso, la variable dependiente fue la concentración de Cd disponible en el suelo y las variables regresoras fueron la concentración de Cd total y las propiedades fisicoquímicas de los suelos; mientras que en el segundo caso la variable dependiente fue la concentración del Cd en granos y las variables regresoras fueron las concentraciones Cd en el suelo y las concentraciones de Cd en las hojas y hojarasca de las plantas.

3.6. Materiales y equipos

3.6.1. Materiales e insumos

a) Materiales

- Tejidos de órganos de plantas de cacao del cultivar CCN 51.
- Muestras de suelos de cultivo de cacao.
- Papel filtro Whatman N°45

b) Equipos

- Espectrofotómetro de emisión atómica (ICP OES)
- Software ICP NEO
- Programas de ArcGIS
- Laptop para la sistematización de la información.
- Balanza electrónica para pesado de las muestras.
- Cámara fotográfica para registros de imágenes.
- GPS.
- Estufa.
- Balanza analítica.
- Molinillo manual para café y otros granos.

c) Herramientas

- Barreno muestreador
- Tamiz (2mm)

d) Reactivos

- HNO_3 1:1
- H_2O_2 (Peróxido de hidrógeno)
- HCl (ácido clorhídrico)
- EDTA 0,05 M (ácido etilendiaminotetraacético)
- HCl_4
- NaHCO_3

3.7. Conducción de la investigación

3.7.1. Selección de las especies a evaluar

Se tomaron las coordenadas del borde de cada uno de las tres parcelas y cada uno de las plantas, seguidamente fueron marcadas con una cinta para su respectiva identificación de cinco plantas por transecto y un total de 20 plantas por parcela.

a) Muestreo de suelo

En cada punto se realizaron muestreos a dos profundidades, hasta los 30 cm de la superficie y luego entre 30 – 60 cm de profundidad. Se realizaron un total 80 submuestras por parcela, estas fueron homogenizadas por transecto obteniéndose así cuatro muestras compuestas de 500 g de suelo por parcela, estas fueron secadas a temperatura ambiente y tamizado en un tamiz de 2 mm, para el análisis fisicoquímico respectivo. Para este muestreo fue necesario emplear un barreno muestreador y bolsas de polietileno.

b) Muestreo de hojas

Se colectaron cuatro hojas maduras por árbol de la parte central de las ramas de la parte media del árbol. En total fueron muestreadas 80 hojas por parcela, que fueron trasladados al laboratorio en sobres manila, las mismas que fueron secados a 60 ° C por 72 horas y luego fueron molidas con un molinillo y homogenizadas.

c) Muestreo de granos

Los granos fueron tomados de mazorcas en madurez fisiológica según el criterio del agricultor, libres de plagas y enfermedades. Estos fueron transportados en unas bolsas de yute para su respectiva fermentación. Las almendras fueron fermentadas durante de 6 a 7 días y seguidamente fueron secadas en una estufa a 60°C por 72 horas.

d) Muestreo de hojarasca

Se tomó una muestra de 20 g de hojarasca, desde el mismo punto que se toma las muestras de suelo, luego le introdujo en un sobre manila, seguidamente fueron secadas en la estufa a 60°C por 72 horas.

3.7.2. Análisis de laboratorio

3.7.2.1. Preparación de muestras de suelo y tejidos

El molido de granos, hojas y hojarasca fueron realizadas con un molinillo, luego fueron almacenados en bolsas de polietileno previamente etiquetados y finalmente se pesaron cada una de las muestras para ser enviada al laboratorio para la determinación de la bioacumulación de Cd.

3.7.2.2. Determinación de propiedades físicas y químicas del suelo

Para los análisis de caracterización fisicoquímicos de los suelos se contrató los servicios del Laboratorio de Análisis de Suelos y Agua Lasa de Tingo María.

a) Análisis físico

Textura del suelo: %Ao, %Lo, y %Ar: método del hidrómetro de Boyoucos.

b) Análisis químico

- pH: método potenciómetro, relación suelo agua (1:1).
- Calcáreo total: método gaso-volumétrico.
- Materia orgánica: método de Walkley y Black.
- Fosforo disponible: método de Olsen modificado. Extractor NaHCO₃ 0.5 ph 8.5.
- Potasio disponible: método de ácido sulfúrico 6N.
- Capacidad de intercambio catiónico: método del acetato de Amonio 1N pH 7.0 (suelos con pH > 5.5).
- Ca: absorción atómica.

- Mg: absorción atómica.
- K: absorción atómica.
- Na: absorción atómica.

3.7.2.3. Determinación de cadmio total en el suelo por el método (USEPA 3050B)

Para la determinación de Cd en suelos y tejidos de órganos de plantas se contrató los servicios del Laboratorio Central de Investigación de la Universidad Nacional Agraria de la Selva. Según el método USEPA-3050B (Agencia de Protección Ambiental) de digestión ácida de sedimentos, lodos y suelos, la cuantificación del filtrado se realizó en el ICP OES (Espectrofotómetro de Emisión Atómica). Se tomaron cada muestra del suelo para su respectivo análisis, según la siguiente metodología:

- Pesar 2 g. de suelo, con un tamaño de partícula 2 mm, añadir 10 ml de HNO₃ 1:1, calentar a 95 °C por 5 minutos, enfriar y añadir 5 ml de HNO₃ concentrado, repetir una vez y dejar reducir la solución hasta 5 ml., dejar enfriar y añadir 2 ml de agua destilada y 3 ml de H₂O₂ (Peróxido de hidrogeno) y al cesar la efervescencia añadir 1 ml de H₂O₂.
- Repetir hasta no observar efervescencia, añadir 5 ml de HCl (ácido clorhídrico) concentrado y 10 ml de agua desionizada, calentar por 15 minutos y dejar enfriar, filtrar por gravedad, aforar a 50 ml con agua destilada y almacenar y mantener refrigerado.

3.7.2.4. Determinación del Cadmio disponible

El contenido de cadmio disponible en el suelo se determinó empleando EDTA 0.05 M. La secuencia del análisis es la siguiente:

- Pesar 5 g de suelo.
- Agitar durante dos horas con 20 ml de solución de EDTA 0,05 M.

- Los extractantes se filtran posteriormente a través de filtro de Whatman N° 542 y se determinó el Cd biodisponible por espectrofotómetro de emisión atómica.

3.7.2.5. Determinación de Cd total en tejidos de cacao (grano, hoja y hojarasca)

La secuencia de la determinación de la bioacumulación de Cadmio en los granos y hojas de cacao es la siguiente.

- Pesado de 500 mg de hojas y granos molido.
- Digerir con 10 ml de una mezcla de HNO₃ (65%) y HCl₄ (98%) de Merk en una proporción de 4: 1 respectivamente.
- La digestión se realizó en un bloque a 120°C durante 3 horas luego a 200°C durante dos horas.
- La solución dirigida se filtró a través de un papel Whatman N° 42 y se diluyó antes del análisis.
- La concentración de Cd en el filtrado se determinó utilizando Espectrofotómetro de emisión atómica.

3.7.2.6. Métodos de determinación del cadmio total y disponible

Cuadro 6. Métodos de determinación de Cd total Cd disponible suelos cacaotales y tejidos de cacao.

Métodos de determinación de cadmio en suelos			
Métodos	Reactivos	Cd total	Cd disponible
(USEPA 3050B)	Peróxido de hidrogeno Ácido clorhídrico	Suelo	Suelo
Métodos de determinación de Cd en tejidos de órganos de cacao			
Digestión	Solución ácido perclórica y NHO ₃	Granos, hojas y hojarasca.	

Fuente: elaboración propia.

IV. RESULTADOS

4.1. Concentración de cadmio en los suelos de los sistemas cacaotales (tradicional, orgánico, convencional)

Los suelos, de las parcelas de cacao estudiados, presentan variación en sus características para la profundidad de 0 – 30 cm y para la profundidad de 30 – 60 cm. En el Cuadro 07 se presentan los estadísticos descriptivos de las características fisicoquímicas de dichos suelos y en los anexos 01, 02 y 03 los estadísticos descriptivos para cada una de las parcelas. Sin embargo, algunas variables presentan mayor variación, tales como, cadmio disponible, cadmio total, contenido de fósforo, contenido de sodio y el contenido de CaCO_3 .

Cuadro 07. Estadísticos descriptivos de las características fisicoquímicas de los suelos de las parcelas de cacao.

Profundidad	Variable	Media	D.E.	Var(n-1)	CV	Min	Máx	Mediana	Asimetría	Kurtosis
0-30	Cadmio (Cd) Total (mg/kg)	0.78	0.04	0.00	5.60	0.73	0.85	0.79	-0.10	-1.38
0-30	Cadmio (Cd) Disponible (mg/kg)	0.10	0.01	0.00	8.62	0.08	0.12	0.10	0.98	0.83
0-30	pH	7.68	0.17	0.03	2.22	7.40	7.87	7.75	-0.54	-1.26
0-30	Arena (%)	36.29	4.98	24.78	13.72	28.18	44.26	36.90	-0.11	-1.09
0-30	Arcilla (%)	24.11	2.51	6.30	10.41	19.74	29.74	23.78	0.60	0.60
0-30	Limo (%)	39.60	4.41	19.42	11.13	29.86	44.22	41.28	-0.95	-0.15
0-30	Materia orgánica (%)	3.45	0.52	0.27	15.04	2.76	4.14	3.34	0.23	-1.32
0-30	N%	0.17	0.03	0.00	15.62	0.14	0.21	0.17	0.40	-1.38
0-30	P (ppm)	6.58	2.39	5.71	36.31	3.89	10.49	6.00	0.55	-1.25
0-30	K(ppm)	127.97	24.61	605.49	19.23	98.94	169.18	121.63	0.64	-1.00
0-30	CIC	29.95	4.32	18.70	14.44	22.97	35.81	30.26	-0.26	-0.89
0-30	Ca+	28.67	4.40	19.39	15.36	21.41	34.63	28.75	-0.27	-0.86
0-30	K+	1.07	0.16	0.03	15.02	0.76	1.31	1.05	-0.11	-0.56
0-30	Mg+	0.17	0.03	0.00	19.10	0.13	0.22	0.16	0.55	-1.08
0-30	Na+	0.04	0.02	0.00	59.35	0.00	0.08	0.04	0.10	-0.93
0-30	CaCO ₃ (%)	3.63	0.76	0.58	21.05	2.50	4.75	3.72	-0.14	-1.32
30-60	Cadmio (Cd) Total (mg/kg)	0.81	0.15	0.02	18.99	0.71	1.29	0.78	3.15	6.14
30-60	Cadmio (Cd) Disponible (mg/kg)	0.11	0.05	0.00	48.54	0.08	0.27	0.09	3.33	6.67
30-60	pH	7.99	0.03	0.00	0.37	7.92	8.02	8.00	-1.11	0.28
30-60	Arena (%)	43.15	5.77	33.26	13.36	35.61	54.33	44.00	0.35	-0.80
30-60	Arcilla (%)	19.54	2.61	6.83	13.37	15.67	24.18	19.82	0.11	-0.91
30-60	Limo (%)	37.30	3.85	14.83	10.32	30.00	42.07	39.04	-0.69	-0.95
30-60	Materia orgánica (%)	2.05	0.25	0.06	12.15	1.61	2.30	2.07	-0.32	-1.33
30-60	N%	0.10	0.01	0.00	10.93	0.08	0.11	0.10	-0.32	-1.33
30-60	P (ppm)	6.01	2.42	5.88	40.34	3.75	10.91	5.16	1.25	-0.11
30-60	K(ppm)	105.73	13.04	170.07	12.33	94.32	143.13	103.00	2.50	3.86
30-60	CIC	32.99	3.98	15.82	12.06	27.97	40.35	33.63	0.27	-0.95
30-60	Ca+	32.07	3.95	15.64	12.33	26.86	39.35	32.67	0.24	-0.94
30-60	K+	0.76	0.09	0.01	11.77	0.61	0.91	0.76	0.01	-0.76
30-60	Mg+	0.13	0.03	0.00	21.23	0.09	0.19	0.13	0.76	0.29
30-60	Na+	0.03	0.02	0.00	71.35	0.00	0.05	0.02	0.23	-1.50
30-60	CaCO ₃ (%)	4.33	1.08	1.17	25.04	1.00	5.00	4.62	-3.07	5.87

Según la prueba de t pareada al 0,05 de probabilidad, estas características difieren significativamente para ambas profundidades de las parcelas (Cuadro 08).

Cuadro 08. Significancia de T pareada para las propiedades fisicoquímicas de los suelos en las profundidades de 0-30 y 30-60 cm.

Propiedades del suelo	N	Diferencia de medias	Diferencia de DE	T	p
Cadmio (Cd) Total (mg/kg)	12	-0.03	0.15	-0.67	0.5147
Cadmio (Cd) Disponible (mg/kg)	12	-0.01	0.06	-0.57	0.5775
pH	12	-0.31	0.16	-6.53	<0.0001
Arena (%)	12	-6.86	3.78	-6.29	0.0001
Arcilla (%)	12	4.57	2.75	5.76	0.0001
Limo (%)	12	2.3	3.4	2.34	0.0392
Materia orgánica (%)	12	1.4	0.48	10.2	<0.0001
N %	12	-0.07	0.02	-10.42	<0.0001
P (ppm)	12	0.57	2.67	0.74	0.4732
K(ppm)	12	22.25	20.73	3.72	0.0034
CIC	12	3.04	5.03	2.09	0.0603
Ca+	12	3.41	5	2.36	0.0378
K+	12	0.32	0.14	7.83	<0.0001
Mg+	12	-0.04	0.03	-5.34	0.0002
Na+	12	0.02	0.02	2.83	0.0163
CaCO ₃ (%)	12	-0.7	1.44	-1.68	0.1214

Según el análisis de la varianza (ANAVA) para el modelo matemático adoptado, no se encontraron diferencias significativas de la concentración de Cd en las tres parcelas estudiadas, así como a nivel de transecto de cada una de las parcelas. Así mismo, no resultó significativo la diferencia de concentración de cadmio de 0 – 30 cm del suelo y de 30 – 60 cm. En el cuadro siguiente se presentan los resultados de las ANAVAs y en el Anexo 5 se encuentran los análisis de las variancias.

Cuadro 9. ANAVA de la concentración de Cd a nivel de transectos y profundidades de tres parcelas.

