



**Facultad de Estudios Ambientales y Rurales
Pontificia Universidad Javeriana**

23-05-2022

Kevin Sebastián Merchán Pérez

Tutora: Lilia L. Roa-Fuentes

Cotutor: Pablo Andrés Ramos

**VARIACIÓN EN EL CONTENIDO DE CADMIO EN CULTIVOS DE CACAO
(*THEOBROMA CACAO*) EN PAUNA Y COPER (BOYACÁ – COLOMBIA).
ANÁLISIS DESDE LA DIVERSIDAD DE LAS COMUNIDADES VEGETALES**

Tabla de Contenido

1. Introducción	6
2. Área de Estudio	8
3. Métodos	10
3.1. Selección de las localidades de muestreo	10
3.2. Muestreo de suelo y vegetación	10
3.3. Cálculos de índices de diversidad	11
3.4 Entrevistas semiestructuradas	12
4. Resultados	12
5. Discusión	19
Literatura Citada	22

Lista de Figuras

Figura 1. Distribución de los valores de abundancia con el contenido de Cd en cultivo, borde y bosque.....	16
Figura 2. La correlación entre la abundancia de especies vegetales en respuestas a los niveles de Cadmio en suelo, grano y hoja.....	17
Figura 3 Contenido de Cd en Coper y Pauna con relación al contenido de Cadmio en suelo, grano y hoja	

Lista de Tablas

Tabla 1. Valores promedio del contenido de Cadmio en los diferentes compartimientos muestreados, en las fincas de estudio en Pauna y Coper. Los datos se reportan en unidades mg/kg	12
Tabla 2. Índice de valor de Importancia, realizado en las tres coberturas de estudio	14
Tabla 3. Correlación	11

RESUMEN

El cacao (*Theobroma cacao* L.) es un cultivo de nivel nacional e internacional, con un importante crecimiento en área sembrada, pasando de 115.882 hectáreas en 2012 a 199.549 hectáreas en el año 2014 y una demanda mundial que se espera tenga un incremento del 50% para el 2020 (Fedecacao 2016, Fedecacao 2013). La tendencia no ha sido ajena en el occidente de Boyacá, debido al impulso que le han dado los gobiernos nacionales, que han visto al cultivo de cacao como una alternativa, para la sustitución de cultivos ilícitos en zonas afectadas por la violencia, como es el caso de las áreas de extracción de esmeraldas, en Pauna y Coper. Se ha evidenciado, que el cacao muestra una alta afinidad por el Cd, esto puede estar expresado por las concentraciones en las hojas y granos de cacao, asociados con el suelo, esta investigación analizará los impactos del Cd del cacao en esta zona, la vegetación arbórea en cuanto a atributos e índice de diversidad, así como las estrategias de manejo del cultivo, por parte de los productores locales.

El análisis de esta investigación arroja como resultado que la diversidad arbórea que se manejan en los municipios de Pauna y Coper no reduce los niveles de Cd, también muestra que el manejo de los cultivos a nivel químico, tiende a incidir en el contenido de metal en el cacao.

Abstract

Cocoa (*Theobroma cacao* L.) is a national and international crop, with significant growth in planted area, going from 115,882 hectares in 2012 to 199,549 hectares in 2014, and a world demand expected to have an increase by 50%. % for 2020 (Fedecacao 2016, Fedecacao 2013). The trend has not been unknown in western Boyacá due to the impetus given by national governments, which have seen cocoa cultivation as an alternative, for the substitution of illicit crops in areas affected by violence, such as the case of the emerald extraction areas, in Pauna and Coper. It has been shown that cocoa shows a high affinity for Cadmium (Cd); this can be expressed by the concentrations in cocoa leaves and beans associated with the soil. This research will analyze the impacts of cocoa Cd in this area, vegetation in terms of attributes and diversity index, and crop management strategies by local producers.

The analysis of this research shows that the tree diversity managed in the municipalities of

Pauna and Coper does not reduce Cd levels. It also shows that the management of crops at a chemical level tends to affect positively or negatively the metal content in cocoa.

1. Introducción

El *Theobroma cacao* L. comúnmente conocido como cacao es una planta tropical de tipo arbóreo, crece entre 2 y 3 m en zonas cálidas y húmedas entre los 15° o 20° de latitudes norte y sur. Es un cultivo permanente, con una etapa de vida estimada de 40 años, para su desarrollo, se encuentra en zonas ubicadas entre los 400 y 1200 metros sobre el nivel del mar, con precipitaciones anuales entre 1500 y 3800 mm, una temperatura entre los 18°C y 32°C y con ciertas características edafológicas, para que el cultivo de cacao tenga un óptimo potencial (Federación Nacional de cacaoteros, 2018; Secretaria de Agricultura y Conservación de Boyacá, 2018).

La International Cocoa Organization expone que el Cacao es un producto de exportación importante, para las economías en desarrollo como África, Asia, Oceanía, América Latina y el Caribe, con un valor en el mercado global de aproximadamente de 12.000 mil millones de dólares. En Colombia el Cacao tiene buenas posibilidades, para posicionarse en mercados como España, Finlandia, Suecia, Australia y Estados Unidos (Stella and Tobón, 2015).

Sin embargo el futuro promisorio con el que cuenta el cultivo del cacao en el país, se puede ver afectado porque se ha evidenciado la presencia de contaminantes como el Cd, que afecta la salud de los consumidores, por esta razón la comunidad europea exige en el cacao y sus derivados unos niveles máximos de Cd para el consumo y comercialización (Stella and Tobón, 2015). Establecidos por El actual reglamento de la UE a cargo de la Autoridad Europea de Seguridad Alimentaria (EFSA) que ha implementado el reglamento No. 488/2014 estableciendo límites tolerantes entre 0.1 a 0.8 µg g⁻¹ a productos derivados del Cacao (UE,2014)

Colombia es uno de los principales productores de Cacao del mundo y contribuye con el 1.5% del mercado mundial. El gobierno colombiano, después de la firma del acuerdo de paz, ha destacado el Cacao como un cultivo de sustitución de las plantaciones de Coca. Actualmente se reportan ~ 25.000 ha. de cultivos ilícitos transformadas a sistemas cacaoteros (Joya-barrero and Pearse, 2021). La producción de cacao en el país se da durante todo el año, y se compone principalmente de Cacao Criollo y Trinario, los cuales se caracterizan por su fino sabor a chocolate, pero relativamente bajo en rendimiento (Federación Nacional de cacaoteros, 2018).

