

**Instituto Tecnológico de Costa Rica
Sede San Carlos**

**Escuela de Agronomía
Vicerrectoría de Investigación y Extensión
Informe Final de Investigación**

**Determinación de concentraciones de cadmio en
plantaciones de cacao (*Theobroma cacao* L.) en
Costa Rica**

Centro Funcional
2151-028

Investigador Responsable
M.Sc. Parménides Furcal Beriguete

San Carlos, marzo 2019

TABLA DE CONTENIDOS

TABLA DE CONTENIDOS	ii
TABLA DE CUADROS	iv
TABLA DE FIGURAS	v
Resumen	2
1. Introducción	3
2. Metodología	5
2.1. Ubicación del proyecto	5
2.2. Recolección de información	5
2.3. Selección de los productores	5
2.4. Área experimental y unidad de medición	5
2.5. Variables evaluadas	6
2.5.1. Análisis en suelo	6
2.5.2. Análisis químico de raíz, hoja y grano	6
2.6. Metodología de muestreo	6
2.6.1. Muestra de suelo en finca	6
2.6.2. Muestra de suelo en laboratorio	6
2.6.3. Muestra en raíces de árbol de cacao	7
2.6.4. Muestras de hojas de cacao	8
2.6.5. Muestra de mazorcas de cacao	8
2.7. Análisis estadísticos de datos	9
3. Resultados y discusión	9
3.1 Resultados de la Región Huetar Norte	11
3.1.1 pH de los suelos	11
3.1.2 Materia orgánica de los suelos de la Región Huetar Norte	13
3.1.3 Análisis granulométricos de los suelos de la Región Huetar Norte	14
3.1.4 Contenido de zinc en los suelos de la Región Huetar Norte	15
3.1.5 Contenido de cadmio en suelos de la Región Huetar Norte	16
3.1.6 Resultados análisis de cadmio en raíz, hoja y grano de cacao en la Región Huetar Norte	16
3.1.7 Correlaciones del contenido de cadmio entre las variables evaluadas en la Región Huetar Norte	19
3.1.8 Resultados de análisis en las hojas de cacao recolectadas en la Región Huetar Norte	20
3.2 Resultados de la Región Brunca	21
3.2.1 pH de los suelos en la Región Brunca	22
3.2.2 Materia orgánica de las muestras de suelos en la Región Brunca	23
3.2.3 Análisis granulométricos y textura de los suelos en Región Brunca	23
3.2.4 Resultados de análisis Cd en raíz, hojas y granos de cacao de la Región Brunca	24
3.2.5 Resultados de correlación en la Región Brunca	27
3.2.6 Resultados de análisis foliares en la Región Brunca	27
3.3 Resultados de la Región Caribe	29
3.3.1 pH de los suelos	29
3.3.2 Contenido de zinc en los suelos de la Región Caribe	30

3.3.3	Contenido de materia orgánica de la Región Caribe	32
3.3.4	Análisis granulométricos de los suelos de Región Caribe	32
3.3.5	Contenido de cadmio en suelos de la Región Caribe.....	32
3.3.6	Resultados de análisis de Cd en raíz, hoja y grano de cacao de la Región Caribe	34
3.3.7	Resultados de análisis foliares de la Región Caribe	37
5	<i>Recomendaciones</i>	39
6	<i>Referencias bibliográficas</i>	40

TABLA DE CUADROS

Cuadro 1.	Resumen de estadística descriptiva de las muestras analizadas para explorar la presencia o no de cadmio en tres regiones de Costa Rica. Diciembre de 2018.	11
Cuadro 2.	Resultados de análisis químicos para fertilidad y de cadmio en suelos de Región Huetar Norte, Costa Rica. Diciembre de 2018.	12
Cuadro 3.	Resultados de análisis de materia orgánica y granulométrico en suelos de Región Huetar Norte, Costa Rica. Diciembre de 2018.	14
Cuadro 4.	Resultados de análisis de cadmio en raíz, hoja y grano no fermentado y seco de <i>Theobroma cacao</i> L de la Región Huetar Norte, Costa Rica. Diciembre de 2018.	17
Cuadro 5.	Análisis de correlación entre contenido de cadmio en las diferentes partes analizadas de la planta en la Región Huetar Norte, Costa Rica. Diciembre de 2018.	20
Cuadro 6.	Resultados análisis químicos en muestras foliares de <i>Theobroma cacao</i> L. Región Huetar Norte, Alajuela, Costa Rica. Diciembre de 2018.	21
Cuadro 7.	Resultados de análisis químicos de suelos de la Región Brunca, Costa Rica. Diciembre de 2018.	22
Cuadro 8.	Resultados de análisis de materia orgánica y granulométricos en suelos de la Región Brunca, Costa Rica. Diciembre de 2018.....	24
Cuadro 9.	Resultados análisis de cadmio en raíz, hoja y grano no fermentado de <i>Theobroma cacao</i> L. Región Brunca, Costa Rica. Diciembre de 2018.....	25
Cuadro 10.	Análisis de correlación de Pearson entre contenido de cadmio en los suelos y las diferentes partes analizadas de la planta de la Región Brunca, Costa Rica. Diciembre de 2018.....	27
Cuadro 11.	Resultados de análisis químicos en muestras foliares de <i>Theobroma cacao</i> L. Región Brunca, Costa Rica. Diciembre de 2018.....	29
Cuadro 12.	Resultados de análisis químico en suelos en Región Caribe, Costa Rica. Diciembre de 2018.	31
Cuadro 13.	Resultados de análisis de materia orgánica y granulométricos en suelos de la Región Caribe, Costa Rica. Diciembre de 2018.	33
Cuadro 14.	Resultados análisis de cadmio en raíz, hoja y grano no fermentado de <i>Theobroma cacao</i> L. Región Caribe, Costa Rica. Diciembre de 2018.....	36
Cuadro 15.	Análisis de correlación entre contenido de cadmio en las diferentes partes analizadas del árbol de cacao de la Región Caribe de Costa Rica. Diciembre de 2018.	37
Cuadro 16.	Resultados análisis químicos en muestras foliares de <i>Theobroma cacao</i> L. Región Caribe, Costa Rica. Diciembre de 2018.	38

TABLA DE FIGURAS

- Figura 1.** Procedimiento para la preparación de las muestras de las semillas de cacao en laboratorio. Extracción de semillas y eliminación de placenta (A), eliminación de mucílago de la semilla (B), lavado de muestra (C), secado del grano (D), molido del grano y tamizado (E), empacado e identificación de la muestra (F).9
- Figura 2.** Distribución de los puntos de muestreos para la exploración de cadmio en cacao en Costa Rica. Diciembre de 2018.....10

Título del proyecto:
Determinación de concentraciones de cadmio en plantaciones de cacao
(*Theobroma cacao* L.) en Costa Rica

Autor y coordinador:
M.Sc. Parménides Furcal Beriguete
Docente-Investigador, Escuela de Agronomía, Campus Tecnológico Local
San Carlos

Resumen

Las autoridades europeas anunciaron en el 2014 que se establecerían regulaciones a la importación de los derivados del cacao, las cuales iniciarían en enero de 2019 con la fijación de niveles de concentración máximos permitidos de cadmio. Por lo anterior y el auge del cacao en Costa Rica, se estableció el presente estudio exploratorio entre 2017 y 2018 a través de muestreos en fincas y análisis químicos de laboratorios a las muestras recolectadas, con el objetivo de determinar concentraciones de cadmio en suelo, raíz, hoja y en grano seco no fermentado de cacao en las regiones productoras en el país; para que sirviera de base a productores y exportadores en la agrocadena del cultivo. Se encontró la presencia de cadmio en las partes raíz y hoja del árbol de cacao, y en el grano; el porcentaje de muestras positivas en granos fue mayor en la Región Brunca con 89,47%, mientras que en las Regiones Caribe y Norte fue más bajo con 36,36 y 33,33 %. Sin embargo, en los análisis de suelos se encontró cadmio solo en la Región Brunca en tres de un total de 19 muestras, quizás debido a que el límite mínimo de detección para suelo propuesto por el laboratorio fue de 1 mg/kg. La información generada permitió determinar que parte de la producción de cacao se encuentra localizada en un entorno donde los órganos raíz y hoja pueden bioacumular cadmio y transferirlo a los granos donde se detectaron concentraciones en un rango de 0 a 8,70 mg/kg.

Palabras clave

Metales pesados, cadmio en hoja de cacao, cadmio en raíz de cacao, cadmio en cacao, análisis de suelos.

Determinación de concentraciones de cadmio en plantaciones de cacao (*Theobroma cacao* L.) en Costa Rica

1. Introducción

La producción de cacao en Costa Rica se concentra en pequeños productores, localizados en las Regiones del Caribe, especialmente en Talamanca y Limón, Huetar Norte en Upala y Guatuso, y Huetar Brunca. Las fincas de mayor tamaño están conformadas por plantaciones cuyas áreas oscilan entre 60 y 110 ha y en el país se registran entre 4491 y 4750 ha sembradas (Carmioli, 2017). Actualmente existe un auge importante en cacao, pero no había estado registrado, sino hasta el censo Agropecuario de 2014, uno de los principales motivos, lo constituye los resultados positivos obtenidos con los nuevos clones tolerantes a la moniliasis (*Moniliophthora roreri*) obtenidos en el CATIE. Esta enfermedad devastó la producción de cacao en el país a finales de la década de 1970, otro motivo es que la mayoría de la producción de cacao en la actualidad es para exportación a Europa y Estados Unidos (Alpizar 2014; Canacacao, 2016; Foster, 2013; MAG, 2007; Nadurille, 2010), y otros países principalmente en forma de productos derivados del grano (chocolates, pasta o licor, manteca y polvo de cacao); sin embargo, el país importa granos de cacao.

La Comisión Técnica Científica de Contaminantes de la Cadena Alimentaria (CONTAM) de la EFSA (Autoridad Europea de Seguridad Alimentaria), determinó que “La exposición alimentaria media al cadmio (Cd) en los países europeos se acerca o supera ligeramente la ingesta semanal tolerable de 2,5 µg/kg de peso corporal” y, en algunos subgrupos de la población, llega casi a duplicarse. Indica que es necesario reducir la exposición al cadmio en la población (Diario Oficial de la Unión Europea, 2014). A raíz de lo anterior, inicia el tema del cadmio en el cacao y sus derivados. El 12 de mayo del 2014, fue aprobado el Reglamento 488/2014, que modifica el Reglamento 1881/2006 de la Comisión, donde se hacen cambios a los niveles máximos (NM) de control de contenido de cadmio en algunos alimentos, añade más productos a la lista de productos controlados, entre ellos los derivados del cacao (CAC, 2016; Diario Oficial de la Unión Europea, 2014) y que rige a partir de enero de 2019.

Las autoridades europeas han establecido regulaciones a la importación de los derivados del cacao con la fijación de NM de concentración permitidos de cadmio (Cd). A pesar que las regulaciones no son aplicadas a las exportaciones del grano, sí las afectan, puesto que los importadores utilizan estos límites para aplicarlos o castigar los precios que se definen en las bolsas de productos de Nueva York y de Londres (OMC, 2017).

Existe una fuerte correlación entre el contenido de metales pesados en el suelo y la concentración en los vegetales, por lo que hay un riesgo asociado por el consumo de vegetales y la biodisponibilidad de los metales pesados, al ser estos cultivados en áreas contaminadas (Agbenin *et al.*, 2009). También, la disponibilidad de Cd y otros metales pesados en granos de cacao es impulsada por actividades antrópicas (Rato *et al.*, 2014; Peris *et al.*, 2007); además de lo anterior, los metales pesados se encuentran de forma natural en la corteza terrestre (Mite *et al.*, 2010 y Arévalo *et al.*, 2016). Es decir que el factor principal que interviene en el contenido de Cd es el material parental, el promedio fluctúa entre 0,2-1,1 mg/kg (Kabata-Pendias, 2011). En Ecuador se reporta, a través de estudios, un nivel crítico en el grano de cacao seco y fermentado de 1 mg/kg (Mite *et al.*, 2010).

En el 2016 finalizó el primer informe generado por el Programa de Investigación y Transferencia de Tecnología Agropecuaria (PITTA) en cacao y el Instituto Nacional de Innovación y Transferencia en Tecnología Agropecuaria (INTA), realizado en granos fermentados y secos de cacao (Gamboa, 2016); sin embargo, se debe estudiar más para disponer de otras informaciones que permitan ampliar el horizonte en este tema a nivel de finca de los productores. A partir de la información anterior, surge el proyecto “Determinación de la concentración de Cd en el suelo y órganos del árbol de cacao en las regiones productoras de cacao en Costa Rica”, con el objetivo de determinar el contenido de cadmio en suelo, en las partes vegetativas raíz y hoja, y en los granos secos no fermentados del árbol de cacao (*Theobroma cacao* L.). Los resultados obtenidos pondrán información útil a disposición de los productores y exportadores de productos derivados de del cultivo de cacao.

2. Metodología

2.1. Ubicación del proyecto

El proyecto cubrió el ámbito de las tres regiones productoras de cacao del país, representadas por la Región Huetar Norte, donde las fincas visitadas se ubicaron a una altura entre 41 y 477 msnm, la Región Brunca o Sur con fincas muestreadas en alturas desde 15 a 601 msnm y en la Región del Caribe, donde se muestrearon fincas desde 4,8 a 727 msnm. De estas fincas seleccionadas se recolectaron de muestras de suelos, raíces, hojas y mazorcas de cacao de las cuales se extrajeron las semillas. Las plantaciones visitadas oscilaban entre media y cinco hectáreas. La su mayoría, pertenecían a pequeños productores de organizaciones cacaoteras y algunos pocos independientes.

2.2. Recolección de información

Se diseñó un cuestionario para recolectar información relacionada con la aplicación de insumos en el suelo y los árboles, tales como fungicidas, abonos químicos, orgánicos u otras enmiendas, esto con el fin de conocer las diferentes labores que realiza el productor y su posible incidencia en la presencia de cadmio en los predios.