Profundidad del suelo (cm)	Cd	F.V	Concentración de Cd (media)	F*	p*	A		
0 – 30	Cd total	Parcela tradicional	0.805	1.56	0.286			
		Parcela orgánico	0.754					
		Parcela convencional	0.790					
		Transecto 1	0.757					
		Transecto 2	0.778					
		Transecto 3	0.813					
	Cd disponible	Transecto 4	0.783	0.92	0.488			
		Parcela tradicional	0.0941					
		Parcela orgánico	0.0977					
		Parcela convencional	0.1026					
		Transecto 1	0.0960					
		Transecto 2	0.0916					
30 – 60	Cd total	Transecto 3	0.1059	1.37	0.323			
		Transecto 4	0.0991					
		Parcela tradicional	0.869				0.38	0.702
		Parcela orgánico	0.789					
		Parcela convencional	0.780					
		Transecto 1	0.738					
	Transecto 2	0.770						
	Transecto 3	0.782						
	Cd disponible	Transecto 4	0.960	1.18	0.393			
		Parcela tradicional	0.133					
		Parcela orgánico	0.094					
		Parcela convencional	0.095					
Transecto 1		0.090						
Transecto 2		0.095						
		Transecto 3	0.090	1.02	0.4487			
		Transecto 4	0.154					

*Cuando el valor de $p > \alpha$, la prueba inferencial no es significativa.

La prueba de comparación LSD Fisher al 0.05 de significancia, corroboró que no existen diferencias significativas de los promedios de concentración del Cd a niveles de parcelas y de transectos de las parcelas. Los resultados de esta prueba de significancia se presentan en la figura 8.

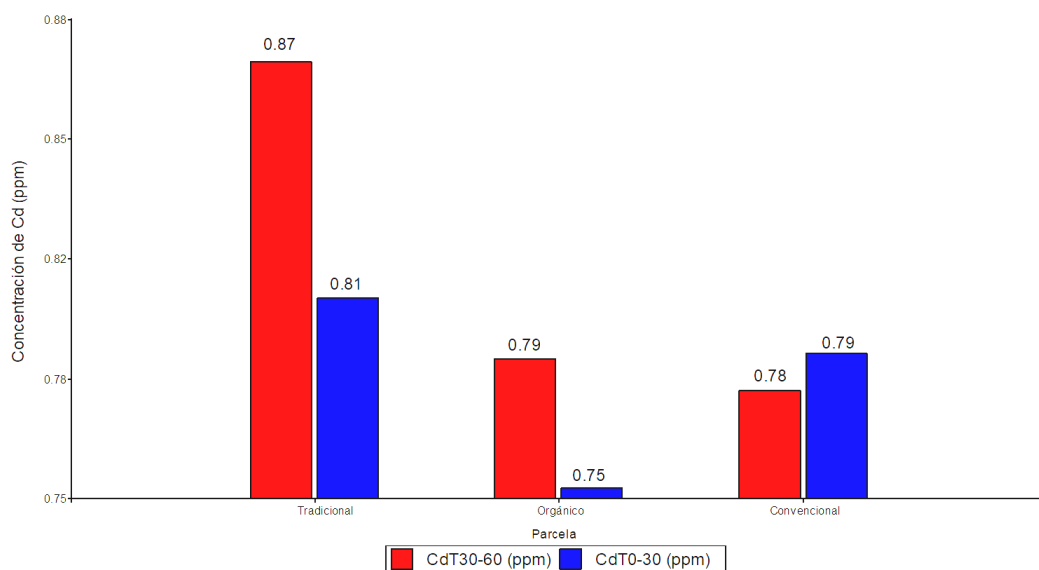


Figura 7. Concentración de Cd total en suelos en tres sistemas de manejo en profundidades (0-60 cm).

4.2. Bioacumulación de cadmio en tejidos (granos, hojas y hojarasca) de los sistemas cacaotales

En el estudio se encontró una alta diferencia significativa de la concentración del cadmio en los tejidos de los órganos de la hoja, granos y hojarasca. (Anexo 6). Según los promedios de la concentración del Cd en tejidos, en las hojas hay una mayor concentración, seguido de las hojarascas y se observaron una menor concentración en los granos, a nivel de todas las parcelas estudiadas. En el Cuadro 10 se presentan los estadísticos descriptivos de las concentraciones de Cd en los tejidos estudiados.

Cuadro 10. Estadísticos descriptivos de las características de los tejidos (grano, hoja y hojarasca) de las parcelas de cacao.

Sistema	Órgano	Media	D.E.	Var(n-1)	CV	Mín	Máx	Mediana	Asimetría	Kurtosis
tradicional	Grano	0.79	0.47	0.23	60.10	0.12	1.23	0.90	-1.32	-0.89
	Hoja	1.37	0.02	0.00	1.48	1.35	1.39	1.37	0.25	-1.54
	Hojarasca	1.02	0.12	0.01	11.61	0.93	1.18	0.99	0.87	-1.36
Orgánico	Grano	0.96	0.08	0.01	8.74	0.87	1.07	0.95	0.61	-1.25
	Hoja	1.34	0.03	0.00	2.01	1.31	1.37	1.33	0.55	-1.00
	Hojarasca	1.19	0.06	0.00	4.84	1.13	1.27	1.19	0.38	-1.03
Convencional	Grano	1.07	0.11	0.01	10.72	0.92	1.19	1.09	-0.89	-1.00
	Hoja	1.39	0.09	0.01	6.61	1.31	1.49	1.39	0.11	-1.90
	Hojarasca	1.19	0.15	0.02	12.97	1.02	1.39	1.17	0.75	-1.00

Según el análisis de la varianza (ANAVA) para el modelo matemático especificado en la sección 3.5.1, no se encontraron diferencias significativas de la concentración de Cd a nivel de parcelas y transecto. Sin embargo, resultó significativa la concentración de cadmio en el SSP. En el anexo 7 se encuentran los análisis de las variancias.

En la figura 8 presenta el resumen de proporciones acumuladas de Cd disponible, Cd en hojas, Cd en hojarasca y Cd en granos de los tres sistemas de manejo (tradición, Orgánico y convencional).

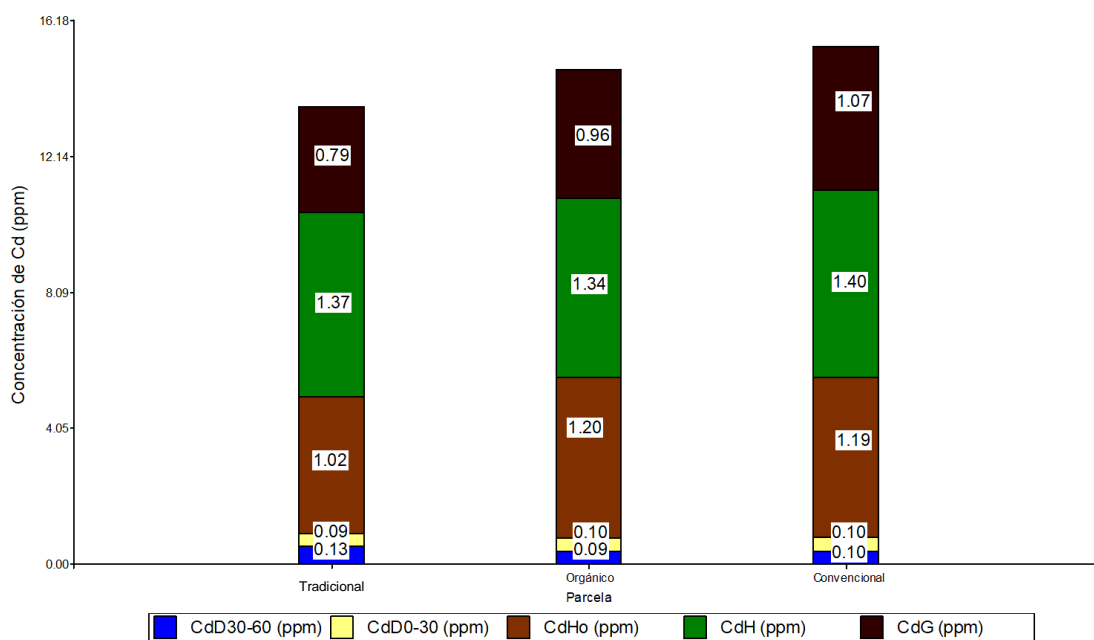


Figura 8. CdDS (Cadmio disponible del suelo), CdH (Cadmio en hojas), CdHo (Cadmio en hojarasca) y CdG (Cadmio en granos) en parcelas de cacao tradicional, orgánico y convencional.

4.3. Dinámica del cadmio en el sistema suelo-tejido de la planta

Existen asociaciones positivas y negativas que son significativas al 0.05 y/o 0.01 de probabilidad del Cd total y Cd disponible con las propiedades de los suelos de las parcelas de cacao estudiadas, en las profundidades de 0 – 30 cm y de 30 – 60 cm. En la profundidad de 0 – 30 cm de la parcela tradicional se determinaron asociaciones muy altas y significativas del Cd disponible con Cd en hojas y Cd en granos, mientras que en la profundidad de 30 – 60 cm, resultaron asociaciones muy altas y significativas de Cd total con Cd disponible y carbonatos, y de Cd disponible con carbonatos. En la profundidad de 0 – 30 cm de la parcela orgánica, se determinaron asociaciones muy altas y significativas de Cd total con MO y N, y de Cd disponible con K y Mg^{+2} ; así mismo en la profundidad de 30 – 60 cm las asociaciones altas fueron de Cd total con P y Mg^{+2} , y de Cd disponible con CIC, Ca^{+2} y K. En la parcela convencional, de 0 – 30 cm de profundidad, resultaron asociaciones muy altas

entre Cd total y pH, CIC y Ca^{+2} . Un resumen de los estadísticos de Pearson superiores a $r=0,68$, considerados que determinan grados de asociaciones interesantes, así como los valores de p, se presentan en el Cuadro 11 y en los anexos 08, 09 y 10.

El modelo de la ecuación predictiva de regresión fue determinada como $Y = -7,61 + 2,55 \text{ CdH} + 1,34 \text{ CdHo}$, con un coeficiente de determinación ajustado ($R^2\text{Aj} = 0.99$) y cuya prueba de ajuste confirma que no existe falta de ajuste en el modelo establecido ($p\text{-valor} = 0.6913$). Esta ecuación denota que la concentración de Cd en los granos de cacao, están asociados funcionalmente con la concentración de este metal en las hojas funcionales, así como en la hojarasca. Teóricamente, llegaría $- 7,61$ ppm de Cd a los granos de cacao de las parcelas estudiadas siempre y cuando la concentración de Cd en las hojas funcionales pueda ser cero así como el aporte de Cd a través de las hojarascas también sean nulas. Los resultados del análisis de regresión múltiple de mejor ajuste, se presentan en el Anexo 11.

Cuadro 11. Coeficientes de correlación entre la concentración del Cd en el sistema suelo-planta y las características de las profundidades de los suelos de 0-30 cm y de 30 – 60 cm.

Variables asociadas (perfil de suelo de 0 – 30 cm)	r	p	Variables asociadas (perfil de suelo de 30 – 60 cm)	r	p
Parcela tradicional					
Cd total (ppm) y pH (1:1)	-0.92	0.080	Cd total (ppm) y Cd disponible (ppm)	1.00	0.002
Cd total (ppm) y CaCO ₃ (%)	-0.82	0.180	Cd total (ppm) y CaCO ₃ (%)	-1.00	0.001
Cd total (ppm) y Limo (%)	0.81	0.190	Cd total (ppm) y ClCt (meq/100 g)	0.75	0.250
Cd total (ppm) y P (ppm)	0.81	0.190	Cd total (ppm) y Ca (meq/100 g)	0.75	0.250
Cd total (ppm) y ClCt (meq/100 g)	-0.80	0.200	Cd total (ppm) y CdH (ppm)	0.81	0.190
Cd total (ppm) y Ca ⁺² (meq/100 g)	-0.80	0.200	Cd-disponible (ppm) y CaCO ₃ (%)	-1.00	0.001
Cd total (ppm) y K ⁺ (meq/100 g)	0.80	0.200	Cd-disponible (ppm) y ClCt (meq/100 g)	0.76	0.240
Cd-Total (ppm) y Na ⁺ (meq/100 g)	-0.87	0.130	Cd-disponible (ppm) y Ca ⁺² (meq/100 g)	0.76	0.240
Cd-disponible (ppm) y CaCO ₃ (%)	-0.73	0.270	Cd-disponible (ppm) y CdH (ppm)	0.77	0.230
Cd-disponible (ppm) y Limo (%)	0.75	0.250			
Cd disponible (ppm) y ClCt (meq/100 g)	-0.78	0.220			
Cd disponible (ppm) y Ca ⁺² (meq/100 g)	-0.78	0.220			
Cd-disponible (ppm) y CdHo (ppm)	0.94	0.060			
Cd-disponible (ppm) y CdG (ppm)	-1.00	7.9E-05			
Parcela orgánica					
Cd total (ppm) y Cd disponible (ppm)	0.68	0.320	Cd total (ppm) y CaCO ₃ (%)	-0.71	0.290
Cd total (ppm) y Limo (%)	-0.77	0.230	Cd total (ppm) y Limo (%)	-0.85	0.150
Cd total (ppm) y MO (%)	-0.98	0.020	Cd total (ppm) y P (ppm)	0.97	0.030
Cd total (ppm) y N (%)	-0.98	0.020	Cd total (ppm) y K (meq/100g)	0.90	0.100
Cd total (ppm) y ClCt (meq/100 g)	-0.77	0.230	Cd total (ppm) y Mg ⁺² (meq/100g)	0.99	0.010
Cd total (ppm) y Ca ⁺² (meq/100 g)	-0.78	0.220	Cd total (ppm) y CdH (ppm)	-0.71	0.290
Cd total (ppm) y Mg ⁺² (meq/100g)	0.73	0.270	Cd total (ppm) y CdG (ppm)	0.90	0.100
Cd total (ppm) y Cd-grano (ppm)	0.92	0.080	Cd-disponible (ppm) y pH (1:1)	-0.87	0.130
Cd-disponible (ppm) y pH (1:1)	-0.80	0.200	Cd-disponible (ppm) y Arcilla (%)	0.90	0.100
Cd-disponible (ppm) y CaCO ₃ (%)	-0.81	0.190	Cd-disponible (ppm) y ClCt (meq/100g)	0.92	0.080
Cd-disponible (ppm) y P (ppm)	0.85	0.150	Cd-disponible (ppm) y Ca ⁺² (meq/100 g)	0.92	0.080
Cd-disponible (ppm) y K (ppm)	0.99	0.010	Cd-disponible (ppm) y K (ppm)	0.95	0.050
Cd-disponible (ppm) y Mg ⁺² (meq/100g)	0.99	0.010			
Cd-disponible (ppm) y CdH (ppm)	-0.95	0.050			
Cd-disponible (ppm) y CdHo (ppm)	-0.87	0.130			
Cd-disponible (ppm) y CdG (ppm)	0.91	0.090			
Parcela convencional					
Cd total (ppm) y pH (1:1)	-0.99	0.010	Cd total (ppm) y pH (1:1)	-0.72	0.280
Cd total (ppm) y CaCO ₃ (%)	-0.87	0.130	Cd total (ppm) y Arena (%)	-0.85	0.150
Cd total (ppm) y Arena (%)	0.86	0.140	Cd total (ppm) y Arcilla (%)	0.85	0.150
Cd total (ppm) y Arcilla (%)	-0.92	0.080	Cd total (ppm) y Limo (%)	0.81	0.190
Cd total (ppm) y Limo (%)	-0.82	0.180	Cd total (ppm) y P (ppm)	-0.79	0.210
Cd total (ppm) y MO (%)	-0.88	0.120	Cd total (ppm) y Mg ⁺² (meq/100g)	-0.89	0.110
Cd total (ppm) y N (%)	-0.88	0.120	Cd total (ppm) y CdHo (ppm)	-0.83	0.170
Cd total (ppm) y ClCt (meq/100 g)	-0.97	0.030	Cd-disponible (ppm) y Arena (%)	-0.85	0.150
Cd total (ppm) y Ca ⁺² (meq/100g)	-0.97	0.030	Cd-disponible (ppm) y Arcilla (%)	0.94	0.060
Cd total (ppm) y K ⁺ (meq/100 g)	-0.84	0.160	Cd-disponible (ppm) y Limo (%)	0.75	0.250
Cd-disponible (ppm) y P (ppm)	-0.89	0.110	Cd-disponible (ppm) y K (ppm)	-0.88	0.120
Cd-disponible (ppm) y Na ⁺	-0.74	0.260	Cd-disponible (ppm) y K ⁺ (meq/100g)	0.88	0.120
Cd-disponible (ppm) y CdH (ppm)	-0.89	0.110	Cd-disponible (ppm) y Na ⁺	-0.81	0.120

