UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA

FACULTAD DE AGRONOMÍA

ESCUELA PROFESIONAL DE AGRONOMÍA

DETERMINACIÓN DEL CADMIO (Cd^{++}) EN ALMENDRAS DE TRES CULTIVARES DE *Theobroma cacao* L. (CACAO) EN EL PROCESO DE POSCOSECHA EN EL DISTRITO DANIEL ALOMÍA ROBLES - HUÁNUCO – PERÚ

Tesis

Para optar el título de:
INGENIERO AGRÓNOMO

PRESENTADO POR:
WALTER LUIS BRAVO ARISTA

Asesor:
HUGO ALFREDO HUAMANI YUPANQUI

Tingo María – Perú

2020

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA
Tingo María
FACULTAD DE AGRONOMÍA

"Año de la Universalización de la Salud"

ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS Nº 004-2020-FA-UNAS

BACHILLER : **WALTER LUIS BRAVO ARISTA**

TÍTULO : **DETERMINACIÓN DEL CADMIO (Cd^{+}) EN ALMENDRAS DE TRES CULTIVARES DE CACAO (*Theobroma cacao* L.) EN EL PROCESO DE POSCOSECHA EN EL DISTRITO DANIEL ALOMIA ROBLES.**

JURADO CALIFICADOR

PRESIDENTE : Dr. JOSE W. ZAVALA SOLORZANO
VOCAL : Ing. JORGE CERON CHAVEZ
VOCAL : M.Sc. JORGE L. ADRIAZOLA DEL AGUILA

ASESOR : Dr. HUGO A. HUAMANI YUPANQUI

FECHA DE SUSTENTACIÓN : 16 de enero del 2020
HORA DE SUSTENTACIÓN : 9:00 a.m.
LUGAR DE SUSTENTACIÓN : SALA DE AUDIOVISUALES DE LA FACULTAD DE AGRONOMÍA
CALIFICATIVO : MUY BUENO
RESULTADO : APROBADO
OBSERVACIONES A LA TESIS: EN HOJA ADJUNTA

TINGO MARÍA, 16 de enero del 2020.

Dr. JOSE W. ZAVALA SOLORZANO
PRESIDENTE

M.Sc. JORGE L. ADRIAZOLA DEL AGUILA
VOCAL

Ing. LUIS G. MANSILLA MINAYA
VOCAL

Dr. HUGO A. HUAMANI YUPANQUI
ASESOR

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA
DIRECCIÓN DE GESTIÓN DE INVESTIGACIÓN - DGI
REPOSITORIO INSTITUCIONAL - UNAS
Correo: repositorio@unas.edu.pe

"Año de la unidad, la paz y el desarrollo"

CERTIFICADO DE SIMILITUD T.I. N° 319 - 2023 - CS-RIDUNAS

El Director de la Dirección de Gestión de Investigación de la Universidad Nacional Agraria de la Selva, quien suscribe,

CERTIFICA QUE:

El Trabajo de Investigación; aprobó el proceso de revisión a través del software TURNITIN, evidenciándose en el informe de originalidad un índice de similitud no mayor del 25% (Art. 3° - Resolución N° 466-2019-CU-R-UNAS).

Programa de Estudio:

Agronomía

Tipo de documento:

Tesis	X	Trabajo de investigación	

TÍTULO	AUTOR	PORCENTAJE DE SIMILITUD
DETERMINACIÓN DEL CADMIO (Cd++) EN ALMENDRAS DE TRES CULTIVARES DE Theobroma cacao L. (CACAO) EN EL PROCESO DE POSCOSECHA EN EL DISTRITO DANIEL ALOMÍA ROBLES - HUÁNUCO – PERÚ	WALTER LUIS BRAVO ARISTA	19 % Diecinueve

Tingo María, 27 de noviembre de 2023

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA
DIRECCIÓN DE GESTIÓN DE LA INVESTIGACIÓN
Dr. Tomas Menacho Mallqui
DIRECTOR

C.C. Archivo

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA

FACULTAD DE AGRONOMÍA

ESCUELA PROFESIONAL DE AGRONOMÍA

DETERMINACIÓN DEL CADMIO (Cd^{++}) EN ALMENDRAS DE TRES CULTIVARES DE *Theobroma cacao* L. (CACAO) EN EL PROCESO DE POSCOSECHA EN EL DISTRITO DANIEL ALOMÍA ROBLES - HUÁNUCO - PERÚ

Autor	:	Walter Luis BRAVO ARISTA
Asesor	:	Dr. Hugo Alfredo HUAMANI YUPANQUI

Programa de Investigación	:	Cultivos Tropicales
Línea (s) de investigación	:	Reducción de metales pesados en tejidos vegetales.
Eje temático	:	Contenido de cadmio en las almendras de cacao.
Lugar de Ejecución	:	- Fundo San Luis, ubicado en el sector Mercedes, distrito Daniel Alomía Robles "Pumahuasi", provincia Leoncio Prado, región Huánuco. - Laboratorio de Suelos, Agua y Ecotoxicología de la Universidad Nacional Agraria de la Selva.
Duración del trabajo	:	3 meses
Financiamiento	:	S/ 5 565,67

Tingo María – Perú, 2023

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA

FACULTAD DE AGRONOMÍA

ESCUELA PROFESIONAL DE AGRONOMÍA

REGISTRO DE TESIS PARA LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO UNIVERSITARIO

I. DATOS GENERALES DE PREGRADO

Universidad	:	Universidad Nacional Agraria de la Selva
Facultad	:	Agronomía
Título de la tesis	:	Determinación del cadmio (Cd^{++}) en almendras de tres cultivares de *Theobroma cacao* L. (cacao) en el proceso de poscosecha en el distrito Daniel Alomía Robles - Huánuco – Perú.
Autor	:	Walter Luis BRAVO ARISTA
Asesor de tesis	:	Dr. Hugo Alfredo HUAMANI YUPANQUI
Escuela profesional	:	Agronomía
Programa de Investigación	:	Cultivos tropicales
Línea (s) de investigación	:	Reducción de metales pesados en tejidos vegetales.
Eje temático de investigación	:	Contenido de cadmio en las almendras de cacao.
Lugar de Ejecución	:	- Fundo San Luis, ubicado en el sector Mercedes, distrito Daniel Alomía Robles "Pumahuasi", provincia Leoncio Prado, región Huánuco. - Laboratorio de Suelos, Agua y Ecotoxicología de la Universidad Nacional Agraria de la Selva.
Duración	:	3 meses
Fecha de Inicio	:	1 de octubre del 2016
Término	:	30 de diciembre del 2016
Financiamiento	:	S/ 5 565,67
FEDU	:	No
Propio	:	Si
Otros	:	No

DEDICATORIA

A nuestro divino creador, quién me guío en todos
los momentos de mi vida.

A mi abuela, Luisa Carhuaricra Santamaría; a mis padres y hermanos, por formar parte de mi desarrollo personal y profesional.

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Nacional Agraria de la Selva y a toda la plana de docentes que la conforman, por el apoyo y confianza; sin embargo, un agradecimiento especial a los docentes de la Facultad de Agronomía que contribuyeron en mi formación profesional.

A los miembros de jurado de tesis: presidente Dr. José Wifredo Zavala Solórzano y a los vocales Ing. Luis Germán Mansilla Minaya y al Ing. M. Sc. Jorge Luis Adriazola Del Águila, por el apoyo y contribución en el informe de investigación final.

A mi asesor Dr. Hugo Alfredo Huamaní Yupanqui, por su orientación en el proyecto y asesoramiento científico de la presente investigación.

Al señor Charles De Weck Pendavis, por la confianza de poder desarrollarme como profesional en el Centro de Estudios y Promoción del Desarrollo (DESCO).

Al Ing. Mario Adán López Rafael, por brindarme la oportunidad y asesorar en mi carrera profesional.

A mis amigos y compañeros de trabajo.

ÍNDICE GENERAL

Página

I. INTRODUCCIÓN 1
1.1. Objetivo general 2
1.2. Objetivos específicos 2
II. REVISIÓN DE LITERATURA 3
2.1. El cultivo de cacao 3
2.1.1. Características de los cultivares de cacao en estudio 3
2.1.2. Beneficio del cacao 5
2.1.3. Fruto y grano del cacao 7
2.2. El cadmio 8
2.2.1. Ingreso, transporte y acumulación de cadmio 9
2.2.2. Estrategias de la planta para reducir el transporte del cadmio 9
2.3. Contaminación del cacao con cadmio 10
2.3.1. El cadmio un problema en el cultivo de cacao 10
2.3.2. El cadmio en el suelo agrícola 11
2.3.3. Absorción del cadmio por las plantas de cacao 12
2.4. Trabajos relacionados con nuestra investigación 14
III. MATERIALES Y MÉTODOS 17
3.1. Lugar de ejecución 17
3.1.1. Ubicación de la parcela de muestreo 17
3.1.2. Ubicación del laboratorio 17
3.1.3. Características climáticas y zona de vida 17
3.2. Materiales y métodos 18
3.2.1. Diseño estadístico 18
3.2.1.1. Grano fresco y fermentado 18
3.2.1.2. Grano seco 20
3.2.2. Metodología 22
3.2.2.1. Muestreo y análisis de suelos 22
3.2.2.2. Recolección de los granos de cacao 24
3.2.2.3. Análisis de cadmio de la testa y cotiledón del grano de cacao 25
3.2.3. Características para evaluar 25
3.2.3.1. Del grano fresco 25

3.2.3.2. Del grano fermentado 25
3.2.3.3. Del grano seco 25
IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN 26
4.1. Cadmio en el grano fresco de cacao 26
4.1.1. Efectos principales 26
4.1.2. Efectos simples 28
4.1.3. Tratamientos en estudio 30
4.2. Cadmio en el grano fermentado de cacao 31
4.2.1. Efectos principales 31
4.2.2. Efectos simples 36
4.2.3. Tratamientos en estudio 38
4.3. Cadmio en el grano seco de cacao 39
4.3.1. Efectos principales 40
4.3.2. Efectos simples 45
4.3.3. Tratamientos en estudio 51
V. CONCLUSIONES 54
VI. PROPUESTAS A FUTURO 55
VII. REFERENCIAS 56
ANEXO 64

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla Página

1. Características de las parcelas en investigación 17
2. Descripción de los tratamientos..... 18
3. Modelo del análisis de variancia 19
4. Descripción de los tratamientos..... 20
5. Modelo del análisis de variancia 22
6. Análisis físico y químico del suelo de las parcelas de tres cultivares de cacao 23
7. Análisis de variancia para el cadmio en el grano fresco..... 26
8. Prueba de Duncan (α = 0,05) para el contenido de cadmio en el grano del factor partes del grano de cacao (A) 27
9. Prueba de Duncan (α = 0,05) para el contenido de cadmio en el grano del factor clones de cacao (B)..... 27
10. Análisis de variancia de los efectos simples para el contenido de cadmio en el grano fresco 28
11. Prueba de Duncan (α = 0,05) para el contenido de cadmio del factor partes del grano en interacción con CCN-51, ICS-95 y Mezcla de Híbridos 28
12. Prueba de Duncan (α = 0,05) para el contenido de cadmio del factor cultivares de cacao en interacción con el cotiledón y testa del grano..... 30
13. Prueba de Duncan (α = 0,05) para el contenido de cadmio en el grano de los tratamientos en estudio 30
14. Análisis de variancia para el cadmio en el grano fermentado 31
15. Prueba de Duncan (α = 0,05) para el contenido de cadmio en el grano del factor partes del grano de cacao (A) 32
16. Prueba de Duncan (α = 0,05) para el contenido de cadmio en el grano del factor clones de cacao (B)..... 34
17. Análisis de variancia de los efectos simples para el contenido de cadmio en el grano fermentado..... 36
18. Prueba de Duncan (α = 0,05) para el contenido de cadmio del factor partes del grano en interacción con CCN-51, ICS-95 y Híbridos..... 37
19. Prueba de Duncan (α = 0,05) para el contenido de cadmio del factor cultivares de cacao en interacción con el cotiledón y testa del grano..... 38

20. Prueba de Duncan (α = 0,05) para el contenido de cadmio en el grano de los tratamientos en estudio 39
21. Análisis de variancia para el cadmio en el grano fermentado 39
22. Prueba de Duncan (α = 0,05) para el contenido de cadmio en el grano del factor partes del grano de cacao (A) 40
23. Prueba de Duncan (α = 0,05) para el contenido de cadmio en el grano del factor clones de cacao (B)..... 42
24. Prueba de Duncan (α = 0,05) para el contenido de cadmio en el grano del factor tipos de secado (C) 45
25. Análisis de variancia de los efectos simples para el contenido de cadmio en el grano seco 46
26. Prueba de Duncan (α = 0,05) para el contenido de cadmio del factor partes del grano de cacao (A) en interacción con los cultivares de cacao (B) y modos de secado (C) ... 47
27. Prueba de Duncan (α = 0,05) para el contenido de cadmio del factor cultivares de cacao (B) en interacción con los modos de secado (C) y con las partes del grano de cacao (A)..... 48
28. Prueba de Duncan (α = 0,05) para el contenido de cadmio en el grano de cacao del factor modos de secado (C) en interacción con los cultivares de cacao (B) y partes del grano de cacao (A)..... 49
29. Prueba de Duncan (α = 0,05) para el contenido de cadmio en el grano de los tratamientos en estudio 53
30. Contenido de cadmio en los granos frescos 65
31. Contenido de cadmio en los granos fermentados 65
32. Contenido de cadmio en los granos secados 66

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura Página

1. Partes de la semilla del cacao 8
2. Contenido de cadmio del factor partes del grano en interacción con los cultivares CCN-51 e ICS-95 y mezcla de híbridos 29
3. Contenidos de cadmio en las partes del grano: a. En grano fresco y fermentado., b. Porcentaje de reducción del cadmio 32
4. Contenidos de cadmio en los cultivares de cacao: a. En grano fresco y fermentado., b. Porcentaje de reducción del cadmio 35
5. Contenido de cadmio del factor partes del grano en interacción con los cultivares CCN-51 e ICS-95 y mezcla de híbridos 37
6. Contenidos de cadmio en las partes del grano: a. En grano fresco, fermentado y secado., b. Porcentaje de reducción del cadmio en la fermentación y porcentaje de incremento de cadmio en el secado 41
7. Contenidos de cadmio en los cultivares de cacao: a. En grano fresco, fermentado y secado., b. Porcentaje de reducción del cadmio en la fermentación y porcentaje de incremento de cadmio en el secado 43
8. Contenidos de cadmio en el grano de cacao, interacción de: a. Las partes del grano con los cultivares de cacao y modos de secado, b. Los cultivares de cacao con las partes del grano y modos de secado, y c. Los modos de secado con las partes del grano y cultivares de cacao 50
9. Granos de CCN-51 secados en concreto 67
10. Granos de ICS-95 secados en concreto 67
11. Granos de CCN-51 secados en parihuela de madera 68
12. Granos de híbridos secados en parihuela de madera 68
13. Testas de los granos de cacao 69
14. Cotiledones de los granos de cacao 69
15. Granos secos del CCN-51, ICS-95 (aromático) e híbridos (criollo) 70
16. Análisis de cadmio en el laboratorio de suelos 70
17. Análisis de suelos de las parcelas de los cultivares CCN-51, ICS-95 y mezcla de híbridos 71
18. Análisis de cadmio de los granos frescos 71

19. Análisis de cadmio de los granos fermentados 72

RESUMEN

En el mes de abril del 2017, se realizó la cosecha de los granos de cacao de los cultivares CCN-51, ICS-95 y mezcla de híbridos, del Fundo San Luis del señor Luis Bravo, ubicado en el sector Mercedes, distrito Daniel Alomía Robles "Pumahuasi", con la finalidad de determinar la concentración del cadmio en la testa y cotiledón del grano fresco, fermentado y, secado en concreto, asfalto y parihuelas de madera de esos tres cultivares. Los resultados, demostraron que las testas y cotiledones de los tres cultivares en el campo acumularon de 0,33 a 0,64 ppm de cadmio; donde las testa y el cotiledón del ICS-95 estadísticamente acumularon más cadmio en comparación a los demás cultivares con 0,64 y 0,51 ppm respectivamente; pero estadísticamente acumularon menos cadmio que las testas y cotiledones en comparación a los demás cultivares en estudio cuando fueron fermentados y secados. Es decir, el cultivar ICS-95 fue más susceptible al cadmio en el campo y más tolerante, en la fermentación y secado; pero, los granos de cacao de la mezcla de híbridos demostraron ser más susceptibles al cadmio cuando fueron fermentados y secados, porque acumularon más cadmio en comparación al ICS-95 y mezcla de híbridos. Asimismo, se demostró que, en la fermentación, se reduce el contenido de cadmio en los granos de 0,10 a 0,37 ppm y se incrementa cuando los granos son secados de 0,21 a 1,02 ppm; sin embargo, estadísticamente los granos se contaminan más cuando son secados en concreto y asfalto, que en parihuelas de madera. Y, por último, se demostró estadísticamente que la testa acumula más cadmio que el cotiledón del grano de cacao, tanto como grano fresco, fermentado y seco.

Palabras clave: Almendra, Cadmio, CCN-51, ICS-95, Híbridos, *Theobroma cacao*.

Abstract

During the month of April, 2017, the harvesting of CCN-51, ICS-95, and a mix of the hybrid varieties of cacao was done on the San Luis farm, [owned by] Mr. Luis Roger Bravo Carhuaricra, [and] located in the Mercedes sector of the Daniel Alomia Robels "Pumahuasi" district, [in Peru]. The purpose was to determine the concentration of the cadmium in the testa and the cotyledon of the fresh and fermented beans, as well as when dried on concrete, asphalt, and wooden pallets for the three varieties. The results demonstrated that the testas and the cotyledons for the three varieties in the field accumulated 0,33 to 0,64 ppm of cadmium, where the testa and the cotyledon of the ICS-95 accumulated the most cadmium statistically, in comparison to the rest of the crops, which had 0,64 and 0,51 ppm, respectively; however, it accumulated less cadmium in the testa and cotyledon when compared to the rest of the varieties in study for the fermented and dried [beans]. This is to say that the ICS-95 variety was more susceptible to cadmium in the field, and more tolerant during the fermentation and drying; but the beans from the hybrid mix proved to be more susceptible to cadmium when they were fermented and dried, because they had the most accumulated cadmium when compared to ICS-95 and CCN51. At the same time, it was proven that in the fermentation the cadmium content in the beans was reduced to between 0,10 and 0,37 ppm, and it increased when the beans were dried, between 0,21 and 1,02 ppm. However, statistically, the beans were more contaminated when they were dried on concrete and asphalt, than when dried on wooden pallets. Finally, it was statistically demonstrated that the testa accumulated more cadmium than the cotyledon in the cacao beans, as much for the fresh beans, as for the fermented and dried ones.

Keywords: bean, cadmium, CCN-51, ICS-95, hybrids, *Theobroma cacao*

I. INTRODUCCIÓN

El año 2018, se esperaba exportaciones por un valor de US$ 280 millones en cacao peruano; porque el Perú es un exportador de cacao, con unas 150 000 ha a nivel nacional y Europa, como su principal mercado (Gestión, 2018). Sin embargo, la Unión Europea mediante el Reglamento 488/2014 para la concentración máxima de cadmio en los chocolates; exige que el límite máximo de cadmio en chocolates, cuya concentración de cacao es de 50 y 70 %, debe ser 0,60 y 0,80 ppm respectivamente. Al respecto, este reglamento está aplicado para los sub productos elaborados a base del cacao; es decir, al chocolate, cacao en polvo y licor de cacao, ya que podrían contener niveles altos de cadmio y ser un riesgo para la salud de los consumidores finales (Unión Europea, 2014). Esta regulación exige a los productores de cacao del país, que la concentración de cadmio sea baja y de no presentar un límite que este dentro de los parámetros establecidos, no lo van a comprar o reducirán el precio, lo que afectaría la economía de los cacaoteros (Florida, 2021).