2.3. Selección de los productores

Se tomó como base el listado de productores cacaoteros ubicados en los diferentes cantones y distritos, de las regiones en estudio; información suministrada por PITTACacao. Con base en ello, recomendación de los funcionarios de las Agencias del Ministerio de Agricultura y Ganadería (MAG) en las zonas y las distancias entre fincas, se seleccionaron los cacaotales representativos, no menor a cinco años, de cada uno los cantones productores de cacao en el país. En la mayoría de estas fincas, durante la labor de muestreos participó el personal del MAG, ellos brindaron información sobre el productor y datos de la finca, además de la suministrada por el productor.

2.4. Área experimental y unidad de medición

Para este estudio exploratorio, el área experimental estuvo constituida por el total de fincas muestreadas, en la Zona Huetar Norte fueron 21 fincas, en la Zona Brunca 19 y en la Zona del Caribe 33, para un total de 73 muestras de suelos, de granos y de cada parte del árbol raíz y hoja. Cada finca, para efectos de este estudio constituyó una repetición, se seleccionaron al menos cinco árboles o unidades de observación en los cuales se registraron las variables analizadas para cada finca.

2.5. Variables evaluadas

2.5.1. Análisis en suelo

Se realizaron análisis químicos completos (pH, acidez, Ca, Mg, K, P, Zn, Cu, Fe y Mn) para determinar la fertilidad de los suelos y la determinación de cadmio (límite de detección de 1 mg/kg), siguiendo la metodología utilizada en el Centro de Investigación Agronómica (CIA) de la Universidad de Costa Rica (UCR), también se realizó un análisis de materia orgánica y granulométrico en el Laboratorio de Análisis Agronómicos (LAA) de la Escuela de Agronomía del Instituto Tecnológico de Costa Rica (ITCR).

2.5.2. Análisis químico de raíz, hoja y grano

En hoja, raíz y grano sin fermentar y seco se realizó un análisis para determinar cadmio (Cd), además en hoja se efectuó un análisis químico completo que contempla N, P, K, Ca, Mg, S, Fe, Mn, Cu y B.

2.6. Metodología de muestreo

2.6.1. Muestra de suelo en finca

Las muestras elementales o submuestras se tomaron en dos puntos, en al menos cinco árboles, puntos localizados a partir de los 20 cm desde tronco del árbol de cacao hasta una distancia donde se proyecta el centro de la copa del árbol a una profundidad desde la superficie del suelo hasta los 20 cm. La recolección se hizo a través de un barreno tipo holandés o con un palín, según sea el suelo con alto contenido de arcilla o arena, estas herramientas fueron afiladas y lavadas antes de cada gira y limpiadas antes de ingresar a cada finca. Las muestras extraídas por finca fueron preparadas en el campo e identificadas con la información del sitio de muestreo, incluyendo altura sobre el nivel del mar, las coordenadas y el nombre del propietario.

2.6.2. Muestra de suelo en laboratorio

Las muestras fueron procesadas en el LAA del ITCR, dichas muestras se colocaron en una bandeja con su respectiva identificación, estas se dejaron secar a temperatura ambiente, se molieron y tamizaron a 2 mm de diámetro. Las muestras resultantes después de identificadas fueron entregadas a los respectivos laboratorios para sus correspondientes análisis.

Los tipos de análisis efectuados en el LAA del ITCR fueron de materia orgánica y el granulométrico, el primero es una técnica volumétrica del método de Walkley-Black que se fundamenta en una combustión húmeda que produce una oxidación de la materia orgánica con una mezcla de dicromato de potasio y ácido sulfúrico, valorando por titulación la cantidad de dicromato de potasio que no ha sido reducida, este valor indica el grado de acumulación de materia orgánica en una capa de suelo.

Por su parte el análisis granulométrico, se basa en el método de sedimentación y medición a través de la técnica del hidrómetro de Bouyoucos, se mide de forma indirecta la velocidad de sedimentación de las partículas del suelo en un medio acuoso, a partir de los valores obtenidos se da la clasificación de las clases texturales.

Se realizó un análisis químico que contempló pH, acidez extractable, Ca, Mg, K, P, Cu, Fe, Zn, Mn y Cd en cada muestra en el laboratorio del CIA de la UCR, la acidez fue determinada por valoración con NaOH y aluminio con HCl, fósforo y azufre por colorimetría con el Analizador de Inyección de Flujo (FIA) y el resto de los elementos por Espectrofotometría de Absorción Atómica, mientras el cadmio se determinó con un plasma de acoplamiento inductivo (ICP) óptico.

2.6.3. Muestra en raíces de árbol de cacao

Las raíces se recolectaron alrededor del tronco desde los 20 cm del tronco hasta donde se proyectaba la copa del árbol, distancia que dependía de la edad del árbol; en profundidad, desde la superficie del suelo hasta 20 cm. Se utilizó un palín para recolectar raíces absorbentes y secundarias en cada punto de muestreo y en cada sitio, previamente retirado el mantillo de la superficie del suelo. Las raíces fueron introducidas en bolsas debidamente etiquetadas con la correspondiente información y transportadas dentro de una hielera para conservar el material.

Una vez en el laboratorio del ITCR del Campus Tecnológico Local San Carlos, se procedió a lavar la muestra, primero con agua hasta eliminar restos de suelo e inmediatamente se enjuagaron con agua destilada, se colocaron dentro de una bolsa de cartón. Posteriormente se introdujeron en un horno a una temperatura de a 60°C y aire forzado durante 48 o 72 horas, hasta su secado completo. Luego se procedió a moler la muestra mediante la

utilización de un molino foliar el cual posee un tamiz de un milímetro, finalmente la muestra ya preparada fue enviada al CIA de la UCR, donde se determinó el cadmio.

2.6.4. Muestras de hojas de cacao

Dentro del lote de cada finca definido para el muestreo, se seleccionaron los árboles de los cuales se tomó la muestra conformada por un conjunto de al menos 25 hojas, formada por cinco hojas por árbol en cada lote de muestreo. Se tomaron en la sección media de la copa del árbol con hojas expuesta al sol y a la sombra, en la sección de las ramas con hojas sanas y maduras fisiológicamente. Las muestras identificadas con el lugar y nombre del productor se trasladaron al LAA del ITCR Campus Tecnológico Local San Carlos en bolsas plásticas dentro de una hielera para conservar el material.

Una vez en laboratorio se procedió a lavar la muestra, primero con agua para quitarle restos de impurezas ambientales e inmediatamente fueron introducidas en agua destilada, se colocaron dentro de una bolsa de cartón y luego se introdujeron en un horno a una temperatura de 60° C y aire forzado durante 48 a 72 horas, luego de este tiempo se procedió a moler la muestra.

La muestra foliar procesada y con su respectiva identificación fue enviada a los laboratorios del CIA de la UCR en San José, en donde se realizó un análisis químico completo de los elementos en cada muestra y contenido de Cd, se utilizó el procedimiento de nitrógeno por combustión seca en Autoanalizador de acuerdo al M-Nitrógeno; los demás por digestión húmeda con HNO₃ y determinación de cadmio con un plasma de acoplamiento inductivo (ICP) óptico.

2.6.5. Muestra de mazorcas de cacao

Se colectó una mazorca madura de cacao en cada uno de los árboles donde se tomaron las muestras de suelos, raíces y hojas, se etiquetaron con el nombre del productor y se trasladaron para su procesamiento en laboratorio. En aquellas fincas donde estaban plantado los clones procedentes del CATIE, se cosechó una mazorca por cada clon, mientras que en las fincas con otros materiales genéticos se cosecharon mazorcas de diferentes colores y formas.

De las mazorcas cosechadas se extrajeron las semillas, se procedió a eliminar la placenta y el mucílago que posee la semilla, luego se lavó con agua, se procedió a mezclar y por último se introdujeron en el horno a una temperatura de 60°C y aire forzado durante 96 horas, se procedió al molido de las semillas con las cáscarillas mediante la utilización de un mortero y pistilo para luego tamizarlas. Una vez obtenida la muestra final se procedió a enviarla al CIA de la UCR, en donde se realizó un análisis para determinar el cadmio (Figura 1).



Figura 1. Preparación de las muestras de las semillas de cacao en laboratorio. Extracción de semillas y eliminación de placenta (A), eliminación de mucílago de la semilla (B), lavado de muestra (C), secado del grano (D), molido del grano y tamizado (E), empacado e identificación de la muestra (F). Fotos tomadas por J.L. Torres

2.7. Análisis estadísticos de datos

Se realizaron técnicas de estadísticas descriptivas y análisis de Correlación de Pearson para encontrar ciertas variables y asociaciones entre contenidos de cadmio en el suelo, hoja, raíz y la relación con el contenido de cadmio en los granos de cacao. Los análisis estadísticos se realizaron con el paquete estadístico InfoStat/P (Di Rienzo et al. 2017).

3. Resultados y discusión

Los resultados comprenden el análisis de 73 muestras de suelos y de cada uno de las partes del árbol de cacao: raíz, hoja y grano no fermentado y seco con cáscara. La distribución de las muestras corresponde a las regiones: Caribe con 33, Huetar Norte con 21 y Brunca con 19 muestras, los puntos de muestreos se visualizan en el Mapa del país (Figura 2).

De acuerdo a los resultados, las tres regiones tienen en mayor o menor grado presencia de cadmio (Cd) en los órganos del árbol de cacao, la región con mayor presencia es la Sur con 84,21% de las 19 muestras en la raíz y hoja, y 89,47% en el grano, distribuido en toda la región, excepto en Pérez Zeledón donde no apareció, además fue la única región con presencia de este metal en tres de las 19 muestras de suelos, en las demás regiones no se detectó Cd en los suelos con un límite mínimo de detección de 1 mg/kg establecido por el laboratorio (Cuadro 1). En cambio, en la Región Caribe la presencia de Cd se focaliza mayormente en el distrito de Sixaola.

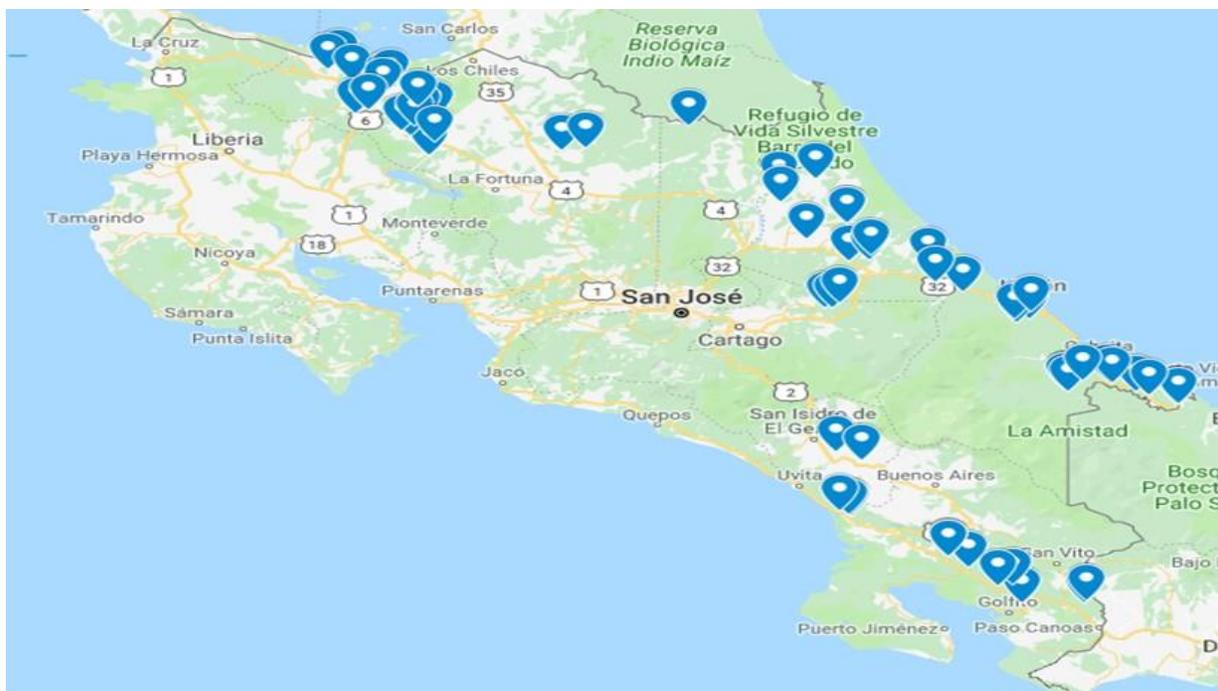


Figura 2. Distribución de los puntos de muestreo para la exploración de cadmio en cacao en Costa Rica. Diciembre de 2018.

Cuadro 1. Resumen de estadística descriptiva de las muestras analizadas para explorar la presencia o no de cadmio en tres regiones de Costa Rica. Diciembre de 2018.

		Estadística					% con Cd
Suelo/órgano	n	Promedio	Mínimo	Máximo	Des.Estándar		
Región Huetar Norte	Suelo	21	ND	ND	ND	ND	ND
	Raíz	21	0,34	0,00	1,50	0,55	28,57
	Hoja	21	0,65	0,00	3,10	0,90	38,01
	Grano	21	0,44	0,00	1,80	0,64	33,33
Región Brunca	Suelo	19	0,38	0,00	4,00	0,99	15,79
	Raíz	19	2,44	0,00	13,40	2,80	84,21
	Hoja	19	2,71	0,00	11,10	2,44	84,21
	Grano	19	2,25	0,00	8,70	2,06	89,47
Región Caribe	Suelo	33	ND	ND	ND	ND	ND
	Raíz	33	0,53	0,00	2,14	0,73	36,36
	Hoja	33	0,71	0,00	3,97	1,11	36,36
	Grano	33	0,59	0,00	3,00	0,86	36,36

ND: no detectado con un límite mínimo de detección de 1 mg/kg

3.1 Resultados de la Región Huetar Norte

Los resultados obtenidos de las muestras analizadas de la Región Huetar Norte, en suelos no se detectó cadmio (Cd) con un límite mínimo de detección de 1 mg/kg (Cuadro 2). Además, se analizaron elementos químicos esenciales en la nutrición de plantas y variables como pH, textura, materia orgánica (MO) y contenido de zinc en el suelo que están relacionadas con la disponibilidad y la absorción del Cd por parte de la planta (Rieuwerts *et al.*, 2015; Alloway, 2002; García *et al.*, 2002).