V. DISCUSIÓN

5.1. Concentración de cadmio en los suelos de los sistemas cacaotales

En las tres parcelas estudiadas, las concentraciones de Cd total y Cd disponible son bajas, en las dos profundidades (de 0-30 cm y de 30-60 cm) son similares y en los transectos de las parcelas. Sin embargo, otras propiedades de los suelos varían a nivel de ambas profundidades, como el pH, las proporciones de arena y arcilla, así como los contenidos de materia orgánica y de potasio, cuyos promedios y otros estadísticos asociados se observan en el Cuadro 08. Los promedios de las concentraciones de Cd total en las áreas de absorción (0 – 30 cm de profundidad) de las parcelas convencional (0,79 ppm), orgánico (0,75 ppm) y tradicional (0,81 ppm) son menores en comparación a los reportados por Gonzales (2017) de 1,35 ppm en promedio en parcelas de cacao de cinco años para la zona de Pucayacu, provincia de la Leoncio Prado de la región Huánuco; pero superiores a las concentraciones encontradas en los primeros 10 cm de profundidad de las parcelas convencional (0,65 ppm), orgánico (0,89 ppm) y tradicional (0,88 ppm) en la localidad de san Alejandro, distrito de Irazola, provincia de Padre Abad en Ucayali (Fernández 2018). Con respecto a los suelos de otros países, como Colombia, también son bajos, por ejemplo, Rodríguez (2017) encontró concentraciones de Cd total en rangos de 0,17 a 23,6 ppm en 64 fincas de Yacopí (promedio de 3,34 ppm) y de 0,54 a 7,05 ppm en 41 fincas de Nilo (promedio de 2,23 ppm). En las parcelas estudiadas, la proporción del Cd disponible con respecto a la concentración del Cd total es de 12,7%, resultado superior (11,7%) al reportado por Huauya y Huamaní (2014), para los suelos de República Dominicana.

Los promedios de Cd disponible en las parcelas, convencional (0,10 ppm), orgánico (0,09 ppm) y tradicional (0,09 ppm), pueden ser considerados como niveles bajos, porque son inferiores al nivel máximo permitido de Cd disponible en suelos (0,80 ppm), de acuerdo a la Guía de Protección

Ambiental de la Comunidad Europea (Súbero 2013, Tantalean y Huauya 2017), así como al nivel de 0,99 ppm, considerado por Huauya y Huamaní (2014) y MINAGRI (2019) de 1,4 ppm en suelos agrícolas. Los valores de Cd disponible de los suelos estudiados son inferiores a las concentraciones de Cd disponible encontrados en suelos aluviales de Ramal de Aspuzana, de la provincia de Leoncio Prado, región Huánuco, cuyos valores se encuentran entre 1,26 a 3,68 ppm (Tantalean y Huauya 2017), así como a los valores encontrados por Cárdenas (2012) entre 0,35 a 1,82 ppm en una parcela de cacao orgánico de la Cooperativa Agraria Industrial Naranjilla, Tingo María-Perú y en comparación a los valores observados por Huauya y Huamaní (2014) de 0,25 a 1,52 ppm de Cd disponible en suelos de parcelas cacaoteros orgánicos localizados en las regiones Huánuco y Ucayali. Así mismo, las concentraciones de Cd disponible observados son menores con relación a los reportados en otros países, como Colombia, por ejemplo, Rodríguez (2017) encontró niveles de 0,01 a 16,9 ppm en parcelas del Municipio de Yacopí y de 0,02 a 3,2 ppm para las parcelas del Municipio de Nilo del departamento de Cundinamarca, Colombia. Sánchez (2017) reportó concentraciones de Cd disponible de 0,11 a 0,45 ppm en cultivo orgánico en producción en cuatro parcelas de dos zonas del Alto Huallaga, así como Huamaní-Yupanqui *et al.* (2012) reportaron valores promedios de 0,53 ppm en 17 parcelas orgánicas de la región Huánuco y cinco de la región Ucayali.

La concentración del Cd total y/o disponible en los suelos estudiados, presentan alta asociación negativa con la concentración de carbonato de calcio, los pH varían de ligeramente alcalino a moderadamente alcalino y las CIC son altas. Rodríguez (2017), también encontró que las concentraciones altas de Cd total están asociadas a los carbonatos en algunos suelos de los municipios de Yacopi y Nilo, en Colombia. Así mismo, Sánchez y Casermeiro (2016) señalan que la fijación del Cd es mayor en los suelos con CIC altos. Esta información sugiere que el Cd se encuentra adsorbida a los carbonatos

(García y Dorronsoro 2019) y por lo tanto su disponibilidad para las plantas del cacao serían menores, aspecto relacionado a su vez con los pH altos que disminuyen la biodisponibilidad del Cd (Jaramillo y Koch 2018). Es decir, los carbonatos son responsables de los altos valores de pH, y por lo tanto el Cd tiende a precipitar y quedar adsorbido por los carbonatos en CdCO_3 , que hace que el cadmio sea menos disponible para la planta del cacao (García y Dorronsoro 2019).

5.2. Bioacumulación de cadmio en tejidos (hojas, granos y hojarasca) de los sistemas cacaotales.

En las parcelas tradicional, orgánico y convencional los promedios de las concentraciones de Cd en grano son 0,79 ppm, 0,96 y 1,07 ppm respectivamente. En los tres casos superan los límites permisibles de 0,6 ppm, de acuerdo a La Organización Mundial del Cacao (ICCO 2019). Sin embargo, las concentraciones de Cd en los granos de cacao de las parcelas estudiadas son menores respecto a las concentraciones encontradas en otras parcelas de cacao en el Perú, por ejemplo, en un suelo aluvial de Ramal de Aspuzana, Tantalean y Huauya (2017) encontraron 1,08 ppm, Cárdenas (2012) reporta un promedio de 1,55 ppm para 20 parcelas de la Cooperativa Naranjillo, en Tingo María, Huánuco, y Sánchez (2017) reporta 1,11 ppm en promedio para cuatro parcelas de la misma Cooperativa. Así mismo, son menores en comparación a las concentraciones promedios reportadas por Rodríguez (2017) 6,06 ppm en 64 parcelas ubicadas en Yacopí y 4,02 ppm en 41 parcelas ubicadas en Nilo, en Colombia. Kabata-Pendias (2000) considera que la concentración máxima tolerable de cadmio en hojas maduras de cacao es de 0,5 ppm. Los promedios observados en las parcelas de Huamancoto (1,39 ppm, 1,37 ppm y 1,34 ppm) son mayores a dicha concentración, pero son menores a algunos valores promedios reportados por los autores peruanos, como, Tantalean y Huauya (2017) que reportan 2,58 ppm y Cárdenas (2012) que revela 2,84 ppm, y mayores al reportado por

Huamaní-Yupanqui *et al.* (2012), 0,21 ppm. En comparación a las concentraciones encontradas en Yacopí (11,54 ppm) y Nilo (6,1 ppm) en Colombia (Rodríguez 2017) también son menores. Los promedios de las concentraciones de Cd en hojarasca (1,02, 1,19, 1,19), son menores a los promedios reportados por Rodríguez (2017) en Yacopí (18,92 ppm) y Nilo (9,1ppm) en Colombia.

En el estudio se encontró diferencia significativa al 5% y 1% de la concentración del cadmio en los tejidos de hojas, granos y hojarascas. Las hojas son los órganos que secuestran la mayor cantidad de Cd en la planta y desde las hojas hay una provisión de este elemento tanto a los otros órganos de la planta como el retorno al suelo a través de las hojarascas. De acuerdo con Gonzales (2017), los tejidos vegetales generalmente contienen mayores concentraciones de Cd que en tejidos de almacenamiento debido a una barrera fisiológica entre lo que limita su acumulación, por lo tanto, llegarían menores cantidades a los granos de cacao. En el estudio, la concentración del Cd acumulado en los granos fue invariable estadísticamente con relación a los sistemas de manejo (tradicional, orgánico y convencional), el cual probablemente se debe a la edad similar que tienen las plantaciones dado que las concentraciones de Cd en los suelos también son estadísticamente similares.

5.3. Dinámica del cadmio en el sistema suelo – órganos de la planta

El modelo matemático obtenido con todas las variables es $Y = -7.61 + 2.55 \text{ CdH} + 1.34 \text{ CdHo}$, con un coeficiente de determinación ajustado ($R^2 \text{ Aj} = 0.99$), error aleatorio de 2.62. Este modelo sugiere que, si existe mayor contenido de Cd en hojas, existe mayor acumulación de este elemento en los granos. Lo cual es razonable porque el proceso de transporte y acumulación de los fotosintatos en los órganos cosechables proviene principalmente de las hojas. Las hojarascas también aportan a la dinámica del Cd en el sistema suelo planta, lo cual puede sugerir que el Cd disponible del suelo tiene una fuente

importante que proviene de la descomposición de las hojarascas del cultivo de cacao.

La baja asociación entre Cd total y Cd disponible en la capa superficial (0 – 30 cm) de los suelos estudiados, pueden explicar que la disponibilidad del Cd para las plantas del cacao no están directamente asociados con la concentración del Cd total en el suelo, es decir aunque este puede tener origen natural casi no aportaría a la concentración de Cd disponible, sino este estaría asociado con causas antropogénicas, el cual es corroborado también con lo observado en la parcela convencional, donde hay una asociación del Cd disponible con la concentración del fósforo que estaría asociado con las incorporaciones durante los ciclos productivos. No obstante, la concentración del Cd total y disponible crece con la profundidad, contrario al reportado por Arévalo-Gardini *et al.* (2017).

Las asociaciones de la concentración del Cd total y Cd disponible con los carbonatos, encontrados en la parcela tradicional, son propios de suelos carbonatados naturales (Stalikas *et al.* 1999, citado por Cárdenas 2012) porque estos compuestos promueven la acumulación del Cd, ya que este metal tiene gran afinidad de ser adsorbido al carbonato o debido a la formación de precipitados de carbonatos de Cd (Cárdenas 2012). Así mismo hay una asociación entre el Cd total y el cadmio disponible (1.00) mayor a los obtenidos por Rodríguez (2017) en Yacopí (0,93) y Nilo (0,92) en Colombia y en relación a las otras dos parcelas son mayores. Las asociaciones entre las concentraciones de Cd en el suelo y el Cd en los tejidos de la planta de cacao, la no significancia revelarían que dichas asociaciones dependen en realidad de otras propiedades fisicoquímicas del suelo o del manejo de los sistemas de producción, mientras que las asociaciones significativas serían indicadores de que la concentración del Cd en el tejido dependería de las concentraciones disponibles de este metal en el suelo (Sánchez 2017), tal como se determinó

una alta asociación significativa entre Cd disponible y Cd en granos en la parcela tradicional.

A nivel de 0 – 30 cm de profundidad de las parcelas estudiadas, hay asociaciones de la concentración del Cd disponible con las propiedades del suelo propensas a modificaciones por intervención antrópicas, por ejemplo, el pH, la concentración de fósforo, CIC y la concentración de materia orgánica. Este último presentó una alta asociación significativa con el Cd disponible en la parcela orgánica, el cual sugiere que a mayor incorporación de fuentes orgánicas el Cd disponible se incrementaría, esto probablemente debido a que el metal forma complejos organometálicos, lo que facilita su solubilidad, disponibilidad y dispersión (Abanto 2016, Arévalo-Gardini *et al.* 2017, Bravo *et al.* 2014) y la materia orgánica proveniente de las hojas u otra parte de la planta, incrementaría la concentración de Cd en el suelo; además de acuerdo a lo señalado por Bravo *et al.* (2014) los ácidos húmicos de la MO tienen un papel primordial en la retención del Cd, formando enlaces fuertes en sus grupos carboxílicos y fenólicos, con mayor capacidad y fuerza de retención que el resto de fases adsorbentes, mientras que el ácido fenólico moviliza el metal por fenómenos de complejación y solubilización.

La CIC presentó una asociación negativa alta y significativa con la disponibilidad del Cd en la parcela convencional, similar a lo reportado por Sánchez (2017). Según Azevedo *et al.* (2003), la adsorción de los metales a las partículas del suelo reduce la concentración de los metales en la solución del suelo. Es decir, un suelo con una CIC baja tiene menos sitios de intercambio en la fracción coloidal del suelo, los que estarán disponibles para una mayor adsorción y posible inmovilización de los metales (Bravo *et al.* 2014, Abanto 2016, Arévalo-Gardini *et al.* 2017).

Además el Cd puede ser reemplazado en la fracción coloidal del suelo por otros metales, como el Ca y Mg, siempre y cuando estos elementos

presentan una correlación alta con la CIC, tal como considera Huamaní (2012), Ca^{+2} (0,98), K^+ (1) y Mg^{+2} (0,61), en este caso aumentaría la biodisponibilidad del Cd en el suelo, del mismo modo, en suelos donde fueron incorporados la cal dolomítica (Bravo *et al.* 2014) habría mayor concentración de Cd, así como en suelos cuyo material proviene de montañas con alto contenido calcáreo, cuyo constituyente es el P, el Mg y cadmio. Así mismo, las asociaciones del Cd disponible con los cationes Ca^{+2} , K^+ y Mg^{+2} , estarían relacionados con las proteínas que son responsables del ingreso de Cd a la planta (Arévalo-Gardini *et al.* 2017).