Por eso, esta investigación se centra en determinar el contenido de cadmio en la testa y cotiledón del grano de cacao de los cultivares CCN-51, ICS-95 y mezcla de híbridos durante el proceso de cosecha y beneficio, porque ocurren cambios físicos y químicos en el grano fresco, fermentado y seco; procesos que son claves en la obtención cacao de calidad (Gómez et al., 2014). Pero, estos procesos no garantizan la inocuidad del grano al cadmio, porque en estos procesos, la concentración de cadmio en la testa y cotiledón del grano podría aumentar o reducirse; asimismo, se cree que la testa del grano que cubre al cotiledón acumula más cadmio que el cotiledón (Falcón, 2019); pero, durante los procesos de fermentado y secado, podría variar. Además, los contenidos de cadmio en los granos de cada cultivar, pueden diferir por la susceptibilidad o la tolerancia al cadmio que presentan (Chupillón, 2017). Por otro lado, la mayoría de los cacaoteros tienen una mala manía de secar sus granos naturalmente en concreto o asfalto, antes que secarlos en parihuelas de madera que imposibilita una mayor contaminación de los granos con cadmio; porque al secar en concreto y asfalto, y cercanos a áreas urbanas, aumenta la posibilidad de que los granos se contaminen con cadmio, porque al reposar los granos para secarlos, estos se ponen en contacto con el cadmio adherido a partículas en polvo de caucho de las ruedas de automóviles, restos de metales galvanizados con zinc, plásticos y carbón, que reposan en las superficies de esos lugares de secado. Por eso y bajo ese contexto, se plantea los siguientes objetivos:

1.1. Objetivo general

- Determinar el contenido de cadmio en la testa y cotiledón del grano fresco, fermentado y secado en tres modos, de tres cultivares de cacao.

1.2. Objetivos específicos

- Determinar en qué parte del grano (testa o cotiledón) de cacao se concentra más el cadmio durante la cosecha y beneficio de cacao.
- Determinar que cultivar de cacao en estudio es más susceptible o tolerante a contaminarse con cadmio durante la cosecha y beneficio de cacao.
- Determinar la susceptibilidad o tolerancia a la contaminación por cadmio de los granos de tres cultivares de cacao al secarse en concreto, asfalto y madera.

II. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. El cultivo de cacao

El cacao (*Theobroma cacao* L.) es una especie leñosa alógama que pertenece a la familia Malvaceae (Almeida y Valle, 2007). Es un superalimento rico en minerales, vitaminas y fibra; posee características nutricionales y medicinales, utilizadas en la fabricación de numerosos productos. Asimismo, de acuerdo con el Convenio Internacional del Cacao 2010 de la ICCO, Perú y Ecuador son considerados los principales países productores y exportadores de cacao fino (Ministerio de Agricultura y Riego [MINAGRI], 2016a). En el año 2016, se registró una producción nacional de 16 500 t de cacao; asimismo en Huánuco se registró 1 300 t de cacao (MINAGRI, 2016b). Por este motivo, diversas empresas de todo el mundo, dedicadas al chocolate, llegan al país con el objetivo de negociar directamente con las organizaciones (cooperativas y asociaciones) que representan a los agricultores que cultivan cacao (MINAGRI, 2016a).

El Ministerio de Agricultura y Riego del Perú señala que aproximadamente el 44 % de la producción pertenece a cacao fino (criollo más nativo), mientras que el 56 % corresponde al cacao común (CCN-51 más forastero) (MINAGRI, 2016b). Por su parte, García (2010), en su catálogo de cultivares del Perú, indica la siguiente distribución: a) En Huánuco, existe un total de 4 201 ha conformado por 45 % de criollo y nativo, 50 % de CCN-51 y un 5 % de trinitario más forastero., b) En San Martín, existe un total de 28 984 ha, conformado con 8 % de criollo y nativo, un 90 % de CCN-51 y un 2 % de trinitario más forastero (Morales et al., 2015). Actualmente, se sabe que el Perú tiene una ventaja competitiva, que generó gran interés del mercado internacional por el cacao peruano. Son las variedades y la diversidad de cacao nativas existentes en el territorio (MINAGRI, 2016a).

2.1.1. Características de los cultivares de cacao en estudio

García (2010), describe las características principales de los cultivares usados en el presente trabajo:

a. Cultivar CCN-51 (Colección Castro Naranjal)

País de origen ecuatoriano, pedigrí: ICS-95 x IMC-67 x forastero desconocido. Su fruto es muy grande, con 44 semillas de tamaño intermedio por fruto y cuyos cotiledones son de color morado y con un peso seco de semilla de 1,4 g. Asimismo, el índice de mazorca es igual a 16, con un rendimiento que puede variar de 937 a 2 812 kg/ha. El CCN-51 es muy conocido por presentar susceptibilidad a pudrición parda (*Phytopthora palmivora*), también muestra moderada resistencia a escoba de bruja (*Crinipellis perniciosa*) y moderada

susceptibilidad a moniliasis (*Moniliophthora roreri*). Industrialmente se caracteriza por tener 54 % de grasa. Sabores básicos y específicos de la pulpa: astringencia, acidez, dulzura y amargor media respectivamente; frutal bajo y floral muy bajo. Sabores sensoriales específicos del licor: astringencia y acidez media respectivamente; amargor medio; se percibe: la ausencia del aroma floral y de la nuez; aroma frutal bajo, además de una nota de corteza y marcada intensidad en el aroma a chocolate.

b. Cultivar ICS-95 (Selección del Colegio Imperial)

Es originario de Trinidad y Tobago; Pedigrí; Híbrido desconocido de Trinitario x Criollo. El fruto es mediano, con un promedio de 35 semillas de tamaño intermedio por fruto, donde los cotiledones son de color morado y con un peso seco de semilla igual a 1,3 g. El índice de mazorca es 22, rendimiento de 682 a 2 045 kg/ha. El ICS-95 presenta resistencia a moniliasis (*Moniliophthora roreri*), también muestra moderada resistencia a pudrición parda (*Phytopthora palmivora*) y tolerancia a escoba de bruja (*Crinipellis perniciosa*). Industrialmente se caracteriza por presentar 56 % de grasa. Sabores básicos y específicos de pulpa: dulzura, astringencia, acidez y amargor bajo respectivamente; frutal medio y floral bajo. Cuando se elabora el licor de cacao presenta sabores básicos y específicos con una nota intermedia de nuez y corteza, con ligeras notas de fruta tropical y con moderada intensidad del chocolate; considerado de calidad organoléptica fina.

c. Híbridos de cacao

Los híbridos de cacao son resultados del cruce sexual de dos plantas y generalmente es manejado por el hombre después de un minucioso proceso de selección, con el fin de formar características favorables. Es decir, el cruce se realiza entre clones, en condiciones opuestas, con el objetivo de incrementar la productividad, precocidad, calidad, respuesta a plagas y enfermedades, etc. Varios de los clones considerados actualmente como universales, han sido elegidos de poblaciones hibridas en Trinidad; en otras palabras, pertenecen a individuos que sobresalen de la descendencia esos cruces. Los cultivares más distinguidos, producidos de esta forma en Trinidad, son el: ICS-1, ICS-39, ICS-40, ICS-60, ICS-95, TSH-565, entre otros. Mediante el proceso de hibridación, se consigue mayor precocidad a diferencia de las plantaciones propagadas mediante semillas de tipo criollo. Los híbridos producen cerca de los tres años, en comparación de las antiguas semillas que se tardaban cuatro y hasta siete años para empezar la cosecha; estos propician, en su momento, una productividad cercana a 1 200 kg/ha/año; la planta en su adultez presenta mejor potencial que las producciones de las antiguas plantaciones de menos de 500 kg/ha/año, y se obtiene plantas más resistentes por su tolerancia a algunas enfermedades (Pinzón y Rojas, 2002).

2.1.2. Beneficio del cacao

a. Cosecha

La cosecha comienza cuando la mazorca presenta una madurez fisiológica, se observa una variación en la pigmentación: de verde a amarillo o rojo y otros similares a amarillo anaranjado fuerte o pálido. La mazorca debe ser cortada por la parte media del pedúnculo que une el fruto al árbol para proteger al cojín floral, usando herramientas como tijera y/o cuchillo para la mazorca bifurcada y el pico de loro especialmente para cosechar el fruto que se encuentra en la parte alta (Paredes, 2003).

b. Quiebra

Esta intervención consiste en partir la mazorca y extraer los granos de cacao que están adheridas en una ramificación en forma de racimo, denominada placenta y para posteriormente someterse al proceso de fermentación. Entre el desgrane y a iniciar la fermentación no debe pasar 24 horas. Para hacer el quiebre o corte se debe usar un machete corto, realizando un corte transversal a ambos lados y longitudinal a la mazorca, sin dañar los granos (Paredes, 2003).

c. Fermentado

Gómez et al. (2014), mencionan que la fermentación del cacao es una transformación espontánea de los granos de cacao fresco, tanto a externa como internamente, provocando la muerte del embrión, eliminando la pulpa que envuelve los granos y desarrollando aromas, sabores y color característico de un cacao de buena calidad. En esta etapa, los granos pasan por un proceso bioquímico que consta de dos fases: anaeróbica y aeróbica. Antes de la fermentación, el cajón debe limpiarse y acondicionarse, eliminando los restos de mucílago de los orificios del cajón para favorecer el drenaje. El interior del cajón también debe estar tapado y no es conveniente fermentar granos de cacao frescos que pesen menos de 100 kg. La primera remoción se realiza a los dos a tres días, y las posteriores remociones se realizan cada 24 horas por un promedio de 4 a 7 días hasta alcanzar la óptima fermentación. A partir del cuarto día se realizarán diariamente las pruebas de corte para determinar el porcentaje de fermentación. Los mismos autores, explican que, durante el primer y segundo día no se debe mover los granos que se encuentran dentro del cajón, ya que ocurre la fermentación anaeróbica, hay falta de oxígeno, incrementa la temperatura hasta 50 °C e inicia la fermentación alcohólica, descomposición del ácido cítrico y formación de exudados que sirven para el consumo directo como jugo de cacao. En estas condiciones, las levaduras del tipo *Saccharomyces* hacen transformaciones físico-químicas. Al tercer día de la fermentación, se debe remover los granos de cacao provocando la oxigenación, momento en el cual inicia la fermentación aeróbica, donde las levaduras

desaparecen por no presentar las condiciones anaeróbicas. A partir de ahí, comienza una nueva etapa de la fermentación con el crecimiento de las bacterias acéticas que necesitan oxígeno y la temperatura desciende a 35 a 40 °C; en esta etapa, se observa la presencia de pequeños mosquitos *Drosóphila* a su alrededor y se percibe el típico olor a vinagre de la fermentación. Al presionar los granos hay la salida de líquido con colores similares al concho de vino que es señal de una correcta fermentación. Al cuarto día, nuevamente hay que remover la masa de granos de cacao, ocasionando un reingreso de oxígeno, el cual es favorable para la acción de los microorganismos acéticos y culminen el proceso de fermentación. Al quinto día, se evalúa el porcentaje de granos fermentados para pasar a un proceso de secado.

d. Secado

Elimina el exceso de agua y conserva el aroma a chocolate obtenido en el proceso de fermentación, reduciendo la humedad de los granos recién fermentados de 50 – 55 % a 7 – 8 % de humedad en forma natural (luz solar) o artificial (secadoras). Para secar los granos de forma natural, se recomienda la utilización de tarimas de madera, parihuelas de madera, secadores deslizantes, secadoras solares y con calamina transparente con el objetivo de evitar la contaminación de los granos de cacao (Gómez et al., 2014).

El tiempo de secado del grano de cacao, varía según a la temperatura, la intensidad solar, la lluvia y la época del año (Nogales et al., 2006); por ello, el tiempo del secado dura entre seis y ocho días bajo condiciones normales, pues cuando el tiempo de secado es muy rápido dificulta la volatilidad del ácido acético, incrementa la acidez mayor cantidad de granos violetas; y cuando el tiempo de secado es más largo de lo normal, los granos de cacao tienen mal olor debido a una mayor presencia de moho (Gómez et al., 2014). El contenido de alcohol disminuye durante el secado, mientras que los ácidos aumentan ligeramente después de 24 horas y al final de la fermentación. También hay evidencia de una gran cantidad de nuevos compuestos como las familias de la pirazinas y así como otro grupo de compuestos como las familias cetonas y cuatro hidrocarburos que desaparecen (Portillo et al., 2009).

En la selva alta del Perú, el secado de los granos en el suelo está muy extendido, ya sea sobre mantas de plástico o pisos de concreto, y esta práctica presenta la desventaja ya que en primer lugar se evapora la humedad del suelo y después del cacao en grano; además, existe otro inconveniente, y es la contaminación de los granos de cacao con el excremento de los animales domésticos y tierra en lugares desprotegidos de limpieza y control (Paredes, 2003). Este secado puede ser eficiente y de alta calidad, si el sol es “apropiado”, pero si esto sucede el manejo se hace bien (Ortiz et al., 2004).

e. Almacenamiento

Después del secado se deben limpiar las impurezas que se encuentran en los granos de cacao con la finalidad de conseguir un producto de calidad y alcanzar los mejores precios, posteriormente se debe empaquetar y almacenar la producción. Según los indicadores de calidad del grano del cacao requeridos por la Unión Europea, el tamaño de grano mínimo autorizado es de 1 g por grano (Paredes, 2003).

2.1.3. Fruto y grano del cacao

El fruto es una baya grande (mazorca), esférica a fusiforme y poliforme, púrpura o amarillo cuando está madura, glabra; con una longitud de 10 a 35 cm y 7 cm de ancho, con un peso que varía de 200 hasta 1000 g y con 5 a 10 surcos longitudinales. Asimismo, el endocarpio posee un espesor de 4 a 8 mm, es de consistencia dura y carnosa, y leñosa cuando está seco. Los granos del cacao son cafés rojizos, ovados, ligeramente comprimidos, miden de 20 a 50 mm de largo, 12 a 16 mm de ancho y de 7 a 12 mm de espesor (Dostert et al., 2011).

Cada mazorca de cacao generalmente tiene alrededor de 30 a 40 semillas acomodadas en placentación axial e incrustada en una masa de pulpa que se desarrollada a partir de las capas externas de la testa. Las semillas tienen una coloración chocolate o purpúreo y tienen un sabor amargo. Estos no tienen albumen y están recubiertos por una capa de mucilago blanco y sabor dulce y ácido. Gran porcentaje del volumen de la semilla en su interior está prácticamente ocupado por los dos cotiledones del embrión, comúnmente conocidos como "granos" de cacao, que son muy ricos en almidón, proteínas y grasas, lo que les otorga un valor nutricional real (Quiroz y Elizalde, 2014).

El cacao es ampliamente conocido por tener semillas recalcitrantes y cuya característica es que no se puede secar sin dañarse, porque su viabilidad se reduce con el secado, pues al alcanzar un “contenido crítico de humedad”, la viabilidad del grano se reduce a cero (Rangel et al., 2012). En cuanto a los granos del cacao, estos poseen una cutícula, cuya función es proteger los cotiledones del grano, y en el exterior está el mucílago o hilio, que es la parte dulce mucilaginosa, el cual facilita la fermentación de los granos. Es decir, el mucílago facilita distinguir algunos cultivares de cacao, por su sabor y también se sabe que el mucílago aumenta los nutrientes en los cotiledones para la siguiente planta, que es el producto fermentado y debidamente secado que se comercializa para hacer el chocolate (Quiroz y Elizalde, 2014).

Respecto a la Figura 1, según Strassburger (1994), se sabe que el endospermo es el tejido nutricional desarrollado en el saco embrionario de plantas con semillas y logra ser utilizado como fuente de nutrimentos por el embrión en el proceso de germinación. Está formado por las células muy compactas y gránulos de almidón insertados en una matriz,

gran parte de la cual es proteína. Asimismo, agrega que la testa es la más externa de las dos capas que se convierten en el episperm o o tegumento que envuelve la semilla de las plantas espermatófitas. La capa más interna se llama tegmen. La testa cumple una función específica y es resguardar la semilla del medio ambiente y algunas semillas producen proyecciones de la testa que ayudan a la absorción de agua en el instante de la germinación.

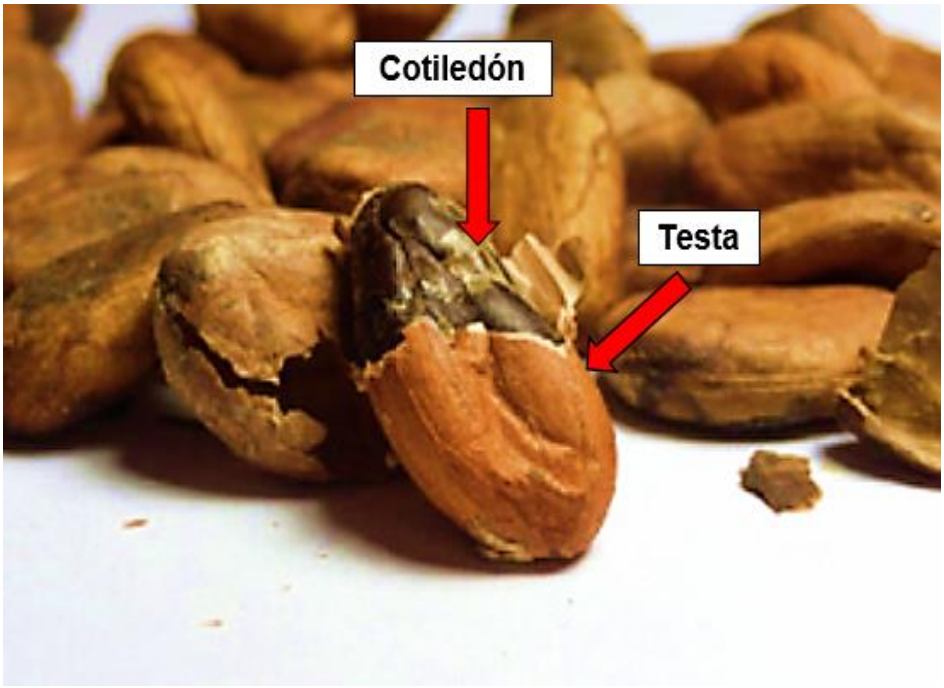

Figura 1. Partes de la semilla del cacao

Fuente: Elaboración propia.

2.2. El cadmio

El cadmio (Cd) forma parte del grupo de metales de transición (grupo B) y se encuentra de forma natural como CdS o $CdCO_3$. Está como impureza en minerales de zinc (Zn) (3 kg Cd/t de Zn), cobre (Cu) y plomo (Pb), así como petróleo crudo y carbón. Los compuestos del cadmio son nocivos para la salud humana, la sobreexposición aguda a humo con cadmio puede dañar a los pulmones; en cambio, el contacto continuo o repetido se relaciona con daño renal y un mayor riesgo de padecer cáncer (Csuros y Csuros, 2002).

El cadmio ingresa al medio ambiente a partir de fuentes antropogénicas, como: la minería, la metalurgia, la combustión de carbón y de petróleo, y el inadecuado manejo de residuos sólidos y peligrosos (policloruro de vinilo) por parte de los gobiernos locales. Estas partículas de policloruro de vinilo generalmente se asientan y se adhieren a la materia orgánica del suelo; pero, una fracción de ella se diluye en agua, contaminando los cuerpos de agua. Las formas más frecuentes del cadmio incluyen Cd^{2+}; también complejos de cadmio-cianuro e hidróxidos de cadmio. Las formas preponderantes a pH superior a 8 son hidróxidos y

carbonatos; pero, a pH menos de 8, predominan las especies de sulfato acuoso y Cd^{2+}. En condiciones reductoras y con presencia de azufre (S), se forma el sulfato de cadmio (CdS) que, por su solidez, dirige la movilidad del cadmio (Volke et al., 2005).