3.1.1 pH de los suelos

Los valores de pH en los suelos varían entre 4,8 y 6,3 (Cuadro 2), el 33% (siete muestras) del total muestreadas corresponden a valores entre 4,8 y 5,5 de pH, el restante 67% (14 muestras) se encuentra con pH entre 5,6 y 6.3. De acuerdo a Andrade y Martínez (2014) se clasifican como suelos muy ácidos y ácidos.

El pH influye en la disponibilidad de nutrientes para la planta (Rábago y Aracil, 2011), el pH ácido es considerado el factor más importante en aumentar la solubilidad de los metales pesados, bajo esa forma existe desorción del metal con resultado de un aumento en la

concentración del elemento en la solución del suelo, de donde pueden ser absorbidos por las plantas (Sánchez, 2016; Rieuwerts *et al.*, 2015; Galán y Romero, 2008; Boulding, 1996;). Del mismo modo Rábago y Aracil (2011) y García *et al.* (2002) mencionan que valores por debajo de 5,5 es donde se encuentra la mayor disponibilidad del Cd; sin embargo, esta disponibilidad depende de características propias del metal como movilidad, forma química, concentraciones del elemento en el suelo, tipo de suelo, presencia de otros metales y fuente productora de Cd (Rábago y Aracil, 2011).

Cuadro 2. Resultados de análisis químicos para fertilidad y de cadmio en suelos de Región Huetar Norte, Costa Rica. Diciembre de 2018.

Código	pH	cmol(+)/L				mg/L					mg/kg
		Acidez ext	Ca	Mg	K	Cu	Mn	Fe	Zn	P	Cd
Cantón Guatuso											
S-2-15-03-01-1-L1	5,6	0,24	5,52	1,5	0,12	9	18	107	3,7	2	ND
S-2-15-03-01-1-L2	5,6	0,30	4,26	1,0	0,07	10	19	117	3,9	1	ND
S-2-15-01-01-1	5,5	0,62	4,53	1,7	0,09	12	127	168	3,8	2	ND
S-2-15-04-01-1	5,5	0,19	5,50	1,3	0,24	17	125	130	4,7	2	ND
S-2-15-02-01-1	6,3	0,11	8,60	3,0	0,11	13	168	96	4,7	3	ND
S-2-15-02-01-2	5,4	0,17	6,28	1,8	0,20	18	197	142	5,5	2	ND
S-2-15-04-01-2	5,8	0,13	8,79	3,0	0,16	13	127	142	6,9	2	ND
S-2-15-04-01-3	6,1	0,10	13,6	4,9	0,47	14	43	157	3,8	7	ND
Cantón Upala											
S-2-13-03-01-1	6,3	0,12	11,4	4,7	0,46	12	31	107	3,9	5	ND
S-2-13-03-01-2	6,2	0,11	15,1	5,9	0,34	10	41	51	8,1	3	ND
S-2-13-03-01-3	6,2	0,10	14,3	4,8	0,51	18	31	99	5,2	5	ND
S-2-13-03-01-4	5,8	0,10	21,2	7,0	0,27	14	35	56	3,6	4	ND
S-2-13-07-01-1	6,1	0,12	19,3	5,4	0,70	8	36	46	4,0	4	ND
S-2-13-07-01-2	5,7	0,15	19,3	5,1	0,64	8	31	93	6,7	6	ND
S-2-13-07-01-3	5,6	0,13	25,9	9,8	0,26	8	39	40	8,6	3	ND
S-2-13-04-01-1	5,3	0,26	5,04	1,0	0,31	9	19	99	3,4	14	ND
S-2-13-04-01-2	5,3	0,28	7,83	2,7	0,22	10	88	108	2,4	1	ND
S-2-13-04-01-3	4,8	0,43	6,50	1,6	0,50	19	19	130	4,1	6	ND
Cantones San Carlos- Los Chiles											
S-2-14-02-01-1	5,2	0,22	6,84	2,6	0,17	10	202	154	3,5	1	ND
S-2-10-13-01-1	5,2	0,22	5,93	2,6	0,12	14	118	203	3,6	2	ND
S-2-10-11-01-1	5,0	1,06	3,24	1,2	0,17	8	38	313	2,7	2	ND

ND: no detectado con un límite mínimo de detección de 1 mg/kg

Por lo anterior, los valores de pH de esta zona pueden ser propicios para que el Cd se encuentre soluble; sin embargo, no se encontró Cd total en estos suelos por encima del nivel mínimo detectable (NMD) de 1 mg/kg establecido por el laboratorio. En suelos alcalinos el Cd es removido del suelo y adsorbido por los coloides lo que hace que su biodisponibilidad disminuya considerablemente (Carrasco, 2005). Suelos que contienen CaCO₃ puede existir un intercambio de la molécula de calcio con la de cadmio pasando a formar CdCO₃, siempre que existan concentraciones altas de Cd en el suelo Boulding (1996).

Los fertilizantes, principalmente los amoniacales y las enmiendas, pueden alterar características químicas del suelo entre ellas el pH (Baloncini 2015 y Kass 1996). El 52% de los productores visitados utiliza alguna fuente química como fertilizante, pero su uso no es mayor de dos veces por año, como para poder alterar alguna característica química del suelo.

3.1.2 Materia orgánica de los suelos de la Región Huetar Norte

Los contenidos de MO varían en un rango de 1,69 a 8,86 (Cuadro 3), valores mayores o iguales a 5 % de MO en suelos que no sean de origen volcánico son considerados buenos Bertsch (1987), por otro lado, para el cultivo de cacao valores iguales o superiores a 3 % en MO son considerados aceptables para el establecimiento del cultivo (López *et al.*, 2011). La Región Huetar Norte mostró un 33 % (siete muestras) de las fincas con valores que van desde un 1% a 3% de MO, el restante 67% (14 muestras) mostraron valores entre 3 % y 8,86 % (Cuadro 3). Se encontró que un solo productor utiliza abono orgánico como parte de la fertilización del cultivo, la finca de este productor obtuvo 4,28% de MO.

Respecto al Cd, algunas sustancias que conforman la MO como los ácidos húmicos y fúlvicos aumentan en el proceso de humificación, tienen un papel importante en la capacidad de formar enlaces fuertes con grupos fenólicos y carboxílicos con mayor capacidad y fuerza de retención (Bravo *et al.*, 2014; García *et al.*, 2002; Rodríguez, 2001); de esta manera afecta la disponibilidad del Cd para las plantas, esta unión del metal con la MO está en función de la carga negativa de estos grupos que aumentan en el proceso de humificación (Rieuwerts *et al.*, 2015). Asimismo, la formación de los complejos organometálicos entre el Cd y la MO es más estable conforme aumenta el pH, esto nos

indica que a pH altos la movilidad y solubilidad de este metal será menor (García *et al.*, 2002). A pesar que algunas fincas presentan condiciones de pH y MO favorables para que el cadmio esté soluble para las plantas, los resultados mostraron que no existe cadmio total en el suelo por encima de 1 mg/kg; quizás por debajo de este límite mínimo detectable se encuentren fincas con este elemento disponible.

Cuadro 3. Resultados de análisis de materia orgánica y granulométrico en suelos de Región Huetar Norte, Alajuela, Costa Rica. Diciembre de 2018.

Código	%				Nombre Textural
	MO	Arena	Arcilla	Limo	
Cantón Guatuso					
S-2-15-03-01-1-L1	7,40	42	42	16	Arcilloso
S-2-15-03-01-1-L2	8,86	57	27	16	Franco A. Arenoso
S-2-15-01-01-1	2,86	19	62	19	Arcilloso
S-2-15-04-01-1	3,47	19	67	14	Arcilloso
S-2-15-02-01-1	4,72	9	69	21	Arcilloso
S-2-15-02-01-2	3,62	9	70	21	Arcilloso
S-2-15-04-01-2	4,28	17	60	24	Arcilloso
S-2-15-04-01-3	2,12	27	32	41	Franco Arcilloso
Cantón Upala					
S-2-13-03-01-1	2,74	16	52	32	Arcilloso
S-2-13-03-01-2	2,26	24	44	32	Arcilloso
S-2-13-03-01-3	3,27	49	32	20	Franco A. Arenoso
S-2-13-03-01-4	3,73	29	42	29	Arcilloso
S-2-13-07-01-1	1,69	29	42	29	Arcilloso
S-2-13-07-01-2	3,34	31	39	30	Franco Arcilloso
S-2-13-07-01-3	2,46	24	52	25	Arcilloso
S-2-13-04-01-1	3,40	36	47	17	Arcilloso
S-2-13-04-01-2	3,57	24	57	19	Arcilloso
S-2-13-04-01-3	3,64	26	57	17	Arcilloso
Cantones San Carlos- Los chiles					
S-2-14-02-01-1	1,87	24	62	14	Arcilloso
S-2-10-13-01-1	3,95	11	77	12	Arcilloso
S-2-10-11-01-1	4,77	16	69	14	Arcilloso

3.1.3 Análisis granulométricos de los suelos de la Región Huetar Norte

Se realizaron análisis granulométricos en los suelos, lo que permite conocer variables importantes como permeabilidad, porosidad, aireación (Rábago y Aracil, 2011). Los resultados de textura en este estudio indica la dominancia de suelos arcillosos (Cuadro 3).

Las arcillas tienen un papel muy importante en la adsorción de los metales, las cargas superficiales negativas, son responsables de capacidad de intercambio catiónico del suelo y a su vez son encargadas de disminuir o aumentar la liberación de los metales (Rieuwerts *et al.*, 2015; Hooda, 2010 y Alloway, 2002). Además del contenido, el tipo de arcilla tiene un rol fundamental, ya que estas se comportan de forma diferentes (Rábago y Aracil, 2011), por otra parte, la energía de los enlaces que logra formar el Cd con las arcillas es menor que la formada con la materia orgánica (Gara, 2016).

En esta zona, por los altos porcentajes de arcilla y de algunas muestras con relativo alto porcentaje de MO, de acuerdo a las fuentes arriba indicadas, se favorecería la formación de complejos fuertes que podrían retener el Cd, lo que afecta su disponibilidad para las plantas.

3.1.4 Contenido de zinc en los suelos de la Región Huetar Norte

El contenido de zinc encontrado en los diferentes suelos donde se realizaron los análisis en la Región Huetar Norte, se muestra en un rango desde 2,4 mg/L a 8,6 mg/L (Cuadro 2). Además del pH, cantidad de materia orgánica, el contenido y tipo de arcillas, el nivel de zinc (Zn) en el suelo es considerado de alta importancia respecto a la disponibilidad del Cd.

El comportamiento entre estos dos elementos se da principalmente por su similitud química, cuando se da una liberación en la fase sólida del suelo ambos metales compiten por las sedes de absorción, así la presencia de Zn en el medio afecta la adsorción del Cd (Rábago y Aracil, 2011). La absorción del Cd a nivel radicular está en competencia específica con otros nutrientes como el manganeso, cobre, zinc, hierro y calcio (Huamaní *et al.*, 2012); por el contrario, Alloway (2002) indica que existe un efecto sinérgico entre el Zn y el Cd, de igual modo Estévez *et al.* (2000) encontraron en tres tipos de suelos que la adición conjunta de Zn y Cd mostraron un efecto sinérgico entre ambos elementos, donde elevadas concentraciones de Zn favorecen la movilidad del Cd.

En la Región Huetar Norte el 90% de las 19 muestras presentaron valores superiores a 3 mg/L del elemento, valor considerado como nivel crítico en cuanto a fertilidad de los suelos, pero la mayoría se encuentran con valores cercano a ese nivel.

3.1.5 Contenido de cadmio en suelos de la Región Huetar Norte

El contenido de Cd en el suelo no fue detectado (Cuadro 2) con un límite mínimo de detección en suelo (LMD) de 1 mg/kg establecido por el laboratorio; la concentración de cadmio en suelo se encuentra de 0,1 a 1 mg/kg (Alloway, 2002; Beltrán, 2001).

A pesar que el pH que es ácido en estos suelos, no existe Cd con un LMD 1 mg/kg, quizás esto es debido a lo publicado por Alloway (2002) y Beltrán (2001) que la concentración de cadmio en suelo se encuentra de 0,1 a 1 mg/kg.

3.1.6 Resultados análisis de cadmio en raíz, hoja y grano de cacao en la Región Huetar Norte.

Según los resultados obtenidos, a nivel de raíz se encontró la presencia de Cd en seis muestras, lo que representa un 28,57 %, con valores que van desde 1,0 a 1,5 mg/kg (Cuadro 4); en raíz el contenido depende de la cantidad del elemento que se encuentre disponible en el suelo (Wilquerson, 2017).

Cuando el Cd se encuentra disponible en la solución del suelo puede ser absorbido por la planta y acumulado en los diferentes órganos (Arévalo *et al.*, 2016), este proceso se puede dar de formas distintas, la absorción pasiva y la absorción activa, esta última tiene lugar contra un gradiente químico (Kabata-Pendías y Pendías, 2001). La entrada de los iones a través de la raíz se puede dar por diferencia de cargas, la raíz en su rizodermis posee una carga negativa de diferentes fuentes, entre ellas la presencia de grupos carboxilo provenientes del ácido péptico, estas cargas negativas interactúan con las cargas positivas de los metales presentes en el suelo formando un equilibrio que facilita la entrada hacia el interior de la célula, una vez que se da esta unión se da el transporte vía apoplasto y en parte vía simplasto (Navarro *et al.*, 2007). Por su parte, (Wilquerson (2017) menciona que la absorción del Cd por parte de las raíces depende de la cantidad del elemento disponible, lo cual es supeditado por factores propios del suelo como pH, materia orgánica, contenido de arcilla, entre otros. El Cd penetra fácilmente la raíz a través del tejido cortical y es translocado a los demás tejidos de la planta (Tantalean y Huauya, 2017). No obstante, (Huamaní *et al.* (2012) menciona que la absorción del Cd a nivel radicular está en competencia específica con otros nutrientes como el manganeso, cobre, zinc, hierro y calcio.

Cuadro 4. Resultados de análisis de cadmio en raíz, hoja y grano no fermentado y seco de *Theobroma cacao* L. de la Región Huetar Norte, Costa Rica. Diciembre de 2018.