Algunos factores de manejo de los cultivos pueden estar asociado a los contenidos de Cd en los granos. Cuando existe la aplicación directa de fertilizantes y otras sustancias al suelo puede incrementar la disponibilidad de Cd en el suelo, plantas, hojas y granos (Martínez and Charrupí, 2017).

Los fertilizantes de fosfato son una de las fuentes más ubicuas de contaminación con Cd en suelos agrícolas de todo el mundo, ya que el Cd a menudo ocurre en altas concentraciones en las rocas de fosfato de las que se produce el fertilizante, las rocas de fosfato sedimentario pueden contener cadmio en concentraciones de 1 a 150 mg/kg – también se han registrado niveles de hasta 300 mg/kg (Fergusson, 1991; Chaney, 2018) Estos incluyen lodos de aguas residuales (biosólidos), el compost, estiércol animal y fertilizante de (Alloway and Steinnes, 1999).

El cacao es bioacumuladora de Cd, el cual es absorbido por sus raíces del suelo y el agua en su forma Cd²⁺ disponible junto con otros nutrientes que la planta necesita, la acumulación se da preferentemente en granos, seguido de cascaras de frutos, y la menor cantidad del metal se acumula en las hojas (Chavez *et al.*, 2015). Aparentemente, el Cacao tiene mayor predisposición para absorber Cd, la evidencia muestra mayor concentración en el chocolate en comparación con otros alimentos. El Cd en el fruto de Cacao se distribuye de manera desigual, con acumulación en el jugo y la pulpa, el metal se puede mover hacia la testa y almendra del Cacao y terminar finalmente en el grano. (Elsa Leuvany Alvarez, 2021)

Debido a los impactos al ambiente y al ser humano ocasionados por este metal (Cd), en los sistemas cacaoteros se han generado estrategias variables, como los monocultivos a pleno sol, hasta sistemas agroforestales donde los árboles frutales y de madera proporcionan sombra. También las prácticas agrícolas incluyen la producción orgánica, convencional y los sistemas de riego, que incluye la lluvia hasta la dependencia completa del riego. Estos factores pueden afectar las características del suelo, como el balance hídrico, la cantidad de materia orgánica, la disponibilidad de nutrientes, así como las fluctuaciones de temperatura (Olaya, Velandia Tibáquira and Suárez Salazar, 2015). Es así como los árboles acompañantes deben tener la capacidad para extraer nutrientes de lo profundo del suelo, el uso de diferentes especies de árboles de sombra también puede afectar la absorción de Cd por parte del cacao (Gramlich *et al.*, 2018; Argüello *et al.*, 2019)

Por otro lado, también se encuentran los sistemas agroforestales, que pueden proveer una

amplia gama de beneficios ecológicos, conservar la biodiversidad de flora y fauna, preservar y fortalecer la humedad y fertilidad del suelo, contribuir al control de pestes y plagas, pues las plantas sirven como agentes biológicos para la remediación en reducir los niveles de metales en el producto del Cacao (Howladar, 2014; George *et al.*, 2016)

En la presente investigación se busca identificar cómo los niveles de cadmio en suelos, grano y hojas de Cacao, en Pauna y Coper - Boyacá, varían según la diversidad de la vegetación arbórea, en la zona Occidente de Boyacá. Para lograr dicho objetivo, 1. se determinarán los contenidos de Cd en los suelos, hojas y fruto en 34 fincas en los municipios de Pauna y Coper en el occidente de Boyacá. 2. Se describirán los atributos de la vegetación acompañante en los cultivos cacaoteros en Pauna y Coper. Y 3. Se caracterizarán las estrategias del manejo del cultivo de cacao en las fincas de estudio de Pauna y Coper. Se espera que mayor diversidad de plantas arbóreas en el cultivo reduzca se correlacione negativamente con el contenido de Cd en los suelos, frutos y granos de Cacao en las fincas de estudio en Pauna y Cope

2. Área de Estudio

La provincia Occidental de Boyacá tiene una extensión de 2.056 Km² y está compuesta por los municipios de Briceño, Buenavista, Caldas, Chiquinquirá, Coper, La Victoria, Maripí, Muzo, Otanche, Pauna, Quípama, Saboyá, San Miguel de Sema, San Pablo de Borbur y Tununguá y la zona de manejo especial Puerto Boyacá. Esta región presenta alta pluviosidad y climas variados desde el cálido, templado, frío y de páramo (Alcaldía de Pauna, 2013). El municipio de Coper se localiza en 5°28'40" de latitud norte y -74°02'55" de longitud oeste, tiene una extensión de 202 Km². La población proyectada en el 2017 es de 3.568 habitantes, 766 habitantes en la cabecera y en el resto del municipio 2.802. Presenta en toda su extensión 5 grandes cuencas que corresponden al río Cantino, río Villamizar, río Palenque, quebrada las golondrinas y Puerto Parra (Alcaldía de Coper, 2013). La temperatura media en el municipio es de 21,7°C, máximos 23,9°C y mínimos de 20,6°C.

El municipio de Pauna se localiza en los 5°40' de latitud y -73°59' de longitud, su extensión es de 259 Km². La población proyectada en el 2017 es de 10.811 habitantes, 2.629 habitantes

en la cabecera y en el resto del municipio 8.182 habitantes (Municipio de Pauna, 2019). Morfológicamente el municipio se ubica en la región montañosa, correspondiente al ramal occidental de la región cordillerana de Boyacá y al costado oriental de la cuenca del Río Magdalena; topográficamente se encuentran elevaciones entre los 300 y los 3000 m.s.n.m., la proporción de terrenos planos es muy pequeña y predominan laderas desde moderadamente inclinadas hasta muy abruptas, moderadamente largas, de forma convexa. El relieve se caracteriza por montañas y colinas, algunas de forma alargada generalmente en la dirección del rumbo de los estratos, de cima aguda o redondeada, debido a la erosión de las crestas de anticlinales; predomina la morfología de montañas y colinas denudadas.