2.2.1. Ingreso, transporte y acumulación de cadmio

Al ser un elemento no esencial se considera que no existen mecanismos de entrada propio para el cadmio. Sin embargo, se han encontrado algunas proteínas involucradas en el ingreso del cadmio hacia las células, entre ellos destaca el transportador de calcio especifico LCT1 (Clemens et al., 1998, como se citó en Rodríguez et al., 2008), y la proteína IRT1, correspondiente a la familia de transportadores de zinc y hiero (ZIP) (Guerinot, 2000). Otra familia de transportadores involucrados es la Nramp, ubicado en la membrana de las vacuolas, por lo que posiblemente juerga un papel en la movilidad del cadmio y no en su entrada a las raíces (Thomine et al., 2000). Una vez que está en el interior de la células, esta puede coordinarse con ligandos de azufrados como glutation o fitoquelatinas y ácidos orgánicos (citrato) (Clemens, 2006). Hay otras moléculas involucradas en la quelación del metal y se trata de pequeñas proteínas ricas en cisteína llamadas metalotioneínas y de esta manera, los complejos cadmio-ligando llegan a ser llevados al interior de las vacuolas o a otras células (Shah y Nongkynrh, 2007).

En la planta, el Cd^{2+} se aglomera en las raíz retenido por la vacuola de las células y solo una mínima cantidad es llevada a la parte aérea de la planta, donde se concentra en orden decreciente de tallos, hojas, frutos y almendras (Chan y Hale, 2004). En células de levadura se ha evidenciado que el Cd^{2+} entra en la vacuola junto a las fitoquelatinas, mediante un transportador de tipo ABC. Otra forma de ingreso del metal en la vacuola es a través un cotransportador de Cd^{2+}/H^{+} situado en la misma membrana (Ortiz et al., 1995, como se citó en Rodríguez et al., 2008). Los transportadores de cationes CAX, están involucrados en el transporte de calcio (Ca) hacia las vacuolas, además transportan otros metales como el Cd^{2+} (Park et al., 2005). Una vez en la raíz, el Cd^{2+} puede ingresar al xilema mediante el apoplasto y/o mediante el simplasto formando complejos (Clemens et al., 2002).

2.2.2. Estrategias de la planta para reducir el transporte del cadmio

Ante la presencia de metales pesados en el ambiente, las plantas han desarrollado diferentes estrategias para impedir su efecto tóxico. Generalmente, la tolerancia a los metales pesados es determinada por la disminución del transporte hacia el interior de las células y/o con una mayor capacidad para retener estos metales. Las raíces de las plantas constituyen una de las principales barreras de defensa a través de la inmovilización del Cd^{2+} por pectinas de la pared celular. Asimismo, los carbohidratos extracelulares (mucílago y calosa) de

la raíz pueden participar en la inmovilización del metal pesado (Benavides et al., 2005). La acumulación de metal en los tricomas que se encuentran en la superficie las hojas es también un mecanismo de inmovilización y protección celular (Salt et al., 1995, como se citó en Rodríguez et al., 2008). Otro mecanismo es la disminución del transporte o incremento de la extrusión de cadmio por los transportadores de iones cargados positivamente de la membrana plasmática (Thomine et al., 2000).

Cuando el cadmio u otros metales están dentro de la célula, son retenidos por ácidos orgánicos, aminoácidos, fitoquelatinas y metalotioneínas, y luego se compartimentan en la vacuola para evitar el efecto tóxico. La fitoquelatina es uno de los mecanismos más importantes de protección contra los metales. Su asimilación tiene lugar a partir del glutatión y se induce en presencia de metales pesados (Clemens, 2006). Las plantas que sobreexpresan la enzima fitoquelatina sintasa tienen mayor tolerancia a los metales pesados como el cadmio (Pomponi et al., 2006). Otra probable molécula encargada del almacenamiento del cadmio es la metalotioneína (pequeña proteína rica en cisteína), aunque no es la principal responsable de la detoxificación del metal, como sucede en células animales (Rodríguez et al., 2008).

2.3. Contaminación del cacao con cadmio

2.3.1. El cadmio un problema en el cultivo de cacao

El cadmio es considerado un metal pesado, al respecto, el Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias (INIAP, 2015), como se citó en Lara (2017), sostiene que los metales pesados conocidos como contaminantes son de difícil solución, al momento de ingresar a los suelos agrícolas y a la cadena alimenticia, son bioacumulables. Asimismo, agrega que los valores que son tolerables en presencia del cadmio cambian desde unos miligramos hasta solo microgramos en el producto comercial final; por lo tanto, estos niveles considerablemente bajos dificultan aún más la venta del producto. Al respecto, Nava y Méndez (2011), como se citó en Tantalean y Huauya (2017), hacen referencia que el cadmio es uno de los elementos traza más perjudiciales que, cuando se encuentra en el recurso suelo, las plantas lo absorben y lo almacenan en las semillas. La exposición de las plantas a suelos contaminado ocasiona que el cadmio ingrese a la planta y forme parte de la cadena alimentaria. En la actualidad la bioacumulación de metales pesados está considerada como muy importante, debido a que este elemento se acumula en los riñones, con una vida media de entre 17 a 30 años.

Prosiguiendo el párrafo anterior, Orozco y López (2015), mencionan que el rango aceptable de cadmio de acuerdo con la Organización Mundial de la Salud (OMS) es de 7 ppm de peso corporal/semana; esto es, de 60 a 70 mg por día para persona adulta. También, argumentan que el cultivo de cacao presenta una mayor tendencia a absorber Cd^{2+}, porque las

diversas investigaciones han encontrado una mayor cantidad en el producto terminado (chocolate) a diferencia de otros alimentos y bebidas. Internacionalmente al cacao peruano, según Cárdenas (2012), es reconocido por su calidad organoléptica, sin embargo, la presencia del metal genera intranquilidad en los productores y sus organizaciones exportadoras de cacao en el territorio, ya que se están generando problemas para la entrada de este producto al mercado principalmente europeo, pues según Subero (2013), superan el límite máximo permisible de cadmio (0,50 ppm).

Mite et al. (2010), indican que uno de los países consumidores de cacao peruano es Alemania, a razón de eso, el Instituto Alemán ha propuesto como máximo 0,1 a 0,3 ppm de cadmio en chocolate. La OMS y la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y Alimentación, según Martínez (2010), establecieron que los límites máximos de cadmio en el chocolate es 0,10 ppm, y los máximos niveles tolerables de cadmio en chocolate y polvo de cacao en Alemania, Europa Central y Malasia son de 0,4; 0,5 y 1,0 ppm respectivamente. Pero, la Unión Europea (2014), modificó el Reglamento (CE) N° 1881/2006 por lo que concierne a la concentración máxima de cadmio en los productos alimenticios, mediante el Reglamento (UE) N° 488/2014, donde se ordena que, a partir del 2019, la concentración máxima de cadmio para el chocolate con leche con un contenido de materia seca total de cacao menor a 30 %, debe ser de 0,10 ppm; para el chocolate con contenido de materia seca total de cacao menos de 50 %, el límite máximo debe ser de 0,30 ppm; respecto al chocolate con un contenido de materia seca de cacao mayor o igual a 50 %, debe tener un límite máximo de 0,80 ppm; y para el cacao en polvo vendido al consumidor final, la concentración de cadmio debe tener un límite de 0,60 ppm.

2.3.2. El cadmio en el suelo agrícola

El cadmio, de acuerdo con Sánchez et al. (2011), se acumula sobre la superficie del suelo y su movilidad puede ser de tipo mecánica y del viento, transportando y repartiendo el metal pesado sobre el perfil del suelo y esta es absorbida por el cultivo de cacao. Rodríguez et al. (2008), hacen referencia que las reacciones químicas del cadmio dependen de las condiciones físico-químicas del suelo. Según Ramírez (2002), como se citó en Lara (2017), el cadmio ingresa a los suelos agrícolas por acción del viento (41 %), fertilizantes y abonos fosfatados (54 %), adición de abono a base de estiércol (5 %) y por efluentes (lixiviados de relaes mineros) en forma de líquidos y sólidos. También hace referencia que el metal puede permanecer hasta 300 años en el suelo y el 90 % se mantiene sin cambios.

El cadmio en los suelos agrícolas puede darse por estar cerca de las áreas urbanas, donde los residuos de combustible, asfaltos y otros contaminantes pueden incrementar

la cantidad del metal pesado tal como reporta el International Plant Nutrition Institute (IPNI, 2015), como se citó en Tantalean y Huauya (2017). Por su parte, Rodríguez et al. (2008); Subero (2013), mencionan que la contaminación por cadmio ha aumentado por la actividad minera, metalurgia de los metales, aplicación de fertilizantes sintéticos y orgánicos fosfatados al suelo, quema de combustibles fósiles, procesos de obtención de cemento, pinturas, plásticos y fabricación de baterías. También Martínez (2010); Ruíz (2011), mencionan que las fuentes naturales de cadmio, como las rocas o material aluvial y erosivo, es llevado por el viento y agua; también se suma el cadmio de origen antropogénico en los suelos que puede originarse por la deposición atmosférica, heces de animales, aguas negras, lixiviados y por la fertilización fosforada. Además, Rábago (2010), sostiene que las rocas sedimentarias tienen más cadmio que otros tipos de rocas.

González et al. (2010), como se citó en González (2016), mencionan que, a un pH por debajo de 6, el Cd es absorbido débilmente en la materia orgánica y a pH por encima de 7, el cadmio precipita con carbonatos de calcio, por lo que se alude que la acides del suelo aporta movilidad de este elemento. Subero (2013), hace referencia que la disponibilidad del cadmio en el suelo se relaciona con la cantidad que exista y de su capacidad para ser liberados desde el estado sólido de la solución. Rueda et al. (2011), sustentan que los metales pesados en los suelos agrícolas están en mínimas cantidades y que muestran una enorme variación de acuerdo con su origen (material parental, proceso de formación o transformación del suelo) y pueden cambiar y aumentar las cantidades de acuerdo con que actividad agronómica se realice.

En relación con los niveles permitidos de los metales pesados en el suelo, según Huauya y Huamaní (2014), la Unión Europea ha establecido valores mínimos de metales pesados de 3 ppm en suelos agrícolas, debido a que existe una relación entre la concentración y el contenido de metales en el suelo y en las almendras de cacao. Miranda et al. (2008), reportan que en diversos países consideran 2 ppm de cadmio total como máximo valor para suelos agrícolas, no obstante, es necesario mencionar que la norma de la concentración máxima en los suelos aplica solo para países que forman la Unión Europea es de 3 ppm. Barragán (2008), indica que es importante asentar que los suelos agrícolas con 3 ppm de cadmio se consideren fitotóxicos tal como hace referencia la OMS-FAO (1992).

2.3.3. Absorción del cadmio por las plantas de cacao

La sobreabundancia del cadmio en suelos agrícolas, de acuerdo con Reynel et al. (2016), tiende a acumularse en los diferentes tejidos de la planta. Por su parte, Huamaní et al. (2012), sustentan que los metales como el cadmio y plomo constituyen la corteza natural de la tierra, es ahí de donde la planta de cacao absorbe el metal pesado; además agregan que el

cadmio no constituye un nutriente esencial para la planta ya que no existe unidades de absorción específicas, sin embargo, se da una competencia o confusión con otros nutrientes, el cual la planta toma al cadmio mediante la célula transportadora especifica de calcio. Alimentarius (2015), como se citó en González (2016), menciona que, investigaciones realizados en tejidos de plantas de cacao y suelos agrícolas, se ha llegado a determinar que el orden de acumulación de cadmio empieza desde la raíz, tronco, hoja, cáscara y almendra; en este último con un contenido mínimo en comparación a los otros tejidos de la planta.

El cadmio del suelo es absorbido en distintas proporciones por la planta de cacao; según Acosta (2013), llega a depender de la especie y características de la planta, adoptando diversas estrategias ante la presencia de dicho metal, identificando así mayor concentración de cadmio en sus raíces, tallos, frutos y almendras; indicando que cada planta absorbe cadmio indistintamente según su fisiología. Prieto et al. (2009), también sustentan que la facultad de las plantas para almacenar cadmio varía de acuerdo con la naturaleza del metal y la especie vegetal; también indica que la concentración de cadmio en el suelo es el factor clave para que el cultivo entre en contacto. Motivo por el cual se genera una correlación entre el metal-suelo-raíz y la asimilación de la planta. Otros como Miranda et al. (2008), reportan que algunos metales como el cadmio, tiene un comportamiento electroquímico parecido a los elementos que forman parte de la nutrición de la planta de cacao por ello son absorbidos, translocados y acumulados.

Niveles altos de cadmio en el suelo, según Jiménez (2015), reducen la fotosíntesis, asimilación del agua y nutrientes, y en consecuencia el oscurecimiento de las raíces y enanismo (crecimiento aletargado), y finalmente con la muerte de la planta de cacao. Acosta (2013); Miranda et al. (2008), coinciden que el cadmio detiene el ingreso y transporte de elementos como Ca, Mg, P y K, considerados esenciales, así como también el agua, llegando a provocar en la planta de cacao deshidratación y desnutrición. Rodríguez et al. (2008), señalan que el cadmio presenta modificaciones en la apertura estomática y transpiración de la planta, y Pernía et al. (2008), aluden que el cadmio puede reemplazar al ion magnesio en la molécula de clorofila, impidiendo que exista captación de los fotones y por ende un descrecimiento de la actividad fotosintética en la planta. A su vez, Barrueta (2013), hace mención que incluso minimiza absorción del nitrógeno en su forma nitratos y su transporte de las raíces al tallo; ocasionando una clorosis por escasa absorción de hierro, fosfatos o por la disminución del transporte de manganeso.

Acosta (2013), manifiesta que, por la presencia de cadmio en el suelo, la planta de cacao incrementa la absorción de dicho metal, acumulándose generalmente en sus

semillas ricas en grasas, ocasionando el rechazo del producto al momento de la comercialización por sobrepasar los estándares mínimos permitidos internacionales como el CODEX alimentarius, y esto porque el cadmio de acuerdo con Orroño (2011), es un metal pesado de fácil translocación a la parte superior de las plantas. Al respecto, Huamaní et al. (2012), hacen referencia que, uno de los factores limitantes para la comercialización del producto es la cantidad del cadmio en los granos de cacao; ocasionado por la bioacumulación en la plantas de cacao absorbidas del suelo contaminado y que, además según Barrueta (2013), naturalmente la planta de cacao absorbe el cadmio del suelo y lo lleva a la semilla.

2.4. Trabajos relacionados con nuestra investigación

Cárdenas (2012), en su trabajo de investigación que realizó en Tingo María, reporta que el contenido de Cd en los suelos es de 0,66 ppm y que las partes vegetativas del clon CCN–51, como hojas, granos y cascarillas fueron de 2,84; 1,55 y 2,04 ppm respectivamente, concluyendo que los niveles de Cd en suelo están por debajo de lo permitido y en las partes vegetativas están por encima de los permitido.

En Tarapoto, Chupillón (2017), determinó que la absorción de cadmio y plomo en genotipos como el IMC-67, POUND-12, SCA-6, EET-400, CCN-51 y cacao común varía de 0,6 a 20,9 ppm/planta, concluyendo que el IMC-67, POUND-12 y cacao común presentaron mínima capacidad de acumulación de Cd y Pb con 8, 8 y 5,4 ppm/planta respectivamente; agregando que las diferencias podrían responder a los mecanismos de absorción que tienen las plantas de cacao según su variabilidad genética en respuesta a la cantidad del metal, considerando la siguiente variable como: tiempo de exposición entre el metal y la planta; también señala que posiblemente las plantas estén presentando mecanismos de respuesta frente al cadmio, presentando el rechazo fisiológico o identificación entre el suelo y la raíz con el fin de minimizar su almacenamiento.

Lanza et al. (2016), en su ensayo realizado en Venezuela, reportan que las concentraciones de cadmio en parcelas de cacao en Santa Bárbara del Zulia en el año 2012 fueron de 1,74 y 2,09 ppm para el cacao híbrido fermentado e híbrido no fermentado respectivamente y para el cacao porcelana fermentada y no fermentada fue de 1,82 y 1,90 ppm respectivamente. En el año 2013, las cantidades de que hallaron fueron de 0,95 y 1,10 ppm para el híbrido fermentado en madera e híbrido fermentado en cesta de plástico respectivamente y para el cacao porcelana fermentada en madera y cesta de plástico fue de 1,57 y 1,76 ppm respectivamente. Asimismo, añaden que no existieron diferencias significativas entre el híbrido fermentado y no fermentado, ni para la porcelana fermentada y no fermentada, tampoco

variando el método de fermentación, concluyendo que no existe efecto en la concentración de Cd cuando se realiza el proceso de poscosecha en los granos de cacao.

INIAP (2015), como se citó en Lara (2017), sustenta que el cadmio en la mazorca se distribuye entre jugo y mucilago, y que a su vez es posible su movilidad hacia la testa y el grano, lo que indicaría que evidentemente los chocolates lo presenten. Asimismo, agrega que recomiendan que un lavado de pulpa antes de iniciado la fermentación puede reducir dicho metal, coincidiendo con IPNI (2015), como se citó en Tantalean y Huauya (2017), quienes sustentan que el Cd en la mazorca del cacao se divide de forma diferente. Lo importante, según Reynel et al. (2016), que en los países que producen cacao deben considerar el grado de contaminación ambiental local (aire, suelo y agua) donde se cultiva y se procesa dicho producto. Ya que estos contaminantes son transferidos al momento de exponerlos al ambiente mediante el secado natural. Uno de los métodos de exposición son el secado sobre el pavimento en lugares donde el uso de vehículos motorizados es recurrente, el cual expone a la materia prima a los gases contaminantes (producto de la combustión de diesel).

De acuerdo con Lara (2017), diferentes investigadores sustentan que el manejo de postcosecha y el genotipo del cacao podrían ser factores relacionados en la disposición del cadmio en el cultivo y por lo tanto en el grano. En Ecuador, González (2016), hace mención que aún no se conoce si existe una relación de las distintas formas de secado en la contaminación por cadmio del grano de cacao. En Ecuador, Reynel et al. (2016), evaluaron efectos del tipo de secado en la calidad organoléptica del cacao; asimismo, reportaron que las almendras de cacao secados en carretera de asfalto y concreto, así como tendal en concreto, secadora a gas, secadora a diésel y marquesina, contenían menos de 0,02 ppm de Cd y sin diferenciarse estadísticamente, además estos niveles estaban por debajo del límite permisible estipulado en las normas Unión Europea y la Organización Mundial de la Salud.

En Santo Domingo, Lara (2017), evaluó la cantidad de Cd en el CCN-51 y la variedad Nacional, utilizando diferentes métodos de secado, concluyendo que los tipos de variedades si llegan a influir en la cantidad de Cd, donde el valor más alto presentó CCN-51 (0,37 ppm) frente al Nacional (0,33 ppm); también afirma que los tipos de secado influyen en la cantidad de Cd, donde el valor más alto fue mediante el secado en estufa con 0,38 ppm, continuo del secado en cemento con 0,37 ppm y el menor rango fue por el secado en asfalto con 0,32 ppm. Además, concluyó que existe una sinergia en cuanto a variedades y secados en relación con el contenido de cadmio, ya que la tendencia fue similar analizando las variedades y tipos de secados por separados o combinados; asimismo, recomienda que, para prevenir la

contaminación del cacao por el cadmio, se deberá poner mayor cuidado en la selección del lugar donde se va a instalar las plantaciones de cacao, previo un análisis físico-químico del suelo.

III. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Lugar de ejecución

3.1.1. Ubicación de la parcela de muestreo

La parcela donde se extrajo las muestras de suelos y las almendras frescas de cacao de tres cultivares (CCN-51, ICS-95 y mezcla de híbridos) para la investigación pertenece al Fundo "San Luis" del señor Luis Bravo, localizado en el sector Mercedes, distrito Daniel Alomía Robles "Pumahuasi", provincia Leoncio Prado, región Huánuco, cuyas coordenadas son: 394942 m. E; 8985807 m. N y altitud 420 m.s.n.m.