El fósforo y el pH influyen en menor proporción en las concentraciones de Cd disponible porque estas propiedades serían menos modificadas con las incorporaciones de fuentes de abonamiento u otros factores de manejo. Sin embargo, es importante tener en cuenta que el pH del suelo es un factor que condiciona los procesos de adsorción del Cd en el suelo, por ejemplo, en suelos con pH alcalinos la retención del metal es mayor, mientras que en condiciones ácidas se incrementa su biodisponibilidad (Bravo *et al.* 2014, Abanto 2016, Arévalo-Gardini *et al.* 2017); por otro lado Bravo *et al.* (2014) y Abanto (2016) mencionan que los fertilizantes fosfatados aportan Cd entre sus impurezas o trazas, por lo que constituyen más del 50 % de la entrada total de este elemento al suelo, probable acumulación de Cd disponible en los suelos de las dos parcelas estudiadas (orgánica y convencional).

La correlación no significativa del Cd disponible con la fracciones granulométricas del suelo (arcilla, limo y arena), en la profundidad de 0 – 30 cm de los suelos estudiados, se debería al hecho de que la arcilla tiene una buena capacidad de adsorción de los metales, entre ellos el Cd; y que la arena incrementa el nivel de absorción de Cd por la planta, debido a que tiene mayor cantidad de macroporos y mínimo contenido coloidal, además de presentar poca cantidad de carbonatos, por lo que el cadmio al disminuir su adherencia

al suelo, se moviliza fácilmente a las partes aéreas de la planta (Abanto 2016; Arévalo-Gardini *et al.* 2017).

Existen asociaciones entre las concentraciones de Cd en la profundidad de 0 – 30 cm con las concentraciones de Cd en los tejidos del cacao; sin embargo, sólo en el sistema tradicional resultó significativo entre Cd disponible y Cd en hojas y granos, mientras que en las otras parcelas las asociaciones no fueron significativas. Resultados similares de correlación fueron encontrados por Sánchez (2017) entre Cd en el suelo y el Cd foliar y Cd en almendras, es decir, las concentraciones de Cd en los tejidos aumentarían según la cantidad de Cd disponible en el suelo, debido a una mayor absorción del Cd; mientras que Ramtahal *et al.* (2016) encontró estadísticos de Pearson menores que 0,86 entre Cd en almendra y hoja.

En general, la presencia de altas concentraciones de metales en los suelos puede producir la absorción del Cd por la planta, debido a que existe una competencia iónica con los metales, de la misma manera las altas concentraciones de estos metales pesados pueden reducir la absorción de calcio y bajar la concentración de este a nivel de raíces, hojas y frutos (Österås y Greger 2006, citado por Cárdenas 2012). Así mismo, el Cd interfiere en la entrada, transporte y utilización de elementos esenciales (Ca, Mg, P y K) y el agua, provocando desequilibrios nutricionales e hídricos en la planta (Singh y Tewari, 2003, citado por Sanchez (2017) del cacao. Finalmente, la disponibilidad del Cd en los suelos es favorecida por las altas temperaturas, ya que este factor incrementa la velocidad de reacciones y da mayor solubilidad (Abanto 2016).

VI. CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos en la investigación permitieron llegar a la siguiente conclusión:

1. Las concentraciones de Cd total y disponible son bajas, inferiores a los límites permisibles, y no presentan diferencia en concentración tanto a nivel de parcela, transectos y profundidades. Sin embargo, otras características fisicoquímicas de los suelos varían principalmente según la profundidad y de acuerdo al enfoque de manejo que opta el agricultor.
2. Según los resultados en las tres parcelas estudiadas la concentración de Cd en grano y hojas superan los límites permisibles para la UE, así también se encontraron diferencia significativa de la concentración de cadmio total en los tejidos de hojas, granos y hojarasca esto se debe a que el Cd se encuentra en mayor cantidad en las hojas y desde ahí hay una provisión de este elemento tanto a los otros órganos de la planta como el retorno al suelo a través de las hojarascas. Los tejidos vegetales contienen mayores concentraciones de Cd que en tejidos de almacenamiento debido a una barrera fisiológica que limita su acumulación, por lo tanto, llegarían menores cantidades a los granos de cacao. Según el estudio, la concentración del Cd acumulado en los granos fue invariable estadísticamente con relación a los sistemas de manejo (tradicional, orgánico y convencional).
3. La dinámica del Cd en el sistema suelo-planta es versátil, por lo que estarían asociados a factores naturales y antrópicos, por ejemplo, en casos de parcelas orgánicas, donde se asume que hay incorporaciones de mayores dosis de fuentes de nutrientes, puede promover al mismo tiempo una mayor concentración de Cd en el suelo absorbible por las plantas. A pesar que las concentraciones del Cd en el suelo no superan los límites permisibles, la concentración del Cd en granos están por

encima de dichos límites por lo que el estudio aporta información relevante para innovar tecnología de manejo de cacaotales orientados a reducir las absorciones del Cd por la planta de cacao y consecuentemente reducir la llegada de este metal a las almendras.

VII. RECOMENDACIONES

Con base a la investigación realizada se recomienda lo siguiente:

1. Teniendo en cuenta que los orígenes del Cd en los suelos agrícolas son antrópicos y naturales; además, la dinámica de este elemento metálico en el sistema suelo – planta de cacao es variable y asociada al manejo y a la dinámica de las propiedades fisicoquímicas de los suelos, se debe realizar estudios desde el enfoque de investigación mixto y con mayor esfuerzo muestral de los suelos de cultivo de cacao, a fin de inferir y analizar desde una perspectiva integral el origen, la dinámica en el sistema suelo-planta y validar metodologías de manejo de la producción de cacao en el marco de la normativa, tanto nacional e internacional.
2. Se recomienda realizar muestreos periódicos (por fase fenológica, anual, bianual, otro) para ver la fluctuación del Cd disponible en comparación a su absorción y presencia en las hojas y frutos de acuerdo a la edad de las plantas, por ejemplo, desde su desarrollo en el vivero hasta la eta de plena producción.
3. Se recomienda realizar estudios de la dinámica del Cd en el sistema suelo-planta de cacao-atmósfera, para poder determinar la dinámica per se del Cd en las parcelas de producción.
4. Desarrollar investigaciones para generar tecnología de manejo de Cd en sistemas cacaotales, por ejemplo, biorremediación con plantas, hongos endofíticos, entre otros.

VIII. LITERATURA CITADA

- Abanto Aguirre, MA. 2016. Fuentes fosfatadas en dos suelos en la concentración de cadmio foliar en maíz bajo condiciones de invernadero (en línea). Tesis Ing. Agro. Lima, Perú, UNAM. Consultado 13 oct. 2019. Disponible en <https://bit.ly/2OQmGUv>
- Alloway, BJ; Steinnes, E. 1999. Antropogenic additions of cadmium to soils (en línea). *In* McLaughlin, MJ y Singh, BR (eds.). Cadmium in soils and plants. Springer Science + Business Media, B. V. p. 97 – 123. Consultado 09 dic. 2019. Disponible en <https://bit.ly/34coHys>
- Azevedo, ML; Ferracciú, LR; Guimarães, LR. 2003. Biosolids and heavy metals in soils (en línea). *Scientia Agrícola* 60(4): 793-806. Consultado 38 oct. 2019. Disponible en <https://bit.ly/2CVFIXH>
- Acosta, S; Pozo, P. 2013. Determinación de cadmio en la almendra de cacao (*Theobroma cacao* L.) de cinco fincas ubicadas en la vía santo domingo-esmeraldas, mediante espectrofotometría de absorción atómica con horno de grafito (en línea). *Infoanalítica*, 1(1): 69-82. Consultado 21 jul. 2018. Disponible en <https://bit.ly/35bTGM1>
- Arvelo, M; Gonzáles, D; Maroto, S; Delgado, T; Montoya, P. 2017. Manual técnico del cultivo de cacao prácticas latinoamericanas. IICA, San José, Costa Rica. 143 p.
- Arévalo-Gardini, E; Arévalo-Hernández, CO; Baligarsi, VC; He, ZL. 2017. Heavy metal accumulation in leaves and beans of cacao (*Theobroma cacao* L.) in major cacao growing regions in Peru (en línea). *Science of the Total Environment* 605-606:792-800. Consultado 09 jul. 2019. DOI: [10.1016/j.scitotenv.2017.06.122](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.06.122)
- Bautista, F; Cram, S; Sommer, I. 2011. Suelos (en línea). *In* Bautista, F; Palacio, JL; Delfín, H (eds). Técnicas de muestreo para manejadores de recursos naturales. 2 ed. México, UNAM. p. 227–258. Consultado 30 jul. 2019. Disponible en <https://bit.ly/2RPR42L>

- Benavides, MP; Gallego, SM; Tomaro, ML. 2005. Cadmium toxicity in plants (en línea). *Brazilian Journal of plant Physiology* 17(1): 21-34. Consultado 04 oct. 2019. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/S1677-04202005000100003>
- Bonadeo, E; Cantero, A. 2011. El funcionamiento del sistema suelo-planta: apoyo al estudio de casos (en línea). Rio Cuarto, Argentina, UníRío. 110 p. Consultado 30 jul. 2019. Disponible en <https://bit.ly/38D64qA>
- Bonomelli, C; Bonilla, C y Valenzuela, A (2003). Efecto de la fertilización fosforada sobre el contenido de cadmio en cuatro suelos de Chile (en línea) *Pesquisa Agropecuária Brasileira* 38(10):1179-1186. Consultado 5 may. 2018. Disponible en <https://bit.ly/32CBzOd>
- Bravo, Isabel del Socorro; Arboleda, CA; Martín, FJ. 2014. Efecto de la calidad de la materia orgánica asociada con el uso y manejo de suelos en la retención de cadmio en sistemas altoandinos de Colombia. *Acta Agronómica*. 63(2): 164-174. Consultado 09 jul. 2019. Disponible en <https://bit.ly/37eWidS>
- Candelaria, T; Alfonso, A; Granados, C. 2016. Adsorción de plomo y cadmio en sistema continuo de leche fijo sobre residuos de cacao (en línea). *Revista ION*, 29(2): 113-124. Consultado 17 ago. 2018. DOI <https://doi.org/10.18273/revion.v29n2-2016009>
- Cárdenas Morales, AA. 2012. Presencia de cadmio en algunas parcelas de cacao orgánico en la Cooperativa Agraria Industrial Naranjillo-Tingo María – Perú (en línea). Tesis. Ing. Agrónomo. Tingo María, Perú, UNAS. Consultado 09 jul. 2019. Disponible en <https://bit.ly/2AohBuR>
- Cuatrecasas, J. 1964. Cacao and its allies a taxonomic revisión of the genus *Theobroma* (en línea). Whashington, D.C., USA. 614 p. Consultado 09 dic. 2019. Disponible en <https://bit.ly/2LKG8zQ>
- Cuenca, E. 2012. Efecto de la materia orgánica y Fuentes de calcio en la toxicidad de cadmio en maíz (*Zea mays* L.) (en línea). Tesis. Magister

- scientiae en suelos. UNALM. Lima, Perú. 64-72p. Consultado 09 dic. 2019. Disponible en <https://bit.ly/38xIFYX>
- Diario Oficial de la Unión Europea. 2014. Reglamento (UE) N° 488/2014 de la comisión de 12 de mayo de 2014 que modifica el Reglamento (CE) no 1881/2006 por lo que respecta al contenido máximo de cadmio en los productos alimenticios (en línea, sitio web). Consultado 03 oct. Disponible en <https://bit.ly/2Bur4Re>
- Di Rienzo, JA; Casanoves, F; Gonzalez, LA; Tablada, EM; Díaz, MP; Robledo, CW; Balzarini, MG. 2009. Estadística para las ciencias agropecuarias (en línea). 7 ed. Córdoba, Argentina. 356 p. Consultado 30 oct. 2019. Disponible en <https://bit.ly/3548hsB>
- InfoStat. 2008. InfoStat, versión 2008. Manual del usuario (en línea). Grupo InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba. Editorial Brujas, Argentina. 336 p. Consultado 30 oct. 2019. Disponible en <https://bit.ly/2qha3le>
- Dostert, N; Roque, J; Cano, A; María, I; La Torre; Weigend, M. 2011. Hoja botánica: cacao (en línea). Lima, Perú. 19 p. Consultado 13 ago. 2019. Disponible en <https://bit.ly/2L2u2BC>
- Fernández Velásquez, B. 2018. Contenido de Cadmio (Cd) en suelos cacaoteros bajo 3 sistemas de manejo del Cultivo en San Alejandro Distrito de Irazola - Provincia de Padre Abad – Departamento de Ucayali (en línea). Tesis Ing. Agrónomo, Pucallpa, Perú, UNU. 87 p. Consultado el 03 oct. 2019. Disponible en: <https://bit.ly/2WqvnXb>
- Florida, N; Claudio, SL y Gómez, R. 2018. El pH y la absorción de cadmio en almendras de cacao orgánico (*Theobroma cacao* L.) en Leoncio prado, Huánuco, Perú (en línea). Revista del Instituto de Investigaciones de la Amazonía Peruana 27(1):1-8. Consultado 26 ago. 2019. DOI: <https://doi.org/10.24841/fa.v27i1.458>

- FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, Italia). 2019. FAOSTAT (en línea). Roma, Italia. Consultado 15 oct. 2019. Disponible en <https://bit.ly/2L1I2bZ>
- Galán, E; Romero, A. (2008). Contaminación de suelos por metales pesados (en línea). Revista Española de Mineralogía 8:48-60. Consultado 13 ago. 2018. Disponible en <https://bit.ly/2FB0B9I>
- García, I; Dorronsoro, C. 2019. Contaminación por metales pesados (en línea, sitio web). Consultado 28 ago. 2019. Disponible en <https://bit.ly/2STp1QJ>
- Garg, N. 2017. Science and Technology of Fruit Wine Production (en línea, sitio web). Consultado 24 ago. 2019. Disponible en <https://bit.ly/359GbMP>
- Gonzales, FS. (2008). Ecofisiología del cacao (en línea). Tingo María, Perú, UNAS. Consultado 15 jul. 2019. Disponible en <https://bit.ly/2VUYVfr>
- Gonzales Valle, S. 2017. Evaluación de la distribución del cadmio en el suelo y en la raíz de la planta de cacao en Pucayacu, Huánuco 2017 (en línea). Tesis Ing. Ambiental, Lima, Perú, UCV. Consultado el 03 oct. 2019. Disponible en: <https://bit.ly/31SxpAB>
- Helmk, PA. 1999. Chemistry of cadmium in soil solution (en línea). In McLaughlin, MJ y Singh, BR (eds.). Cadmium in soils and plants. Springer Science + Business Media, B. V. p. 39 – 64. Consultado 09 dic. 2019. Disponible en <https://bit.ly/2t4TU9I>
- Hernández, R; Fernández, C; Baptista, P. 2014. Metodología de la investigación (en línea). 6 ed. D. F, México, Mc Graw Hill Education. 600 p. Consultado 30 jul. 2019. Disponible en <https://bit.ly/2PEZ6sD>
- Huamani-Yupanqui, HA; Huauya-Rojas MA; Mansilla-Minaya LG; Florida-Rowner N; Neira-Trujillo GM. (2012). Presencia de metales pesados en cultivo de cacao (*Theobroma cacao* L.) orgánico (en línea). Acta Agronómica, 61(4): 339-344. Consultado 21 jul. 2018. Disponible en: <https://bit.ly/2XjMLxs>

- Huauya, M; Huamaní, H. 2014. Macrofauna edáfica y metales pesados en el cultivo de cacao, *Theobroma cacao* L. (Malvaceae) (en línea). *The Biologist*, 12(1):45-55. Consultado 03 oct. 2019. Disponible en <https://bit.ly/32MUmpj>
- Huaynates Natividad, JL. 2013. Efecto de la materia orgánica en la absorción de cadmio por el suelo, en la localidad de Supte (en línea). Tesis. Ing. en Recursos Naturales Renovables mención Conservación de Suelos y Agua. Consultado 16 oct. 2019. Disponible en <https://bit.ly/2Mn8ErK>
- INTA (Instituto Nicaragüense de tecnología agropecuaria). 2009. Guía tecnológica del cultivo del cacao (en línea). 4ta ed. Diciembre. Consultado 11 ago. 2018. Disponible en <https://bit.ly/2MQcNTZ>
- Jaramillo, RA; Koch, A. 2018. Determinación de los niveles de cadmio en diferentes profundidades del suelo y su relación con las características fisicoquímicas, en el cultivo de cacao en cinco cantones de la provincia de Guayas-Ecuador (en línea). Tesis. Mg en agricultura sostenible. Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE. Sangolquí, Ecuador. Consultado 25 oct. Disponible en <https://bit.ly/2KpJ43T>
- Kabata-Pendias, A. 2000. Trace elements in soils and plants (en línea) 3ra ed. CRC Press, Boca Ratón. Florida, USA. 413 p. (en línea). Consultado 25 oct. Disponible en. Disponible en <https://bit.ly/2QcEKZJ>
- Laporte, JP; Morales, PI. 1994. Definición territorial en centros clásicos de tierras bajas: Una aplicación metodológica a la región de Dolores (en línea). In Laporte, JP; Escobedo, H (eds.). Simposio de Investigaciones Arqueológicas en Guatemala (6, Museo Nacional de Arqueología y Etnología, Guatemala). Consultado 30 jul. 2019. Disponible en <https://bit.ly/36wGrGh>
- López, O; Ramírez, SI; Espinosa, S; Moreno, JL; Ruiz, C; Villarreal, JM; Ruiz, JL. 2015. Manejo agroecológico de la nutrición en el cultivo del cacao

- (en línea). Universidad Autónoma de Chiapas, México. Consultado 24 dic. 2019. Disponible en <https://bit.ly/2MBCYP6>
- Martí, L; Troilo S; Filippini, MF; Salcedo, C; Bermejillo, A; Valdés, A. 2009. Monitoreo de cadmio y plomo en los principales fungicidas cúpricos comercializados en Mendoza, Argentina (en línea). Consultado. Disponible en <https://bit.ly/31KqOZ4>
- Mendoza, L. 2018. El 93% de la producción peruana de cacao se concentra en 7 regiones (en línea, sitio web). Consultado 24 ago. 2019. Disponible en <https://bit.ly/2pkxJL5>
- MINAGRI (Ministerio de Agricultura y Riego). 2019. Protocolos de muestreo de suelos con cadmio en zonas cacaoteras (en línea). Consultado 04 de oct. 2019. Disponible en <https://bit.ly/32Wswas>
- MINAGRI (Ministerio de Agricultura y Riego). 2003. Caracterización de las zonas productoras de cacao en el Perú y su competitividad (en línea). Consultado el 09 dic. 2019. Disponible en <https://bit.ly/2PckZvA>
- Motamayor, JC; Lachenaud, P; Wallace, J; Loor, L; Kuhn, DN; Brown, JS; Schnell, RJ. 2008. Geographic and genetic population differentiation of the Amazonian Chocolate tree (*Theobroma cacao* L) (en línea). PlosOne 3(10):e3311. Consultado 09 dic. 2019. DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0003311>
- Motamayor, JC; Risterucci, AM; Lopez, PA; Ortiz, CF; Moreno, A; Lanaud, C. 2002. Cacao domestication I: the origin of the cacao cultivated by the Mayas (en línea). Heredity 89: 380-386. Consultado 09 dic. 2019. Disponible en <https://go.nature.com/2YFOVYI>
- Monge-Amaya, O; Valenzuela-García, JL; Acedo-Félix, E; Certucha-Barragán, MT; Almendáriz-Tapia, FJ. 2008. Biosorción de cobre en sistema por lote y continuo con bacterias aerobias inmovilizadas en zeolita natural (clinoptilolita). Revista Internacional de Contaminación

- Ambiental 24(3):107-115. Consultado 09 jul. 2019. Disponible en <https://bit.ly/2PEhcv1>
- Österás, A; Greger, M. 2006. Interactions between calcium and copper or cadmium in Norway spruce. *Biología Plantarum*. 50(4): 647- 652. DOI: [10.1007/s10535-006-0101-6](https://doi.org/10.1007/s10535-006-0101-6)
- Ramírez, R; Giraldo, D; Barrera, D. 2017. Fitoextracción de cadmio con hierba mora (*Solanum nigrum* L.) en suelos cultivados con cacao (*Theobroma cacao* L.) (en línea). *Acta Agronómica*. 67 (3): 420-424. <https://bit.ly/35ezYPM>
- Ramtahal, G; Chang, I; Bekele, I; Bekele, F; Wilson, L; Maharaj,K; Lisa Harrynanan, L. 2016. Relationships between cadmium in tissues of cacao trees and soils in plantations of Trinidad and Tobago (en línea). *Food Nutr. Sci*. 7: 37–43. Disponible en <https://bit.ly/2pp3Adl>
- Roca, Al. (s.f.). Contaminación de suelos por metales pesados (en línea, sitio web). Consultado 16 jul. 2019. Disponible en <https://bit.ly/2BhMAZo>
- Rodríguez Albarracín, H. 2017. Dinámica del cadmio en suelos con niveles altos del elemento, en zonas productoras de cacao de Nilo y Yacopí, Cundinamarca (en línea). Tesis. Mg en ciencias Agrarias. Bogotá, Colombia. UNC. 133 p. Consultado el 03 oct. 2019. Disponible en: <https://bit.ly/2PwevwW>
- Rodríguez, M; Martínez, N; Romero, MC; del Río, LA; Sandalio, LM. 2008. Toxicidad del Cadmio en Plantas. *Ecosistemas* 17 (3): 139-146. <https://bit.ly/35MiATh>
- Sánchez, G; Casermeiro, MA. 2016. Ecotoxicología del cadmio riesgo para la salud de la utilización de suelos ricos en cadmio (en línea, sitio web). Consultado 20 jul. 2019. Disponible en <https://bit.ly/2nRihWd>
- Sánchez, C. 2012. Cultivo y producción de cacao: Morfología y taxonomía. Lima, Perú. Ripalme. 134 p.

- Sánchez R, M. 2017. Evaluación del contenido de metales pesados (cd y pb) en diferentes edades y etapas fenológicas del cultivo de cacao en dos zonas del Alto Huallaga (en línea). Perú. 184 p. Consultado el 03 oct. 2019. Disponible en: <https://bit.ly/32WAqkV>
- Singh, P; Tewari, R. 2003. Cadmium toxicity induced changes in plant water relations and oxidative metabolism of *Brassica juncea* L. plants. Journal of Environmental Biology 24(1):107-112. Disponible en <https://bit.ly/39BktnE>
- Tantalean Pedraza, E. 2017. Distribución del contenido de cadmio en los diferentes órganos del cacao CCN-51 en suelo aluvial y residual. Tesis. Ing. Agro. Tingo María, PE. UNAS (en línea). Consultado 21 jul. 2018. Disponible en <https://bit.ly/2OVpu2M>
- Tantalean, E; Huauya, M. 2017. Distribución del contenido de cadmio en los diferentes órganos del cacao CCN-51 en suelo aluvial y residual en las localidades de Jacintillo y Ramal de Aspuzana (en línea). Perú. Revista de Investigación en Agroproducción Sustentable 1(2):69-78. Consultado el 25 oct. 2019. DOI:[10.25127/aps.20172.365](https://doi.org/10.25127/aps.20172.365)
- Thomas, E; van Zonneveld, M; Loo, J; Hodgkin, T; Galluzzi, G; van Etten, J. 2012. Present spatial diversity patterns of *Theobroma cacao* L. in the neotropics reflect genetic differentiation in pleistocene refugia followed by Human-Influenced dispersal (en línea). PlosOne 7(10):e47676. Consultado 09 dic. 2019. DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0047676>
- Torres Quispe, NE. 2018. Evaluación de la concentración de metales pesados como As, Cu, Cd, Hg y Pb en el botadero de Cancharani de la ciudad de Puno (en línea). Tesis. Ing. Agro. Puno, Perú. UNAP. Consultado 24 ago. 2019. Disponible en <https://bit.ly/2lXnflq>

- Traina, SJ. 1999. The environmental chemistry of cadmium (en línea). *In* McLaughlin, MJ y Singh, BR (eds.). Cadmiun in soils and plants. Springer Science + Business Media, B. V. p. 11 – 37. Consultado 09 dic. 2019. Disponible en <https://bit.ly/2RLMRxd>
- Villavicencio, JL. 2019. Contenido de cadmio en el cacao: preocupación mundial (en línea, sitio web). Consultado 26 ago. 2019. Disponible en <https://bit.ly/2VJrFI5>
- Villanueva Vargas, H. 2008. Análisis y propuesta para la instalación de una subestación termo pluviométrica en el sector de Huamancoto, distrito de Daniel Alomía Robles, provincia de Leoncio prado, Huánuco (en línea). Tesis. Ing. En recursos naturales renovables mención conservación de suelos y agua, Tingo María, Perú. UNAS. Consultado 30 abr. 2019. Disponible en <https://bit.ly/36c0aeA>
- Zavala, J; Salgado, S; Marín, A; Palma, DJ; Castelán, M; Ramos, R. 2014. Transecto de suelos en terrazas con plantaciones de cítricos en tabasco (en línea). *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios* 1(2): 123 – 137. Consultado 30 jul. 2019. Disponible en <https://bit.ly/2ROkgXU>

ANEXOS

Anexo 01. Estadísticos descriptivos de la caracterización del suelo de la parcela tradicional de cacao.

Profundidad	Variable	Media	D.E.	Var(n-1)	CV	Mín	Máx	Mediana	Asimetría	Kurtosis
0-30	Cd T (mg/kg)	0.81	0.06	0.00	6.90	0.73	0.85	0.83	-1.58	-0.90
0-30	Cd D (mg/kg)	0.09	0.00	0.00	3.82	0.09	0.10	0.09	1.35	-0.88
0-30	PH	7.82	0.04	0.00	0.45	7.78	7.86	7.82	0.32	-1.41
0-30	Arena (%)	35.21	2.51	6.31	7.13	32.40	38.33	35.05	0.33	-1.24
0-30	Arcilla (%)	22.64	2.51	6.29	11.08	19.74	25.60	22.60	0.07	-1.33
0-30	Limo (%)	42.16	1.42	2.02	3.37	40.63	44.07	41.96	0.80	-0.95
0-30	M.O (%)	2.93	0.22	0.05	7.51	2.76	3.22	2.88	0.85	-1.37
0-30	N%	0.15	0.01	0.00	6.49	0.14	0.16	0.15	0.85	-1.37
0-30	P (ppm)	7.19	2.94	8.65	40.89	4.45	10.07	7.12	0.03	-1.95
0-30	K(ppm)	145.90	26.00	675.87	17.82	121.10	169.18	146.66	-0.02	-1.98
0-30	CIC	29.98	4.95	24.50	16.51	23.20	35.05	30.83	-0.98	-0.94
0-30	Ca+	28.66	4.97	24.74	17.36	21.89	33.80	29.47	-0.93	-0.97
0-30	K+	1.07	0.12	0.01	10.80	0.95	1.21	1.05	0.57	-1.39
0-30	Mg+	0.19	0.03	0.00	16.63	0.16	0.22	0.20	-0.08	-1.94
0-30	Na+	0.06	0.01	0.00	23.57	0.05	0.08	0.06	1.41	-1.00
0-30	CaCO3 (%)	4.41	0.31	0.10	7.01	4.00	4.75	4.45	-0.71	-0.96
30-60	Cd T (mg/kg)	0.87	0.28	0.08	32.39	0.71	1.29	0.74	1.98	-0.68
30-60	Cd D (mg/kg)	0.13	0.09	0.01	69.43	0.08	0.27	0.09	1.99	-0.67
30-60	PH	8.01	0.01	0.00	0.19	7.99	8.02	8.01	-0.37	-1.72
30-60	Arena (%)	42.02	4.04	16.29	9.61	35.97	44.11	44.00	-2.00	-0.67
30-60	Arcilla (%)	18.87	2.63	6.91	13.94	15.89	21.96	18.82	0.10	-1.39
30-60	Limo (%)	39.11	2.54	6.48	6.51	36.14	42.07	39.11	0.00	-1.35
30-60	M.O (%)	1.84	0.19	0.04	10.21	1.61	2.07	1.84	0.00	-1.00
30-60	N%	0.09	0.01	0.00	9.07	0.08	0.10	0.09	0.00	-1.00
30-60	P (ppm)	5.96	2.96	8.77	49.68	4.17	10.35	4.67	1.86	-0.74
30-60	K(ppm)	116.57	18.90	357.28	16.21	102.30	143.13	110.43	1.36	-1.03
30-60	CIC	34.43	5.07	25.71	14.73	27.97	40.35	34.69	-0.31	-1.00
30-60	Ca+	33.38	5.12	26.21	15.34	26.86	39.35	33.66	-0.32	-1.01
30-60	K+	0.85	0.06	0.00	6.73	0.78	0.91	0.85	0.00	-1.45
30-60	Mg+	0.15	0.03	0.00	17.25	0.13	0.19	0.15	1.44	-0.90
30-60	Na+	0.05	0.01	0.00	12.83	0.04	0.05	0.05	0.00	-2.00
30-60	CaCO3 (%)	3.95	1.97	3.88	49.82	1.00	5.00	4.91	-2.00	-0.67

Anexo 02. Estadísticos descriptivos de la caracterización del suelo de la parcela orgánico de cacao.