Las condiciones atmosféricas húmedas de algunos sectores son causadas por la presencia permanente de nubes; al contrario, la acción de los vientos locales hace que en algunas zonas las condiciones sean más secas (Villalobos-Gualteros and Ruiz-Martínez, 2019). En el municipio se presentan cuatro periodos: un periodo seco, menos seco, lluvioso y lluvia menor, el periodo seco inicia a mediados de diciembre hasta mediados de marzo, el menos seco a finales de junio y termina a principios de agosto; el tiempo lluvioso comienza a mediados de marzo y culmina en los finales de junio y la lluvia menor a mediados de agosto y termina a mitad de diciembre, se puede determinar que, los meses lluviosos son abril, mayo, octubre, los más secos enero y febrero (Vera Tapiero Oscar Geovanny, 2021)

Los atributos de la vegetación y tipos de ecosistemas que predominan en el occidente de Boyacá son El Bosque Andino, Bosque Húmedo Tropical y Bosques Enclaves Subxerofíticos)- El Bosque Húmedo Tropical se ubica a partir de los 1000 m hasta los 2800 - 3200 m de altitud. Sobresalen bromelias y musgos de los cuales dependen los nutrientes transportados por las corrientes de niebla que predominan los flancos orientales y occidentales de cordillera oriental, se mantiene una continua interacción con los páramos, que proveen importantes cantidades hídricas y de nutrientes, a través de sus suelos a diferentes especies de fauna y flora que componen el ecosistema (Etter, 1998).

La vegetación del occidente de Boyacá varía desde la franja bosque - páramo definida por (Argüello *et al.*, 2019), como una zona de transición, donde confluyen especies del bosque y la vegetación achaparrada de páramo, tal franja puede variar, debido a la alta heterogeneidad espacial de las cordilleras y los Andes en general, (Olaya-Angarita, Díaz-Pérez and Morales-

Puentes, 2019). Definen para esta franja cuatro formas o patrones espaciales (difuso, abrupto, isla o lengüetas y “krummholz” en alemán madera doblada) basados en mecanismos de tres niveles, primero: limitación en el crecimiento, pérdida de biomasa y mortalidad de plántulas, segundo: estrés: fotoinhibición, daño por congelamiento, vientos, otros y tercero: interacción con su vecino (Carlos Andres and Amaya Rodríguez, 2019).

En los últimos años la gobernación de Boyacá, la secretaria de fomento agropecuario y la Fundación Red agropecuaria (FUNREDAGRO), han desarrollado el proyecto “Fortalecimiento de procesos técnicos y socio-empresariales para consolidar la competitividad regional cacaotera y la innovación social en la Provincia de Occidente del departamento de Boyacá”. Que busca elevar los niveles de productividad y rentabilidad del cultivo de Cacao, con el fin de fortalecer la estructura social, tecnológica, económica y comercial de los productores y asociaciones de la región (Secretaria de Agricultura y Conservación de Boyacá, 2018; Carlos Andres and Amaya Rodríguez, 2019)

3. Métodos

3.1. Selección de las localidades de muestreo

Se seleccionaron 36 fincas cacaoteras para representar la variación en la cobertura arbórea de sombra y biodiversidad de especies arbóreas, con el fin de obtener un gradiente de biodiversidad que va de baja a alta diversidad de especies de árboles. Adicionalmente, las fincas fueron seleccionadas teniendo en cuenta el manejo del cultivo de cacao (bosque nativo, monocultivos, sistemas agroforestales). En cada una de las fincas se seleccionaron tres áreas de muestreo (borde, bosque y parcela).

3.2. Muestreo de suelo y vegetación

Para cada parcela se registró el número total de especies de árboles y el número individuos por especie. Se cuantificó la diversidad de árboles usando el índice de diversidad de Shannon y Simpson, como variable de diversidad de árboles. Adicionalmente se midió la densidad total de árboles, la altura del árbol, diámetro a la altura pecho (DAP).

En cada finca se selecciona un borde 10 m de largo x 2 metros de ancho, para el muestreo de la vegetación. Finalmente, en cada finca se selecciona una zona de bosque remanente y

se llevó a cabo el muestreo de la vegetación en un transecto de 10 x 2.

Para la colecta de las muestras de suelo se evaluó los contenidos de nitrógeno, fósforo, carbono orgánico, limo, arena y sobre todo el contenido de arcilla coloidal y de materia orgánica, que son esenciales en la dinámica de los metales pesados (Reddy, Perkins 1974). Cada muestra fue obtenida a una medida de 20 cm de una planta de Cacao por finca de estudio marcando un cuadrante de 20 a 20 cm. Para esta toma es importante saber que los horizontes superficiales de los suelos seleccionados presentaron diferencias texturales, de porosidad, y en el contenido de materia orgánica. Ello les confiere diferente potencial de adsorción y fijación de los aportes recibidos (Titova et al 1996). Los análisis químicos se llevaron a cabo en el Laboratorio de Aguas y Suelos de la Facultad de Ciencias Agrarias de la Universidad Nacional-Bogotá. El tipo de análisis llevado a cabo en suelo se resumen en el Anexo 1.

Las muestras de tejido vegetal se concentraron en hojas y fruto. Las muestras de fruto se tomaron seleccionando cuatro plantas al azar, dentro de cada finca. En cada planta se muestrearon de dos a tres hojas maduras, totalmente expandidas y expuestas al sol. Adicionalmente, de cada planta se seleccionaron dos frutos para el análisis de Cd en las semillas. El análisis químico para la determinación de Cd en material vegetal fue de Calcinación; digestión ácida con HCl/HNO₃ y la determinación se llevó a cabo por Absorción atómica-Llama.

3.3. Cálculos de índices de diversidad

Se reportan los valores de número de individuos, DAP y altura para cada finca.

Adicionalmente, se calcularon la densidad de tallos y el Índice de Valor de Importancia por especies (Cottam y Curtis, 1956). El índice de valor de importancia (IVI) se obtuvo a partir de la suma de la abundancia relativa, la frecuencia y la dominancia relativas de cada especie en cada zona de muestreo. La diversidad de especies en cada unidad de muestreo se calculó usando el índice de Shannon-Wiener (Magurran, 1988), índice de dominancia de Simpson (D_{si}). Para los cálculos de Cd, N, P, materia orgánica, limo y arena en cada finca se usó los resultados dados por el Laboratorio donde se llevaron las muestras

3.4 Entrevistas semiestructuradas

La entrevista semiestructurada se diseñó con cinco preguntas as: 1. edad de la plantación, 2. número de la producción cacao en el año, 3. número de plantas de Cacao en la finca, 4. uso de fertilizantes y 5. uso de plaguicidas. Estas preguntas buscan analizar el manejo dado en cada finca para poder relacionar los niveles de Cd con el uso de cada cultivo

3.4. Análisis Estadístico

Para determinar el efecto del compartimiento (hojas, semillas, suelo) en el contenido de Cd se llevó a cabo un Análisis de Varianza (ANOVA) de una vía. Las variables respuesta fueron riqueza y diversidad de especies.