Código	Cd mg/kg)		
	Raíz	Hoja	Grano seco
Cantón Guatuso			
2-15-03-01-1-L1	ND	ND	ND
2-15-03-01-1-L2	ND	ND	ND
2-15-01-01-1	ND	1,5	1,0
2-15-04-01-1	ND	1,3	1,1
2-15-02-01-1	ND	ND	ND
2-15-02-01-2	ND	ND	ND
2-15-04-01-2	ND	ND	ND
2-15-04-01-3	1,2	1,4	1,6
Cantón Upala			
2-13-03-01-1	1,3	1,8	1,1
2-13-03-01-2	ND	ND	ND
2-13-03-01-3	ND	ND	ND
2-13-03-01-4	1,2	1,8	1,5
2-13-07-01-1	1,0	ND	ND
2-13-07-01-2	1,0	1,4	ND
2-13-07-01-3	1,5	3,1	1,8
2-13-04-01-1	ND	1,4	1,1
2-13-04-01-2	ND	ND	ND
2-13-04-01-3	ND	ND	ND
Cantón San Carlos			
2-14-02-01-1	ND	ND	ND
2-10-13-01-1	ND	ND	ND
2-10-11-01-1	ND	ND	ND

ND: No detectado

En estas muestras las concentraciones de Cd en el suelo no fueron detectadas para un límite de 1 mg/kg, quizás pueden existir valores menores a este. La presencia en raíz en algunas muestras, a pesar de no detectarse por debajo de 1 mg/kg en suelo, puede ser debido a que las plantas son capaces de acidificar el suelo alrededor de las raíces modificando la actividad de la enzima H⁺ ATPasa por medio de la producción de exudados carboxilados haciendo biodisponibles los metales presentes en el suelo, que pueden ser absorbidos por la planta y almacenados en los diferentes órganos. De ahí que algunos investigadores argumentan que las concentraciones de metales en las raíces de las plantas podrían proporcionar el mejor indicador de biodisponibilidad respecto al suelo (Kabata-Pendias y Pendias, 2001), debido al aumento de exudados alrededor de la raíz y de la actividad

microbiana inducida por estos que aumentan la solubilidad y biodisponibilidad del metal. De igual forma el Cd puede penetrar a la raíz utilizando transportadores de otros metales tales como el calcio, hierro y zinc (Pernía *et al.* 2008).

Algunos elementos no esenciales para la planta tienden a ser acumulados debido a que presentan comportamientos electrostáticos similares a elementos que sí son esenciales (Tantalean y Huauya, 2017); cuando el Cd es absorbido se acumula generalmente en la vacuola de la célula en la raíz de la planta y solo una parte es translocada a los órganos aéreos; al respecto, la planta ha desarrollado diferentes métodos de defensa contra el Cd, entre estos se encuentra la acumulación del metal en los tricomas de las hojas y la disminución en el transporte por medio de transportadores de cationes de la membrana plasmática (Serrano *et al.* 2008).

En tejido foliar el contenido de Cd fue encontrado en la Región Huetar Norte con valores desde 1,3 a 3,1 mg/kg (Cuadro 4). El límite permisible de cadmio en tejido foliar es de 0,5 mg/kg (Alloway, 2002; Kabata-Pendías y Pendías, 2001). El Cd es liberado al ambiente mediante erupciones volcánicas, transporte de partículas del suelo por el viento, quemas forestales, por otro lado, actividades humanas como minería e industriales entre ellas fundición de metales, uso de fertilizantes fosfatados, entre otras, también favorecen la liberación de este metal (Pernía *et al.*, 2008); asimismo, Kabata-Pendías y Pendías, 2001) mencionan que este metal puede ser absorbido vía foliar por la planta, por lo que no necesariamente todo el Cd encontrado dentro de la planta tiene que ser originario del suelo. Sin embargo, las fincas donde se hicieron los análisis no se encuentran en zonas con riesgos de haber sido afectadas por contaminación ambiental de origen industrial o de transporte, además en la encuesta aplicada se detectó que muy pocos propietarios aplican fertilizantes orgánicos o inorgánicos con frecuencia mayor a una vez al año, tampoco el cultivo se encuentra con técnica de irrigación, por lo que las únicas posibilidades serían por origen de los suelos y en algunas localidades por posibles emanaciones volcánicas.

En la Región Huetar Norte el 38% de las muestras (ocho) se les detectó cadmio en tejido foliar con valores que sobrepasan el límite permisible. Uno de los métodos que puede desarrollar la planta en defensa contra el Cd hacen que esta logre inmovilizar este metal en

los tricomas de las hojas (Serrano *et al.* 2008), quizás esta es la razón que en la Región Huetar Norte la hoja, por lo general, es el órgano de mayor acumulación de Cd.

Un 33% de las muestras (siete) posee contenido de Cd en el grano de cacao no fermentado y seco, estas se encuentran con valores que van de 1 a 1,8 mg/kg (Cuadro 4). El nivel máximo permisible de Cd en grano es de 0,5 mg/kg (Tantalean y Huauya, 2017; Contreras *et al.*, 2011). El Cd una vez absorbido por la raíz se une a la pared celular de las células epidérmicas para luego ser transportado por intercambio iónico al resto de órganos de la planta (Pernía *et al.*, 2008), esta información concuerda con Barrueta (2013) que indica que la planta de cacao absorbe los metales que existen en el suelo y los tiende a acumular en los granos; mientras que, en algunas etapas de la planta, tales como crecimiento, floración y formación de fruto se prioriza el transporte de elementos esenciales a esas partes para cumplir y proporcionar a la planta la capacidad de poder optimizar su desarrollo (Arce, 2017).

La detección de Cd en las semillas de la mazorca es muy importante, ya que es la materia prima para la elaboración de los productos que llegarán al consumidor. De las seis muestras con Cd en la raíz, cinco de ellas presentaron contenidos en la hoja; asimismo, de las ocho muestras con Cd en las hojas, siete de ellas aparecieron con el elemento en el grano, esto nos permite inferir que el proceso de translocación en la planta de este elemento se produjo desde la raíz hacia los demás órganos y por ende se da su acumulación en el grano (Cuadro 4), este resultado se confirma con las correlaciones existentes (Cuadro 5). En ese sentido, además se refuerza la tesis que, aunque no se detectó Cd en las muestras de suelos con un LMD de 1 mg/kg, existe la posibilidad que los suelos contengan este elemento por debajo de este límite y las raíces sean capaces de absorberlo y acumularlo a través del tiempo, raíces de árboles que fueron muestreados con mínimo de cinco años de edad, suficiente para acumular metales.

3.1.7 Correlaciones del contenido de cadmio entre las variables evaluadas en la Región Huetar Norte

Se encontró correlación positiva muy significativa entre el Cd encontrado en el tejido foliar y en el grano con un coeficiente de correlación de 0,9029 y un p-valor de $5,10^{-8}$. También se encontró que existe un coeficiente de correlación de 0,7194 y un p-valor = 0,0004 entre el nivel de Cd en las muestras de raíz y en el tejido foliar, igualmente existe correlación

positiva, pero menos fuerte que las demás, entre el contenido de Cd en la raíz y el grano de cacao (0,6256) con p-valor = 0,0032 (Cuadro 5), lo que quiere decir que si hay un aumento en los contenidos de cadmio en raíz sucedería lo mismo en la concentración del elemento en la hoja, y entre esta y el grano. Barrueta (2013) y Augstburger *et al.* (2000) mencionan que la planta transporta el cadmio absorbido y lo almacena en los granos.

Cuadro 5. Análisis de correlación entre contenido de cadmio en las diferentes partes analizadas de la planta en la Región Huetar Norte, Costa Rica. Diciembre de 2018.

	Cd (Raíz)	Cd (Hoja)	Cd (Grano)
Cd (Raíz)	1	0,0004	0,0032
Cd (Hoja)	0,7194	1	5,10E-08
Cd (Grano)	0,6256	0,9029	1

3.1.8 Resultados de análisis en las hojas de cacao recolectadas en la Región Huetar Norte.

Resultados de elementos esenciales en la nutrición de plantas, obtenidos de los análisis foliares de fincas muestreadas en la Región Huetar Norte se muestran en el Cuadro 6.

El rango considerado como normal de nitrógeno (N) en las hojas de cacao va desde 2,00 a 2,15% (Laínez, 1982) y de 2,00 a 2,50% (Mills y Jones, 1996), con esta información, el 19% de las muestras se encuentran deficientes en este elemento y el restante se encuentra cerca del límite inferior.

El rango de suficiencia del contenido de fósforo (P) en las hojas de cacao es entre 0,13 y 0,25% (Guerrero, 2012; Mills y Jones, 1996), encontrándose, en la Región Huetar Norte, 10 (47,62 %) de las muestras deficientes; lo que indica que a nivel de hojas prácticamente la mitad de las muestras están suficientes, aunque en suelos los resultados son deficientes en forma generalizada.

El potasio (K), presenta un rango adecuado en las hojas de cacao cuando su concentración se encuentra entre 1,3 a 2,2% y entre 1,2 a 2,2% Guerrero (2012) y Mills y Jones (1996), 11 (52,38%) de las muestras presentes en el Cuadro 6 están deficientes. De estas 11 muestras, 6 de suelos coinciden en que están igualmente deficientes

Con niveles críticos de 0,30%; 0,20% y 20 ppm (Mills y Jones, 1996), las concentraciones de calcio, magnesio y zinc se encuentran adecuadas respectivamente, mientras que el

manganeso con un rango de suficiencia de 50-300 ppm (Mills y Jones, 1996) está elevado. Del mismo modo, a nivel de suelos las muestras de calcio, magnesio y zinc prácticamente todas se encuentran dentro del rango de suficiencia. El elemento manganeso se encuentra adecuado y alto en los suelos.

Cuadro 6. Resultados análisis químicos en muestras foliares de *Theobroma cacao* L. Región Huetar Norte, Costa Rica. Diciembre de 2018.

Código	% masa						mg/kg					
	N	P	Ca	Mg	K	S	Fe	Cu	Zn	Mn	B	
H-2-15-03-01-1-L1	2,3	0,11	1,62	0,8	1,0	0,21	106	7	48	219	43	
H-2-15-03-01-1-L2	2,1	0,11	1,30	0,6	0,8	0,21	78	6	52	324	45	
H-2-15-01-01-1	2,0	0,11	1,26	0,6	0,8	0,23	121	5	65	1201	46	
H-2-15-04-01-1	1,9	0,10	1,29	0,7	1,0	0,29	103	5	49	1240	43	
H-2-15-02-01-1	2,3	0,14	1,18	0,6	0,7	0,19	55	7	56	791	38	
H-2-15-02-01-2	2,3	0,14	1,43	0,7	1,2	0,23	57	10	98	1231	37	
H-2-15-04-01-2	2,1	0,12	1,27	0,6	1,4	0,21	94	7	67	533	33	
H-2-15-04-01-3	2,3	0,20	1,08	0,4	1,8	0,2	90	8	68	183	45	
H-2-13-03-01-1	1,7	0,70	1,35	0,7	1,5	0,28	70	5	86	579	35	
H-2-13-03-01-2	2,1	0,17	0,97	0,5	1,9	0,19	60	9	78	280	36	
H-2-13-03-01-3	2,2	0,21	0,97	0,5	1,9	0,21	58	9	73	124	38	
H-2-13-03-01-4	2,0	0,18	1,6	0,7	1,4	0,26	51	7	97	572	36	
H-2-13-07-01-1	2,2	0,19	1,57	0,4	1,7	0,23	52	8	71	280	38	
H-2-13-07-01-2	1,9	0,20	0,92	0,5	1,9	0,18	53	8	60	379	30	
H-2-13-07-01-3	2,2	0,19	1,4	0,6	1,2	0,23	51	9	154	937	43	
H-2-13-04-01-1	2,2	0,14	2,16	0,8	1,1	0,28	92	10	108	963	38	
H-2-13-04-01-2	2,1	0,10	1,19	0,6	1,5	0,27	85	8	109	1488	34	
H-2-13-04-01-3	1,5	0,11	1,14	0,5	1,3	0,20	63	21	39	745	30	
H-2-14-02-01-1	2,1	0,12	0,86	0,4	1,2	0,18	33	11	61	661	36	
H-2-10-13-01-1	2,1	0,11	1,48	0,8	1,0	0,19	56	6	62	897	48	
H-2-10-11-01-1	2,2	0,12	1,44	0,9	1,1	0,26	53	7	43	1154	58	
Máximo	2,3	0,21	2,16	0,9	1,9	0,29	121	21	154	1488	58	
Mínimo	1,5	0,1	0,86	0,4	0,7	0,18	33	5	39	124	30	
Promedio	2,09	0,14	1,31	0,61	1,30	0,23	70,52	8,24	73,52	703,86	39,52	
Mediana	2,1	0,14	1,29	0,6	1,2	0,22	60	8	67	661	38	
D. Estándar	0,198	0,037	0,288	0,139	0,367	0,035	22,472	3,294	26,745	397,243	6,471	

3.2 Resultados de la Región Brunca

En la Región Brunca se muestrearon un total de 19 fincas distribuidas en cuatro cantones, los resultados obtenidos en los análisis de suelos evidencian niveles de pH muy similares entre fincas, un rango amplio en contenido de materia orgánica y predomina la textura arcillosa (Cuadros 7 y 8). Se detectó cadmio en el suelo en un total de tres fincas con

valores de 1.3, 1.9 y 4 mg/kg (Cuadro 7) valores que son superiores a la concentración de 0,1 a 1 mg/kg de este elemento en el suelo propuesto por Alloway (2002) y Beltrán (2001).

Cuadro 7. Resultados de análisis químicos de suelos de la Región Brunca, Costa Rica. Diciembre de 2018.