De acuerdo con la Tabla 1, las parcelas de cacao de los tres cultivares en estudio cuenta con las siguientes características funcionales:

Tabla 1. Características de las parcelas en investigación

Características	Cultivares		
	CCN-51	**ICS-95**	**Mezcla de híbridos**
Edad de la plantación	4,5 años	4,5 años	65 años
Certificación	Sostenible	Sostenible	Sostenible
Sistema de siembra	3 x 3 (cuadrado)	3 x 3 (cuadrado)	4 x 4 (cuadrado)
Sistemas agroforestales	Sí	Sí	Sí
Asociación de cultivos	Plátanos	Plátanos	Plátanos
Área total (ha)	5	5	5

Fuente: Elaboración propia

3.1.2. Ubicación del laboratorio

El contenido de cadmio de las muestras de suelo y los granos de cacao de los tres cultivares, se analizaron en el Laboratorio de Suelos, Agua y Ecotoxicología de la Universidad Nacional Agraria de la Selva (UNAS), cuyas coordenadas son: 0410645 m. E; 8983244 m. N y altitud 647 m.s.n.m.

3.1.3. Características climáticas y zona de vida

De acuerdo con el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI, 2017), la provincia de Leoncio Prado presenta una precipitación anual de 3 200 mm, con una humedad relativa de 80 % anualmente y con temperaturas máxima, mínima y anual de 29, 20 y 24,2 ºC respectivamente; encontrándose en la formación vegetal de bosque muy húmedo Premontano Sub Tropical (bmh-PST), tal como se clasifica de acuerdo con la zona de vida Holdridge (1994), como se citó en Tello (2008).

3.2. Materiales y métodos

3.2.1. Diseño estadístico

El experimento consistió en base a tres etapas que pasa el grano en el proceso del beneficio del cacao y son:

3.2.1.1. Grano fresco y fermentado

a. Componentes en estudio

Factor A (partes del grano)

a_1 = Testa

a_2 = Cotiledón

Factor B (cultivares de cacao)

b_1 = CCN-51

b_2 = ICS-95

b_3 = Mezcla de híbridos

b. Tratamientos en estudio

En la Tabla 2, se muestran los seis tratamientos en estudio.

Tabla 2. Descripción de los tratamientos

Clave	Interacción (A x B)	Descripción de los tratamientos
T_1	a_1 x b_1	Testa del CCN-51
T_2	a_1 x b_2	Testa del ICS-95
T_3	a_1 x b_3	Testa de la mezcla de híbridos
T_4	a_2 x b_1	Cotiledón del CCN-51
T_5	a_2 x b_2	Cotiledón del ICS-95
T_6	a_2 x b_3	Cotiledón de la mezcla de híbridos

c. Diseño experimental

Para el trabajo de investigación, se utilizó el DCA con arreglo factorial 2A x 3B, con tres repeticiones. Donde el modelo aditivo lineal es el siguiente:

Modelo aditivo lineal

$$Y_{ijk}=\mu + \alpha_i + \beta_j + (\alpha\beta)_{ij} + \epsilon_{ijk}$$

Donde:

Y_{ijk} = Es la respuesta obtenida en la unidad experimental de la k - ésima repetición, del j-ésimo cultivar de cacao con la i - ésima parte del grano de cacao.

μ = Es el efecto de la media general.

α_i = Efecto de la i – ésima parte del grano de cacao.

β_j = Es el efecto del j – ésimo cultivar de cacao.

$(\alpha\beta)_{ij}$ = Es el efecto de la interacción entre la i-ésima parte del grano y el j-ésimo cultivar de cacao.

ϵ_{ijk} = Es el efecto aleatorio del error experimental en la unidad experimental de la k - ésima repetición, del j-ésimo cultivar de cacao con la i - ésima parte del grano de cacao.

Para:

i = 1 y 2 partes del grano de cacao.

j = 1, 2 y 3 cultivar de cacao.

k = 1, 2 y 3 repeticiones.

d. Análisis estadístico

De acuerdo con el análisis de variancia (F. tab. = 0,01 y 0,05) (Tabla 3), se halló el coeficiente de variabilidad (CV) de los ensayos con la ecuación (1). Para la diferencia de medias de los tratamientos se utilizó prueba de Duncan ($\alpha = 0,05$). También, se determinó las diferencias de las medias de los tratamientos mediante la prueba de Duncan ($\alpha = 0,05$). Para realizar este análisis estadístico, se usó el software Microsoft Office Excel 2013 en español.

Tabla 3. Modelo del análisis de variancia

FV	GL	SC	CM	F Cal.	F Tab.
Tratamientos	$(a_x b)-1$	SC_{trat}	$SC_{trat}/gl_{trat} = CM_{trat}$	CM_{trat}/CM_{ee}	$F_\alpha(gl_{trat},gl_{ee})$
A	a-1	SC_A	$SC_A/gl_A = CM_A$	CM_A/CM_{ee}	$F_\alpha(gl_A,gl_{ee})$
B	b-1	SC_B	$SC_B/gl_B = CM_B$	CM_B/CM_{ee}	$F_\alpha(gl_B,gl_{ee})$
$A_x B$	$(a-1)_x(b-1)$	SC_{AxB}	$SC_{AxB}/gl_{AxB} = CM_{AxB}$	CM_{AxB}/CM_{ee}	$F_\alpha(gl_{AxB},gl_{ee})$
Error exp.	$(a_x b)_x(r-1)$	SC_{ee}	$SC_{ee}/gl_{ee} = CM_{ee}$		
Total	$(a_x b_x r)-1$	SC_{total}			

a = partes del grano., b = cultivares de cacao., r = repetición

$$CV = \frac{\sqrt{(CM_e)}}{\bar{Y}} \times (100) \qquad \text{.....(1)}$$

Donde:

CV = Coeficiente de variabilidad.

CM_e = Cuadrado medio del error.

$\bar{Y}...$ = Promedio total de los tratamientos.

3.2.1.2. Grano seco

a. Componentes en estudio

Factor A (partes de la semilla)

a_1 = Testa

a_2 = Cotiledón

Factor B (cultivares de cacao)

b_1 = CCN-51

b_2 = ICS-95

b_3 = Mezcla de híbridos

Factor C (modos de secado)

c_1 = Concreto

c_2 = Asfalto

c_3 = Madera

b. Tratamientos en estudio

En la Tabla 4, se muestran los 18 tratamientos en estudio.

Tabla 4. Descripción de los tratamientos

Clave	Interacción (A x B x C)	Descripción de los tratamientos
T_1	$a_1 \times b_1 \times c_1$	Testa del CCN-51 secado en concreto
T_2	$a_1 \times b_1 \times c_2$	Testa del CCN-51 secado en asfalto
T_3	$a_1 \times b_1 \times c_3$	Testa del CCN-51 secado en madera
T_4	$a_1 \times b_2 \times c_1$	Testa del ICS-95 secado en concreto
T_5	$a_1 \times b_2 \times c_2$	Testa del ICS-95 secado en asfalto
T_6	$a_1 \times b_2 \times c_3$	Testa del ICS-95 secado en madera
T_7	$a_1 \times b_3 \times c_1$	Testa de híbridos secado en concreto
T_8	$a_1 \times b_3 \times c_2$	Testa de híbridos secado en asfalto
T_9	$a_1 \times b_3 \times c_3$	Testa de híbridos secado en madera
T_{10}	$a_2 \times b_1 \times c_1$	Cotiledón del CCN-51 secado en concreto
T_{11}	$a_2 \times b_1 \times c_2$	Cotiledón del CCN-51 secado en asfalto
T_{12}	$a_2 \times b_1 \times c_3$	Cotiledón del CCN-51 secado en madera
T_{13}	$a_2 \times b_2 \times c_1$	Cotiledón del ICS-95 secado en concreto
T_{14}	$a_2 \times b_2 \times c_2$	Cotiledón del ICS-95 secado en asfalto
T_{15}	$a_2 \times b_2 \times c_3$	Cotiledón del ICS-95 secado en madera
T_{16}	$a_3 \times b_3 \times c_1$	Cotiledón de híbridos secado en concreto
T_{17}	$a_3 \times b_3 \times c_2$	Cotiledón de híbridos secado en asfalto
T_{18}	$a_3 \times b_3 \times c_3$	Cotiledón de híbridos secado en madera

c. Diseño experimental

Para el trabajo de investigación, se usó DCA con arreglo factorial 2A x 3B x 3C y tres repeticiones.

Modelo aditivo lineal

$$Y_{ijkl} = \mu + \alpha_i + \beta_j + \lambda_k + (\alpha\beta)_{ij} + (\alpha\lambda)_{ik} + (\beta\lambda)_{jk} + (\alpha\beta\lambda)_{ijk} + \varepsilon_{ijkl}$$

Dónde:

Y_{ijkl} = Es la respuesta obtenida en la unidad experimental de la l - ésima repetición, del k-ésimo modo de secado del j – ésimo cultivar con la i - ésima parte del grano.

μ = Efecto de la media general.

α_i = Efecto de la i-ésima parte del grano de cacao.

β_j = Efecto del j-ésimo cultivar de cacao.

λ_k = Efecto del k- ésimo modo de secado.

$(\alpha\beta)_{ij}$ = Es el efecto de la interacción entre la i-ésima parte del grano y el j-ésimo cultivar de cacao.

$(\alpha\lambda)_{ik}$ = Es el efecto de la interacción entre la i-ésima parte del grano y el k-ésimo modo del secado.

$(\beta\lambda)_{jk}$ = Es el efecto de la interacción entre el j-ésimo cultivar de cacao y el k-ésimo modo de secado.

$(\alpha\beta\lambda)_{jik}$ = Efecto de la interacción entre la i – ésima parte del grano de cacao con el j-ésimo cultivar de cacao con el k - ésimo modo de secado.

ε_{ijkl} = Es el efecto aleatorio del error experimental en la unidad experimental de la l - ésima repetición, del k-ésimo modo de secado del j - ésimo cultivar de cacao con la i - ésima parte del grano de cacao.

Para:

i = 1 y 2 partes del grano de cacao.

j = 1, 2 y 3 cultivares de cacao.

k = 1, 2 y 3 modos de secado.

l = 1, 2 y 3 repeticiones.

d. Análisis estadístico

De acuerdo con el análisis de variancia (F. tab. = 0,01 y 0,05) (Tabla 5), se halló el coeficiente de variabilidad (CV) de los ensayos (1). Además, se determinó las diferencias de los promedios de los tratamientos mediante la prueba de Duncan ($\alpha = 0,05$).

Tabla 5. Modelo del análisis de variancia

Fuente de variación	GL	SC	CM	F Cal.
Tratamientos	$(a_x b_x c)$-1	SC_{trat}	$SC_{trat}/gl_{trat} = CM_{trat}$	CM_{trat}/CM_{ee}
A	a-1	SC_A	$SC_A/gl_A = CM_A$	CM_A/CM_{ee}
B	b-1	SC_B	$SC_B/gl_B = CM_B$	CM_B/CM_{ee}
C	c-1	SC_C	$SC_B/gl_B = CM_C$	CM_C/CM_{ee}
A_xB	$(a-1)_x(b-1)$	SC_{AxB}	$SC_{AxB}/gl_{AxB} = CM_{AxB}$	CM_{AxB}/CM_{ee}
A_xC	$(a-1)_x(c-1)$	SC_{AxC}	$SC_{AxC}/gl_{AxC} = CM_{AxC}$	CM_{AxC}/CM_{ee}
B_xC	$(b-1)_x(c-1)$	SC_{BxC}	$SC_{BxC}/gl_{BxC} = CM_{BxC}$	CM_{BxC}/CM_{ee}
A_xB_xC	$(a-1)_x(b-1)_x(c-1)$	SC_{AXBxC}	$SC_{AxBxC}/gl_{AxBxC} = CM_{AxBxC}$	CM_{AxBxC}/CM_{ee}
Error exp.	$(a_x b_x c)$x(r-1)	SC_{ee}	$SC_{ee}/gl_{ee} = CM_{ee}$	
Total	$(a_x b_x c_x r)$-1	SC_{total}		

a = partes del grano., b = cultivares de cacao., c= modos de secado., r = repetición

3.2.2. Metodología

3.2.2.1. Muestreo y análisis de suelos

Se recolectó tres muestras de suelo, uno por cada cultivar (CCN-51, ICS-95 y mezcla de híbridos). Para la colección de muestras de suelos, se tomó en cuenta la metodología propuesta por el Ministerio del Ambiente (MINAM, 2014), donde se tomaron 60 submuestras (20 por cultivar) de suelos de cada pie de planta, en un área total de 15 ha; luego, se mezclaron y secaron a temperatura ambiente por separado, y así se obtuvo 1 kg de suelo representativo por cultivar y que fue enviado al Laboratorio de Suelos, Agua y Ecotoxicología de la UNAS.

Según el análisis físico y químico de los suelos de las parcelas de los cultivares CCN-51, ICS-95 y mezcla de híbridos (Tabla 6); se observa que las tres parcelas cuentan con suelos francos, cuyos pH están entre 6,50 y 7,00, calificándolos como suelos ligeramente neutros. Respecto a los niveles de materia orgánica, nitrógeno y fósforo en suelo de las parcelas de CCN-51 y mezcla de híbridos, los valores obtenidos indican que tienen contenidos medios; pero en los resultados del análisis de suelo realizado en el pie de planta del cultivar ICS-95, existen contenidos muy bajos de materia orgánica, nitrógeno y fósforo. Respecto al potasio en el suelo, se evidencia que su contenido es bajo para las tres muestras obtenidas de tres cultivares de cacao.

La concentración de Cd en el suelo de las parcelas de cacao de los cultivares CCN-51, ICS-95 y mezcla de híbridos (Tabla 6) fue 0,14; 0,09 y 0,27 ppm respectivamente; estos valores de cadmio en el suelo son inferiores a 1 ppm. Al respecto, el contenido de Cd en un suelo no contaminado es menor a 1 ppm (Villanueva, 2005); asimismo, la Unión Europea señala que el nivel máximo y permitido de Cd en suelos agrícolas es 3 ppm (Acevedo et al., 2005; Huauya y Huamaní, 2014; Barragán, 2008); es decir, los niveles de Cd en los suelos de las tres parcelas están por debajo de los límites permisibles.

Tabla 6. Análisis físico y químico del suelo de las parcelas de tres cultivares de cacao

Elementos	**Contenido**		
Análisis físico:	**CCN-51**	**ISC-95**	**Híbridos**
Arena (%)	36,00	36,00	38,00
Limo (%)	19,00	19,00	21,00
Arcilla (%)	45,00	45,00	41,00
Clase textural	Franco	Franco	Franco
Análisis químico:			
pH (1:1) en agua	6,85	6,89	6,98
MO (%)	2,26	1,26	3,39
N - Total (%)	0,10	0,06	0,15
Fósforo disponible (ppm)	10,14	5,16	10,35
Potasio disponible (ppm)	94,83	96,96	109,83
Cadmio (ppm)	0,14	0,09	0,27
Ca cambiable (cmol(+)/kg)	8,19	8,90	9,99
Mg cambiable (cmol(+)/kg)	1,40	1,50	1,60
K cambiable (cmol(+)/kg)	0,10	0,20	0,24
Na cambiable (cmol(+)/kg)	0,08	0,14	0,15
Al cambiable (cmol(+)/kg)	---	---	---
H cambiable (cmol(+)/kg)	---	---	---
Bases cambiables (%)	100,00	100,00	100,00
Acidez cambiable (%)	0,00	0,00	0,00
Saturación de aluminio (%)	0,00	0,00	0,00
CIC (cmol(+)/kg)	9,77	10,76	11,97

Fuente: Laboratorio de Suelos, Agua y Ecotoxicología de la UNAS

3.2.2.2. Recolección de los granos de cacao

Para esta actividad se tuvo en cuenta la Norma Técnica Peruana NTP- 208.040:2008 Cacao sobre las buenas prácticas en el beneficio de cacao, propuesta por el Comité Técnico de Normalización de Cacao y Chocolate (2008). Se recolectó los frutos del fundo "San Luis" previa identificación de los cultivares CCN-51, ICS-95 y mezcla de híbridos; además, los frutos eran seleccionados, sin infecciones y otras imperfecciones que pudieran afectar los resultados. La cosecha se hizo el mismo día para todos los cultivares con el fin de que todos tengan el mismo proceso de beneficio y el factor ambiental sea igual para todos.

a. Almendra fresca

Se extrajo 450 g de almendra fresca (150 kg por cultivar), luego se separaron nueve muestras representativas (tres por cultivar), cada muestra de 0,5 kg de almendra fresca eran puestas en bolsas Ziplok (bolsa hermética con cierre deslizable, con el fin de conservar las características fisicoquímicas de la muestra) bien rotuladas. Estas fueron trasladadas al laboratorio de la UNAS para determinar la concentración de cadmio total en dos partes de la semilla (testa y cotiledón), haciendo un total de 18 análisis de cadmio. Es importante mencionar que el análisis de las almendras frescas se hizo sin mucílago.

b. Grano fermentado

145,5 kg de almendra fresca por cada cultivar (CCN-51, ICS-95 y mezcla de híbridos) se dispusieron de tres cajones fermentadores (cajón por cultivar). Se evaluó el proceso de fermentación desde el cuarto al séptimo día de duración, con el fin de obtener más de 80 % de granos fermentados para cada cultivar de cacao de manera transversal. Una vez obtenido este porcentaje de fermentación en campo se extrajo nueve muestras (tres muestras por cultivar). Cada muestra tenía un peso de 0,5 kg de grano de cacao fermentado mayor a 80 %, dispuestas en bolsas Ziplok bien rotuladas para determinar el contenido de Cd en el laboratorio presentes en dos partes de la semilla (cotiledón y testa), haciendo un total de 18 análisis.

c. Grano seco

La masa fermentada restante de cada cultivar pasó a la etapa de secado sometido a tres formas: concreto, asfalto y madera. El secado se hizo hasta que los granos alcanzaron un porcentaje de humedad de 8 %, siendo este último dato el indicador para la toma de las 27 muestras en grano seco (nueve por cultivar). Cada muestra tenía un peso de 0,25 kg de grano seco puestos en bolsas Ziplok bien rotuladas para el análisis de la concentración de Cd presentes en dos partes de la semilla (testa y cotiledón), haciendo un total de 54 análisis.

3.2.2.3. Análisis de cadmio de la testa y cotiledón del grano de cacao

Según el Laboratorio de Análisis de Suelos, Agua y Ecotoxicología de la UNAS se trabajó con la metodología por vía seca: a) Se pesó 2 g de muestra molida y se colocó en un crisol identificado previamente; b) Se ubicó los crisoles en la estufa a 105 °C por 24 horas; c) Se retiró las muestras de la estufa y se pesó; d) Se ubicó los crisoles en la mufla a 450 °C por ocho horas; e) Se apagó y se dejó enfriar antes de remover los crisoles; f) Se humedeció las muestras calcinadas con agua destilada; g) Se adicionó gradualmente 2 ml de HCl concentrado; h) Se ubicó los crisoles en plancha eléctrica y se calentó gradualmente hasta que el HCl se secó; i) Se añadió 2 ml de agua destilada y 2 ml de HCl concentrado; j) Se calentó gradualmente hasta que el líquido añadido se secó; k) Se añadió 2 ml de HCl concentrado y se calentó gradualmente con la finalidad de facilitar la disolución; l) Se trasladó el contenido del crisol con agua caliente y se filtró a una fiola de 100 ml; m) Finalmente se hizo lectura en espectrometría de absorción atómica.

3.2.3. Características para evaluar

3.2.3.1. Del grano fresco

Evaluación del cadmio total en testa y cotiledón de los granos de tres cultivares CCN-51, ICS-95 y mezcla de híbridos.

3.2.3.2. Del grano fermentado

Evaluación del cadmio total en testa y cotiledón de los granos de tres cultivares CCN-51, ICS-95 y mezcla de híbridos.

3.2.3.3. Del grano seco

Evaluación del cadmio total en testa y cotiledón de los granos de tres cultivares CCN-51, ICS-95 y mezcla de híbridos secados en concreto, asfalto y parihuelas de madera.

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Cadmio en el grano fresco de cacao

De acuerdo con el análisis de variancia para el contenido de cadmio en el grano fresco de cacao (Tabla 7), se muestra que: a) Existen diferencias estadísticas altamente significativas entre los tratamientos. b) Existen diferencias estadísticas altamente significativas para el factor partes del grano (A). c) Existen diferencias estadísticas altamente significativas para el factor cultivares de cacao (B). c) Existen diferencias estadísticas altamente significativas de interacción entre los factores partes del grano (A) y cultivares de cacao (B), siendo preciso hacer el estudio de los efectos simples de los factores en estudio. d) El coeficiente de variabilidad fue 6,07 %; es decir, existió excelente homogeneidad de los resultados.