4. Resultados

El análisis y desarrollo de los objetivos serán realizados a partir de la línea de investigación muestreo simple y encuesta, para iniciar se dará paso al desarrollo del objetivo 1 y 2 con la línea de investigación muestreo simple, en el cual el objetivo 1, se determina los impactos que genera el cadmio en los suelos, granos, hojas de cacao en el occidente de Boyacá, la tabla 1 realiza este análisis permitiendo visualizar la concentración de Cd en las fincas de estudio.

Tabla 1. Valores promedio del contenido de Cadmio en los diferentes compartimientos muestreados, en las fincas de estudio en Pauna y Coper. Los datos se reportan en unidades mg/kg

Finca (ID)	Cd en suelo mg/kg	Cd en grano de Cacao mg/kg	Cd en Hojas mg/kg
A1	0.095	1.815	3.61
A10	0.05	1.1	3.01
A12	1.445	0.34	1.87
A13	0.18	9.7	30.59
A14	0.17	0.675	4.305
A16	0.03	4.175	22.98
A18	0.32	0.89	2.63
A19	1.575	1.57	6.705

A20	0.225	5.495	13.75
A21	0.345	0.52	3.325
A22	0.55	2.06	3.335
A3	0.11	3.86	9.42
A4	0.03	0.41	2.56
A5	0.135	0.855	2.795
A7	0.03	0.845	2.59
A8	0.07	0.54	1.765
A9	0.13	1.32	2.035
B1	0.82	4.955	23.7
B10	1	4.165	11.27
B11	0.235	3.47	5.145
B12	0.21	1.215	3.4
B13	0.065	2.395	5.175
B14	0.68	4.3	12.25
B15	0.19	1.655	5.46
B16	0.82	8.36	26.05
B17	0.03	1.15	3.35
B18	0.495	1.885	6.91
B2	0.35	3.745	8.365
B4	0.485	0.56	2.34
B5	10.85	23.6	131
B6	4.425	6.305	53.6
B7	0.39	0.945	4.42
B8	0.075	1.015	2.68
B9	0.095	1.28	5.745

En esta tabla se puede observar los resultados obtenidos de las muestras de los suelos recolectados en Pauna y Coper, que arroja un promedio de 0.79 mg/kg, lo que indica un valor alto en los sustratos donde se cultivan las plantas de Cacao, el promedio para el grano de Cacao es de 3.15 mg/kg y el promedio de las hojas es de 12.34 mg/kg que sugiere una alta presencia del metal.

En Coper se encuentran seis fincas con valores de Cd en los suelos menores de 0.07 mg/kg; sin embargo, el grano y hojas tiene un valor elevado en este elemento. En Pauna se registraron tres fincas con valores de Cd inferior a 0.07 mg/kg, pero el resultado de Cd en granos y hojas se encuentran en altos niveles. Solo en 10 fincas de los dos municipios tienen contenidos de Cd en el grano de Cacao menores de 0.9 mg/kg. El rango de Cd en las hojas está entre 1.765 mg/kg y 12.59 mg/kg se evidencia, que el valor mínimo, está en el municipio de Coper y la

mayor concentración en Pauna. El mayor valor de Cd se registró en las hojas y la menor concentración del metal está en los suelos.

Tabla 2. Índice de valor de Importancia, realizado en las tres coberturas de estudio

Cobertura	Especie	IVI
Borde	<i>Citrus reticulata</i>	35.79
	<i>Mangifera indica</i>	28.86
	<i>Citrus x aurantium</i>	23.65
	<i>Psidium guajava</i>	15.78
	<i>Persea americana</i>	12.85
	<i>Tectona grandis</i>	9.42
	<i>Cordia alliodora</i>	9.19
	<i>Gmelina arborea</i>	8.82
Bosque	<i>Anacardium excelsum</i>	29.81
	<i>Cecropia sp.</i>	26.70
	<i>Cordia alliodora</i>	23.36
	<i>Jacaranda caucana</i>	19.56
	<i>Myrsine guianensis</i>	17.02
	<i>Cedrela montana Turcz</i>	15.80
	<i>Miconia sp.</i>	11.67
	<i>Zanthoxylum rhoifolium</i>	11.06
	<i>Croton Cupreatus</i>	10.90
	<i>Bactris gasipaes</i>	10.78
Cultivo	<i>Citrus reticulata</i>	29.72
	<i>Citrus x aurantium</i>	28.29
	<i>Jacaranda caucana</i>	23.25
	<i>Tectona grandis</i>	20.61
	<i>Cedrela sp.</i>	19.86
	<i>Cedrela montana Turcz</i>	18.26
	<i>Bactris gasipaes</i>	15.43

En la Tabla 2 se reportan las especies ecológicamente más importante que representan el dominio florístico en cada una de las coberturas. En la cobertura de borde y cultivo, las especies *Citrus reticulata* fue la especie de mayor IVI, y comparten la especie *Citrus x aurantium* y *Cedrela montana Turcz*. Los bajos valores de IVI en el bosque que están por debajo de 15 como ocurren con las especies del bosque (*Miconia sp*, *Zanthoxylum rhoifolium*, *Croton Cupreatus*, *Bactris gasipaes*) en el borde (*Persea americana*, *Cedrela montana Turcz*,

Tectona grandis, *Cordia alliodora*, *Gmelina arborea*) y en cultivo solo encontramos la especie, *Bactris gasipaes*. Lo cual quiere decir que hay un menor dominio florístico

Se registro un valor de diversidad de Shannon de 1.337 en el borde, 1.170 en el bosque y 1.187 borde en el cultivo. Los valores de Simpson para borde fueron de 0.676, bosque 0.608 y cultivo 0.594.

Continuando con el desarrollo de los objetivos, se da paso al análisis del objetivo 2, que permite analizar la vegetación acompañante en los cultivos cacaoteros en Pauna y Coper. En la figura 1 y 2 se correlacionan los valores del promedio de Cadmio en suelos, grano y hojas del Cacao relacionadas con el número de abundancia y la riqueza de especies presentes en los cultivos de las fincas de estudio. Donde se observa que ninguna tiene impactos de reducción sobre los niveles de Cd

Figura 1. Distribución de la abundancia de especies de árboles acompañantes, con el contenido de Cd en *el cultivo*

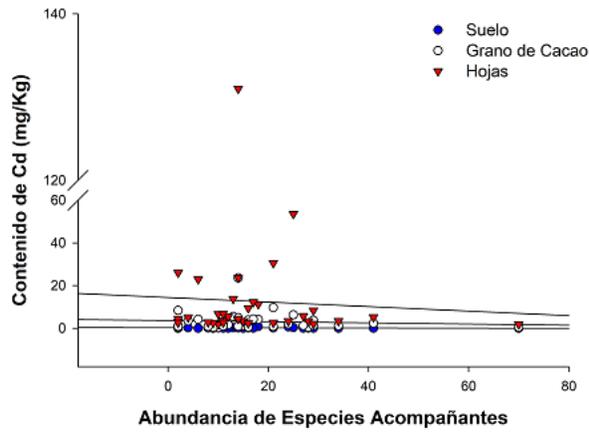


Figura 2. Distribución de la riqueza de especies de árboles con el contenido de Cd en el cultivo de cacao.