Código	pH	cmol(+)/L				mg/L					mg/kg
		Acidez ext	Ca	Mg	K	Cu	Mn	Fe	Zn	P	Cd
Cantón Osa											
6-05-05-01-1	5,2	1,43	20	3,8	0,2	4	90	80	3	1	ND
6-05-05-01-2-L1	5,2	0,6	33,9	3	0,1	4	39	77	6,2	2	ND
6-05-05-01-2-L2	6,6	0,12	49	3,1	0,2	5	19	33	10	5	1,3
6-05-05-01-2-L3	5,7	0,25	36,6	3,9	0,2	8	90	48	6,3	5	ND
6-05-01-01-1	5,1	0,81	19,8	3,53	0,49	10	33	168	2,0	6	ND
6-05-01-01-2	5,6	0,40	28,24	4,71	0,24	18	62	118	2,0	5	ND
6-05-01-01-3	5,2	0,92	22,3	5,13	0,47	10	51	150	4,0	11	ND
6-05-05-01-2	5,5	0,59	33,36	4,27	0,66	181	20	112	3,7	33	ND
6-05-05-01	6,8	0,12	43,9	3,17	0,59	12	13	46	1,9	7	ND
Cantón Golfito											
6-07-01-01-1	5,7	0,26	35,5	5,8	0,3	110	46	90	6,1	7	ND
6-07-03-01-2	5,2	2,35	27,1	6,8	0,3	4	54	39	3	1	ND
6-07-03-01-1	5,4	1,09	31,8	5,3	0,2	4	51	49	2,5	1	ND
Cantón Corredores											
6-10-01-01-1	5,5	0,27	22,8	6,3	0,4	5	63	45	3,1	2	1,9
6-10-01-01-2	5,6	0,25	19,7	1,9	0,7	6	45	71	1,8	2	4,0
6-10-01-12	5,4	0,65	26,44	4,23	0,61	5	54	50	2,3	2	ND
6-10-01-12	5,5	1,21	14,95	3,14	0,55	5	26	192	2	16	ND
6-10-01-01-2	5,3	2,66	11,62	2,82	0,38	5	35	182	1,5	1	ND
Cantón General											
1-19-02-01-1	4,7	1,65	0,90	0,26	0,11	11	11	298	2	11	ND
1-19-05-01-1	4,8	1,63	3,05	0,89	0,41	7	21	133	13	4	ND

ND: No detectado con un límite mínimo de detección de 1 mg/kg.

3.2.1 pH de los suelos en la Región Brunca

Las fincas evaluadas en el sur obtuvieron resultados de pH que van desde un valor mínimo de 4,7 hasta un máximo de 6.8 (Cuadro 7). Del total de muestras (19), 10 se encuentran con valores inferiores a 5.5, valor por debajo del cual hay un aumento en la solubilidad del Cd (Rábago y Aracil, 2011; García *et al.*, 2002); sin embargo, esta disponibilidad depende de características propias del metal como movilidad, forma química, concentraciones del

elemento en el suelo, tipo de suelo, presencia de otros metales y materiales fuentes del cadmio (Rábago y Aracil, 2011).

En nuestro caso la relación Cd-pH no se cumplió, ya que las tres fincas a las cuales se les detectó este elemento en el suelo poseen pH igual o superior a 5,5, aunque siguen siendo suelos ácidos. A pesar que el pH en los suelos de la mayoría de las fincas favorece la solubilidad del Cd, otras variables como la cantidad de materia orgánica (Bravo *et al.*, 2014; García *et al.*, 2002; Rodríguez, 2001), y el porcentaje de arcilla (Rieuwerts *et al.*, 2015; Hooda, 2010; Alloway, 2002) favorecen la retención del metal. El 29% de las fincas muestreadas utiliza algún tipo de abono químico granular; sin embargo, su utilización no es intensiva, la frecuencia en la mayoría de fincas es una y dos veces al año, los fertilizantes químicos que usan son Rocas fosfóricas, 10-30-10, Kmag y urea.

3.2.2 Materia orgánica de las muestras de suelos en la Región Brunca

La materia orgánica (MO) va de un valor mínimo de 2,64 hasta un máximo de 10,09, solo una finca se encuentra por debajo de 3%, valor mínimo considerado adecuado para el cultivo de cacao (López *et al.*, 2011), las restantes 18 muestras se encuentran por encima de este valor representando el 94,73% de los suelos muestreados (Cuadro 8). Resultados altos de MO podrían favorecer la fijación de los metales en el suelo y por lo tanto afecta la absorción del cadmio por parte de la planta (Rodríguez 2001, Bravo *et al.* 2014, García *et al.* 2002), sin embargo, no se informa por encima de cual valor se puede fijar el Cd.

3.2.3 Análisis granulométricos y textura de los suelos en Región Brunca

Los análisis granulométricos indican la dominancia de suelos arcillosos y franco arcillosos (Cuadro 8). Las condiciones obtenidas en este estudio favorecen la adsorción de cadmio a las arcillas, lo que trae como consecuencia una posible disminución en su disponibilidad, mediante la formación de enlaces que son formados, principalmente, por las diferencias entre las cargas eléctricas de las arcillas y del metal (Rieuwerts *et al.*, 2015; Hooda, 2010; Alloway, 2002).

Cuadro 8. Resultados de análisis de materia orgánica y granulométricos en suelos de la Región Brunca, Costa Rica. Diciembre de 2018.

Código	%				Nombre Textural
	MO	Arena	Arcilla	Limo	
Cantón Osa					
6-05-05-01-1	2,64	21	59	19	Arcilloso
6-05-05-01-2-L1	6,10	16	62	22	Arcilloso
6-05-05-01-2-L2	8,20	24	64	12	Arcilloso
6-05-05-01-2-L3	4,30	27	62	12	Arcilloso
6-05-01-01-1	4,93	34	37	29	Franco Arcilloso
6-05-01-01-2	4,48	27	37	36	Franco Arcilloso
6-05-01-01-3	4,91	30	42	29	Arcilloso
6-05-05-01-2	3,48	34	32	31	Franco Arcilloso
6-05-05-01	3,30	49	30	29	Franco Arcilloso
Cantón Golfito					
6-07-01-01-1	3,40	9	57	34	Arcilloso
6-07-03-01-2	4,10	34	42	24	Arcilloso
6-07-03-01-1	3,50	31	44	25	Arcilloso
Cantón Corredores					
6-10-01-01-1	7,20	26	57	17	Arcilloso
6-10-01-01-2	6,00	31	54	15	Arcilloso
6-10-01-12	3,02	34	45	21	Arcilloso
6-10-01-12	5,70	49	35	16	Franco A. Arenoso
6-10-01-01-2	6,29	37	45	29	Arcilloso
Cantón General					
1-19-02-01-1	7,00	7	80	14	Arcilloso
1-19-05-01-1	10,09	47	34	19	Franco A. Arenoso

3.2.4 Resultados de análisis Cd en raíz, hojas y granos de cacao de la Región Brunca

En el Cuadro 9 se presentan los resultados obtenidos en los análisis de Cd en raíz, en donde se detectó el metal en 16 (84,21%) de las 19 muestras con un valor máximo 13,4 mg/kg muy distante de los demás, confirmado por los valores de 3,01 y de 2,46 mg/kg de promedio y mediana, respectivamente.

Aunque las condiciones de las muestras de los suelos (% relativamente altos de arcillas y materia orgánica suficiente para regiones tropicales) no son las más favorables para que el elemento se encuentre en la solución, pueden existir diferentes factores que ayudan a que este elemento se encuentre presente en raíz. Serrano *et al.* (2008) explica que la planta una

vez que absorbe el cadmio lo acumula preferentemente en raíz secuestrado en la vacuola, como métodos de defensa de la planta; sin embargo, parte de este elemento es transportado vía xilema hacia las hojas, donde este órgano puede inmovilizar parte de este metal en los tricomas de las hojas que es otro de los métodos que puede desarrollar la planta en defensa contra el Cd, desde aquí parte pasa a las semillas. La planta, además, por formación de exudados alrededor de las raíces favorecen algunas condiciones de suelos que ayudan a la disponibilidad del Cd y la absorción por la raíz (Pernía *et al.* 2008), y por ende su translocación a las partes aéreas de la planta.

Cuadro 9. Resultados análisis de cadmio en raíz, hoja y grano no fermentado de *Theobroma cacao* L. Región Brunca, Costa Rica. Diciembre de 2018.

Código	Cd mg/kg)		
	Raíz	Hoja	Grano seco
	Cantón de Osa		
6-05-05-01-1	3,30	3,10	2,00
6-05-05-01-2-L1	1,90	3,00	2,90
6-05-05-01-2-L2	2,40	3,80	5,00
6-05-05-01-2-L3	2,60	4,40	4,10
6-05-01-01-1	ND	ND	1,10
6-05-01-01-2	1,10	1,40	1,40
6-05-01-01-3	1,30	1,90	2,00
6-05-05-01-2	2,86	4,58	2,44
6-05-05-01	2,52	4,49	2,45
	Cantón de Golfito		
6-07-01-01-1	3,00	2,80	1,60
6-07-03-01-2	2,60	1,60	1,60
6-07-03-01-1	1,60	1,80	1,20
	Cantón de Corredores		
6-10-01-01-1	3,80	3,00	4,50
6-10-01-01-2	13,40	11,10	8,70
6-10-01-12	1,31	1,23	0,60
6-10-01-12	1,18	1,23	0,70
6-10-01-01-2	1,46	2,02	0,56
	Cantón El General		
1-19-02-01-1	ND	ND	ND
1-19-05-01-1	ND	ND	ND

ND: No detectado

En los resultados de los análisis de Cd en hoja y raíz se detectó el metal en 16 (84,21%) de las 19 muestras con valor mínimo de 1,23 mg/kg y un máximo 11,10 mg/kg (Cuadro 9); el promedio es de 3,44 y la mediana de 3,00 mg/kg, estos parámetros indican que los valores están más cerca del valor mínimo. Los valores de Cd en las muestras están por encima 0,5 mg/kg, límite máximo permisible en tejido foliar (Alloway, 2002; Kabata-Pendías y Pendías, 2001); el 36,84% de los productores utilizan algún tipo de insumo de origen químico vía foliar; sin embargo, la frecuencia de utilización es baja (una o dos aplicaciones al año), además fincas que no usan insumos presentan contenido de Cd. El porcentaje de muestras con Cd en raíz es el mismo que a nivel foliar y las mismas muestras con presencia de Cd en la raíz son las mismas con Cd en la hoja, por lo tanto, los procesos de translocación del elemento en la planta movilizan el Cd desde la raíz hasta la hoja del árbol, aunque no es un elemento esencial; una vez absorbido se moviliza por diferentes rutas hasta llegar a los distintos órganos (Serrano *et al.* 2008). Por lo tanto, un aumento de la presencia del elemento en la raíz podría aumentar el contenido del elemento en el tejido foliar y en las semillas; bajo este criterio, si no existe posibilidad de contaminación del aire y no ha sido aplicado el elemento por insumos vía foliar, entonces existe una probabilidad alta que el origen del Cd en la raíz-hoja-grano sea el suelo.

Los análisis efectuados en el grano no fermentado y seco muestran un 89,47% de presencia de Cd (17 de las 19 muestras de la zona), este alto porcentaje es muy importante ya que el grano es la materia prima para la elaboración de los productos derivados del cacao para el consumo, sobre los cuales la Unión Europea estableció restricciones recientemente. La concentración de Cd en el grano se encontró dentro de un rango muy amplio que va de 0,56 mg/kg a 8,7 mg/kg (Cuadro 9), con promedio de 2,31 y mediana de 2,00 mg/kg.

La planta destina gran cantidad de nutrientes para la formación y desarrollo de frutos, por ende, aquellos elementos que se encuentren en las hojas serán translocados al fruto para que se de un desarrollo adecuado (Arce, 2017), igualmente aquellos elementos almacenados en las raíces pasarán a las hojas, esto coincide con Barrueta (2013), que menciona que la planta de cacao tiende a acumular los metales pesados en los granos.

3.2.5 Resultados de correlación en la Región Brunca

Los resultados de las correlaciones para los contenidos de cadmio en suelos, raíz y hoja relacionados con los contenidos de este elemento en el grano de cacao muestran que existe correlación (p -valor $< 0,01$) entre el Cd en los suelos de esta región y el Cd encontrado en la raíz, hoja y grano (Cuadro 10). Se observan correlaciones positivas entre los contenidos de cadmio en raíz con el contenido de cadmio en tejido foliar (p -valor = $5,20E^{-9}$) y en grano (p -valor= $1,9E^{-6}$) con coeficientes de correlación de 0,930 y 0,860 respectivamente y de la hoja con el grano de 0,90. Igualmente la correlación positiva de suelos con la raíz es fuerte con p -valor de $6,1E^{-7}$ y un coeficiente de correlación de 0,881. Tantalean y Huauya (2017), y Arévalo *et al.* (2016) mencionan que el Cd que se encuentra disponible en el suelo puede ser absorbido por la planta y acumulado en los diferentes órganos.

Cuadro 10. Análisis de correlación de Pearson entre contenido de cadmio en los suelos y las diferentes partes analizadas de la planta de la Región Brunca, Costa Rica. Diciembre de 2018.

	Cd (Suelos)	Cd (Raíz)	Cd (Hoja)	Cd (Grano)
Cd (Suelos)	1	0,00000061	0,000092	0,0000013
Cd (Raíz)	0,881	1	0,0000000052	0,0000019
Cd (Hoja)	0,780	0,930	1	0,0000001
Cd(Grano)	0,870	0,860	0,900	1

3.2.6 Resultados de análisis foliares en la Región Brunca

Los resultados de la mayoría de elementos esenciales en la nutrición de plantas obtenidos de los análisis foliares realizados en las diferentes fincas muestreadas en la Región Brunca se muestran en el Cuadro 11.

El rango considerado como normal de nitrógeno (N) en las hojas de cacao va desde 2,00 a 2,15% (Laínez, 1982) y de 2,00 a 2,50% (Mills y Jones, 1996), de acuerdo a estos rangos de suficiencia el 15,79% de las muestras se encuentran deficientes en este elemento, el promedio de N en las hojas muestreadas es de 2,18%.

El rango de suficiencia del contenido de fósforo (P) en las hojas de cacao es entre 0,13 y 0,25% (Guerrero, 2012; Mills y Jones, 1996), encontrándose en la Región Brunca cuatro (21,05 %) de las muestras deficientes, el promedio y la mediana de P en las hojas muestreadas es de 0,17%, lo que indica que a pesar que el suelo es deficiente en este

elemento, en las hojas el mayor porcentaje de las muestras se encuentran con contenido adecuado de P, por lo que posiblemente las raíces son capaces de absorber pocas cantidades de P que no pueden ser detectadas con los análisis de suelos y transportarlas a las hojas, lo que también quizás suceda con el Cd.

El potasio (K), presenta un rango adecuado en las hojas de cacao cuando su concentración se encuentra entre 1,3 a 2,2% y entre 1,2 a 2,2% (Guerrero, 2012 y Mills y Jones, 1996), tres de las 19 muestras (15,79%) del Cuadro 11 están deficientes.