Tabla 7. Análisis de variancia para el cadmio en el grano fresco

Fuente de variación	**GL**	**SC**	**CM**	**SIG**
Tratamientos	5	0,18	0,04	AS
A (Partes del grano)	1	0,02	0,02	AS
B (Cultivares de cacao)	2	0,14	0,07	AS
A x B	2	0,02	0,01	AS
Error Experimental	12	0,01	0,00	
Total	17	0,19		
CV (%)	6,07			

AS: Existe diferencias estadísticas al 1 % de probabilidad
NS: No existen diferencias estadísticas significativas

4.1.1. Efectos principales

Según la prueba de Duncan ($\alpha = 0,05$), el contenido de cadmio en la testa del grano de cacao (0,49 ppm) es estadísticamente mayor al contenido de cadmio en el cotiledón del grano de cacao (0,42 ppm) posterior a la cosecha (Tabla 8), coincidiendo con la Agencia de los Estados Unidos para el Desarrollo Internacional (USAID) y ALIANZA CACAO (s.f.), quienes reportan que con la separación de la testa, el contenido de cadmio tiende a disminuir en el grano, porque la testa cumple la función de cubrir al cotiledón y permite acumular más cadmio en la testa que en el cotiledón del grano.

Tabla 8. Prueba de Duncan (α = 0,05) para el contenido de cadmio en el grano del factor partes del grano de cacao (A)

Partes del grano (A)	Cadmio (ppm)	Significancia
Testa	0,49	a
Cotiledón	0,42	b

Tratamientos unidos por la misma letra en una columna, no existe significación estadística

De acuerdo con la prueba de Duncan (α = 0,05), los contenidos de cadmio en los granos de los cultivares de cacao se diferencian significativamente (Tabla 9). Igualmente, Chupillón (2017), menciona que las diferencias podrían responder a los mecanismos de absorción que tienen las plantas de cacao según su variabilidad genética en respuesta a la concentración del metal, considerando la siguiente variables como: tiempo de exposición entre el metal y la planta. Asimismo, de acuerdo con nuestros resultados (Tabla 9), estadísticamente el grano fresco del cultivar ICS-95 (0,58 ppm) absorbió más cadmio en comparación de los granos frescos de la mezcla de híbridos (0,42 ppm) y del cultivar CCN-51 (0,37 ppm), a pesar de que la concentración de cadmio en el suelo de dicha parcela (0,09 ppm) fue aritméticamente menor a la concentración de cadmio en los suelos de las parcelas de los demás cultivares (Tabla 6) y esto posiblemente según Prieto et al. (2009), es la respuesta de las plantas en bioacumular metales y cambia de acuerdo con la especie vegetal, debido a la interacción planta-raíz-metal y el metabolismo de la planta. Al respecto, el CCN-51 estadísticamente bioacumuló menos cadmio en sus granos frescos que los demás cultivares (Tabla 9), posiblemente se deba a la composición genética que hay entre los cultivares respecto a la interacción planta-raíz-metal o porque de acuerdo con Chupillón (2017), posiblemente las plantas estén presentando mecanismos de respuesta frente al cadmio, presentando el rechazo fisiológico o identificación entre el suelo y la raíz con el fin de minimizar su almacenamiento.

Tabla 9. Prueba de Duncan (α = 0,05) para el contenido de cadmio en el grano del factor clones de cacao (B)

Cultivares de cacao (B)	Cadmio (ppm)	Significancia
ICS-95	0,58	a
Mezcla de híbridos	0,42	b
CCN-51	0,37	c

Tratamientos unidos por la misma letra en una columna, no existe significación estadística

4.1.2. Efectos simples

En la Tabla 10, se presenta el análisis de variancia de los efectos simples para el contenido de cadmio en el grano fresco de cacao, se observa que: a) Existe efecto de interacción altamente significativo entre el factor partes del grano de cacao (A) con los cultivares CCN-51 e ICS-95., b) Existe efecto de interacción altamente significativo entre el factor cultivares de cacao (B) con la testa y el cotiledón del grano.

Tabla 10. Análisis de variancia de los efectos simples para el contenido de cadmio en el grano fresco

Fuente de variación	GL	SC	CM	Sig.
A en b_1	1	0,01	0,01	AS
A en b_2	1	0,03	0,03	AS
A en b_3	1	0,00*	0,00**	NS
B en a_1	2	0,11	0,05	AS
B en a_2	2	0,05	0,03	AS
Error experimental	12	0,01		

a_1 = Testa., a_2 = Cotiledón., b_1 = CCN-51., b_2 = ICS-95., b_3 = Mezcla de híbridos
AS: Existe diferencias estadísticas al 1 % de probabilidad
NS: No existen diferencias estadísticas significativas
*: 0,000267
**: 0,000267

Estadísticamente se bioacumuló más cadmio en la testa que en el cotiledón del grano fresco de cacao de los cultivares CCN-51 e ICS-95 (Tabla 11 y Figura 2), posiblemente porque la testa cubre al cotiledón y bioacumula más cadmio que el cotiledón.

Tabla 11. Prueba de Duncan ($\alpha = 0,05$) para el contenido de cadmio del factor partes del grano en interacción con CCN-51, ICS-95 y Mezcla de Híbridos

CCN-51			ICS-95			Mezcla de Híbridos		
Interacción	Cd (ppm)	Sig.	Interacción	Cd (ppm)	Sig.	Interacción	Cd (ppm)	Sig.
Testa	0,41	a	Testa	0,64	a	Testa	0,42	b
Cotiledón	0,33	b	Cotiledón	0,51	b	Cotiledón	0,43	b

Tratamientos unidos por la misma letra en una columna, no existe significación estadística

Pero esta diferencia significativa entre la testa y cotiledón (Tabla 11), no existe en el grano fresco de la mezcla de híbridos, porque los contenidos de cadmio fueron estadísticamente iguales. Sin embargo, que haya más cadmio en la testa que el cotiledón, podría ser a que el cadmio se divide en forma desigual por toda la planta (Tantaleán y Huauya, 2017) y el mucílago al estar adherida a la testa pudo influir en que esta acumule más cadmio que el cotiledón, porque según Dávila (2019), la mayor concentración de cadmio se almacena en el

jugo y la pulpa (mucilago) del cacao, coincidiendo con Mite et al. (2016), quienes reportan que en el mucílago se concentran hasta 8,90 ppm, la testa 2,86 ppm y en la almendra de cacao 2,55 ppm de cadmio.

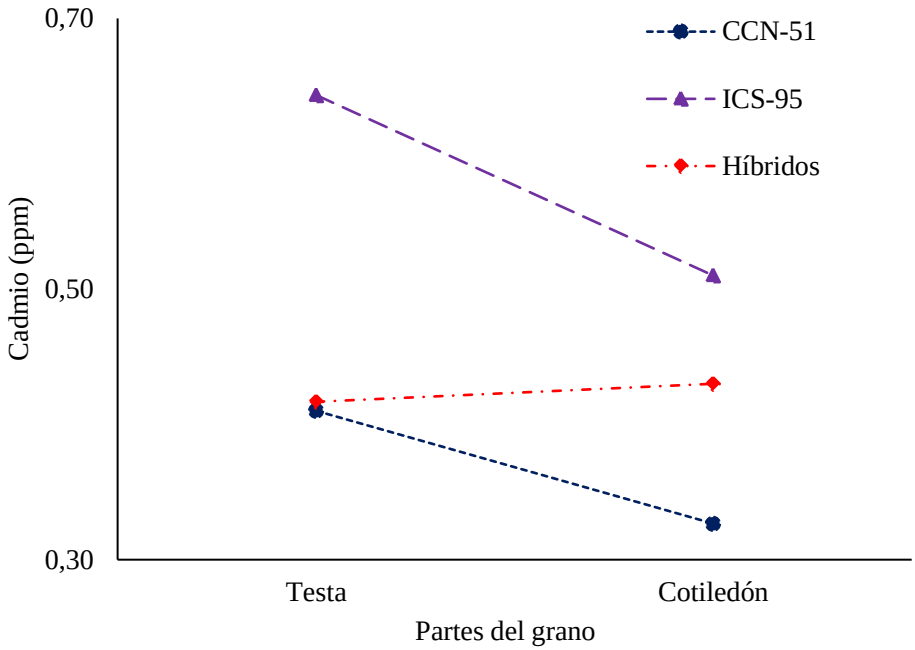

Figura 2. Contenido de cadmio del factor partes del grano en interacción con los cultivares CCN-51 e ICS-95 y mezcla de híbridos

Estadísticamente el cultivar ICS-95 acumuló más cadmio en ambas partes del grano fresco en comparación al contenido de cadmio obtenido por la mezcla de híbridos y cultivar CCN-51, porque según el Instituto de Cultivos Tropicales (ICT, 2018), existen diferencias genéticas en la absorción de cadmio. Asimismo, el contenido de cadmio en la testa del grano de los híbridos fue estadísticamente igual al contenido de cadmio en la testa del cultivar CCN-51, pero al eliminar la testa del grano de los híbridos, el contenido de cadmio es aritméticamente menor al contenido de cadmio del cotiledón y significativamente mayor al contenido de cadmio en el cotiledón del cultivar CCN-51 (Tabla 12), porque según IPNI (2015), el cadmio se distribuye de forma desigual en el fruto de cacao.

Tabla 12. Prueba de Duncan (α = 0,05) para el contenido de cadmio del factor cultivares de cacao en interacción con el cotiledón y testa del grano

Testa			Cotiledón		
Interacción	**Cd (ppm)**	**Sig.**	**Interacción**	**Cd (ppm)**	**Sig.**
ICS-95	0,64	a	ICS-95	0,51	a
Híbridos	0,42	b	Híbridos	0,43	b
CCN-51	0,41	b	CCN-51	0,33	c

Tratamientos unidos por la misma letra en una columna, no existe significación estadística

4.1.3. Tratamientos en estudio

De acuerdo con la Tabla 13, las concentraciones de cadmio acumulado en la testa y cotiledón del grano fresco del clon ICS-95 fueron estadísticamente mayores a las concentraciones de cadmio acumulado en la testa y cotiledón de los granos frescos de la mezcla de híbridos y clon CCN-51 respectivamente, porque muy aparte de que la bioacumulación de cadmio difiere por la constitución genética entre los clones y mezcla de híbridos; también puede ser a la diferencia en el contenido de grasa en sus semillas, porque según García (2010), el clon ICS-95 tiene 56 % de grasa en su semilla y el clon CCN-51, tiene 54 % de grasa en su semilla, coincidiendo con Barrueta (2013), quien sustenta que las plantas de cacao absorben lentamente los metales pesados y lo almacenan en los granos más grasosos. Al respecto, se podría deducir que el contenido de grasa de los granos de la mezcla de híbridos se encuentra en la parte intermedia, aunque es refutable porque no se tiene el análisis bromatológico de esas semillas.

Tabla 13. Prueba de Duncan (α = 0,05) para el contenido de cadmio en el grano de los tratamientos en estudio

Tratamientos		Cadmio	
Clave	**Descripción**	**(ppm)**	**Significancia**
T_5	Testa del ICS-95	0,64	a
T_2	Cotiledón del ICS-95	0,51	b
T_3	Cotiledón de la mezcla de híbridos	0,43	c
T_6	Testa de la mezcla de híbridos	0,42	c
T_4	Testa del CCN-51	0,41	c
T_1	Cotiledón del CCN-51	0,33	d

Tratamientos unidos por la misma letra en una columna, no existe significación estadística

4.2. Cadmio en el grano fermentado de cacao

De acuerdo con el análisis de variancia para el contenido de cadmio en el grano fermentado (Tabla 14), se muestra que: a) Existen diferencias estadísticas altamente significativas entre los tratamientos. b) Existen diferencias estadísticas altamente significativas para el factor partes del grano (A). c) Existen diferencias estadísticas altamente significativas para el factor cultivares de cacao (B). d) Existen diferencias estadísticas altamente significativas de interacción entre los factores partes del grano (A) y cultivares de cacao (B), siendo preciso hacer el estudio de los efectos simples de los factores en estudio. d) El valor del coeficiente de variabilidad fue 17,52 %; es decir, existió una buena homogeneidad de los resultados.

Tabla 14. Análisis de variancia para el cadmio en el grano fermentado

Fuente de variación	GL	SC	CM	SIG
Tratamientos	5	0,16	0,03	AS
A (Partes del grano)	1	0,12	0,12	AS
B (Cultivares de cacao)	2	0,02	0,01	AS
A x B	2	0,01	0,01	AS
Error Experimental	12	0,02	0,00	
Total	17	0,17		
CV (%)	17,52			

AS : Existe diferencias estadísticas al 1 % de probabilidad
NS : No existen diferencias estadísticas significativas

4.2.1. Efectos principales

Una vez finalizado la fermentación de los granos; la testa del grano de cacao estadísticamente sigue manteniendo más cadmio en comparación al contenido de cadmio existente en el cotiledón del grano (Tabla 15), porque tal vez, la planta de cacao adoptó estrategias de disminuir la acumulación de este metal según el orden del tejido en la planta, porque según Chan y Hale (2004), en la planta, el Cd^{2+} se aglomera en las raíz retenido por la vacuola de las células y solo una mínima cantidad es llevada a la parte aérea de la planta, donde se concentra en orden decreciente de tallos, hojas, frutos y almendras respectivamente, coincidiendo con González (2016), quién reporta que, estudios realizados en tejidos de plantas de cacao y suelos agrícolas, se ha llegado a determinar que el orden de acumulación de cadmio empieza desde la raíz, tronco, hoja, cáscara y almendra; en este último con un contenido mínimo en comparación a los otros tejidos de la planta. Al respecto y razón por el cual, la testa es la

barrera de protección del cotiledón ante este metal tóxico, lo que permite tener menor concentración de cadmio.

Tabla 15. Prueba de Duncan (α = 0,05) para el contenido de cadmio en el grano del factor partes del grano de cacao (A)

Partes del grano (A)	Cadmio (ppm)	Significancia
Testa	0,30	a
Cotiledón	0,13	b

Tratamientos unidos por la misma letra en una columna, no existe significación estadística

El contenido de cadmio en la testa y cotiledón con 0,49 y 0,42 ppm respetivamente en el grano fresco (Tabla 8), se reduce aritméticamente cuando el grano de cacao es fermentado (Figura 3a) en cajones de madera, adquiriendo concentraciones de 0,30 y 0,13 ppm respectivamente (Tabla 15). Es decir, se reduce en 39,46 y 68,52 % respectivamente del cadmio presente en la testa y cotiledón del grano fresco (Figura 3b), coincidiendo con Lanza et al. (2016), quienes concluyeron que el método de fermentación del cacao llega a modificar los niveles de los metales pesados y que la fermentación en madera podría disminuir la concentración de todos los metales (menos el cromo).

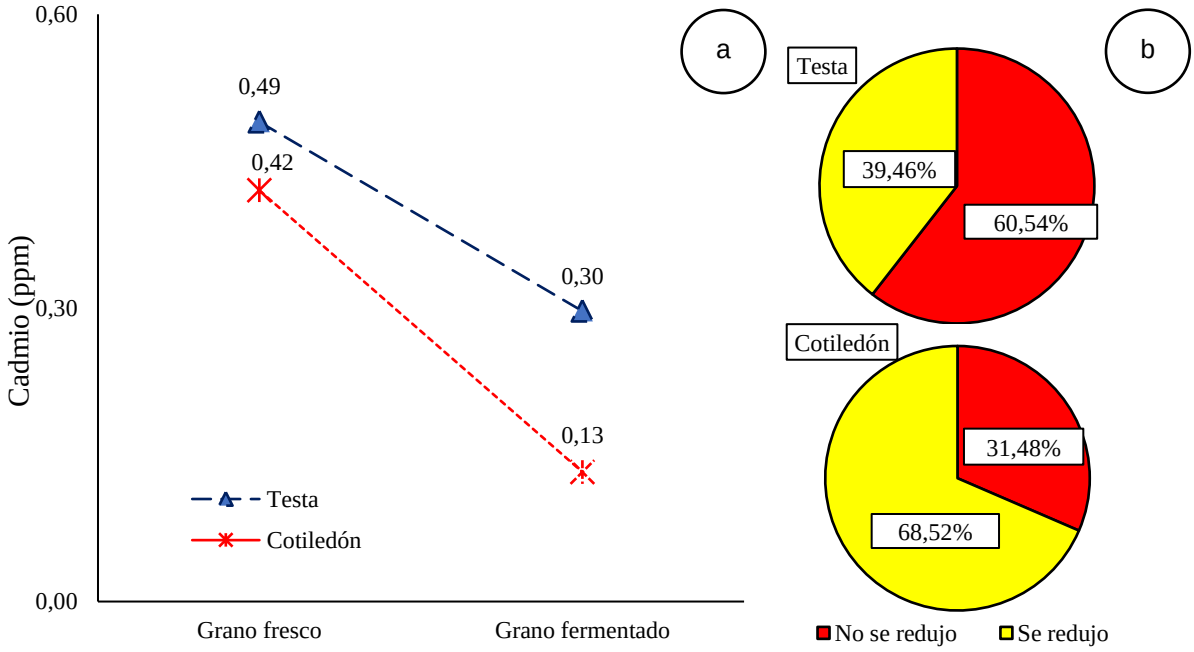

Figura 3. Contenidos de cadmio en las partes del grano: a. En grano fresco y fermentado., b. Porcentaje de reducción del cadmio

Aunque según Mite et al. (2010), existen estrategias simples, como retirar el mucilago del grano mediante el lavado antes que ingrese a la etapa de fermentación, ya que ayudan a reducir niveles considerables de contaminantes, sin alterar la calidad; o porque en la fermentación del grano existe cambios de temperatura y pH, tal como observaron Caballero et al. (2014), que durante los 7 días de fermentación, la temperatura de los granos en el fermentador oscila entre 32,1 y 40,6 °C, y los pH de la testa y cotiledón variaron; y según Ortega (2012), el cadmio es muy susceptible a las variaciones de temperatura y pH, los cuales inducen la liberación del cadmio; y el cadmio al estar liberado presente en la testa y cotiledón, según Arroyave et al. (2009), es transportado por el xilema mediante quelantes, hasta ser eliminado por volatilización.

Respecto al cotiledón, este al someterse a la fermentación redujo un mayor porcentaje de cadmio respecto al contenido de cadmio del grano fresco en comparación a la testa (Figura 3b), porque en la fermentación del grano, según Teneda (2016), la temperatura se incrementa; sin embargo, Caballero et al. (2014), comprobaron que, durante la fermentación, la temperatura del grano al final del proceso de la fermentación, la acidez del cotiledón aumenta y la acidez de la testa disminuye; es decir, hay mayor presencia de ácidos orgánicos en el cotiledón que en la testa, ácidos que son producidos según Beckett (2008), por bacterias acéticas que contribuyen a la muerte del embrión. Esta diferencia de ácidos orgánicos presentes en el cotiledón y la testa, podría explicar porque el cadmio se llegó a reducir más en el cotiledón que la testa (Figura 3b) respecto al contenido de cadmio en grano fresco (Figura 3a) y esto probablemente porque según Pomponi et al. (2006), una vez en el interior de la célula, los metales pesados como el cadmio son retenidos por ácidos orgánicos y luego compartimentalizados en la vacuola para evitar su efecto tóxico, porque de acuerdo con Viloria (2013), una vacuola que está dentro de la célula recoge los sustancias toxicas que resultan del metabolismo celular, se acerca a la membrana celular, se une a ella y desecha el contenido al exterior de la célula por ósmosis, difusión o diálisis.