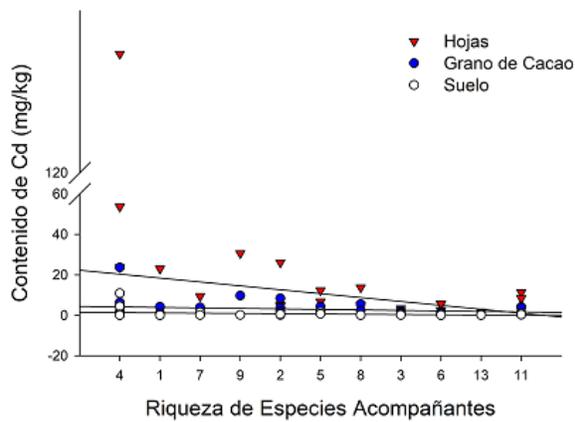


Figura 3 Contenido de Cd en Coper y Pauna con relación al contenido de Cadmio en suelo, grano y hoja

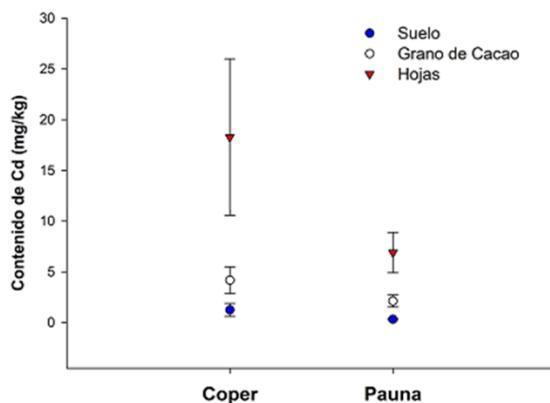


Tabla 3. Correlación entre riqueza y Cadmio

Coberturas	Correlación	P-Valor	Promedio Cd (mg/kg)
Suelo	-0.0613	0.7302	0.78
Grano	0.0249	0.0249	3.15
Hoja	-0.069	0.7302	12.59

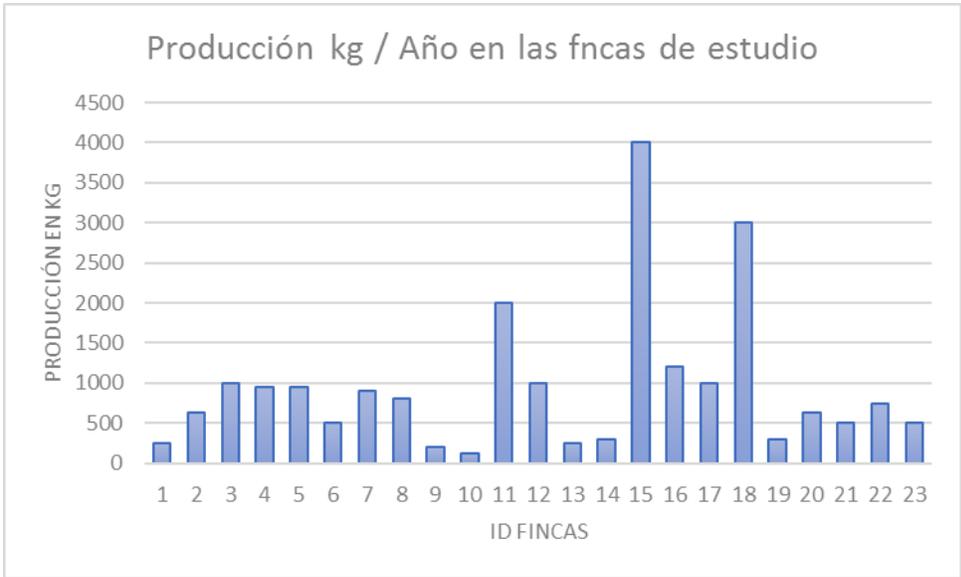
contenido de Cd y los valores promedios del p-valor y valores de correlación, que nos permite conocer la fuerza y dirección entre los valores de cada muestra, para nuestro estudio se evidencia un nivel negativo de las especies arbóreas con el Cd, lo que sugiere que los cultivos acompañantes no ejercen un valor significativo en la reducción del metal

Tabla 4. Resultados de la Anova. Factores de variación: Municipio y Compartimiento (hoja, fruto, suelo)

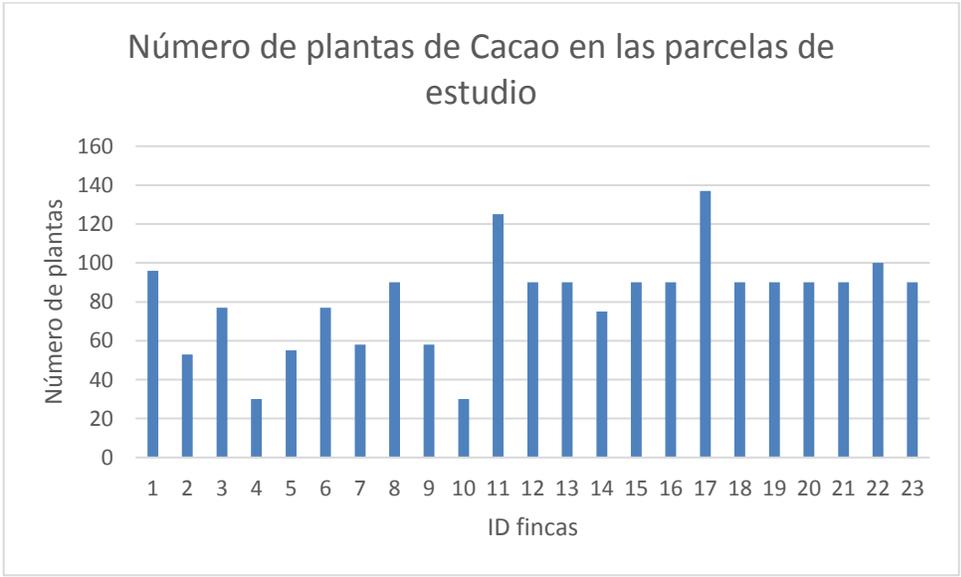
Fuente de Variación	F	Pr (>f)
Compartimiento	73.022	< 2e - 1e ***
Municipio	11.54	0.000993***
Compartimiento – Municipio	0.13	0.07042 e