Con rango de suficiencia entre 0,30-0,60%, 0,20-0,50%, 20-100 ppm (Mills y Jones, 1996), las concentraciones de calcio, magnesio y zinc se encuentran adecuadas respectivamente, mientras que el manganeso con un rango de suficiencia de 50-300 ppm (Mills y Jones, 1996) está elevado en la mayoría de las muestras.

El Zn a pesar que está deficiente en 58% de las muestras de suelos de la Región Brunca, en las hojas se encuentra en condiciones adecuadas en todas las muestras (Cuadro11); algo similar sucede con el Cd que no se detectó en el suelo con un límite de 1 mg/kg, pero aparece en las hojas en 16 muestras de un total de 19 (84,21%).

Cuadro 11. Resultados de análisis químicos en muestras foliares de *Theobroma cacao* L. Región Brunca, Costa Rica. Diciembre de 2018.

Código	% masa						mg/kg				
	N	P	Ca	Mg	K	S	Fe	Cu	Zn	Mn	B
6-05-05-01-1	2,36	0,14	0,91	0,5	2,06	0,19	65	8	85	451	21
6-05-05-01-2-L1	2,12	0,19	1,14	0,52	1,57	0,18	40	10	82	315	24
6-05-05-01-2-L2	2,49	0,18	1,39	0,51	1,77	0,19	131	8	78	194	33
6-05-05-01-2-L3	2,27	0,17	1,45	0,53	1,50	0,17	40	7	87	554	28
6-05-01-01-1	2,36	0,16	1,12	0,45	1,56	0,18	51	8	25	144	36
6-05-01-01-2	1,90	0,17	1,81	0,58	1,20	0,23	33	6	47	532	47
6-05-01-01-3	1,76	0,15	1,61	0,61	1,08	0,17	31	6	50	517	42
6-05-05-01-2	2,08	0,17	2,07	0,50	1,50	0,23	118	10	165	482	35
6-05-05-01-1	2,09	0,15	2,35	0,42	1,19	0,23	94	8	83	466	40
6-07-01-01-1	1,98	0,22	1,36	0,75	2,16	0,22	160	9	113	223	29
6-07-03-01-2	2,05	0,13	0,91	0,42	2,20	0,16	56	8	74	260	20
6-07-03-01-1	2,04	0,22	1,08	0,61	2,44	0,2	51	8	85	333	28
6-10-01-01-1	2,19	0,15	0,79	0,45	2,03	0,17	42	8	47	256	21
6-10-01-01-2	2,44	0,23	1,06	0,60	1,84	0,21	44	10	74	208	22
6-10-01-12	2,25	0,16	1,45	0,63	1,73	0,22	172	11	96	455	28
6-10-01-12	2,61	0,15	1,48	0,60	1,73	0,21	141	10	33	286	29
6-10-01-01-2	2,06	0,11	1,37	0,71	1,55	0,35	202	9	93	774	34
1-19-02-01-1	2,40	0,13	0,86	0,45	0,78	0,18	129	10	89	720	49
1-19-05-01-1	2,32	0,12	0,83	0,46	1,64	0,18	52	19	75	314	79
Máximo	2,61	0,23	2,35	0,75	2,44	0,35	202	11	165	774	40
Mínimo	1,76	0,11	0,79	0,42	1,19	0,16	40	7	25	194	20
Promedio	2,18	0,17	1,34	0,56	1,81	0,21	96,86	8,86	77,94	375,50	28,00
Mediana	2,12	0,17	1,37	0,53	1,75	0,21	79,5	8,5	82	324	28
D. Estándar	0,218	0,034	0,419	0,094	0,327	0,045	54,323	1,125	30,144	157,564	5,794

3.3 Resultados de la Región Caribe

En la Región Caribe se analizaron 33 muestras de suelos y de cada una de las partes del árbol de cacao raíz, hoja y grano seco no fermentado, correspondientes a los cantones Talamanca, Limón, Guácimo, Matina, Siquires, Pococí, además de Turrialba.

En ninguna de las muestras de suelos se detectó cadmio (Cd) con un límite de detección fijado por el laboratorio de 1 mg/kg, esto no quiere decir que no exista la posibilidad que este elemento se encuentre por debajo de este valor límite (Cuadro 12)

3.3.1 pH de los suelos

El pH se encuentra dentro de un rango de 4,8 a 8; un 42.42% de 33 muestras presentan valores $\leq 5,5$, de acuerdo a Andrade y Martínez (2014) se clasifican como suelos muy ácidos y ácidos. Valores por debajo de 5,5 es donde se encuentra la mayor disponibilidad

del Cd (Rábago y Aracil, 2011; García *et al.*, 2002); sin embargo, esta disponibilidad también depende de características propias del metal como movilidad, forma química, concentraciones del elemento en el suelo, tipo de suelo, presencia de otros metales y materiales fuentes del cadmio (Rábago y Aracil, 2011).

3.3.2 Contenido de zinc en los suelos de la Región Caribe

Además del pH, la cantidad de materia orgánica, el nivel de zinc (Zn) y el porcentaje y tipo de arcilla son considerados en el comportamiento del Cd en el suelo. La cantidad de Zn encontrada en los suelos analizados, muestra un rango que va desde 0,8 mg/L hasta 8,4 mg/L, una mediana de 2,70 y un promedio de 3,22.

Valores en suelos que se encuentren en un rango de 3 a 15 mg/L de Zn son considerados suficientes (Bertsch, 1987) desde el punto de vista de nutrición de plantas; de las muestras de suelos de la Región Caribe el 63,63% mostraron valores inferiores a 3 mg/L del elemento. La interacción entre este elemento y el Cd se da principalmente por su similitud química, de modo que la presencia de Zn en cantidad suficiente o mayor en el medio afecta la adsorción del Cd en los coloides del suelo (Rábago y Aracil 2011), por los resultados se puede decir que en más de la mitad de los suelos no hay suficiente Zn que pueda competir con el Cd.

Cuadro 12. Resultados de análisis químico en suelos en Región Caribe, Costa Rica.
Diciembre de 2018.

Código	pH	Acidez ext	cmol(+)/L			mg/L					mg/kg
			Ca	Mg	K	Cu	Mn	Fe	Zn	P	Cd
7-04-02-01-1	5,8	0,49	26,77	8,79	0,43	9	13	118	7,0	11	ND
7-04-02-01-2-M1	5,9	0,21	21,53	5,72	0,21	15	33	124	2,8	16	ND
7-04-02-01-2-M2	5,9	0,17	19,79	5,40	0,18	13	70	135	2,3	7	ND
7-04-02-01-3	6,3	0,17	21,40	6,12	0,50	14	49	124	1,7	9	ND
7-04-02-01-4	6,3	0,37	22,03	5,51	0,62	14	39	152	2,2	21	ND
7-04-02-01-5	6,5	0,22	23,13	6,77	0,29	15	21	126	2,8	11	ND
7-04-02-01-6	6,4	0,13	21,95	5,70	0,46	14	39	110	2,2	13	ND
7-04-02-01-4	5,7	0,18	23,45	6,00	0,92	12	15	115	1,9	25	ND
7-04-01-01-1	5,0	0,85	4,68	2,72	0,32	11	228	169	4,3	1	ND
7-04-01-01-2-CT1	4,9	4,41	3,54	1,90	0,09	13	108	257	3,6	2	ND
7-04-01-01-2-CT2	5,4	0,77	8,48	4,24	0,16	13	168	186	8,4	1	ND
7-04-01-01-3	5,0	1,14	3,48	1,39	0,14	10	88	377	2,2	6	ND
7-04-01-01-4	7,2	0,23	27,84	5,52	0,40	5	27	63	6,1	6	ND
7-01-04-01-1-R1	6,1	0,21	24,58	11,0	0,13	4	26	64	2,8	1	ND
7-01-04-01-1-Rc	5,5	0,23	27,11	15,9	0,16	3	29	60	2,2	1	ND
7-01-04-01-2	6,0	0,33	13,82	4,27	0,23	5	23	140	2,7	1	ND
7-01-04-01-3	5,7	0,26	14,76	4,84	0,25	3	59	159	4,0	6	ND
7-01-04-01-4	7,2	0,11	33,28	5,22	0,38	8	11	46	3,3	4	ND
7-02-03-01-1	5,3	0,85	4,44	1,98	0,32	7	10	188	1,4	7	ND
7-02-03-01-2	4,9	1,09	1,26	0,29	0,16	5	14	147	0,8	4	ND
7-02-03-01-3	5,5	0,35	4,98	1,14	0,22	8	7	156	1,2	3	ND
7-05-03-01-1	5,7	0,82	17,16	7,22	0,07	6	16	176	1,6	2	ND
7-05-02-01-1	5,8	0,44	26,45	8,04	0,23	6	34	96	2,7	3	ND
7-05-02-01-2	8,0	0,28	41,06	2,97	0,34	7	7	44	1,2	11	ND
7-03-06-01-1	5,4	0,44	4,84	0,91	0,10	16	37	145	2,4	5	ND
7-03-04-01-1	4,8	1,29	1,80	0,81	0,21	12	20	413	2,7	8	ND
7-03-04-01-2	5,0	1,11	2,80	1,10	0,09	16	72	323	3,2	12	ND
7-06-01-01-1	5,4	1,10	4,39	1,43	0,27	5	11	180	2,4	8	ND
7-06-05-01-1 (H1)	6,0	0,21	6,19	1,48	0,36	11	8	102	1,4	11	ND
7-06-05-01-1 (H2)	5,8	0,17	10,83	3,75	0,51	13	13	243	4,4	14	ND
3-05-11-01-1	5,2	2,12	26,86	4,15	0,23	6	30	65	7,2	1	ND
3-05-05-01-1	5,6	0,16	10,64	2,56	0,37	12	27	337	5,4	24	ND
3-05-03-01-1	5,5	0,18	22,05	4,30	0,22	8	37	134	5,7	4	ND

ND: No detectado con un límite mínimo de detección de 1 mg/kg.

3.3.3 Contenido de materia orgánica de la Región Caribe

Las muestras analizadas en el Caribe tienen valores entre 1,65% y 7,92% de materia orgánica (MO) (Cuadro 13), con un promedio y una mediana de 4,05% y 4,02% respectivamente. Valores mayores o iguales a 5% de MO en suelos que no sean de origen volcánico son considerados con cantidad suficiente (Bertsch, 1987), además López *et al.* (2011) mencionan que para el cultivo de cacao valores iguales o superiores a 3% en MO son considerados aceptables para su establecimiento. En la Región Caribe solo 18,18% de las muestras analizadas se ubican por encima de 5% de MO, principalmente aquellas que pueden tener alguna influencia volcánica; el 21,21% de los productores visitados usa algún tipo de materia orgánica para en abonamiento del cultivo. Por lo anterior, es poco probable que la MO pueda ser una variable que afecte la retención del Cd en esta región.

Respecto al Cd, algunas sustancias que conforman la MO como los ácidos húmicos y fúlvicos, que aumentan en el proceso de humificación, tienen un papel importante en la capacidad de formar enlaces fuertes con grupos fenólicos y carboxílicos con mayor capacidad y fuerza de retención (Bravo *et al.*, 2014; García *et al.*, 2002; Rodríguez, 2001), de esta manera afecta la disponibilidad del cadmio para las plantas (Rieuwerts *et al.*, 2015).

3.3.4 Análisis granulométricos de los suelos de Región Caribe

La mayoría de los suelos de la Región Caribe presentaron dominancia de arcilla y limo respecto a la arena (Cuadro 13); sin embargo, por el % no muy alto podría no retener el Cd si no se dieran otras condiciones como lo indican los autores siguientes. De acuerdo a Rieuwerts *et al.* (2015), Hooda (2010) y Alloway (2002), las arcillas tienen un papel muy importante en la adsorción de los metales y en la capacidad de intercambio catiónico de los suelos; sin embargo depende mucho del tipo de arcilla (Rábago y Aracil, 2011), por otra parte, la energía de los enlaces que logra formar el Cd con las arcillas es menor que la formada con la materia orgánica (Gara, 2016).

3.3.5 Contenido de cadmio en suelos de la Región Caribe

El contenido de Cd en estos suelos no fue detectado (Cuadro 12) con un límite mínimo de detección en suelo (LMD) establecido por el laboratorio de 1 mg/kg. Por lo anterior y lo reportado por Alloway (2002) y Beltrán (2001) que la concentración de cadmio en suelo se

encuentra entre 0,1 y 1 mg/kg, es posible que, en los suelos de la Región Caribe, exista Cd por debajo de 1mg/kg que puede ser absorbido por las plantas.

Cuadro 13. Resultados de análisis de materia orgánica y granulométricos en suelos de la Región Caribe, Costa Rica. Diciembre de 2018.

Código	%				Nombre Textural
	MO	Arena	Arcilla	Limo	
7-04-02-01-1	3,64	16	45	40	Arcilloso
7-04-02-01-2-(M1)	3,49	4	54	42	Arcillo Limoso
7-04-02-01-2-(M2)	2,77	13	52	35	Arcilloso
7-04-02-01-3	1,82	7	34	59	Franco A. Limoso
7-04-02-01-4	2,50	4	42	54	Arcillo Limoso
7-04-02-01-5	2,56	11	39	50	Franco A. Limoso
7-04-02-01-6	2,44	16	32	52	Franco A. Limoso
7-04-02-01-4	2,77	21	40	40	Franco Arcilloso
7-04-01-01-1	4,02	24	62	14	Arcilloso
7-04-01-01-2-(CT1)	4,05	14	82	4	Arcilloso
7-04-01-01-2-(CT2)	4,06	26	70	4	Arcilloso
7-04-01-01-3	4,87	21	64	15	Arcilloso
7-04-01-01-4	3,28	3	51	46	Arcillo Limoso
7-01-04-01-1-(R1)	4,31	31	44	25	Arcilloso
7-01-04-01-1-(Rc)	2,52	31	44	25	Arcilloso
7-01-04-01-2	3,86	16	47	37	Arcilloso
7-01-04-01-3	4,45	18	72	12	Arcilloso
7-01-04-01-4	3,60	19	43	38	Arcilloso
7-02-03-01-1	5,12	36	33	31	Franco Arcilloso
7-02-03-01-2	7,92	47	29	23	Franco A. Arenoso
7-02-03-01-3	3,39	40	34	26	Franco Arcilloso
7-05-03-01-1	2,65	4	52	44	Arcillo Limoso
7-05-02-01-1	3,60	31	35	35	Franco Arcilloso
7-05-02-01-2	1,65	23	27	50	Franco Limoso
7-03-06-01-1	4,87	21	63	16	Arcilloso
7-03-04-01-1	4,23	19	63	19	Arcilloso
7-03-04-01-2	4,98	16	68	16	Arcilloso
7-06-01-01-1	4,63	40	39	21	Franco Arcilloso
7-06-05-01-1 (H1)	4,68	63	22	16	Franco A. Arenoso
7-06-05-01-1 (H2)	7,39	38	37	26	Franco Arcilloso
3-05-11-01-1	5,06	26	58	16	Arcilloso
3-05-05-01-1	6,42	31	50	19	Arcilloso
3-05-03-01-1	6,34	29	45	26	Arcilloso

3.3.6 Resultados de análisis de Cd en raíz, hoja y grano de cacao de la Región Caribe

Los resultados obtenidos en los análisis de Cd en raíz, hoja y grano seco no fermentado, muestran que se detectó el metal en 36,36 % de las muestras analizadas en cada órgano; de estas 12 muestras con Cd por cada órgano, el mayor porcentaje se encontró en el distrito de Sixaola del Cantón de Talamanca (Cuadro 14), donde siete muestras de raíz y de hoja, y seis muestras de grano contienen Cd.