El contenido de cadmio en el grano fresco del ICS-95 (0,58 ppm) fue estadísticamente mayor en comparación al contenido de cadmio en grano fresco de los demás cultivares (Tabla 9 y Figura 4a); pero, los granos de este cultivar al ser fermentados, reduce 68,97 % del contenido cadmio presente en su grano fresco (Figura 4b) en 0,18 ppm (Tabla 16 y Figura 4a); porque al parecer, los mecanismos de exclusión del cadmio en el grano de cacao de este cultivar, se favorecen cuando su grano es fermentado. Caso contrario sucede con los granos de la mezcla de híbridos cuando son fermentados, porque el cadmio de su grano fresco (0,42 ppm) es estadísticamente menor al contenido del cadmio del ICS-95 (Tabla 9 y Figura

4a) y al ser fermentados, su contenido de cadmio si bien se reduce en 37,70 % respecto contenido de cadmio en grano fresco y siendo el menor porcentaje de reducción a diferencia de los otros cultivares (Figura 4b), es estadísticamente menor al contenido de cadmio en el grano fermentado del ICS-95 (Tabla 16 y Figura 4a); porque al ser una mezcla de híbridos, existe diferentes genotipos con distintas reacciones a la fermentación de sus granos y posiblemente con una gran variabilidad alejada de la media (0,26 ppm), porque cada genotipo puede tener un diferente mecanismo de exclusión del cadmio del interior de sus granos.

Tabla 16. Prueba de Duncan (α = 0,05) para el contenido de cadmio en el grano del factor clones de cacao (B)

Cultivares de cacao (B)	Cadmio (ppm)	Significancia
Mezcla de híbridos	0,26	a
CCN-51	0,20	a b
ICS-95	0,18	b

tratamientos unidos por la misma letra en una columna, no existe significación estadística

El contenido de cadmio en el grano fresco del ICS-95 (0,58 ppm) fue estadísticamente mayor en comparación al contenido de cadmio en grano fresco de los demás cultivares (Tabla 9 y Figura 4a); pero, los granos de este cultivar al ser fermentados, reduce 68,97 % del contenido cadmio presente en su grano fresco (Figura 4b) en 0,18 ppm (Tabla 16 y Figura 4a); porque al parecer, los mecanismos de exclusión del cadmio en el grano de cacao de este cultivar, se favorecen cuando su grano es fermentado.

Caso contrario sucede con los granos de la mezcla de híbridos cuando son fermentados, porque el cadmio de su grano fresco (0,42 ppm) es estadísticamente menor al contenido del cadmio del ICS-95 (Tabla 9 y Figura 4a) y al ser fermentados, su contenido de cadmio si bien se reduce en 37,70 % respecto contenido de cadmio en grano fresco y siendo el menor porcentaje de reducción a diferencia de los otros cultivares (Figura 4b), es estadísticamente menor al contenido de cadmio en el grano fermentado del ICS-95 (Tabla 16 y Figura 4a); porque al ser una mezcla de híbridos, existe diferentes genotipos con distintas reacciones a la fermentación de sus granos y posiblemente con una gran variabilidad alejada de la media (0,26 ppm), porque cada genotipo puede tener un diferente mecanismo de exclusión del cadmio del interior de sus granos.

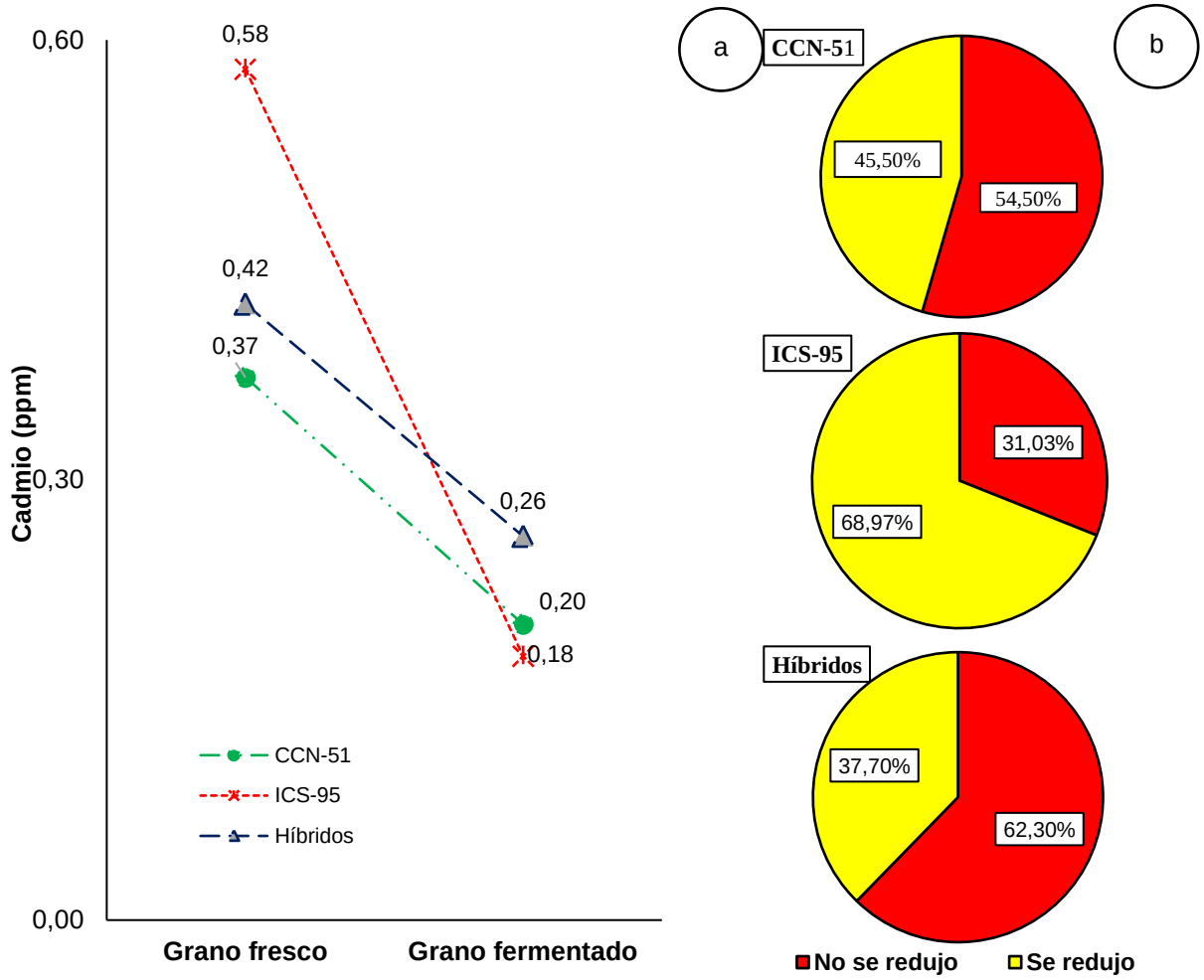

Figura 4. Contenidos de cadmio en los cultivares de cacao: a. En grano fresco y fermentado., b. Porcentaje de reducción del cadmio

Las concentraciones de cadmio presentes en los granos frescos del CCN-51, ICS-95 y mezcla de híbridos se reducen aritméticamente en 45,50; 68,97 y 37,70 % respectivamente cuando son fermentados (Figura 4b), manteniéndose la misma tendencia de los resultados de las partes de grano (Figura 3b) y porque según Luna et al. (2002), la fermentación es la acción equilibrada entre la temperatura, ácidos orgánicos, alcoholes, pH y humedad, para formar aromas y sabores propios del grano de cacao; razón por el cual, estas acciones se relacionaría con distintos factores que involucran la reducción del cadmio en el grano.

Ortega (2012), menciona que el cadmio es sensible a los cambios de temperatura y pH, lo que provoca su liberación; esta liberación del cadmio dentro de la célula según Rodríguez et al. (2008), permite ser secuestrados por ácidos orgánicos (ácidos cético, cítrico, etc.), aminoácidos, fitoquelatinas y metalotioneínas, para ser llevados a la vacuola y se la excrete al exterior, para ser volatilizadas, porque la importancia de la vacuola en la tolerancia

a los metales según González y Zapata (2008), ha sido probada en varios estudios. Al respecto de la fitoquelatinas, Clemens (2006), sostiene que es uno de los mecanismos más importantes de protección contra los metales pesados, y por su parte Pomponi et al. (2006), sustentan que las plantas que sobreexpresan la enzima fitoquelatina sintasa tienen mayor tolerancia frente al cadmio; razón por el cual, se puede deducir que el grano del cultivar ICS-95 tenía en su interior al momento de la fermentación, mayor presencia de esta enzima en comparación a los demás cultivares, reduciendo así un mayor porcentaje de cadmio presente en el grano fresco que los demás cultivares (Figura 4b).

Respecto al párrafo anterior, Rodríguez et al. (2008), sustentan que las plantas ante la presencia de los metales pesados han desarrollado diferentes estrategias para impedir su efecto tóxico y que en general, la tolerancia a los metales se basa en la disminución del transporte del cadmio hacia el interior de las células con una superior capacidad para retener a estos elementos y luego eliminarlos al exterior. Pero, estos mecanismos de tolerancia del grano de cacao ante el cadmio fueron evidentes al alterar físicamente su medio, aumentando la temperatura y el pH, lo cual constituyó alterar también la composición química del grano y así reducir el contenido de cadmio en una media aproximada de 50 % del cadmio presente en el grano fresco.

4.2.2. Efectos simples

En la Tabla 17, se observa que: a) Existe efecto de interacción altamente significativo entre el factor partes del grano de cacao (A) con los cultivares CCN-51, ICS-95 y mezcla de híbridos., b) Existe efecto de interacción altamente significativo entre el factor cultivares de cacao (B) con la testa.

Tabla 17. Análisis de variancia de los efectos simples para el contenido de cadmio en el grano fermentado

Fuente de variación	GL	SC	CM	Sig.
A en b_1	1	0,06	0,06	AS
A en b_2	1	0,01	0,01	AS
A en b_3	1	0,07	0,07	AS
B en a_1	2	0,03	0,02	AS
B en a_2	2	0,00	0,00	NS
Error experimental	12	0,02		

a_1 = Testa., a_2 = Cotiledón., b_1 = CCN-51., b_2 = ICS-95., b_3 = Mezcla de híbridos
AS: Existe diferencias estadísticas al 1 % de probabilidad
NS: No existen diferencias estadísticas significativas

Estadísticamente existió menos contenido de cadmio en el cotiledón en comparación a la testa del grano fermentado del CCN-51, ICS-95 y mezcla de híbridos (Tabla 18 y Figura 5), porque pueden relacionarse posiblemente con tres factores: el primero, a la barrera de protección que ejerce la testa sobre el cotiledón, acumulando mayor porcentaje de cadmio y porque en la planta, el cadmio se concentra en orden decreciente; el segundo, al fermentar el grano hay una mayor presencia de ácidos orgánicos en el cotiledón que en la testa, ácidos que secuestran el cadmio y ser desechados al exterior y la tercera, en la fase de la fermentación algunos nutrientes e incluso metales son transportados por flujo de masa del cotiledón a la testa (Falcón, 2019).

Tabla 18. Prueba de Duncan (α = 0,05) para el contenido de cadmio del factor partes del grano en interacción con CCN-51, ICS-95 y Híbridos

CCN-51			ICS-95			Híbridos		
Interacción	**Cd (ppm)**	**Sig.**	**Interacción**	**Cd (ppm)**	**Sig.**	**Interacción**	**Cd (ppm)**	**Sig.**
Testa	0,30	a	Testa	0,22	a	Cotiledón	0,37	a
Cotiledón	0,10	b	Cotiledón	0,14	b	Testa	0,16	b

Tratamientos unidos por la misma letra en una columna, no existe significación estadística

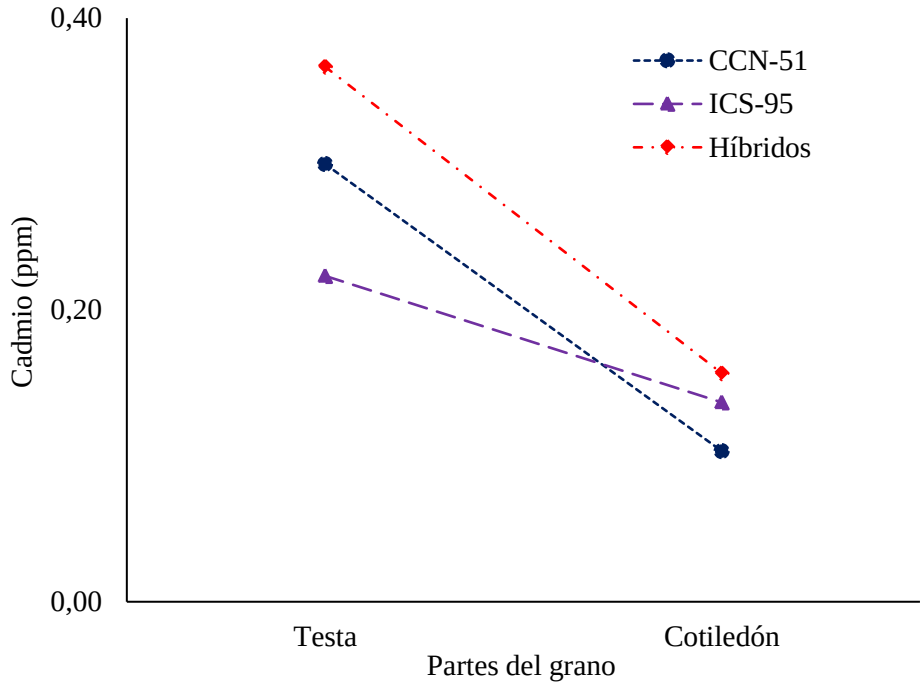

Figura 5. Contenido de cadmio del factor partes del grano en interacción con los cultivares CCN-51 e ICS-95 y mezcla de híbridos

Estadísticamente las testas de los granos fermentados de la mezcla de híbridos y CCN-51 acumularon más cadmio a la testa del grano fermentado del ICS-95 (Tabla 19), porque posiblemente la estrategia de evitar la toxicidad de cadmio por parte del ICS-95 sea

reforzada en la fermentación a diferencia de los demás cultivares. Sin embargo, esta diferencia entre cultivares sólo existe en la testa; porque los contenidos de cadmio de los cotiledones en los cultivares, fueron estadísticamente iguales (Tabla 19) y, difiriendo de los resultados del contenido de cadmio en los cotiledones de los granos frescos de los cultivares, donde las diferencias fueron estadísticas (Tabla 12), porque en la fermentación hay cambios de temperatura y pH del medio de los granos. Estos cambios, incide en la liberación del cadmio de los compuestos, porque según Ortega (2012), este metal es sensible a la temperatura y pH; razón por el cual, este metal es secuestrado por ácidos orgánicos y según Portillo et al. (2006), estos ácidos se incrementan más en el cotiledón que en la testa en la fermentación del grano. En base a esos factores, es posible deducir que las concentraciones de ácidos fueron similares en los cotiledones de los tres cultivares; pero diferentes en las testas de los tres cultivares.

Tabla 19. Prueba de Duncan (α = 0,05) para el contenido de cadmio del factor cultivares de cacao en interacción con el cotiledón y testa del grano

Testa			Cotiledón		
Interacción	**Cd (ppm)**	**Sig.**	**Interacción**	**Cd (ppm)**	**Sig.**
Híbridos	0,37	a	Híbridos	0,16	a
CCN-51	0,30	a	ICS-95	0,14	a
ICS-95	0,22	b	CCN-51	0,10	a

Tratamientos unidos por la misma letra en una columna, no existe significación estadística

4.2.3. Tratamientos en estudio

Estadísticamente los contenidos de cadmio de los cotiledones en los granos frescos del CCN-51 y mezcla de híbridos fueron mayores en contraste a los otros tratamientos bajo estudio. Igualmente, estadísticamente el contenido de cadmio en el cotiledón del ICS-95 fue mayor en comparación a los contenidos de cadmio en las testas de los cultivares; siendo estos últimos, estadísticamente iguales (Tabla 20). Los cotiledones de los cultivares retuvieron mayor cadmio que sus testas coincidiendo con los resultados obtenidos por INIAP (s.f.), como se citó en USAID y ALIANZA CACAO (s.f.), en el análisis de presencia de cadmio en granos sin cáscara (sólo cotiledón) y granos con cáscara (testa más cotiledón) de cacao sembrados en suelos con niveles de cadmio variable, reportando que la testa contenía 4,5 veces más cadmio que el cotiledón; estos resultados, se dan porque el cotiledón tiene mayor capacidad de eliminar metales pesados que la testa cuando son fermentados.

Tabla 20. Prueba de Duncan (α = 0,05) para el contenido de cadmio en el grano de los tratamientos en estudio

Tratamientos		Cadmio	
Clave	**Descripción**	**(ppm)**	**Significancia**
T_3	Cotiledón de la mezcla de híbridos	0,37	a
T_1	Cotiledón del CCN-51	0,30	a
T_2	Cotiledón del ICS-95	0,22	b
T_6	Testa de la mezcla de híbridos	0,16	c
T_5	Testa del ICS-95	0,14	c
T_4	Testa del CCN-51	0,10	c

Tratamientos unidos por la misma letra en una columna, no existe significación estadística

4.3. Cadmio en el grano seco de cacao

De acuerdo con el análisis de variancia para el contenido de cadmio en el grano seco de cacao (Tabla 21), se muestra que: a) Existen diferencias estadísticas altamente significativas entre los tratamientos. b) Existen diferencias estadísticas altamente significativas para los factores partes del grano (A), cultivares de cacao (B) y modos de secado (C). c) Existe diferencias estadísticas altamente significativas de interacción entre los factores partes del grano, cultivares de cacao y modos de secado. d) El coeficiente de variabilidad fue igual a 13,18 %; es decir, existió muy buena homogeneidad de los resultados.

Tabla 21. Análisis de variancia para el cadmio en el grano fermentado

Fuente de variación	GL	SC	CM	SIG
Tratamientos	17	3,41	0,20	AS
A (Partes del grano)	1	1,56	1,56	AS
B (Cultivares de cacao)	2	0,84	0,42	AS
C (Modos de secado)	2	0,49	0,25	AS
A x B	2	0,39	0,20	AS
A x C	2	0,02	0,01	NS
B x C	4	0,05	0,01	NS
A x B x C	4	0,06	0,01	AS
Error Experimental	36	0,18	0,01	
Total	53	3,59		
CV (%)	13,18			

AS : Existe diferencias estadísticas al 1 % de probabilidad
NS : No existen diferencias estadísticas significativas

4.3.1. Efectos principales

Los análisis reportaron que estadísticamente hubo mayor concentración de cadmio en la testa que en el cotiledón del grano secado (Tabla 22), tan igual que en la evaluación de grano fresco (Tabla 8) y grano fermentado (Tabla 15) porque está relacionado con algunos mecanismos de tolerancia del cacao hacía el cadmio como ya lo mencionamos en los incisos de grano fresco y fermentados. Uno de los mecanismos tiene que ver con la función de la testa, que es cubrir al cotiledón; además, la antecede y según Herrera (2011), la acumulación de cadmio sigue un orden descendente (raíz, tallo, hojas y fruto) en los tejidos de la planta del cacao; siendo esta una posible razón por el cual se acumuló más cadmio en la testa. Al respecto, Miranda et al. (2008), encontraron que, en las hojas más viejas de una planta de cacao, se acumuló la mayor concentración de cadmio total a diferencia de las hojas jóvenes, debido a la presencia de péptidos; es decir, existió mayor concentración de péptidos en la testa que en el cotiledón; en especial, péptidos ricos en cisteína, porque Montero et al. (2018), demostraron que cuando las células se encuentran libres de cadmio, los péptidos ricos en cisteína son cercanos a cero y se incrementa la concentración de péptidos, conforme aumenta la concentración de cadmio, porque estos péptidos según Shah y Nongkynrh (2007), son moléculas encargadas de la quelación del cadmio. Otro factor diferencial, es que en el cotiledón hay mayor contenido de ácidos orgánicos que en la testa, porque varios autores sostienen que los ácidos son encargadas de secuestrar el cadmio para que la planta las elimine.