Figura 2. Estrategias de manejo en los cultivos de Cacao, en las fincas de Pauna y Coper

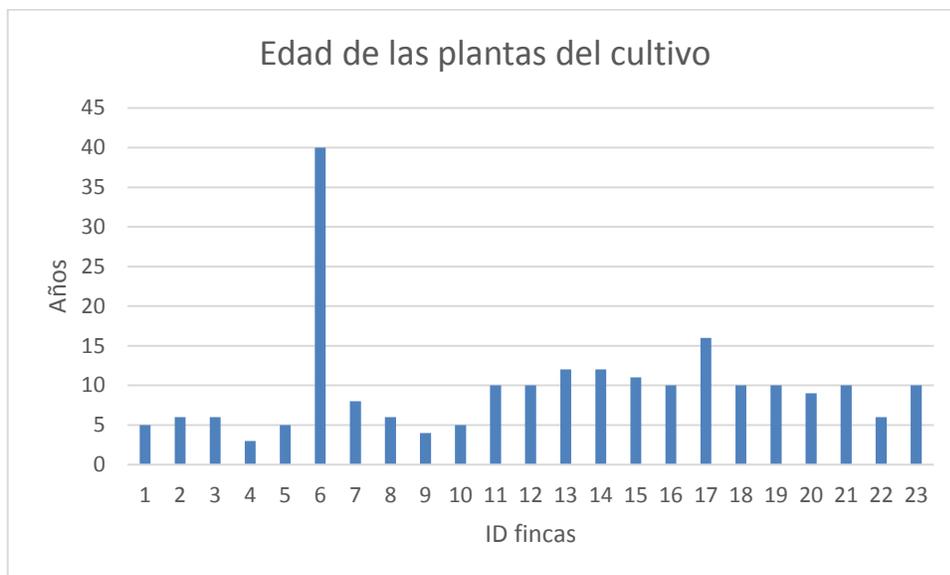
a.



b.



c.



Los resultados de la encuesta muestran que el promedio de la producción es de 997.4 kg/año, el número de plantas oscila entre los 250 a 2000 ind/ha de dependiendo del tamaño de la finca. Los propietarios registran cultivos muy jóvenes, que tienen plantación con individuos de 3 años y solo una plantación con edad de 40 años; por último, sobre el uso de fertilizantes y plaguicidas los 23 encuestados respondieron que hace uso de estos, pues son necesarios para la producción del cacao.

5. Discusión

El actual reglamento de la UE a cargo de la Autoridad Europea de Seguridad Alimentaria (EFSA) consideró necesario modificar nuevamente los niveles máximos, para ciertos contaminantes como el Cd, consignados en el Reglamento 1881/2006, incorporando nueva información y los avances del Codex Alimentarius (Unión Europea, 2011; Zug *et al.*, 2019). El Cd es catalogado como un elemento carcinógeno, efectos tóxicos, daños renales y cardio vasculares o incluso la muerte. Actualmente la UE ha implementado el reglamento No. 488/2014 estableciendo límites tolerantes entre 0.1 a 0.8 $\mu\text{g g}^{-1}$ a productos derivados del Cacao (UE,2014). Las investigaciones científicas han puesto en evidencia que los suelos generalmente tienen bajos niveles de Cd y su disponibilidad depende de las características físicas y morfológicas del suelo (Realpe, Pardo and Peinado, 2014; Gramlich *et al.*, 2017) Los resultados promedio de Cd en los suelos de las fincas de estudio para Pauna y Copere es de 0.78 mg/kg, lo cual indica un valor por encima de lo establecido por la UE, en el grano el

valor promedio 3.08 mg/kg, lo que indica un nivel alto de Cd. Estos valores indican que el Cacao de las fincas de estudio no contienen los niveles permitidos por la UE.

Los sistemas agroforestales a través de los años se han dado numerosas definiciones de agroforestería o sistemas agroforestales. El International Council for Research in Agroforestry (1983) la define como: “Sistema sostenido del manejo de la tierra que aumenta su rendimiento total, combina la producción de cultivos con especies forestales y/o animales, en forma simultánea o secuencial sobre la misma superficie de terreno, y aplica prácticas de manejo que son compatibles con las prácticas culturales de la población local”. A nivel de servicios cada especie de árbol se destaca por la adición de materia orgánica, el aumento del contenido de nitrógeno, su influencia sobre cantidad y distribución de lluvias y su aporte de nutrimentos, reducción de la pérdida de suelo y de nutrimentos, la absorción de nutrimentos en las capas profundas y su deposición en la superficie, la conservación de nutrimentos que podrían perderse por lavado de los suelos, la liberación (por medio del manejo) de nutrimentos en el momento requerido por los cultivos, la mejora de las propiedades físicas (retención de agua, drenaje, etc.), el aumento de la biomasa de las raíces, sustancias promotoras del crecimiento, asociaciones microbianas, la mejora de la calidad de la hojarasca, a través de la diversidad de especies, la creación de un microclima favorable y la moderación (Iglesias JM, 2011)

Al conocer la problemática que presentan los sistemas cacaoteros con los altos niveles de Cadmio en Colombia, en este caso en el Occidente de Boyacá contrasta con los resultados esperados. En la zona de estudio a mayor número de plantas asociadas con el cultivo los niveles de Cd no disminuyeron y se demuestra que tienen alto nivel de Cd en el grano y hoja. El valor de índice de diversidad para borde fue el más alto mientras que los valores para bosque fueron menores

Para la disminución del Cd, en Brasil se diseñó un sistema de rehabilitación que incluía la plantación de *Camaldulensis* en surcos y *Brachiaria decumbens* entre los surcos intermedios, acompañando la siembra de micorrizas arbusculares del tipo *Glomus sp.* Que han usado en otros tipos de programas de rehabilitación en zonas contaminadas por metales pesados (Liu *et al.*, 2017). Este trabajo concluye que el conocimiento de las especies empleadas para la biorremediación ha contribuido a la revegetación y establecimiento de nuevos materiales

vegetales en áreas muy contaminadas. Por otra parte, se encontró en un estudio la incorporación al suelo de micorrizas arbusculares *Glomus mosseae*, *Glomus intraradices*, *Glomus etunicatum* para minimización de Cd en el suelo. El género *Bassia* indica que puede ser utilizada en mezcla con estos hongos para disminuir la dispersión del Cadmio en los suelos y plantas de Cacao (Hashem *et al.*, 2019)

En esta investigación se logra determinar que los cultivadores de Cacao, manejan un alto flujo que fomentan el aumento de metales pesados, lo que repercute en los altos niveles de Cd en los cultivos del Cacao, acertando en la hipótesis de a mayor uso de fertilizantes y plaguicidas, mayores incrementos de este metal en el suelo.