Profundidad	Variable	Media	D.E.	Var(n-1)	CV	Mín	Máx	Mediana	Asimetría	Kurtosis
0-30	Cd T (mg/kg)	0.75	0.04	0.00	5.53	0.73	0.82	0.74	1.76	-0.79
0-30	Cd D (mg/kg)	0.10	0.00	0.00	3.12	0.09	0.10	0.10	-1.00	-1.22
0-30	PH	7.56	0.22	0.05	2.87	7.40	7.87	7.49	1.50	-0.94
0-30	Arena (%)	36.24	7.36	54.11	20.30	28.18	44.26	36.26	-0.01	-1.65
0-30	Arcilla (%)	25.82	2.79	7.81	10.83	23.82	29.74	24.85	1.36	-1.03
0-30	Limo (%)	37.95	6.42	41.16	16.91	29.86	44.00	38.96	-0.62	-1.44
0-30	M.O (%)	4.08	0.12	0.01	2.82	3.91	4.14	4.14	-2.00	-0.67
0-30	N%	0.21	0.01	0.00	2.41	0.20	0.21	0.21	-2.00	-0.67
0-30	P (ppm)	6.49	1.53	2.33	23.55	4.31	7.68	6.98	-1.47	-0.94
0-30	K(ppm)	129.23	23.87	569.64	18.47	98.94	152.57	132.70	-0.62	-1.38
0-30	CIC	27.27	3.30	10.89	12.10	22.97	30.11	28.00	-0.83	-1.37
0-30	Ca+	25.84	3.38	11.44	13.09	21.41	28.60	26.67	-0.87	-1.36
0-30	K+	1.22	0.12	0.01	9.54	1.06	1.31	1.25	-1.09	-1.21
0-30	Mg+	0.17	0.03	0.00	18.60	0.13	0.20	0.18	-0.63	-1.43
0-30	Na+	0.05	0.02	0.00	42.55	0.03	0.07	0.04	0.85	-1.37
0-30	CaCO3 (%)	2.94	0.59	0.34	19.98	2.50	3.80	2.72	1.80	-0.74
30-60	Cd T (mg/kg)	0.79	0.03	0.00	3.56	0.76	0.83	0.79	0.65	-1.26
30-60	Cd D (mg/kg)	0.09	0.01	0.00	7.74	0.09	0.10	0.09	1.01	-1.17
30-60	PH	7.98	0.04	0.00	0.51	7.92	8.01	7.99	-1.47	-0.93
30-60	Arena (%)	40.52	5.34	28.55	13.19	35.61	48.04	39.22	1.29	-0.93
30-60	Arcilla (%)	20.91	2.69	7.23	12.86	17.89	24.18	20.78	0.23	-1.31
30-60	Limo (%)	38.57	3.00	9.01	7.78	34.07	40.22	40.00	-1.99	-0.67
30-60	M.O (%)	2.19	0.23	0.05	10.53	1.84	2.30	2.30	-2.00	-0.67
30-60	N%	0.11	0.01	0.00	9.52	0.09	0.11	0.11	-2.00	-0.67
30-60	P (ppm)	5.65	1.24	1.53	21.92	4.17	6.98	5.72	-0.25	-1.46
30-60	K(ppm)	100.91	2.07	4.29	2.05	98.88	103.70	100.54	0.93	-1.11
30-60	CIC	32.60	4.55	20.73	13.97	28.08	37.61	32.35	0.15	-1.77
30-60	Ca+	31.68	4.54	20.60	14.33	27.16	36.67	31.44	0.15	-1.77
30-60	K+	0.77	0.02	0.00	2.89	0.75	0.80	0.76	1.72	-0.76
30-60	Mg+	0.13	0.01	0.00	10.33	0.11	0.14	0.13	0.00	-1.36
30-60	Na+	0.02	0.01	0.00	55.92	0.01	0.04	0.02	1.13	-0.90
30-60	CaCO3 (%)	4.67	0.21	0.04	4.49	4.45	4.95	4.64	0.79	-1.04

Anexo 03. Estadísticos descriptivos de la caracterización del suelo de la parcela convencional de cacao.

Profundidad	Variable	Media	D.E.	Var(n-1)	CV	Mín	Máx	Mediana	Asimetría	Kurtosis
0-30	Cd T (mg/kg)	0.79	0.02	0.00	2.48	0.77	0.82	0.79	0.60	-1.30
0-30	Cd D (mg/kg)	0.10	0.01	0.00	13.49	0.08	0.12	0.10	-0.48	-1.10
0-30	pH	7.66	0.11	0.01	1.46	7.52	7.77	7.67	-0.36	-1.51
0-30	Arena (%)	37.44	5.21	27.13	13.91	29.97	41.70	39.04	-1.51	-0.89
0-30	Arcilla (%)	23.89	1.47	2.15	6.14	22.25	25.82	23.74	0.58	-0.97
0-30	Limo (%)	38.70	3.81	14.55	9.86	36.14	44.22	37.22	1.62	-0.88
0-30	M.O. (%)	3.34	0.13	0.02	3.98	3.22	3.45	3.34	0.00	-2.00
0-30	N%	0.17	0.01	0.00	3.50	0.16	0.17	0.17	0.00	-2.00
0-30	P (ppm)	6.07	3.02	9.10	49.73	3.89	10.49	4.95	1.74	-0.79
0-30	K (ppm)	108.79	7.31	53.49	6.72	98.95	116.22	110.00	-0.89	-1.06
0-30	CIC	32.60	3.78	14.28	11.59	27.90	35.81	33.34	-0.60	-1.54
0-30	Ca+	31.51	3.67	13.48	11.65	27.00	34.63	32.20	-0.55	-1.58
0-30	K+	0.93	0.12	0.01	12.70	0.76	1.03	0.97	-1.65	-0.79
0-30	Mg+	0.14	0.01	0.00	6.72	0.13	0.15	0.15	-0.85	-1.37
0-30	Na+	0.02	0.01	0.00	66.67	0.00	0.02	0.02	-2.00	-0.67
0-30	CaCO3 (%)	3.55	0.48	0.23	13.56	2.98	4.14	3.53	0.18	-1.11
30-60	Cd T (mg/kg)	0.78	0.03	0.00	3.99	0.74	0.81	0.79	-1.60	-0.84
30-60	Cd D (mg/kg)	0.10	0.01	0.00	10.63	0.09	0.11	0.09	0.51	-1.62
30-60	PH	7.98	0.02	0.00	0.26	7.95	8.00	7.98	0.00	-1.15
30-60	Arena (%)	46.91	6.88	47.31	14.66	37.68	54.33	47.82	-0.77	-0.96
30-60	Arcilla (%)	18.85	2.68	7.17	14.20	15.67	21.96	18.89	-0.07	-1.29
30-60	Limo (%)	34.23	4.46	19.85	13.01	30.00	40.36	33.29	1.10	-1.03
30-60	M.O (%)	2.13	0.22	0.05	10.35	1.84	2.30	2.19	-0.85	-1.37
30-60	N%	0.10	0.01	0.00	9.34	0.09	0.11	0.11	-0.85	-1.37
30-60	P (ppm)	6.42	3.29	10.84	51.31	3.75	10.91	5.51	1.13	-1.17
30-60	K(ppm)	99.70	5.08	25.84	5.10	94.32	104.14	100.17	-0.14	-1.89
30-60	CIC	31.94	2.67	7.15	8.37	28.68	35.00	32.04	-0.19	-1.25
30-60	Ca+	31.17	2.63	6.94	8.45	27.95	34.18	31.27	-0.20	-1.24
30-60	K+	0.66	0.04	0.00	6.26	0.61	0.71	0.66	0.36	-1.03
30-60	Mg+	0.11	0.02	0.00	20.63	0.09	0.14	0.10	1.72	-0.76
30-60	Na+	0.01	0.01	0.00	66.67	0.00	0.01	0.01	-2.00	-0.67
30-60	CaCO3 (%)	4.36	0.20	0.04	4.51	4.20	4.63	4.31	1.18	-1.13

Anexo 04. Coeficientes de correlación y significación entre las variables de las propiedades fisicoquímicas de los suelos estudiados.

	Cd disponible (mg/kg)	pH	Arcilla (%)	Carbonatos (%)	N%	P (ppm)	K(ppm)	Ca+	K+	Mg+	Cd total (mg-1kg-1)	Arena (%)	Limo (%)	M.O (%)	CIC	Na+	CaCO3 (%)	PSS (g)	CHRS (%)
Cd disponible (mg/kg)	1.00	0.64	0.46	1.0E-04	0.48	0.52	0.52	0.04	0.84	0.60	1.20E-11	0.61	0.88	0.46	0.03	0.64	1.0E-04	0.36	0.36
pH	0.10	1.00	3.0E-04	4.5E-03	9.5E-08	0.62	0.07	0.01	7.3E-05	0.04	0.53	0.19	0.55	1.3E-07	0.02	0.29	4.5E-03	0.58	0.58
Arcilla (%)	-0.16	-0.67	1.00	0.27	2.5E-05	0.99	0.06	0.66	4.5E-05	0.06	0.31	5.8E-06	0.08	2.5E-05	0.78	0.55	0.27	0.71	0.71
Nitrógeno (%)	-0.15	-0.86	0.75	-0.48	1.00	0.71	0.08	0.02	0.00	0.04	0.34	0.02	0.59	0.00	0.03	0.33	0.02	0.65	0.65
Fosforo (ppm)	-0.14	-0.11	-0.002	0.01	0.08	1.00	0.12	0.21	0.23	0.06	0.89	0.89	0.83	0.73	0.22	0.49	0.98	0.49	0.49
Potasio(ppm)	-0.14	-0.38	0.39	-0.03	0.36	0.33	1.00	0.14	2.1E-04	1.2E-12	0.58	0.13	0.45	0.11	0.19	2.1E-04	0.89	0.87	0.87
Calcio intercambiable (Ca+)	0.43	0.51	-0.10	0.09	-0.47	-0.27	-0.31	1.00	0.04	0.17	0.16	0.73	0.38	0.02	0.0E+00	0.26	0.68	0.16	0.16
Potasio intercambiable (K+)	-0.04	-0.72	0.73	-0.39	0.81	0.25	0.69	-0.43	1.00	3.6E-05	0.74	2.1E-03	0.15	5.1E-06	0.06	0.01	0.06	0.58	0.58
Magnesio intercambiable (Mg+)	-0.11	-0.42	0.39	-0.08	0.41	0.38	0.95	-0.29	0.74	1.00	0.61	0.11	0.37	0.06	0.24	9.1E-05	0.70	0.60	0.60
Cd total (mg/kg)	0.94	0.14	-0.22	-0.63	-0.21	-0.03	-0.12	0.30	-0.07	-0.11	1.00	0.54	0.91	0.33	0.16	0.65	9.4E-04	0.61	0.61
Arena (%)	0.11	0.28	-0.78	-0.01	-0.48	-0.03	-0.32	-0.07	-0.60	-0.34	0.13	1.00	5.4E-08	0.02	0.61	0.30	0.95	0.44	0.44
Limo (%)	-0.03	0.13	0.36	0.21	0.12	0.05	0.16	0.19	0.30	0.19	-0.02	-0.86	1.00	0.62	0.32	0.29	0.33	0.39	0.39
Materia orgánica (%)	-0.16	-0.85	0.75	-0.47	1.00	0.07	0.34	-0.46	0.79	0.39	-0.21	-0.48	0.11	1.00	0.03	0.42	0.02	0.62	0.62
Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC)	0.43	0.49	-0.06	0.07	-0.44	-0.26	-0.28	1.00	-0.38	-0.25	0.30	-0.11	0.21	-0.43	1.00	0.33	0.74	0.14	0.14
Sodio intercambiable(Na+)	0.10	-0.23	0.13	-0.14	0.21	0.15	0.69	-0.24	0.53	0.71	0.10	-0.22	0.23	0.17	-0.21	1.00	0.53	0.61	0.61
Carbonato de calcio (CaCO3) (%)	-0.71	0.56	-0.23	1.00	-0.48	0.01	-0.03	0.09	-0.39	-0.08	-0.63	-0.01	0.21	-0.47	0.07	-0.14	1.00	0.93	0.93

Anexo 05. ANAVA del Cd en las tres parcelas estudiadas, así como a nivel de transecto de cada una de las parcelas y a diferentes profundidades (0-30 y 30-60).