Tabla 22. Prueba de Duncan ($\alpha = 0,05$) para el contenido de cadmio en el grano del factor partes del grano de cacao (A)

Partes del grano (A)	Cadmio (ppm)	Significancia
Testa	0,71	a
Cotiledón	0,37	b

Tratamientos unidos por la misma letra en una columna, no existe significación estadística

Los contenidos de cadmio en la testa y el cotiledón del grano fresco de 0,49 y 0,42 ppm respectivamente (Tabla 9 y Figura 6a) se redujeron a 39 y 69 % respectivamente del cadmio en el grano fresco (Figura 6b). Pero, al ser secados, el cadmio en la testa y cotiledón se incrementaron de 0,30 y 0,13 ppm respectivamente (Figura 6a) a 0,71 y 0,37 ppm respectivamente (Tabla 22 y Figura 6a); incrementándose en 138 y 178 % (Figura 6b).

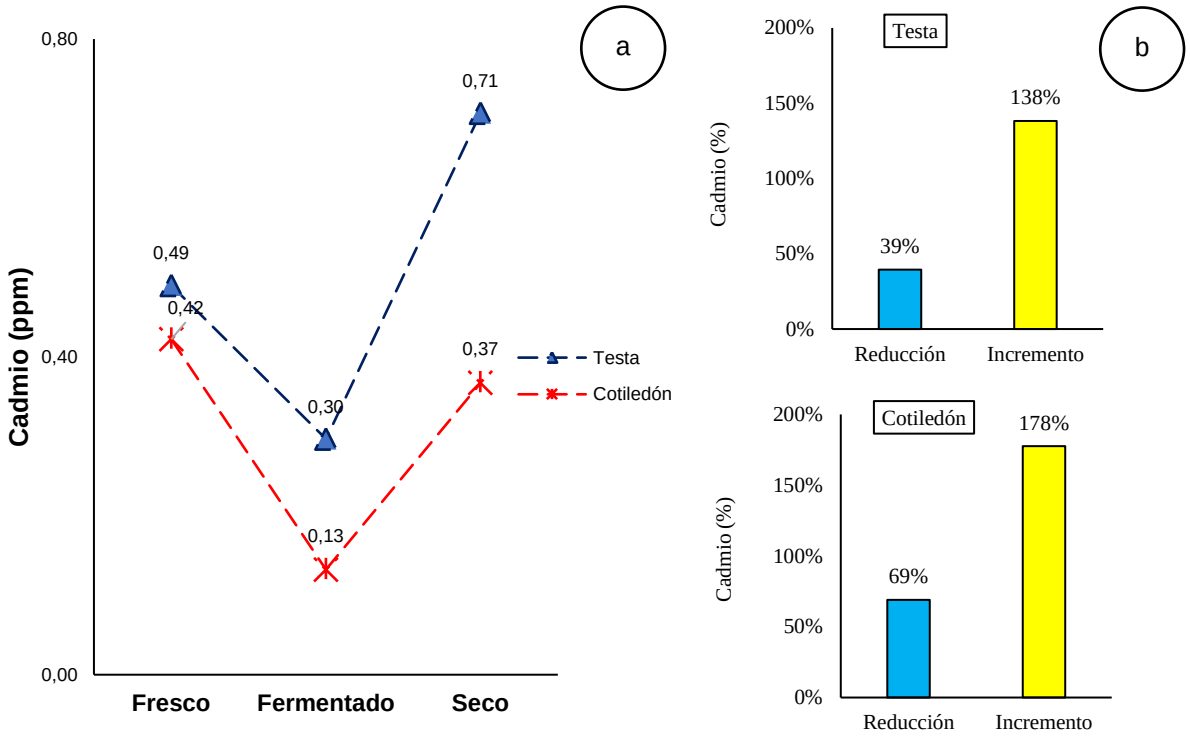

Figura 6. Contenidos de cadmio en las partes del grano: a. En grano fresco, fermentado y secado., b. Porcentaje de reducción del cadmio en la fermentación y porcentaje de incremento de cadmio en el secado

En el proceso de fermentación, los granos de cacao reducen los niveles de cadmio. Pero, al secar los granos poniéndolos en un área específica de concreto y asfalto que estaban al borde de la carretera a Pucallpa; el cadmio se incrementó en el grano de cacao y esto porque según Reynel et al. (2016), el cacao posee la particularidad de ser higroscópico, ya que capta olores y sustancias que se acumulan en el interior de la semilla, porque al exponerlos al ambiente mediante el secado natural sobre el asfalto, están propensos a contaminarse fácilmente con los gases del asfalto, gasolina y diésel que expulsan las unidades de combustión motorizada; además, según Arévalo-Hernández et al. (2017), el cadmio se concentra en los granos por su constitución grasosa, como los granos de cacao que según Reyes y Capriles (2000), son ricas en grasa.

En la fermentación y el secado, existen diferentes procesos físicos, químicos y biológicos en torno y, dentro del grano como el pH y la temperatura que influyen directamente en la bromatología del grano y otros. Sin embargo, indirectamente esos cambios influyen en el contenido del cadmio en el grano, debido a que este elemento es muy sensible a cambios de temperatura y pH, liberalizándolo de compuestos en la célula; razón por el cual, hace fácil la tarea de los ácidos orgánicos, aminoácidos, fitoquelatinas y metalotioneínas, porque según

Domínguez et al. (2004), estos secuestran al cadmio para ser llevado a la vacuola y prevenir su toxicidad. Por eso, cuando se finaliza la fermentación según Steinau (2017), comprobó que la acidez en el cotiledón aumenta y la acidez de la testa muestra una disminución, y durante el secado, la acidez se incrementa en la testa y en el cotiledón se reduce, porque según Nogales et al. (2006); Ortiz et al. (2009), hay pérdida de ácidos volátiles en el cotiledón que se evaporan en el agua a través de la testa del grano; razón por el cual, en la fermentación el cotiledón reduce un 69 % del cadmio presente en el grano fresco más que la testa; y en el secado, en el cotiledón se incrementa un 178 % del cadmio presente en el grano fermentado más que la testa (Figura 6b), debido a la baja concentración de ácidos orgánicos. Sin embargo, la testa acumuló más cadmio que el cotiledón, debido a una mayor presencia de péptidos ricos en cisteína en la testa; porque estos péptidos, de acuerdo con Sun et al. (2008), son responsables de la quelación del cadmio.

De acuerdo con los resultados del cadmio presente en el grano fresco de los cultivares (Tabla 9), suponíamos que la diferencia entre los cultivares se debía al contenido de grasa, porque el ICS-95 acumuló más cadmio que el CCN-51 y según García (2010), el ICS-95 tiene 2 % grasa de más en su semilla y el CCN-51. Pero, al observar que los granos del ICS-95 cuando fueron fermentados y secados, estadísticamente concentraron menos cadmio en comparación a los cultivares (Tabla 23), porque los granos de cacao sufrieron transformaciones importantes en la fermentación y el secado, lo que favoreció estadísticamente al ICS-95 a concentrar menos cadmio que el cultivar CCN-51 y mezcla de híbridos, y desfavoreció a la mezcla de híbridos, porque acumuló estadísticamente más cadmio que los demás cultivares. Desfavoreció en el resultado, por la diferencia de los genotipos de cacao que hay en la mezcla; que, a su vez, poseen distintos mecanismos de tolerancia y exclusión al cadmio, siendo menos eficaces; o a una mayor concentración de péptidos ricos en cisteína, que son responsables de la quelación del cadmio y acumularla más en comparación al CCN-51 e ICS-95, coincidiendo con Arévalo-Hernández et al. (2017), quienes concluyeron que los híbridos alcanzaron mayor concentración de cadmio en comparación a los otros clones.

Tabla 23. Prueba de Duncan ($\alpha = 0,05$) para el contenido de cadmio en el grano del factor clones de cacao (B)

Cultivares de cacao (B)	**Cadmio (ppm)**	**Significancia**
Mezcla de híbridos	0,69	a
CCN-51	0,54	b
ICS-95	0,38	c

Tratamientos unidos por la misma letra en una columna, no existe significación estadística

Los contenidos de cadmio en los granos fresco de CCN-51, ICS-95 y mezcla de híbridos fueron 0,37; 0,58 y 0,42 ppm respectivamente (Tabla 9 y Figura 7a); sin embargo, cuando estos granos fueron fermentados, el contenido de cadmio del grano fresco se redujo a 50, 69 y 38 % respectivamente (Figura 7b), alcanzando niveles de cadmio de 0,20; 0,18 y 0,26 ppm respectivamente (Tabla 16 y Figura 7a). Al respecto, en la fermentación se originan cambios bioquímicos en el interior del grano, pero reduciendo indirectamente hasta en un 50 % del cadmio en los granos frescos; además, los granos fueron fermentados en cajones de madera, aislándolos de agentes externos que contaminen, como el aire, porque según Ramírez (2002), la concentración de cadmio en el aire de áreas rurales varía 0,1 a 6,0 ppm, y el 41 % llega a la superficie por deposición.

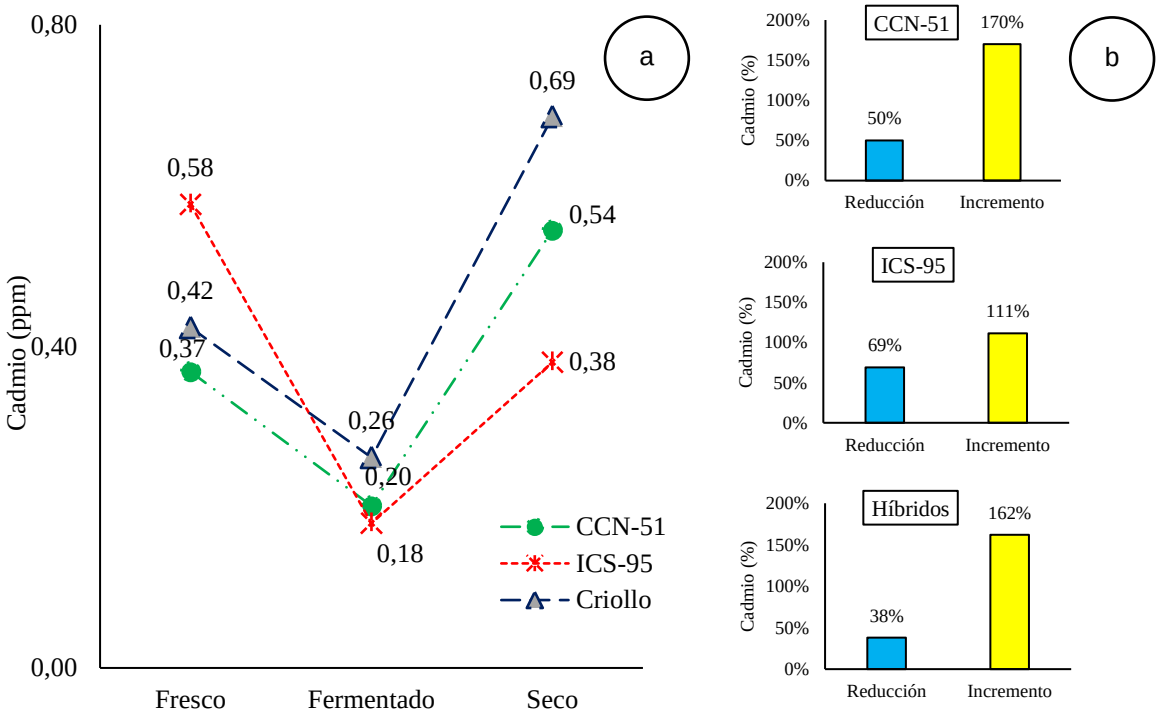

Figura 7. Contenidos de cadmio en los cultivares de cacao: a. En grano fresco, fermentado y secado., b. Porcentaje de reducción del cadmio en la fermentación y porcentaje de incremento de cadmio en el secado

Pero cuando los granos del CCN-51, ICS-95 y mezcla de híbridos son expuestos al ambiente para ser secados sobre cemento, asfalto y madera, pasan de 0,20; 0,18 y 0,26 ppm de cadmio a 0,54; 0,38 y 0,69 ppm de cadmio respectivamente (Figura 7a), incrementándose en 170, 111 y 162 % del cadmio presente en los granos fermentados respectivamente (Figura 7b), y esto porque una de las desventajas del secado de los granos de cacao sobre carreteras o aceras según Reyes y Capriles (2000), es que expone a los granos al pisoteo, a la contaminación con detritus de animales, absorción de malos olores, adhesión de

polvo, y también según Reynel et al. (2016), a los gases del asfalto, a la gasolina y diésel que expulsan los vehículos; siendo estos últimos según Volke et al. (2005), una fuente antropogénica del cadmio que son transportados por el viento y agua, para ser depositados y adheridos a la materia orgánica, y excrementos de animales presentes en la superficie.

Los granos de cacao secados en concreto y asfalto acumularon 0,62 y 0,59 ppm de cadmio respectivamente y, además estadísticamente acumularon más cadmio que los granos secados en madera (Tabla 24), porque el concreto era la acera o parte lateral del asfalto vehicular de Tingo María – Pucallpa, y el asfalto, eran parte del asfalto vehicular de Tingo María-Pucallpa. Es decir, ambos espacios de secado colindaban con una vía donde pasan cientos de automóviles; razón por el cual, los granos de cacao fueron más susceptibles a contaminarse con cadmio, porque de acuerdo con Ramírez (2002), las partículas de polvo de caucho que provienen de los neumáticos de los coches contienen cadmio; asimismo, estas ruedas están galvanizadas con zinc, y según Lara (2017), el cadmio por afinidad química siempre está junto al zinc; además, de acuerdo con Csuros y Csuros (2002), el cadmio normalmente está como impureza en minerales de zinc al igual que en el carbón y en el petróleo.

Al respecto, una de las actividades más comunes de los productores de la zona, es la costumbre de utilizar el asfalto para secar los granos de cacao, y según Martínez (2010), el asfalto es el último derivado de la destilación del petróleo en crudo que posee trazas de metales pesados, contribuyendo de esta forma en el incremento de la acumulación de metales pesados en los granos; además, al poner en contacto a los granos con el concreto y asfalto, también se ponen en contacto con el óxido de cadmio que según el Ministerio de Salud (MINSA, 2013), es adherido a pequeñas partículas que han recorrido largas distancias antes de volver al suelo como polvo, lluvia o nieve.

Aunque de acuerdo con Rodríguez et al. (2008), el cadmio al ser considerado un elemento no esencial, se considera que no existen mecanismos de entrada propio para dicho elemento; pero, como el grano de cacao es higroscópico y al estar expuesto en el ambiente para ser secado, son más susceptibles en absorber humedad del ambiente y según la Fundación Vasca para la Seguridad Agroalimentaria (ELIKA, 2014), el cadmio está en diferentes formas químicas inorgánicas biodisponibles en el medio acuático, como hidróxido de cadmio, carbonato de cadmio y sulfuro de cadmio, y otros compuestos inorgánicos insolubles unidos al cadmio; además, el cacao es también susceptible a contaminarse con sustancias orgánicas e inorgánicas, porque según Christensen y Haung (1999), el cadmio puede encontrarse adsorbido en superficies orgánicas e inorgánicas que forman parte de minerales; ahora, una vez que el cadmio e ingresa al grano, los transportadores específicos (proteínas) de

calcio, zinc y hierro, serán las responsables según Guerinot (2000), del ingreso del metal a la célula vegetal. Estadísticamente los granos secados en madera acumularon menos cadmio en comparación al contenido de cadmio en los granos de cacao secados en concreto y cemento (Tabla 24); resultados que no coincidieron con Reynel et al. (2016), quienes no encontraron diferencias significativas en el contenido de cadmio en las muestras de cacao provenientes secados en asfalto, carretera de concreto, tendal concreto, secadora a gas, secadora a diésel y marquesina de madera, y cuyos valores de cadmio fueron menores a 0,02 ppm; posiblemente porque los granos eran provenientes de genotipos tipo (nacional x criollo) con mecanismos de tolerancia y exclusión al cadmio más eficientes, coincidiendo con Lara (2017), quien observó que, los granos de cacao nacional secados en estufa, cemento y asfalto acumularon menos cadmio que los granos en CCN-51.

Tabla 24. Prueba de Duncan (α = 0,05) para el contenido de cadmio en el grano del factor tipos de secado (C)

Modos de secado (C)	**Cadmio (ppm)**	**Significancia**
Concreto	0,62	a
Asfalto	0,59	a
Madera	0,40	b

Tratamientos unidos por la misma letra en una columna, no existe significación estadística

4.3.2. Efectos simples

En la Tabla 25, se observa que: a) Existe efecto de interacción altamente significativo entre el factor partes del grano de cacao con los cultivares CCN-51, ICS-95 y mezcla de híbridos; y con los métodos de secado en concreto, asfalto y madera., b) Existe efecto de interacción altamente significativo entre el factor cultivares de cacao con la testa; y con los métodos de secado en concreto, asfalto y madera., c) Existe efecto de interacción altamente significativo entre el factor métodos de secado con la testa y cotiledón; y con los cultivares CCN-51, ICS-95 y mezcla de híbridos.

Tabla 25. Análisis de variancia de los efectos simples para el contenido de cadmio en el grano seco

Fuente de variación	GL	SC	CM	Sig.
A en b_1	1	0,58	0,58	AS
A en b_2	1	0,07	0,07	AS
A en b_3	1	1,30	1,30	AS
A en c_1	1	0,61	0,61	AS
A en c_2	1	0,62	0,62	AS
A en c_3	1	0,35	0,35	AS
B en a_1	2	1,19	0,60	AS
B en a_2	2	0,04	0,02	NS
B en c_1	2	0,27	0,14	AS
B en c_2	2	0,15	0,08	AS
B en c_3	2	0,12	0,06	AS
C en a_1	2	0,36	0,18	AS
C en a_2	2	0,15	0,08	AS
C en b_1	2	0,27	0,14	AS
C en b_2	2	0,15	0,08	AS
C en b_3	2	0,12	0,06	AS
Error experimental	36	0,18	0,01	

a_1 = Testa., a_2 = Cotiledón., b_1 = CCN-51., b_2 = ICS-95., b_3 = Híbridos., c_1 = Concreto., c_2 = Asfalto., c_3 = Madera
AS: Existe diferencias estadísticas al 1 % de probabilidad
NS: No existe diferencias estadísticas significativas

La testa del grano cumple la función de ser una barrera de protección externa e interna del cotiledón del grano, y a la vez acumula más cadmio y evita en lo posible, una mayor contaminación de cadmio en el cotiledón porque en la testa se produce más péptidos ricos en cisteína como fitoquelatinas y glutatión (encargadas en la quelación del cadmio); razón por el cual, estadísticamente las testas de los tres cultivares de cacao y las testas secados en concreto, asfalto y parihuelas de madera, acumularon más cadmio que los cotiledones de los tres cultivares y cotiledones secados en concreto, asfalto y parihuelas de madera.