La concentración de Cd en el grano se encontró dentro de un rango de 1,0 y 3,0 mg/kg (Cuadro 14), se evidencia, que por lo general, la concentración de Cd en el grano es más baja dentro de cada muestra que los valores obtenidos en las hojas; una de las formas que puede desarrollar la planta en defensa contra el Cd es que esta logre inmovilizar este metal en los tricomas de las hojas (Serrano *et al.*, 2008), quizás esta es la razón que en este estudio, por lo general, la hoja es el órgano de mayor acumulación de Cd, además este órgano es el fotosintéticamente activo y por consiguiente se usa para diagnóstico en nutrición mineral de plantas.

En la Región Caribe, las condiciones de la mayoría de muestras de suelos son favorables (por MO, contenido de Zn y en parte por pH) para que el elemento Cd se encuentre disponible para las plantas, siempre que esté presente en el suelo, sea por origen o depositado. La mayoría de los distritos de la Región Caribe donde se encuentran las fincas de cacao, en mayor o menor grado, son afectados por inundaciones de ríos. El caso de Sixaola donde en siete y seis de las ocho muestras de raíz, hoja y grano analizadas se encontró Cd (Cuadro 14), es inundada por el río del mismo nombre, estas inundaciones pueden dar origen a arrastre de materiales desde la parte alta y ser acumulado en esta zona; materiales que pueden contener Cd sea por origen o por actividades antrópicas. El hecho que no se haya detectado en los suelos y sí en los órganos del árbol, posiblemente se debe a que el límite de detección en suelos, establecido por el laboratorio, fue de 1 mg/kg, con posibilidad de encontrarse en concentración por debajo de este límite como lo reportan Alloway (2002) y Beltrán (2001), también se menciona que el Cd disponible en el suelo puede ser absorbido por la planta y acumulado en las diferentes partes de las plantas (Tantalean y Huauya, 2017; Arévalo *et al.*, 2016). La presencia de Cd en este distrito podría provenir por contaminación por aplicaciones en cultivos anteriores y presentes de

Musa sp, la probabilidad es baja debido a que en los demás distritos muestreados en la Región Caribe abundan los cultivos de bananos y plátanos, y la presencia de Cd en ellos es baja; además hay inundaciones, pero por ríos que tienen orígenes diferentes.

En la Región Caribe, a pesar que existe correlación entre el contenido de Cd en raíz y grano, la única correlación fuerte se da entre el contenido de Cd en hoja y en grano con un coeficiente de correlación de 80,7% (Cuadro 15). Sin embargo, cuando se correlaciona el contenido de Cd en raíz, hoja y grano en el Cantón de Talamanca (distritos de Sixaola y Bribri), sin los demás cantones de la Región Caribe, se observa que existe correlación entre el contenido de Cd presente en los tres órganos (raíz, hoja y grano) analizados del árbol de cacao, con coeficientes de correlación de 72,2%, 89,4%, y 75,3%, raíz-hoja, raíz-grano y hoja-grano, y p-valor de 0,03; 0,00012 y 0,01 respectivamente. Esto confirma lo mostrado en el Cuadro 14, que en Talamanca, específicamente en Sixaola, es donde se encuentra el contenido de Cd en mayor porcentaje de las muestras analizadas de los órganos del árbol de cacao en la Región Caribe.

Cuadro 14. Resultados análisis de cadmio en raíz, hoja y grano no fermentado de *Theobroma cacao* L. Región Caribe, Costa Rica. Diciembre de 2018.

Código	Cd mg/kg)		
	Raíz	Hoja	Grano seco
Distrito de Sixaola			
7-04-02-01-1	1,3	1,6	1,2
7-04-02-01-2-M1	1,8	3,4	3,0
7-04-02-01-2-M2	1,8	ND	1,8
7-04-02-01-3	ND	1,4	ND
7-04-02-01-4	1,2	2,0	1,5
7-04-02-01-5	1,3	2,0	1,8
7-04-02-01-6	1,0	1,1	ND
7-04-02-01-4	2,14	3,97	2,11
Demás zonas de la Región del Caribe			
7-04-01-01-1	ND	ND	ND
7-04-01-01-2-CT1	ND	ND	ND
7-04-01-01-2-CT2	ND	ND	ND
7-04-01-01-3	ND	ND	ND
7-04-01-01-4	1,1	1,2	1,1
7-01-04-01-1-R1	ND	ND	ND
7-01-04-01-1-Rc	ND	ND	ND
7-01-04-01-2	ND	ND	ND
7-01-04-01-3	ND	ND	ND
7-01-04-01-4	ND	1,2	1,3
7-02-03-01-1	ND	ND	ND
7-02-03-01-2	1,1	ND	1,0
7-02-03-01-3	ND	ND	ND
7-05-03-01-1	ND	1,0	ND
7-05-02-01-1	ND	ND	ND
7-05-02-01-2	ND	ND	ND
7-03-06-01-1	1,3	ND	ND
7-03-04-01-1	ND	ND	ND
7-03-04-01-2	1,9	ND	ND
7-06-01-01-1	1,5	ND	1,2
7-06-05-01-1 (H1)	ND	ND	ND
7-06-05-01-1 (H2)	ND	ND	ND
3-05-11-01-1	ND	1,4	1,0
3-05-05-01-1	ND	ND	ND
3-05-03-01-1	ND	3,2	2,5

ND: no detectado

Cuadro 15. Análisis de correlación entre contenido de cadmio en las diferentes partes analizadas del árbol de cacao de la Región Caribe de Costa Rica. Diciembre de 2018.

Región Caribe (incluye Talamanca)			
	Cd (Raíz)	Cd (Hoja)	Cd (Grano)
Cd (Raíz)	1	0,1	0,00098
Cd (Hoja)	0,438	1	5,3E-08
Cd (Grano)	0,606	0,807	1
Cantón de Talamanca			
	Cd (Raíz)	Cd (Hoja)	Cd (Grano)
Cd (Raíz)	1	0,03	0,00012
Cd (Hoja)	0,722	1	0,01
Cd (Grano)	0,894	0,753	1

3.3.7 Resultados de análisis foliares de la Región Caribe

Los resultados de la mayoría de elementos esenciales en la nutrición de plantas, obtenidos de los análisis foliares realizados en las diferentes fincas muestreadas en la Región Caribe se muestran en el Cuadro 16.

El rango considerado como normal de nitrógeno (N) en las hojas de cacao va desde 2,00 a 2,15% (Laínez, 1982) y de 2,00 a 2,50% (Mills y Jones, 1996), de acuerdo a estos rangos de suficiencia el 21,21% de las muestras se encuentran deficientes en este elemento, el promedio de N en las muestras es de 2,17%.

El rango de suficiencia del contenido de fósforo (P) en las hojas de cacao es entre 0,13% y 0,25% (Guerrero, 2012; Mills y Jones, 1996); en la Región Caribe ninguna muestra fue deficiente en este elemento, el promedio y la mediana son de 0,18% y de 0,20% respectivamente, lo que indica que a pesar que el suelo es deficiente en este elemento en 66,67%, en las hojas no hay deficiencia, por lo que este cultivo al parecer es eficiente en la absorción de este elemento por las raíces.

El potasio (K), presenta un rango adecuado en las hojas de cacao cuando su concentración se encuentra entre 1,3% a 2,2% y entre 1,2% a 2,2% (Guerrero, 2012 y Mills y Jones, 1996), solo el 15,79% de las muestras es deficiente en este elemento (cinco muestras de 33) (Cuadro 16).

Cuadro 16. Resultados análisis químicos en muestras foliares de *Theobroma cacao* L. Región Caribe, Costa Rica. Diciembre de 2018.

Código	% masa						mg/kg				
	N	P	Ca	Mg	K	S	Fe	Cu	Zn	Mn	B
7-04-02-01-1	2,38	0,20	1,13	0,36	1,82	0,2	92	11	82	255	34
7-04-02-01-2-(M1)	1,97	0,28	1,16	0,48	1,73	0,22	40	10	92	143	35
7-04-02-01-2-(M2)	2,01	0,21	1,48	0,59	1,33	0,23	40	9	100	381	38
7-04-02-01-3	1,77	0,24	1,65	0,73	1,29	0,27	85	8	97	163	37
7-04-02-01-4	1,96	0,27	1,23	0,53	1,62	0,24	58	8	87	140	39
7-04-02-01-5	2,01	0,28	1,08	0,57	1,60	0,24	35	8	90	150	33
7-04-02-01-6	2,18	0,17	1,69	0,48	1,47	0,21	42	8	51	164	43
7-04-02-01-4	1,76	0,20	1,56	0,51	1,06	0,17	60	5	103	229	33
7-04-01-01-1	2,30	0,19	0,73	0,44	1,85	0,22	36	11	144	755	33
7-04-01-01-2-(CT1)	2,29	0,19	0,38	0,33	1,92	0,15	38	13	77	438	25
7-04-01-01-2-(CT2)	2,12	0,17	1,05	0,51	1,56	0,22	46	11	169	852	32
7-04-01-01-3	2,17	0,17	0,75	0,52	1,59	0,24	80	10	106	1407	36
7-04-01-01-4	2,20	0,24	1,02	0,43	2,12	0,19	134	13	97	306	31
7-01-04-01-1-(R1)	2,22	0,18	1,02	0,45	1,79	0,21	37	8	65	197	36
7-01-04-01-1-(Rc)	2,33	0,21	0,82	0,40	2,11	0,2	47	12	68	204	36
7-01-04-01-2	2,36	0,18	0,96	0,45	2,07	0,2	39	13	66	162	33
7-01-04-01-3	2,18	0,18	0,91	0,42	1,66	0,19	34	11	80	573	36
7-01-04-01-4	1,93	0,16	1,62	0,35	1,63	0,21	35	7	48	71	45
7-02-03-01-1	2,27	0,14	1,26	0,68	1,37	0,25	56	14	30	300	39
7-02-03-01-2	2,46	0,19	0,91	0,49	1,94	0,2	52	10	24	281	44
7-02-03-01-3	2,27	0,14	1,26	0,68	1,37	0,25	56	14	30	300	39
7-05-03-01-1	1,80	0,18	1,59	0,64	1,12	0,25	47	6	60	380	43
7-05-02-01-1	2,43	0,26	0,91	0,56	1,98	0,25	60	12	73	246	39
7-05-02-01-2	1,87	0,30	1,57	0,71	1,73	0,29	80	6	80	30	46
7-03-06-01-1	2,47	0,16	1,12	0,52	1,97	0,22	68	10	65	442	54
7-03-04-01-1	2,01	0,13	0,62	0,54	1,39	0,28	74	9	78	1473	43
7-03-04-01-2	2,21	0,18	0,87	0,50	1,46	0,29	74	10	90	1103	45
7-06-01-01-1	2,38	0,18	1,23	0,58	1,73	0,26	119	10	41	220	43
7-06-05-01-1 (H1)	2,47	0,19	1,00	0,5	2,12	0,19	70	8	39	83	39
7-06-05-01-1 (H2)	2,16	0,20	1,39	0,51	1,74	0,24	64	9	81	169	42
3-05-11-01-1	2,51	0,18	1,53	0,48	1,40	0,22	87	8	137	1137	40
3-05-05-01-1	2,18	0,15	1,25	0,56	1,18	0,19	56	7	59	219	29
3-05-03-01-1	2,01	0,14	1,76	0,51	1,10	0,22	78	14	105	645	40
Máximo	2,51	0,30	1,76	0,73	2,12	0,29	134	14	169	1473	54
Mínimo	1,76	0,13	0,38	0,33	1,06	0,15	34	5	24	30	25
Promedio	2,17	0,20	1,17	0,52	1,63	0,22	61,18	9,79	79,21	412,67	38,18
Mediana	2,18	0,18	1,13	0,51	1,63	0,22	56	10	80	255	39
D. Estándar	0,210	0,043	0,335	0,096	0,304	0,033	23,814	2,409	31,789	375,263	5,665

ND: no detectado con un límite de detección de 1 mg/kg.

Con niveles de suficiencia entre 0,30-0,60%, 0,20-0,50%, 20-100 ppm (Mills y Jones, 1996), las concentraciones de calcio, magnesio y zinc se encuentran adecuadas respectivamente, mientras que el manganeso con un rango de suficiencia de 50-300 ppm (Mills y Jones, 1996) está elevado en cerca de la mitad de las muestras. El zinc (Zn) a pesar que está deficiente en 63,64% de las muestras de suelos de la Región Caribe, en las hojas se encuentra en condiciones adecuadas en todas las muestras (Cuadro 16); algo similar a los elementos P y Zn sucede con el Cd que no se detectó en el suelo con un límite de 1 mg/kg, pero aparece en las hojas en 12 muestras de un total de 33 (36,36%).

4 Conclusiones

Del total de muestras de suelos analizadas (73), solo tres resultaron positivas con cadmio, correspondientes a la Región Brunca, en las restantes no se detectó el elemento con un límite de detección mínimo de 1 mg/kg.