Cadmio (Cd) Disponible (mg/kg) de 0-30

Fuentes de variación	SC	Gl	CM	F	p-valor
Modelo	4.70E-04	5	9.40E-05	1.77	0.2527
Parcela	1.50E-04	2	7.30E-05	1.37	0.3226
Transecto	3.20E-04	3	1.10E-04	2.04	0.2104
Error	3.20E-04	6	5.30E-05		
Total	7.90E-04	11			

CV=7.42

Cadmio (Cd) Total (mg/kg) de 0-30

Fuentes de variación	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	0.01	5	2.10E-03	1.17	0.4193
Parcela	0.01	2	2.80E-03	1.56	0.2856
Transecto	4.90E-03	3	1.60E-03	0.92	0.4875
Error	0.01	6	1.80E-03		
Total	0.02	11			

CV=5.4

Cadmio (Cd) Disponible (mg/kg) de 30-60

Fuentes de variación	SC	Gl	CM	F	p-valor
Modelo	0.01	5	2.50E-03	0.88	0.5457
Parcela	3.90E-03	2	1.90E-03	0.68	0.5427
Transecto	0.01	3	2.90E-03	1.02	0.4487
Error	0.02	6	2.90E-03		
Total	0.03	11			

CV=49.91

Cadmio (Cd) Total (mg/kg) de 30-60

Fuentes de variación	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	0.11	5	0.02	0.86	0.5572
Parcela	0.02	2	0.01	0.38	0.7017
Transecto	0.09	3	0.03	1.18	0.3933
Error	0.15	6	0.03		
Total	0.26	11			

CV=19.63

Anexo 06. ANAVA de concentración de Cd en hoja, hojarasca y grano

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
Cd (ppm)	36	0.49	0.46	16.16

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	1.09	2	0.54	15.88	<0.0001
Órganos	1.09	2	0.54	15.88	<0.0001
Error	1.13	33	0.03		
Total	2.22	35			

Sistema SP	Medias	n	E.E.	Diferencia de los promedios de Cd
Grano	0.94	12	0.05	A
Hojarasca	1.13	12	0.05	B
Hoja	1.37	12	0.05	C

Anexo 7. ANAVA del Cd a nivel de parcela, transecto y SSP

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
Cd (ppm)	60	0.92	0.9	16.64

F.V.	SC	GI	CM	F	p-valor
Modelo	11.18	9	1.24	60.200	<0.0001
Parcela	0.090	2	0.04	2.1300	0.129
Transecto	0.030	3	0.01	0.5400	0.658
SSP	11.06	4	2.77	133.98	<0.0001
Error	1.030	50	0.02		
Total	12.21	59			

SSP	Medias	n	E.E.	Diferencia de los promedios de Cd	
CdDS (ppm)	0.10	12	0.04	A	
CdTS (ppm)	0.78	12	0.04		B
CdG (ppm)	0.94	12	0.04		C
CdHo (ppm)	1.13	12	0.04		D
CdH (ppm)	1.37	12	0.04		E

Anexo 08. Coeficientes de correlación y significación entre las variables de las propiedades fisicoquímicas de los suelos de la parcela tradicional

	Cd total (mg/kg)	Cd disponible (mg/kg)	pH	Carbonatos (%)	Arena (%)	Arcilla (%)	Limo (%)	M.O (%)	N %	P (ppm)	K(ppm)	CIC	Ca+	K+	Mg+	Na+	CaCO ₃ (%)
Cd total (mg/kg)	1.00	0.00	0.65	0.00	0.49	0.49	0.65	0.72	0.71	0.95	0.36	0.27	0.27	0.77	0.30	0.89	0.00
Cd disponible (mg/kg)	0.97	1.00	0.38	0.00	0.28	0.36	0.37	0.46	0.45	0.70	0.30	0.13	0.12	0.42	0.24	0.93	0.00
pH	0.19	0.36	1.00	0.62	0.01	0.05	0.07	0.00	0.00	0.43	0.16	0.18	0.16	0.00	0.14	0.22	0.62
Arena (%)	0.28	0.44	0.81	-0.31	1.00	0.00	0.01	0.02	0.02	0.59	0.15	0.30	0.27	0.00	0.17	0.32	0.45
Arcilla (%)	-0.28	-0.38	-0.71	0.30	-0.88	1.00	0.27	0.03	0.03	0.99	0.16	0.80	0.76	0.05	0.18	0.25	0.46
Limo (%)	-0.19	-0.37	-0.67	0.22	-0.81	0.44	1.00	0.14	0.13	0.30	0.34	0.06	0.06	0.02	0.36	0.64	0.61
Materia orgánica (%)	-0.15	-0.31	-0.99	0.17	-0.80	0.77	0.57	1.00	0.00	0.54	0.17	0.30	0.27	0.01	0.16	0.20	0.69
Nitrógeno (%)	-0.16	-0.31	-0.99	0.17	-0.80	0.75	0.59	1.00	1.00	0.54	0.16	0.29	0.26	0.01	0.15	0.17	0.68
Fosforo (ppm)	-0.03	-0.16	-0.32	0.08	-0.23	0.01	0.42	0.26	0.25	1.00	0.29	0.04	0.04	0.14	0.29	0.86	0.85
Potasio(ppm)	-0.37	-0.42	-0.55	0.40	-0.56	0.55	0.39	0.53	0.55	0.43	1.00	0.51	0.48	0.11	0.00	0.02	0.32
Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC)	0.45	0.59	0.53	-0.46	0.42	-0.10	-0.68	-0.42	-0.43	-0.74	-0.27	1.00	0.00	0.12	0.45	0.93	0.25
Calcio intercambiable (Ca+)	0.45	0.59	0.55	-0.46	0.44	-0.13	-0.69	-0.44	-0.45	-0.74	-0.29	1.00	1.00	0.10	0.42	0.96	0.25
Potasio intercambiable (K+)	-0.13	-0.33	-0.90	0.18	-0.87	0.71	0.79	0.86	0.86	0.57	0.61	-0.60	-0.62	1.00	0.12	0.39	0.67
Magnesio intercambiable (Mg+)	-0.42	-0.47	-0.57	0.45	-0.54	0.53	0.38	0.55	0.56	0.43	1.00	-0.31	-0.33	0.60	1.00	0.02	0.26
Sodio intercambiable(Na+)	-0.06	-0.04	-0.48	0.03	-0.40	0.46	0.20	0.51	0.53	0.08	0.80	0.04	0.02	0.35	0.79	1.00	0.94
Carbonato de calcio (CaCO ₃) (%)	-0.99	-0.98	-0.21	1.00	-0.31	0.30	0.22	0.17	0.17	0.08	0.40	-0.46	-0.46	0.18	0.45	0.03	1.00

Anexo 09. Coeficientes de correlación y significación entre las variables de las propiedades fisicoquímicas de los suelos orgánicos.

	Cd total (mg/kg)	Cd disponible (mg/kg)	pH	Carbonatos (%)	Arena (%)	Arcilla (%)	Limo (%)	M.O (%)	N%	P (ppm)	K(ppm)	CIC	Ca+	K+	Mg+	Na+	CaCO ₃ (%)
Cd total (mg/kg)	1.00	0.91	0.58	0.43	0.07	0.40	0.09	0.19	0.19	0.34	0.87	0.96	1.00	0.43	0.82	0.38	0.43
Cd disponible (mg/kg)	0.05	1.00	0.17	0.27	0.37	0.03	0.83	0.41	0.40	0.17	0.20	0.65	0.72	0.20	0.15	0.68	0.27
pH	0.23	-0.54	1.00	0.00	0.86	0.06	0.28	0.01	0.01	0.05	0.00	0.09	0.07	0.00	0.00	0.03	0.00
Arena (%)	0.66	-0.37	0.07	0.16	1.00	0.06	0.01	0.36	0.37	0.36	0.90	0.30	0.34	0.47	0.90	0.71	0.71
Arcilla (%)	-0.35	0.76	-0.69	-0.69	-0.70	1.00	0.69	0.06	0.05	0.47	0.04	0.86	0.78	0.01	0.04	0.54	0.06
Limo (%)	-0.64	-0.09	0.44	0.33	-0.83	0.17	1.00	0.94	0.92	0.03	0.21	0.09	0.10	0.59	0.22	0.30	0.43
Materia orgánica (%)	-0.52	0.34	-0.82	-0.91	-0.37	0.69	-0.03	1.00	0.00	0.44	0.08	0.11	0.09	0.00	0.05	0.16	0.00
Nitrógeno (%)	-0.51	0.35	-0.82	-0.92	-0.37	0.70	-0.04	1.00	1.00	0.44	0.07	0.11	0.09	0.00	0.05	0.14	0.00
Fosforo (ppm)	0.39	0.53	-0.70	-0.62	0.38	0.30	-0.75	0.32	0.32	1.00	0.06	0.28	0.27	0.19	0.03	0.27	0.10
Potasio(ppm)	0.07	0.51	-0.87	-0.85	-0.05	0.72	-0.50	0.66	0.67	0.68	1.00	0.10	0.08	0.00	0.00	0.23	0.01
Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC)	-0.02	0.19	0.64	0.69	-0.42	-0.07	0.64	-0.61	-0.61	-0.43	-0.62	1.00	0.00	0.10	0.11	0.14	0.06
Calcio intercambiable (Ca+)	0.00	0.15	0.67	0.72	-0.39	-0.12	0.63	-0.64	-0.64	-0.45	-0.65	1.00	1.00	0.08	0.09	0.13	0.04
Potasio intercambiable (K+)	-0.33	0.51	-0.93	-0.97	-0.30	0.81	-0.22	0.93	0.94	0.51	0.87	-0.62	-0.65	1.00	0.00	0.10	0.00
Magnesio intercambiable (Mg+)	0.09	0.56	-0.88	-0.87	-0.05	0.72	-0.49	0.70	0.71	0.76	0.97	-0.60	-0.63	0.89	1.00	0.24	0.00
Sodio intercambiable(Na+)	-0.36	0.18	-0.75	-0.69	0.16	0.26	-0.42	0.55	0.57	0.45	0.48	-0.57	-0.59	0.62	0.47	1.00	0.06
Carbonato de calcio (CaCO ₃) (%)	0.33	-0.44	0.97	1.00	0.16	-0.69	0.33	-0.91	-0.92	-0.62	-0.85	0.69	0.72	-0.97	-0.87	-0.69	1.00

Anexo 10. Coeficientes de correlación y significación entre las variables de las propiedades fisicoquímicas de los suelos de la parcela convencional.

	Cd total (mg/kg)	Cd disponible (mg/kg)	pH	Carbonatos (%)	Arena (%)	Arcilla (%)	Limo (%)	M.O (%)	N%	P (ppm)	K(ppm)	CIC	Ca+	K+	Mg+	Na+	CaCO3 (%)
Cd total (mg/kg)	1.00	0.27	0.27	0.47	0.38	0.32	0.45	0.74	0.72	0.06	0.52	0.30	0.29	0.96	0.41	0.87	0.47
Cd disponible (mg/kg)	0.45	1.00	0.38	0.30	0.51	0.31	0.72	0.57	0.54	0.14	0.57	0.56	0.59	0.25	0.69	0.25	0.30
pH	-0.45	-0.36	1.00	0.00	0.24	0.08	0.45	0.01	0.01	0.53	0.30	0.57	0.49	0.08	0.10	0.15	0.00
Arena (%)	-0.36	-0.27	0.47	0.18	1.00	0.00	0.00	0.10	0.09	0.87	0.40	0.21	0.24	0.03	0.47	0.75	0.68
Arcilla (%)	0.40	0.42	-0.65	-0.39	-0.95	1.00	0.01	0.03	0.03	0.83	0.32	0.33	0.39	0.01	0.33	0.56	0.34
Limo (%)	0.31	0.15	-0.31	-0.01	-0.97	0.85	1.00	0.23	0.22	0.67	0.51	0.17	0.19	0.10	0.63	0.90	0.98
Materia orgánica (%)	0.14	0.24	-0.85	-0.76	-0.62	0.76	0.48	1.00	0.00	0.81	0.06	0.82	0.92	0.01	0.05	0.23	0.03
Nitrógeno (%)	0.15	0.26	-0.86	-0.76	-0.63	0.77	0.49	1.00	1.00	0.82	0.07	0.82	0.91	0.01	0.04	0.23	0.03
Fosforo (ppm)	-0.69	-0.57	0.26	0.30	-0.07	-0.09	0.18	-0.10	-0.10	1.00	0.97	0.24	0.23	0.97	0.48	0.75	0.47
Potasio(ppm)	-0.27	0.24	-0.42	-0.36	-0.35	0.41	0.28	0.68	0.68	-0.02	1.00	0.37	0.43	0.02	0.01	0.91	0.38
Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC)	-0.42	0.25	0.24	0.30	-0.50	0.40	0.54	0.10	0.10	0.47	0.37	1.00	0.00	0.19	0.47	0.23	0.47
Calcio intercambiable (Ca+)	-0.43	0.23	0.29	0.34	-0.47	0.36	0.52	0.04	0.05	0.48	0.33	1.00	1.00	0.25	0.54	0.20	0.40
Potasio intercambiable (K+)	0.02	0.46	-0.65	-0.50	-0.74	0.84	0.62	0.86	0.86	-0.01	0.79	0.51	0.47	1.00	0.03	0.69	0.21
Magnesio intercambiable (Mg+)	-0.34	0.17	-0.62	-0.58	-0.30	0.40	0.21	0.71	0.72	0.29	0.82	0.30	0.26	0.76	1.00	0.45	0.13
Sodio intercambiable(Na+)	0.07	-0.46	-0.56	-0.39	-0.14	0.24	0.05	0.48	0.48	0.13	0.05	-0.48	-0.51	0.17	0.31	1.00	0.34
Carbonato de calcio (CaCO3) (%)	-0.30	-0.42	0.91	1.00	0.18	-0.39	-0.01	-0.76	-0.76	0.30	-0.36	0.30	0.34	-0.50	-0.58	-0.39	1.00

Anexo 11. Análisis de regresiones parciales de la concentración de Cd en los granos de cacao (ppm) respecto las concentraciones del Cd en las hojas funcionales (ppm), hojarasca (ppm)

variable	N	R	R Aj	ECMP	AIC	BIC
Cd G (ppm)	12	0.99	0.99	0.00056	-62.5	-60.08

Coefficiente	Est	E.E	LI(95%)	LS(95%)	T	p-valor	CpMallows	VIF
constante	-7.61	2.62	-13.66	-1.57	-2.9	0.0198		
CdH* (ppm)	2.55	0.43	1.56	3.54	5.92	0.0004	34.25	7.05
CdHo** (ppm)	1.34	0.09	1.13	1.56	14.55	<0.0001	191.41	2.82

F.V	SC	GI	CM	F	p-valor
Modelo	0.17	3	0.06	273.69	<0.0001
Cd H (ppm)	0.01	1	0.01	35.03	0.0004
Cd Ho(ppm)	0.04	1	0.04	211.83	<0.0001
Error	0.0017	8	0.00021		
Lack of Fit	0.00086	5	0.00017	0.64	0,6913
Error Puro	0.00081	3	0.00027		
Total	0.17	11			

*CdH: Concentración de Cd en hojas

** CdHo: Concentración de Cd en hojarasca

Anexo 10. Panel fotográfico de investigación



Muestreo de suelo.



Muestreo de suelo.



Muestreo de mazorcas.



Muestreo de hojas.



Muestreo de hojarasca.



Preparación de muestras de suelo y tejidos.



UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA

TINGO MARIA
VICERRECTORADO DE INVESTIGACIÓN
LABORATORIO CENTRAL DE INVESTIGACIÓN



ANALISIS

SOLICITANTE Universidad Nacional Hermilio Valdizan
INVESTIGACIÓN Alternativas de manejo de cadmio en el cultivo de cacao orgánico (Theobroma cacao L.) en suelos contaminados con metales pesados

DEPARTAMENTO : Huanuco
PROVINCIA : Leoncio Prado
DISTRITO :

N°	CODIGO	DATOS DE LA MUESTRA		Cd total mg/Kg	Cd disponible mg/Kg
		Muestra	Cod. Sol.		
1	SA 0034	Suelo	M 001	0.725	0.0936
2	SA 0035	Suelo	M 002	0.840	0.0928
3	SA 0036	Suelo	M 003	0.845	0.0992
4	SA 0037	Suelo	M 004	0.810	0.0908
5	SA 0038	Suelo	M 005	0.705	0.0876
6	SA 0039	Suelo	M 006	0.745	0.0904
7	SA 0040	Suelo	M 007	0.735	0.0820
8	SA 0041	Suelo	M 008	1.290	0.2708

Equipo: ICP OES /HORIBA-Ultima expert

Nota: Muestras digeridas por el solicitante

Recibo N°: 0582703

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA
LABORATORIO CENTRAL DE INVESTIGACION
Dra. Elizabeth Ordóñez Gomez
DIRECTORA

N°	CODIGO	DATOS DE LA MUESTRA		Cd total mg/Kg	Cd disponible mg/Kg
		Muestra	Cod. Sol.		
9	SA 0042	Suelo	M 009	0.730	0.0936
10	SA 0043	Suelo	M 010	0.725	0.0972
11	SA 0044	Suelo	M 011	0.815	0.1004
12	SA 0045	Suelo	M 012	0.745	0.0996
13	SA 0046	Suelo	M 013	0.775	0.0948
14	SA 0047	Suelo	M 014	0.760	0.0872
15	SA 0048	Suelo	M 015	0.825	0.0896
16	SA 0049	Suelo	M 016	0.795	0.1036

Fecha: 4/06/2019

Ing. Sánchez Rodríguez, Miguel
RESPONSABLE AREA ICP OES



UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA

TINGO MARIA
VICERRECTORADO DE INVESTIGACIÓN
LABORATORIO CENTRAL DE INVESTIGACIÓN



ANÁLISIS

SOLICITANTE Universidad Nacional Hermilio Valdizan
INVESTIGACIÓN Alternativas de manejo de cadmio en el cultivo de cacao orgánico (Theobroma cacao L.) en suelos contaminados con metales pesados

DEPARTAMENTO : Huanuco
PROVINCIA : Leoncio Prado
DISTRITO : Daniel Alomía Robles

N°	CODIGO	DATOS DE LA MUESTRA		Cd total mg/Kg	Cd disponible mg/Kg
		Muestra	Cod. Sol.		
17	SA 0050	Suelo	M 017	0.815	0.1008
18	SA 0051	Suelo	M 018	0.770	0.0848
19	SA 0052	Suelo	M 019	0.780	0.1180
20	SA 0053	Suelo	M 020	0.795	0.1068
21	SA 0054	Suelo	M 021	0.735	0.0868
22	SA 0055	Suelo	M 022	0.805	0.1076
23	SA 0056	Suelo	M 023	0.785	0.0996
24	SA 0057	Suelo	M 024	0.795	0.0872
25	SA 0058	Suelo	M 025	0.765	0.1064

Equipo: ICP OES /HORIBA-Ultima expert

Nota: Muestras digeridas por el solicitante

Fecha: 4/06/2019

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA
LABORATORIO CENTRAL DE INVESTIGACIÓN
Elisabeth Ordoñez Gomez
Dra. Elisabeth Ordoñez Gomez
DIRECTORA

Miguel Sánchez Rodríguez
Ing. Sánchez Rodríguez Miguel
ESPECIALISTA AREA ICP OES



UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA

TINGO MARIA
VICERRECTORADO DE INVESTIGACIÓN
LABORATORIO CENTRAL DE INVESTIGACIÓN



ANALISIS

SOLICITANTE Universidad Nacional Hermilio Valdizan
INVESTIGACIÓN Alternativas de manejo de cadmio en el cultivo de cacao orgánico (Theobroma cacao l.) en suelos contaminados con metales pesados

DEPARTAMENTO : Huanuco
PROVINCIA : Leoncio Prado
DISTRITO : ---

N°	CODIGO	DATOS DE LA MUESTRA			Cd
		Muestra	Tipo	sector	ug/L
1	ICP 0224	Cacao	Grano	---	17.1075
2	ICP 0225	Cacao	Grano	---	19.0625
3	ICP 0226	Cacao	Grano	---	22.3775
4	ICP 0227	Cacao	Grano	---	24.6125
5	ICP 0228	Cacao	Grano	---	17.4175
6	ICP 0229	Cacao	Grano	---	18.3650
7	ICP 0230	Cacao	Grano	---	21.3050
8	ICP 0231	Cacao	Grano	---	19.5250

N°	CODIGO	DATOS DE LA MUESTRA			Cd
		Muestra	Tipo	sector	ug/L
9	ICP 0232	Cacao	Grano	---	21.4425
10	ICP 0233	Cacao	Grano	---	23.8175
11	ICP 0234	Cacao	Grano	---	18.3275
12	ICP 0235	Cacao	Grano	---	22.1550

Equipo: ICP OES /HORIBA-Ultima expert

Nota: Muestras digeridas por el solicitante/resultados solo de lecturas

Recibo N° 0582703

Fecha: 11/07/2019

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA
LABORATORIO CENTRAL DE INVESTIGACION
Dra. Elizabeth Ordoñez Gomez
DIRECTORA

Ing. Sánchez Rodríguez Miguel
ESPECIALISTA AREA ICP OES



UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA

TINGO MARIA
VICERRECTORADO DE INVESTIGACIÓN
LABORATORIO CENTRAL DE INVESTIGACIÓN



ANALISIS

SOLICITANTE Universidad Nacional Hermilio Valdizan
INVESTIGACIÓN Alternativas de manejo de cadmio en el cultivo de cacao orgánico (Theobroma cacao L.) en suelos contaminados con metales pesados

DEPARTAMENTO : Huanuco
PROVINCIA : Leoncio Prado
DISTRITO : Daniel Alomía Robles

N°	CODIGO	DATOS DE LA MUESTRA			Cd
		Muestra	Tipo	Cod. Sol.	mg/Kg
1	ICP 0139	Cacao	Hoja	MH 001	1.345
2	ICP 0140	Cacao	Hoja	MH 002	1.355
3	ICP 0141	Cacao	Hoja	MH 003	1.375
4	ICP 0142	Cacao	Hoja	MH 004	1.390
5	ICP 0143	Cacao	Hoja	MH 005	1.370
6	ICP 0144	Cacao	Hoja	MH 006	1.335
7	ICP 0145	Cacao	Hoja	MH 007	1.305
8	ICP 0146	Cacao	Hoja	MH 008	1.330

Equipo: ICP OES /HORIBA-Ultima expert

Nota: Muestras digeridas por el solicitante

N°	CODIGO	DATOS DE LA MUESTRA			Cd
		Muestra	Tipo	Cod. Sol.	mg/Kg
9	ICP 0147	Cacao	Hoja	MH 009	1.455
10	ICP 0148	Cacao	Hoja	MH 010	1.490
11	ICP 0149	Cacao	Hoja	MH 011	1.310
12	ICP 0150	Cacao	Hoja	MH 012	1.320
13	ICP 0151	Cacao	Hoja	MH 013	1.350

Fecha: 4/06/2019

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA
LABORATORIO CENTRAL DE INVESTIGACIÓN
Dra. Elizabeth Ordoñez Gomez
DIRECTORA

Ing. Sánchez Rodríguez Miguel
ESPECIALISTA AREA ICP OES



UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA

TINGO MARIA
VICERRECTORADO DE INVESTIGACIÓN
LABORATORIO CENTRAL DE INVESTIGACIÓN



ANÁLISIS

SOLICITANTE Universidad Nacional Hermilio Valdizan
INVESTIGACIÓN Alternativas de manejo de cadmio en el cultivo de cacao orgánico (*Theobroma cacao* L.) en suelos contaminados con metales pesados

DEPARTAMENTO : Huanuco
PROVINCIA : Leoncio Prado
DISTRITO : Daniel Alomía Robles

N°	CODIGO	DATOS DE LA MUESTRA			Cd
		Muestra	Tipo	Cod. Sol.	mg/Kg
1	ICP 0152	Cacao	Hojarasca	MHC 001	1.050
2	ICP 0153	Cacao	Hojarasca	MHC 002	0.925
3	ICP 0154	Cacao	Hojarasca	MHC 003	1.175
4	ICP 0155	Cacao	Hojarasca	MHC 004	0.930
5	ICP 0156	Cacao	Hojarasca	MHC 005	1.265
6	ICP 0157	Cacao	Hojarasca	MHC 006	1.195
7	ICP 0158	Cacao	Hojarasca	MHC 007	1.180
8	ICP 0159	Cacao	Hojarasca	MHC 008	1.125

Equipo: ICP OES /HORIBA-Ultima expert

Nota: Muestras digeridas por el solicitante

N°	CODIGO	DATOS DE LA MUESTRA			Cd
		Muestra	Tipo	Cod. Sol.	mg/Kg
9	ICP 0160	Cacao	Hojarasca	MHC 009	1.390
10	ICP 0161	Cacao	Hojarasca	MHC 010	1.185
11	ICP 0162	Cacao	Hojarasca	MHC 011	1.145
12	ICP 0163	Cacao	Hojarasca	MHC 012	1.020
13	ICP 0164	Cacao	Hojarasca	MHC 013	1.155

Fecha: 4/06/2019

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA
LABORATORIO CENTRAL DE INVESTIGACIÓN
Dra. Elizabeth Ordoñez Gomez
DIRECTORA

Agib
Ing. Sánchez Rodríguez Miguel
ESPECIALISTA AREA ICP OES



LASA TINGO MARIA

Laboratorio de Análisis de Suelos y Agua

A.V. Asunción Saldaña Lt. 34 Telf. 999250084 - 988094215 Correo: lasatingomaria@gmail.com

RESULTADO DE ANÁLISIS FÍSICO - QUÍMICO DE SUELO

Solicitante : VILLANUEVA JARA PILAR KATERIN
 Procedencia : DANIEL ALOMIA ROBLES-PUMAHUASI-HUAMANCOTO
 Muestreado por : El interesado

Código de Muestra	% DE ARENA	% DE ARCILLA	% DE LIMO	TEXTURA	pH (1:1)	CaCO ₃	M.O (%)	N (%)	P (p.m.m.)	K (p.m.m.)	ClCt (meq/100g)	Calcio (meq/100g)	Magnesio (meq/100g)	Potasio (meq/100g)	Sodio (meq/100g)	Al (meq/100g)	H ⁺ (meq/100g)	% Bas. Camb	% Ac. Camb	% Sat. Al.
M1	35.84	23.53	40.63	Franca	7.86	4.75	2.76	0.14	4.45	167.51	35.05	33.80	0.95	0.22	0.08	---	---	100	---	---
M2	32.40	25.60	42.00	Franca	7.78	4.45	3.22	0.16	10.07	169.18	30.40	28.90	1.21	0.22	0.06	---	---	100	---	---
M3	34.26	21.67	44.07	Franca	7.80	4.00	2.99	0.15	9.37	121.10	23.20	21.89	1.10	0.16	0.05	---	---	100	---	---
M4	38.33	19.74	41.93	Franca	7.83	4.45	2.76	0.14	4.87	125.81	31.26	30.04	1.00	0.17	0.05	---	---	100	---	---
M5	43.97	19.89	36.14	Franca	7.99	5.00	2.07	0.10	4.17	103.82	35.02	34.06	0.78	0.14	0.04	---	---	100	---	---
M6	44.04	15.89	40.07	Franca	8.02	4.88	1.61	0.08	10.35	143.13	27.97	26.86	0.87	0.19	0.05	---	---	100	---	---
M7	35.97	21.96	42.07	Franca	8.00	4.93	1.84	0.09	4.17	117.04	34.36	33.25	0.91	0.15	0.04	---	---	100	---	---
M8	44.11	17.74	38.14	Franca	8.02	1.00	1.84	0.09	5.16	102.30	40.35	39.35	0.82	0.13	0.05	---	---	100	---	---
M9	32.18	23.82	44.00	Franca	7.87	3.80	4.14	0.21	4.31	98.94	29.59	28.36	1.06	0.13	0.03	---	---	100	---	---
M10	40.33	23.82	35.86	Franca	7.40	2.50	4.14	0.21	7.40	122.15	26.41	24.98	1.20	0.16	0.07	---	---	100	---	---
M11	44.26	25.89	29.86	Franca	7.42	2.69	3.91	0.20	7.68	152.57	22.97	21.41	1.31	0.20	0.05	---	---	100	---	---
M12	28.18	29.74	42.07	Fr Ar	7.55	2.75	4.14	0.21	6.56	143.25	30.11	28.60	1.30	0.19	0.03	---	---	100	---	---
M13	38.33	21.74	39.93	Franca	8.00	4.95	1.84	0.09	5.16	98.88	35.22	34.30	0.76	0.12	0.04	---	---	100	---	---
M14	40.11	19.82	40.07	Franca	8.01	4.68	2.30	0.11	4.17	99.95	29.47	28.58	0.75	0.11	0.02	---	---	100	---	---
M15	48.04	17.89	34.07	Franca	7.98	4.45	2.30	0.11	6.98	103.70	28.08	27.16	0.76	0.14	0.02	---	---	100	---	---
M16	35.61	24.18	40.22	Franca	7.92	4.60	2.30	0.11	6.28	101.12	37.61	36.67	0.80	0.13	0.01	---	---	100	---	---
M17	41.70	22.25	36.14	Franca	7.52	2.98	3.22	0.16	5.44	98.95	27.90	27.00	0.76	0.13	0.02	---	---	100	---	---
M18	29.97	25.82	44.22	Franca	7.77	4.14	3.45	0.17	10.49	108.34	35.50	34.37	0.97	0.14	0.02	---	---	100	---	---
M19	37.97	23.74	38.29	Franca	7.72	3.43	3.45	0.17	4.45	116.22	35.81	34.63	1.03	0.15	0.00	---	---	100	---	---
M20	40.11	23.74	36.14	Franca	7.61	3.63	3.22	0.16	3.89	111.66	31.17	30.03	0.97	0.15	0.02	---	---	100	---	---
M21	54.33	15.67	30.00	Fr Ao	8.00	4.23	2.07	0.10	10.91	103.94	32.89	32.09	0.65	0.14	0.01	---	---	100	---	---
M22	37.68	21.96	40.36	Franca	7.98	4.63	1.84	0.09	6.84	96.40	35.00	34.18	0.71	0.10	0.00	---	---	100	---	---
M23	47.97	19.82	32.22	Franca	7.97	4.20	2.30	0.11	4.17	94.32	31.19	30.44	0.66	0.09	0.01	---	---	100	---	---
M24	47.68	17.96	34.36	Franca	7.95	4.38	2.30	0.11	3.75	104.14	28.68	27.95	0.61	0.10	0.01	---	---	100	---	---

LABORATORIO DE ANÁLISIS DE SUELOS Y AGUA
LASA TINGO MARIA EIRL.

 Dr. José Wilfredo Zavala Solarzano
 JEFE DE LABORATORIO

Tingo María, 12 de Julio del 2019