Entre los metales pesados el Cd es de los que más genera riesgos ambientales por su movilidad en los suelos y su facilidad con que es absorbido por las plantas. Algunas fuentes de contaminación con Cd se deben a suelos de cultivos, incremento de la actividad industrial, el uso de fertilizantes fosfatados siendo la principal fuente de contaminación de suelos agrícolas y otra fuente procede de las aguas residuales usadas para el riego de las plantaciones. Por esta razón se propone medidas de manejo natural y manual para evitar el uso de fertilizantes y plaguicidas, ya que en 23 fincas de la zona de estudio se comprobó el uso desmedido de estos químicos. (Solis, 2016) propone recoger frutos con síntomas iniciales, antes de la esporulación del hongo, se deben recolectar en fundas plásticas para evitar la desaminación de las esporas, llevarlos fuera de la plantación y espolvorearlos con cal, adicionalmente se debe hacer control de malezas, se recomienda 6 por año, realizar poda de ramas laterales e internas, para favorecer el paso de la luz, por último evitar encharcamientos que permitan la formación de microclimas, los cuales favorecen la enfermedad.

• 6. Conclusiones

Se deben realizar estrategias para el manejo de los cultivos, que eviten el uso excesivo de fertilizantes y plaguicidas, ya que estas pueden ser una de las razones que está incrementando el contenido de Cadmio en los frutos

Los sistemas agroforestales necesitan más apoyo técnico, tecnológico y microbiológico,

debido que si se trabaja conjuntamente se puede generar biorremediación en los cultivos de Cacao, favoreciendo a mejorar los niveles de Cd. Los resultados revelan los valores de Cadmio en el grano de Cacao presentan niveles medios y altos lo cual afecta la salud humana, del suelo y de la planta de Cacao, esto causa que el producto final de la planta no cumpla lo requerido por la Unión Europea

Realizar un estudio sobre la vegetación acompañante que contribuya a la reducción del Cd en los cultivos de Cacao, así como que genere beneficios económicos, sociales y ambientales

7. Recomendaciones

Realizar cambio en los cultivos acompañantes que actualmente se manejan en Pauna y Coper, ya que no contribuyen a la reducción del Cd

Generar estrategias de aprendizaje y acompañamiento para los agricultores en cuanto al manejo de fertilizantes y plaguicidas

Socializar con los agricultores y habitantes de la zona los impactos negativos del Cd en los cultivos de Cacao, con respecto a la salud humana

Literatura Citada

- Alcaldía de Coper (2013) *Análisis Situacional del Municipio de Coper*. Available at: https://www.boyaca.gov.co/secretariasalud/wp-content/uploads/sites/67/2014/05/images_Documentos_ASIS_2013_ASIS-COPER-2013.pdf.
- Alcaldía de Pauna (2013) *Análisis situacional de salud del Municipio de Pauna - Boyacá*. Pauna. Available at: https://www.boyaca.gov.co/secretariasalud/wp-content/uploads/sites/67/2014/05/images_Documentos_ASIS_2013_ASIS-PAUNA-2013.pdf.
- Alloway, B. J. and Steinnes, E. (1999) 'Anthropogenic Additions of Cadmium to Soils', *Cadmium in Soils and Plants*, pp. 97–123. doi: 10.1007/978-94-011-4473-5_5.
- Argüello, D. *et al.* (2019) 'Science of the Total Environment Soil properties and agronomic factors affecting cadmium concentrations in cacao beans : A nationwide survey in Ecuador',

Science of the Total Environment. Elsevier B.V., 649, pp. 120–127. doi: 10.1016/j.scitotenv.2018.08.292.

Carlos Andres, N. A. R. and Amaya Rodríguez (2019) ‘Boyacá Bio’, *Gobernación de Boyacá*, pp. 1–263. Available at: http://www.dapboyaca.gov.co/descargas/boyaca_bio/Dosier_Boyaca_BIO_2018.pdf.

Chaney, R. L. (2018) *Food Safety Issues for Mineral and Organic Fertilizers Food Safety Issues for Mineral and Organic Fertilizers*. doi: 10.1016/B978-0-12-394278-4.00002-7.

Chavez, E. *et al.* (2015) ‘Concentration of cadmium in cacao beans and its relationship with soil cadmium in southern Ecuador’, *Science of the Total Environment*, 533, pp. 205–214. doi: 10.1016/j.scitotenv.2015.06.106.

Elsa Leuvany Alvarez, X. M. G. (2021) ‘ANÁLISIS DE LOS EFECTOS QUE PRODUCE LA PRESENCIA DEL CADMIO EN EL CULTIVO DE CACAO (theobroma cacao).pdf’. Quevedo, p. 14. doi: 10.21897/23460466.2723.

Etter, A. (1998) ‘Ecosistemas de Bosque Húmedo Tropical’, *Informe Nacional sobre el Estado de la Biodiversidad Colombia*, (October 1998), pp. 106–133.

Federación Nacional de cacaoteros (2018) *Estimaciones para el año cacaotero 2018 - 2019*. Available at: <https://fedecacao.co/porta1/index.php/es/2015-02-12-17-20-59/internacionales>.

Fergusson, J. E. (1991) ‘The Heavy Elements: Chemistry, Environmental Impact, and Health Effects’, in *Journal of Environmental Quality*. New York, p. 876. doi: 10.2134/jeq1991.00472425002000040028x.

George, K. S. *et al.* (2016) ‘A Study on the Potential of Moringa Leaf and Bark Extract in Bioremediation of Heavy Metals from Water Collected from Various Lakes in Bangalore’, *Procedia Environmental Sciences*. Elsevier B.V., 35, pp. 869–880. doi: 10.1016/j.proenv.2016.07.104.

Gramlich, A. *et al.* (2017) ‘Cadmium uptake by cocoa trees in agroforestry and monoculture systems under conventional and organic management’, *Science of the Total Environment*. Elsevier B.V., 580, pp. 677–686. doi: 10.1016/j.scitotenv.2016.12.014.