En raíz, la presencia de cadmio fue 28,57%; 84,21% y 36,36% para un número de muestras analizadas de 21, 19 y 33 en las Regiones Norte, Brunca y Caribe, respectivamente. Mientras que, para el mismo número de muestras y regiones, en el órgano hoja la presencia de cadmio fue 38,01%; 84,21% y 36,36%, respectivamente. De la misma forma, en el grano de cacao no fermentado y seco en las tres regiones, resultaron positivas a la presencia de cadmio 33,33%; 89,47% y 36,36%, respectivamente.

En la Región Caribe, el distrito de Sixaola es el de mayor presencia de Cd, respecto a los demás.

5 Recomendaciones

Debido a la dificultad para encontrar en el país laboratorios acreditados para la detección de cadmio en derivados del cacao y laboratorios para suelos con detección por debajo de 1 mg/kg, se recomienda antes de iniciar estos tipos de trabajos con metales pesados cerciorarse sobre los alcances de los laboratorios.

Se recomienda continuar con investigaciones para determinar el origen del cadmio presente en las muestras de tejidos vegetales y en los granos de cacao, y participar en las reuniones del sector productor de cacao para definir, en conjunto, las investigaciones y trabajos inminentes según las tomas de decisiones de los países importadores.

6 Referencias bibliográficas

- Agbenin, J., Danko, M., Welp, G. 2009. Soil and vegetable composition relationships of eight potentially toxic metals in urban garden fields from northern Nigeria. *J. Sci Food Agr.* 89:49-54: doi 10.1002/jsfa.3409.
- Alpizar, E. 2014. Zonificación agroecológica del café (*Coffea arabica*) y el cacao (*Theobroma cacao*, L) en Costa Rica, mediante el sistema de zonas de vida. Tesis M.Sc. Gestión de Recursos Naturales y Tecnologías de Producción. Cartago, Costa Rica. ITCR. 98h.
- Alloway, B. 2002. Heavy metal in soil. Third Edition. Editorial Board. Canada. 614p.
- Andrade, M., Martínez, M. 2014. Fertilidad del suelo y parámetros que la definen. Consultado el 31 de julio de 2018. Disponible en <file:///C:/Users/Jos%C3%A9%20Luis%20Torres/Desktop/Dialnet-FertilidadDelSueloYParametrosQueLaDefinen-267902.pdf>Arboleda
- Arce, M. 2017. Efecto de las relaciones fuente: sumideros decrecientes sobre la expresión sexual y la carga de frutos de papaya (*Carica papaya* L.) híbrido Pococí. Tesis Lic. Agronomía. Universidad de Costa Rica. 98p.
- Arévalo, E., Obando, M., Zúñiga, L., Arévalo, C., Baligar, B., He, Z. 2016. Metales pesados en suelos de plantaciones de cacao (*Theobroma cacao*. L) en tres regiones del Perú. *Ecología aplicada.* 15: 81-89
- Augstburger, F., Berger, J., Censkowsky, U., Heid, P. & Milz, J. 2000. Agricultura Orgánica en el trópico y subtropical. En: Guía de 18 cultivos. 1ra Edición. Alemania. 24p.
- Baldoncini, A. 2015. Efectos de la aplicación de fertilizantes sobre el pH de suelos serie Oncativo. Consultado el 25 de junio de 2018. Disponible en <https://rdu.unc.edu.ar/bitstream/handle/11086/1849/Baldoncini%20-%20Efectos%20de%20la%20aplicaci%C3%B3n%20de%20fertilizantes%20sobre%20el%20pH.pdf?sequence=1>
- Barrueta, S. 2013. Guía de métodos de detección y análisis de cadmio en cacao (*Theobroma cacao* L.). Consultado 09 mayo 2018. Disponible en https://issuu.com/riicchperu/docs/guia_de_metodos_de_deteccion_y_anal
- Bravo, I., Arboleda, C., Martin, F. 2014. Efecto de la calidad de la materia orgánica asociada con el uso y manejo de suelos en la retención de cadmio en sistemas alcalinos de Colombia. *Acta Agronomica.* 63(2):1-14
- Beltrán, M. 2001. Fito extracción en suelos contaminados con Cadmio y Zinc usando especies vegetales comestibles. Tesis Msc Ingeniería Ambiental. México. Universidad Autónoma metropolitana. 176h.
- Bertsch, F. 1987. Manual para interpretar la fertilidad de los suelos en Costa Rica. San José. Costa Rica. 83p.
- Boulding, R. 1996. Environmental assesment sourcebook. USA. 400p.
- CAC (Codex Alimentarius Commission). 2018. Anteproyecto de niveles máximos (NM) para el cadmio en chocolate y productos derivados del cacao (En el trámite 5/8).

- Informe de la 12.^a Reunión del Comité del CODEX sobre contaminantes de los alimentos. (12 al 16 de marzo de 2018, Países Bajos).
- Canacacao (Asociación Cámara Nacional de Cacao Fino de Costa Rica). 2016. Biblioteca. Cacao de Costa Rica. Consultado 18 may. 2016.
- Carmioli G., G. 2017. Análisis de la actividad cacaotera costarricense y perspectivas de su reactivación. SEPSA (Secretaría Ejecutiva de Planificación Sectorial Agropecuaria).2017-001. 82 p. Consultado el 11 mayo 2017. Disponible en http://www.sepsa.go.cr/DOCS/2017-001-Diagnostico_cacao.pdf
- Carrasco, A. 2005. Metales pesados en el suelo. Consultado el 30 de noviembre de 2017. Disponible en http://biblioteca-digital.sag.gob.cl/documentos/medio_ambiente/criterios_calidad_suelos_agricolas/pdf_suelos/5_metales_pesados_suelo.pdf
- Contreras, F., Herrera, T., Izquierdo, A. 2011. Efecto de dos fuentes de carbonato de calcio (CaCO₃) sobre la disponibilidad de cadmio para plantas de cacao (*Theobroma cacao* L.) en suelos de Barlovento, estado de Miranda. Revista Venesuelos. 13:52-63.
- Diario Oficial de la Unión Europea. 2014. Reglamento (UE) No 488/2014 de la Comisión del 12 de mayo de 2014 que modifica el Reglamento (CE) N° 1881/2006 por lo que respecta al contenido máximo de cadmio en los productos alimenticios. Diario Oficial de la Unión Europea.13 de mayo de 2014. L138/75-79.
- Di Rienzo, Balzarini, M., González, L., Casanoves, F., Tablada, M., Robledo, C. 2017. InfoStat. Software estadístico. Córdoba, Argentina.
- Estévez, J., Andrade, L., Marcet, P., Montero, J. 2000. Fijación y movilidad del cadmio y zinc en tres tipos de suelos ácidos de Galicia, España. Ciencia del suelo. 18(1):28-35p.
- Foster R. Ll. 2013. Propuesta para el proyecto determinación de concentraciones de Cadmio en suelos, granos secos de cacao (*Theobroma cacao* L.) y chocolates de los cantones cacaoteros de Costa Rica. 73p.
- Galán, E., Antonio, R. 2008. Contaminación de suelos por metales pesados. Consultado el 26 de noviembre de 2017. Disponible en http://www.ehu.es/sem/macla_pdf/macla10/Macla10_48.pdf
- Gamboa, J. 2016. Determinación de concentraciones de cadmio en granos fermentados y secos de cacao (*Theobroma cacao* L.), en los cantones cacaoteros de Costa Rica. Código CC 01 NM 501-9-15. Instituto Nacional de Innovación y Transferencia de Tecnología Agropecuaria (INTA). Fundación para el fomento y promoción de la investigación Transferencia de tecnología agropecuaria de Costa Rica (FITTACORI). San José, Costa Rica. 39p.
- Gara, B. 2016. Eco toxicología del cadmio. Riesgo para la salud de la utilización de suelos ricos en cadmio. Tesis Lic. Farmacia. Universidad Complutense. 23h.

- García, C., Moreno, J., Hernandez, L., Polo, A. 2002. Metales pesados y sus implicaciones en la calidad del suelo. Consultado el 29 de noviembre de 2017. Disponible en <http://digital.csic.es/handle/10261/111812>
- Guerrero, J. 2012. Análisis de suelo y fertilización del cacao. Guía Técnica. Universidad Nacional La Molina (UNALM). Perú. 36p. Recuperado de https://www.agrobanco.com.pe/wp-content/uploads/2017/07/010-a-cacao_SUELOS_FERTILIZACI%C3%93N_.pdf
- Hooda, P. 2010. Trace elements in soils. Londres. Inglaterra. 618p.
- Huamaní, H., Huauya, R., Mansilla, L., Florida, N., Neira, G. 2012. Presencia de metales pesados en cultivo de cacao (*Theobroma cacao* L.) organico. Acta Agronómica. 61(4):339-344p.
- Kabata-Pendias, A. 2011. Trace elements in soils and plants. 4th ed. CRC Press. Taylor and Francis Group. Boca Raton (FL). 505 p.
- Kabata-Pendias, A. and Pendias, H. 2001. Trace elements in soil s and plants. 3rd ed. CRC Press. Boca Raton, London New York, Washington, D.C.USA. 403p.
- Kass, D. 1996. Fertilidad de suelos. San José. Costa Rica. 272p.
- Laínez, J. 1982. Aplicación del diagnóstico foliar en la evaluación de la condición nutricional de las plantaciones comerciales de café y cacao en el litoral ecuatoriano. INIAP. Recuperado de <http://repositorio.iniap.gob.ec/bitstream/41000/1574/1/Bolet%C3%ADn%20t%C3%A9cnico%20N%C2%BA%2049.pdf>
- López, P., Ramírez, M., Mendoza, A. 2011. Paquete tecnológico cacao (*Theobroma cacao*.L) establecimiento y mantenimiento. Consultado el 03 de julio de 2018. Disponible en file:///C:/Users/Jos%C3%A9%20Luis%20Torres/Desktop/cacao_establecimiento.pdf
- MAG (Ministerio de Agricultura y Ganadería). 2007. Caracterización de la agro cadena del cacao. San José, Costa Rica. 17p.
- Mills, H. A. and Jones Jr., J.B. (1996). Plan Analysis Handbook II. Un Practical Sampling, preparation analysis and interpretation guide. Published: Athens, GA.: Micro-Macro.422p.
- Mite, F., Carrillo, M., Durango, W. 2010. Avances del monitoreo de presencia de cadmio en almendras de cacao, suelos y aguas en Ecuador. XII Congreso Ecuatoriano de la Ciencia del Suelo. 17-19 de noviembre de 2010.21p. (en línea). Consultado 24 enero 2019. Disponible en <http://www.secsuelo.org/wp-content/uploads/2015/06/6.-Francisco-Mite.-Cadmio.-INIAP.pdf>
- Nadurille, E. 2010. Cacao: Cadena de valor de Costa Rica. (en línea). Consultado 06 marzo 2017. Disponible en <http://orton.catie.ac.cr/repdoc/A7712E/A7712E.PDF>
- Navarro, J., Aguilar, L., López, J. 2007. Aspectos bioquímicos y genéticos de la tolerancia y acumulación de metales pesados en plantas. Ecosistemas. 16(2):10-25

- OMC (Organización Mundial del Comercio). G/SPS/GEN/1587 (17-5872). 2017. Reglamento (UE) N° 488/2014 de la Comisión, del 12 de mayo de 2014, que modifica el Reglamento (CE) N° 1881/2006 por lo que respecta al contenido máximo de cadmio en los productos alimenticios. Comunicación de Perú. 30 de mayo de 2017. P 1-2.
- Peris, M., C. Micó, L. Recatalá, R. Sánchez, y J. Sánchez. 2007. Heavy metal contents in horticultural crops of a representative area of the European Mediterranean region. *Sci Total Environ.*; 378(1-2):42-48.
- Pernía, B., De Sousa, A., Reyes, R., Castrillo, M. 2008. Biomarcadores de contaminación por cadmio en las plantas. Consultado el 06 de mayo de 2018. Disponible en <http://www.redalyc.org:9081/home.oa?cid=958504>
- Rábago, I., Aracil, J. 2011. Capacidad de amortiguación de la contaminación por plomo y por cadmio en suelos de la comunidad de Madrid. Tesis PhD Farmacia. Madrid, España. Universidad Complutense de Madrid 285p.
- Rato, J., Ramos-Miras, J., Lopez-Piñeiro, A., Loures, L., Gil, C., Coelho, J., Loures, A. 2014. Concentrations of Available Heavy Metals in Mediterranean Agricultural Soils and their Relation with Some Soil Selected Properties: A Case Study in Typical Mediterranean Soils. *Sustainability* 2014, 6 (12) 9124-9138; <https://doi.org/10.3390/su6129124>.
- Rieuwerts, J., Thornton, I., Farago, M., Ashmore, M. 2015. Factors influencing metal bioavailability in soils: preliminary investigations for the development of a critical loads approach for metals. *Chemical Speciation and Bioavailability*.10(2): 61-75
- Rodríguez, H. 2001. Estudio de la contaminación por metales pesados en la cuenca del río Llobregat. Tesis Phd Ingeniería Minera y recursos naturales. Catalunya. Universidad politécnica de Catalunya. 281h.
- Sánchez, G. 2016. Eco toxicología del cadmio. Riesgo para la salud de la utilización de suelos ricos en cadmio. Tesis. Lic Farmacia. México. Universidad complutense.19h.
- Serrano, M., Martínez, N., Romero, M., Del Rio, L., Sandallo, L. 2008. Toxicidad de cadmio en plantas. Consultado el 08 de mayo de 2018. Disponible en <https://www.revistaecosistemas.net/index.php/ecosistemas/article/view/409>
- Tantalean, E., Huauya, M. 2017. Distribución del contenido de cadmio en los diferentes órganos de cacao CCN-51 en suelo aluvial y residual en las localidades de Jacintillo y Ramal de Aspuzana. *Revista de investigación agroproduccion sustentable* 1(2): 69-78
- Wilquerson, J. 2017. Determinación de la absorción de cadmio y plomo en genotipos de cacao (*Theobroma cacao* L.) para el establecimiento de plantaciones comerciales. Tesis. Lic. Ing Agronómica. Perú. Universidad Nacional de San Martin-Tarapoto. 75h.