Gramlich, A. *et al.* (2018) ‘Science of the Total Environment Soil cadmium uptake by cocoa in Honduras’, *Science of the Total Environment*. Elsevier B.V., 612, pp. 370–378. doi: 10.1016/j.scitotenv.2017.08.145.

Hashem, A. *et al.* (2019) ‘Role of calcium in AMF-mediated alleviation of the adverse

impacts of cadmium stress in *Bassia indica* [Wight] A.J. Scott', *Saudi Journal of Biological Sciences*, pp. 828–838. doi: 10.1016/j.sjbs.2016.11.003.

Howladar, S. M. (2014) 'A novel *Moringa oleifera* leaf extract can mitigate the stress effects of salinity and cadmium in bean (*Phaseolus vulgaris* L.) plants', *Ecotoxicology and Environmental Safety*. Elsevier, 100(1), pp. 69–75. doi: 10.1016/j.ecoenv.2013.11.022.

Iglesias JM (2011) 'Sistemas de producción agroforestales. Capacitación y análisis en: "conceptos generales y definiciones"', *Rev Sist Prod Agroecol*, pp. 151–176.

Joya-barrero, V. and Pearse, J. (2021) 'Natural and Anthropogenic Sources of Cadmium in Cacao Crop Soils in Santander, Colombia', pp. 0–23.

Liu, M. *et al.* (2017) 'Nitrogen fertilizer enhances growth and nutrient uptake of *Medicago sativa* inoculated with *Glomus tortuosum* grown in Cd-contaminated acidic soil', *Chemosphere*. Elsevier Ltd, 167, pp. 204–211. doi: 10.1016/j.chemosphere.2016.09.145.

Martínez, D. and Charrupi, N. (2017) 'Estudio ambiental del cadmio y su relación con suelos destinados al cultivo de cacao en los departamentos de Arauca y Nariño', *Universidad de La Salle - Ciencia UNISALLE*, p. 131. Available at: https://ciencia.lasalle.edu.co/cgi/viewcontent.cgi?article=1717&context=ing_ambiental_sanitaria.

Municipio de Pauna (2019) *Análisis de situación de salud con el modelo de los determinantes sociales de salud, municipio de Pauna Boyacá 2019*. Available at: https://www.boyaca.gov.co/SecSalud/images/Documentos/asis2019/asis_pauna_2019.pdf.

Olaya-Angarita, J. A., Díaz-Pérez, C. N. and Morales-Puentes, M. E. (2019) 'Composition and structure of the forest-páramo transition in the guantiva-la rusia corridor (Colombia)', *Revista de Biología Tropical*, 67(4), pp. 755–768. doi: 10.15517/rbt.v67i4.31965.

Olaya, D. M. S., Velandia Tibáquira, O. G. and Suárez Salazar, J. C. (2015) 'Contribución de sistemas productivos en la generación de ingresos en familias cacaoteras, departamento del Caquetá', *Revista de Ciencias Agrícolas*, 32(1), p. 37. doi: 10.22267/rcia.153201.23.

Realpe, I. D. S. B., Pardo, C. A. A. and Peinado, F. J. M. (2014) 'Efecto de la calidad de la materia orgánica asociada con el uso y manejo de suelos en la retención de cadmio en sistemas altoandinos de Colombia', *Acta Agronomica*, 63(2). doi: 10.15446/acag.v63n2.39569.

Secretaria de Agricultura y Conservación de Boyacá (2018) 'EL OCCIDENTE AVANZA EN EL CULTIVO DE CACAO'. Tunja. Available at:

<https://www.boyaca.gov.co/secretariaagricultura/el-occidente-avanza-en-el-cultivo-de-cacao/>.

Solis, M. O. P. (2016) *EL MANEJO FITOSANITARIO DEL CULTIVO DE CACAO NACIONAL (Theobroma cacao L.) Y EL RENDIMIENTO DEL MISMO, EN LA ASOCIACIÓN KALLARI*. Universidad Técnica de Ambato. Available at: <http://repositorio.uta.edu.ec/jspui/bitstream/123456789/22069/1/tesis-051> Maestría en Agroecología y Ambiente - CD 375.pdf.

Stella, C. and Tobón, J. (2015) ‘Estado legal mundial del cadmio en cacao (Theobroma cacao): fantasía o realidad *’, 10(1), pp. 89–104.

Titova NA, Travnikova LS, Kakhovich ZN, Sorokin SE, Schulz E, Korschens M. 1996. Heavy metal content in various particle-size and density fractions of soils. *Eurasian Soil Science*. 29:7, 820-830; traducido de *Pochvovedenie* (1996). 7: 888-898.

Unión Europea (2011) ‘Statement on tolerable weekly intake for cadmium’, *EFSA Journal*, 9(2), pp. 10–14. doi: 10.2903/j.efsa.2011.1975.

Vera Tapiero Oscar Geovanny, H. S. D. (2021) *Aplicación del modelo de regresión logístico binario para la identificación de pérdida de cobertura bosque en el municipio de Pauna, Boyacá*. Universidad Distrital; Francisco Jose de Caldas; Facultad del Medio Ambiente y Recursos Naturales.

Villalobos-Gualteros, J. and Ruiz-Martínez, L. (2019) ‘Estrategias para la gestión integrada y sostenible del recurso hídrico en el municipio de Pauna (Boyacá)’, *Ingeniería Solidaria*, 15(27), pp. 1–29. doi: 10.16925/2357-6014.2019.01.03.

Zug, K. L. M. *et al.* (2019) ‘Cadmium Accumulation in Peruvian Cacao (Theobroma cacao L.) and Opportunities for Mitigation’, *Water, Air, and Soil Pollution*. *Water, Air, & Soil Pollution*, 230(3). doi: 10.1007/s11270-019-4109-x.

Anexo 1. Técnicas para el análisis de suelos llevados a cabo en el Laboratorio de Aguas y Suelos de la Facultad de Ciencias Agrarias. Universidad Nacional de Colombia-Bogotá.

MÉTODOS			
Nombre Variable	Método	Determinación	Unidades
CO: Carbono orgánico	Walkley-Black	Colorimetría	%
Nest: N estimado	Estimado a partir del CO (factor empleado 0,0862)	-	%
N: Nitrógeno orgánico	Digestión Kjeldahl	Volumetría	%
P: Fósforo disponible	Bray II	Colorimetría	mg/kg
Cdd: Cadmio disponible	Extracción con DTPA	Absorción atómica - Llama	mg/kg
Arcilla (Ar), limo (L), arena (A)	Bouyoucos, dispersión con Hexametáfosfato de sodio	Densimetría	%
Text.: Textura	Triángulo de clasificación textural USDA	-	-