Tabla 26. Prueba de Duncan (α = 0,05) para el contenido de cadmio del factor partes del grano de cacao (A) en interacción con los cultivares de cacao (B) y modos de secado (C)

Interacción	CCN-51		ISC-95		Híbridos	
	(ppm)	Sig.	(ppm)	Sig.	(ppm)	Sig.
Testa	0,72	a	0,44	a	0,95	a
Cotiledón	0,36	b	0,32	b	0,42	b
Interacción	**Concreto**		**Asfalto**		**Madera**	
	(ppm)	Sig.	(ppm)	Sig.	(ppm)	Sig.
Testa	0,80	a	0,77	a	0,54	a
Cotiledón	0,44	b	0,40	b	0,26	b

Tratamientos unidos por la misma letra en una columna, no existe significación estadística

En la Tabla 27, se observa que los granos del ICS-95 secados en concreto y asfalto, toleran y excluyen más a contaminarse con cadmio, porque estadísticamente acumularon menos cadmio en comparación a los granos del CCN-51 y mezcla de híbridos secados en concreto y asfalto. Los granos de la mezcla de híbridos son más susceptibles a la contaminación del cadmio al ser secados en asfalto y madera, porque estadísticamente acumularon más cadmio que los granos del CCN-51 e ICS-95 secados en asfalto y madera. Asimismo, se muestra que los granos del CCN-51 e ICS-95 secados en parihuelas de madera, son más tolerantes a la contaminación del cadmio, porque estadísticamente acumularon menos cadmio en comparación a los granos de la mezcla de híbridos secados en parihuelas de madera. Es decir, los cultivares de cacao influyen en la acumulación de cadmio de los granos de cacao en los tres modos de secado, porque difieren en la concentración de cadmio y estas diferencias se dan porque de acuerdo con Chupillón (2017), los mecanismos de absorción varían según la variabilidad genética, la disponibilidad del cadmio y el tiempo de exposición. Al hacer comparaciones estadísticas de los contenidos de cadmio en las testas y cotiledones de los granos frescos de la mezcla de híbridos, CCN-51 e ICS-95, encontramos que estadísticamente el ICS-95 acumuló más cadmio en la testa y en el cotiledón, en comparación a los contenidos de cadmio en la testa y cotiledón del CCN-51 y mezcla de híbridos (Tabla 12). Sin embargo, después de la fermentación (Cuadro 19) y el secado, la testa del grano del ICS-95 acumuló menos cadmio en comparación a lo acumulado por las testas de los granos fermentados y secados del CCN-51 y mezcla de híbridos (Tabla 27); es decir, existe influencia de los cultivares en la concentración de cadmio sobre la testa del grano, porque posiblemente en la fermentación y el secado, la testa del ICS-95 repotencia sus mecanismos de tolerancia y exclusión al cadmio que las testas del

CCN-51 y mezcla de híbridos; caso contrario, sucede con las testas de los granos de la mezcla de híbridos, quiénes estadísticamente acumularon más cadmio que las testas del CCN-51 e ICS-95, porque posiblemente generan más péptidos ricos en cisteína a diferencia de los dos cultivares en estudio. Pero, los contenidos de cadmio en los cotiledones de los cultivares, no se diferenciaron significativamente (Tabla 27); es decir, no hay influencia de los cultivares sobre el contenido de cadmio en el cotiledón del grano, porque sus testas se encargan de acumular y retener el cadmio absorbido por el grano en mayor parte, favorecido por los procesos físicos, químicos y biológicos en el secado.

Tabla 27. Prueba de Duncan ($\alpha = 0,05$) para el contenido de cadmio del factor cultivares de cacao (B) en interacción con los modos de secado (C) y con las partes del grano de cacao (A)

Interacción	**Concreto**		**Asfalto**		**Madera**	
	(ppm)	**Sig.**	**(ppm)**	**Sig.**	**(ppm)**	**Sig.**
Híbridos	0,73	a	0,76	a	0,57	a
CCN-51	0,64	a	0,62	b	0,37	b
ICS-95	0,49	b	0,39	c	0,27	b

Interacción	**Testa**		**Interacción**	**Cotiledón**	
	(ppm)	**Sig.**		**(ppm)**	**Sig.**
Híbridos	0,95	a	Híbridos	0,42	a
CCN-51	0,72	b	CCN-51	0,36	a
ICS-95	0,44	c	ICS-95	0,32	a

Tratamientos unidos por la misma letra en una columna, no existe significación estadística

En la Tabla 28, se muestra que hay influencia estadística de los modos de secado en el contenido de cadmio sobre los cultivares de cacao, y sobre la testa y cotiledón del grano de cacao, esto porque como ya se mencionó anteriormente, el concreto y asfalto estaban cercanos al asfaltado de la carretera Tingo María-Pucallpa; mientras que la parihuela de madera estaba alejado de este asfaltado y según Pacheco (2009), el asfaltado produce gases, vapores y humos que contienen sustancias tóxicas, como el benceno, arsénico, sulfuro de hidrógeno y el cadmio, tal como afirman Tantalean y Huauya (2017), quienes indican que la contaminación de los granos con cadmio se da cuando se trabaja frecuentemente cerca de zonas urbanas en las que incrementa el riesgo de contaminarse con restos de combustible y asfalto; razón por el cual, los granos de los tres cultivares, las testas y cotiledones de los granos secados en concreto y asfalto, acumularon más cadmio en comparación a los tres cultivares, la testa y cotiledón secados en madera respectivamente (Tabla 26).

Tabla 28. Prueba de Duncan (α = 0,05) para el contenido de cadmio en el grano de cacao del factor modos de secado (C) en interacción con los cultivares de cacao (B) y partes del grano de cacao (A)

Interacción	CCN-51		ISC-95		Híbridos	
	(ppm)	Sig.	(ppm)	Sig.	(ppm)	Sig.
Concreto	0,64	a	0,49	a	0,76	a
Asfalto	0,62	a	0,39	a	0,73	a
Madera	0,37	b	0,27	b	0,57	b

Interacción	Testa		Interacción	Cotiledón	
	(ppm)	Sig.		(ppm)	Sig.
Concreto	0,80	a	Concreto	0,44	a
Asfalto	0,77	a	Asfalto	0,40	a
Madera	0,54	b	Madera	0,26	b

Tratamientos unidos por la misma letra en una columna, no existe significación estadística

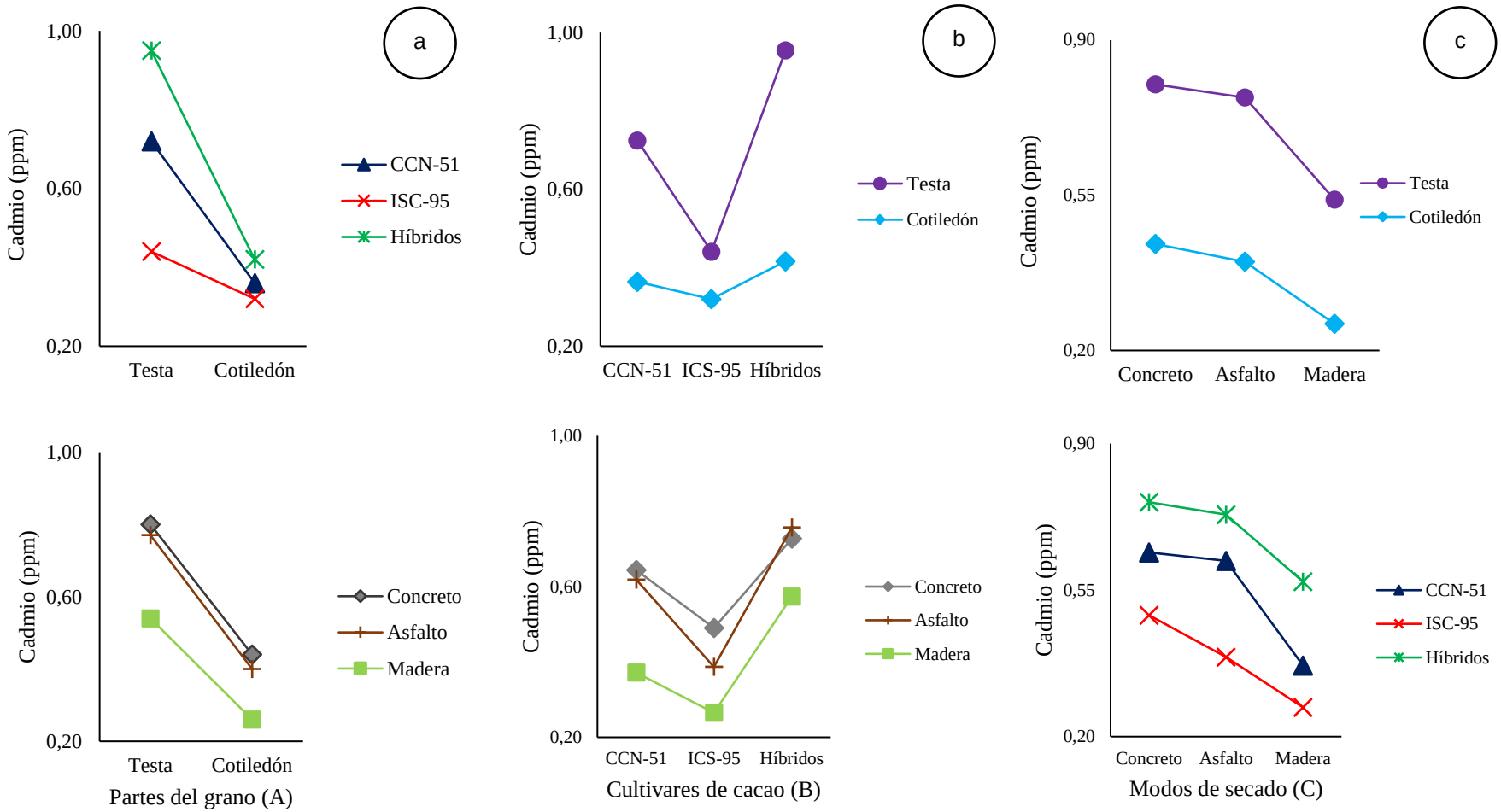

Figura 8. Contenidos de cadmio en el grano de cacao, interacción de: a. Las partes del grano con los cultivares de cacao y modos de secado, b. Los cultivares de cacao con las partes del grano y modos de secado, y c. Los modos de secado con las partes del grano y cultivares de cacao

4.3.3. Tratamientos en estudio

Los contenidos de cadmio en los granos de cacao fresco obtenidos por los tratamientos en estudio, variaron de 0,33 a 0,64 ppm (Tabla 13); estos valores se redujeron a 0,10 a 0,37 ppm (Tabla 20) cuando los granos fueron fermentados; sin embargo, al secar los granos de los tres cultivares de cacao en concreto, asfalto y parihuelas de madera, los niveles de cadmio incrementaron de 0,21 a 1,02 ppm (Tabla 29), cuyos contenidos promedios de cadmio en los granos de la mezcla de híbridos, CCN-51 e ICS-95 fueron 0,69, 0,54 y 0,38 ppm respectivamente (Tabla 23). Los resultados indican que el secado es el punto más crítico del proceso de beneficio del cacao, porque incrementa la concentración de cadmio en los granos, y esto se debe al secar los granos cerca del asfaltado Tingo María - Pucallpa y exponerlos en un ambiente abierto.

Esta exposición del grano facilitó su contaminación con cadmio, porque la presencia de este metal es más frecuente según Sánchez (2016), ya que se encuentra en el aire como cloruro o sulfato, formando partículas o vapores y recorriendo grandes distancias en la atmósfera para luego ser acumulados en la superficie del suelo o en masas de agua, además, de adherirse fuertemente a partículas en la tierra; que por cierto según Rodríguez et al. (2008), provienen de fuentes de la quema de combustibles fósiles y carbón, o los restos de materiales como asfalto, cemento, pigmentos y plásticos; además, al estar cerca a la influencia del alto tránsito vehicular, estos además de eliminar gases tóxicos también expulsan metales contaminantes como el cadmio (Han et al., 2007). Los tratamientos en base a la interacción de las testas del grano de cacao con los cultivares y modos de secado como el tratamiento T_8 (Testa de híbridos secado en asfalto), T_7 (Testa de híbridos secado en concreto), T_1 (Testa del CCN-51 secado en concreto), T_9 (Testa de híbridos secado en madera) y T_2 (Testa del CCN-51 secado en asfalto) acumularon valores de cadmio por encima de 0,80 ppm, mientras que los tratamientos T_4 (Testa del ICS-95 secado en concreto), T_5 (Testa del ICS-95 secado en asfalto), T_3 (Testa del CCN-51 secado en madera) y T_6 (Testa del ICS-95 secado en madera), acumularon contenidos de cadmio menores a 0,60 ppm (Tabla 29). Pero, de acuerdo con Mite et al. (2010), se sabe que la testa en el proceso de elaboración de tostado para elaborar el chocolate, es eliminada; además, estadísticamente la testa del grano acumula más cadmio en comparación al cotiledón (Tabla 22), porque concentran más péptidos ricos en cisteína como las metalotioneinas (MT) y fitoquelatinas (FQ), que son encargadas de secuestrar e impedir la contaminación con cadmio en el cotiledón, y esto se relaciona con las diferencias de los contenidos de proteínas en la testa y el cotiledón, porque De la Cruz et al. (2012), como se citó en Steinau (2017), indican que los contenidos de proteínas presente en la testa y el cotiledón

fermentado y secado es de 20,0 y 15,6 % respectivamente. Los contenidos de cadmio obtenidos por los tratamientos en base a la interacción de los cotiledones de los cultivares y modos de secado como el T_{17} (Cotiledón de híbridos secado en asfalto), T_{16} (Cotiledón de híbridos secado en concreto), T_{13} (Cotiledón del ICS-95 secado en concreto), T_{10} (Cotiledón del CCN-51 secado en concreto), T_{11} (Cotiledón del CCN-51 secado en asfalto) y T_{14} (Cotiledón del ICS-95 secado en asfalto), fluctuaron de 0,31 a 0,49 ppm; valores de cadmio que fueron menores de acuerdo con los límites máximos del contenido de cadmio en cacao y chocolate que exige la Unión Europea (2014), que mediante el Reglamento (UE) N° 488/2014 se ordena que, a partir del 2019, el chocolate con un contenido de materia seca de cacao mayor o igual a 50 % deberá tener un límite máximo de 0,80 ppm de cadmio y, que el cacao en polvo o como ingrediente en cacao en polvo endulzado vendido al consumidor final (chocolate para beber), debe tener un límite de 0,60 ppm de cadmio. Pero, los niveles de cadmio de esos tratamientos están por encima del límite en caso de chocolate con leche con un contenido de materia seca total de cacao menor a 30 % y chocolate con contenido de materia seca total de cacao menos de 50 %, porque de acuerdo con la Unión Europea (2014), los límites serían de 0,10 y 0,30 ppm de cadmio respectivamente. Sólo los tratamientos T_{18} (Cotiledón de híbridos secado en madera), T_{12} (Cotiledón del CCN-51 secado en madera) y T_{15} (Cotiledón del ICS-95 secado en madera), acumularon cadmio menos de 0,31 ppm (Tabla 29), valores que están dentro del límite máximo de 0,30 ppm de cadmio en chocolate con materia seca total de cacao menos de 50 %; asimismo, menores a los límites de 0,60 y 0,80 ppm de cadmio que exige la Unión Europea. Es decir, que los cotiledones de los tres cultivares secados en parihuelas de madera, nos ayudó a que no se contaminaran con cadmio y alcanzaran valores de cadmio por encima a 0,30 ppm que exige la Unión Europea a partir del 2019, y esto porque la madera no es una fuente de contaminación de cadmio; además, hasta ahora no hay reportes que la madera sea una fuente de contaminación, por lo que se les consideraría como un método de secado más apropiado para los granos de cacao, porque los granos secados en concreto y asfalto se contaminan más con cadmio. Asimismo, se demuestra que el ICS-95 es más tolerante a contaminarse con cadmio; sin embargo, los granos del CCN-51 y la mezcla de híbridos son más susceptibles a contaminarse con cadmio, y esta diferencia se puede dar por los mecanismos de absorción, tolerancia y exclusión de los cultivares; aunque según USAID y ALIANZA CACAO (s.f.), los cultivares que poseen mayor porcentaje de solidos de cacao, pueden presentar mayor contenido de cadmio.

Tabla 29. Prueba de Duncan (α = 0,05) para el contenido de cadmio en el grano de los tratamientos en estudio

Tratamientos		Cadmio	
Clave	**Descripción**	**ppm**	**Sig.**
T_8	Testa de híbridos secado en asfalto	1,02	a
T_7	Testa de híbridos secado en concreto	0,99	a
T_1	Testa del CCN-51 secado en concreto	0,88	b
T_9	Testa de híbridos secado en madera	0,85	b
T_2	Testa del CCN-51 secado en asfalto	0,83	b
T_4	Testa del ICS-95 secado en concreto	0,54	c
T_{17}	Cotiledón de híbridos secado en asfalto	0,49	c
T_5	Testa del ICS-95 secado en asfalto	0,46	c
T_{16}	Cotiledón de híbridos secado en concreto	0,46	c
T_3	Testa del CCN-51 secado en madera	0,46	c
T_{13}	Cotiledón del ICS-95 secado en concreto	0,44	c d
T_{10}	Cotiledón del CCN-51 secado en concreto	0,41	c d e
T_{11}	Cotiledón del CCN-51 secado en asfalto	0,40	c d e
T_6	Testa del ICS-95 secado en madera	0,32	d e f
T_{14}	Cotiledón del ICS-95 secado en asfalto	0,31	e f
T_{18}	Cotiledón de híbridos secado en madera	0,30	e f
T_{12}	Cotiledón del CCN-51 secado en madera	0,28	e f
T_{15}	Cotiledón del ICS-95 secado en madera	0,21	f

Tratamientos unidos por la misma letra en una columna, no existe significación estadística

V. CONCLUSIONES

1. Las concentraciones de cadmio en las testas y cotiledones de los granos de cacao del CCN-51, ICS-95 y mezcla de híbridos, fueron variables; porque después de cosechar los granos frescos presentaron concentraciones de 0,33 a 0,64 ppm de cadmio; pero cuando estos granos fueron fermentados en cajones de madera, las concentraciones de cadmio se redujeron de 0,10 a 0,37 ppm y cuando fueron secados en concreto, asfalto y madera, las concentraciones de cadmio se incrementaron de 0,21 a 1,02 ppm.
2. Se comprobó estadísticamente que la testa del grano de cacao acumuló mayor concentración de cadmio que el cotiledón, tanto en grano fresco, fermentado y secado.
3. Estadísticamente se determinó que los granos frescos de cacao del cultivar ICS-95 acumularon más cadmio en comparación a los demás cultivares; pero durante la fermentación y secado, sus granos acumularon menos que los demás cultivares. Caso contrario con los granos de la mezcla de híbridos, que en su etapa de grano fresco estadísticamente acumularon menos cadmio que el ICS-95; pero durante la fermentación y secado, fueron los que más cadmio presentaron, acumulando así más cadmio en comparación a los demás cultivares.
4. El secado de los granos de cacao en concreto y asfalto, facilitaron estadísticamente a que se contaminen con más cadmio, en comparación al secado de los granos en parihuelas de madera.

VI. PROPUESTAS A FUTURO

1. Realizar una investigación sobre la dinámica-movilidad del cadmio en el grano fermentado y su relación con la calidad.
2. Realizar un estudio sobre la dinámica de la concentración de cadmio en los diferentes genotipos de cacao de diferentes cultivares y qué relación existe con el contenido proteínas, grasa, carbohidratos y otros de cada cultivar.
3. Evaluar el efecto del secado artificial de los granos de cacao y su relación con el contenido de metales pesados y calidad.

VII. REFERENCIAS

Acevedo, E., Carrasco, M., León, O., Martínez, E., Silva, P., Castillo, G., Ahumada, I., Borie, G. y Gonzáles, S. (2005). *Criterios de calidad de suelo agrícola*. Ministerio de Agricultura. Servicio Agrícola y Ganadero.

Acosta, A. (2013). Efecto del sulfato de cadmio en la germinación y el crecimiento de plántulas de cacao (*Theobroma cacao* L.). *Investigación y Amazonía, 3*(1), 20-29.

Agencia de los Estados Unidos para el Desarrollo Internacional y ALIANZA CACAO. (s.f). *Contenido de cadmio en granos de cacao: Plan de atención a 20 000 familias de agricultores en el ámbito de la Alianza Cacao Perú* [Diapositiva PowerPoint]. https://goo.gl/VPUQH8

Almeida, A. y Valle, R. (2007). Ecophysiology of the cacao tree. *Brazilian Journal of Plant Physiology, 19*(1), 425-448.

Arévalo-Hernández, C., Arévalo-Gardini, E., Farfán-Pinedo, A., Baligar, V. y He, Z. (13-17 de noviembre de 2017). Metales pesados en suelos, hojas y granos de zonas cacaoteras del Perú. International Symposium on Cocoa Research (ISCR), Lima, Perú.

Arroyave, C., Araque, P. y Pelaez, C. A. (2009). Evaluación de la bioacumulación y toxicidad de cadmio y mercurio en pasto llanero (*Brachiaria dictyoneura*). *Vitae, 17*(1), 45-49.

Barragán, O. (2008). Estudio de diferentes metodologías para determinar la biodisponibilidad de cadmio y arsénico en suelos y su relación con la concentración en plantas. *NOVA - Publicación Científica en Ciencias Biomédicas, 6*(9), 35-39.

Barrueta, S. (2013). *Guía de métodos de detección y análisis de cadmio en cacao* (*Theobroma Cacao* L). Comisión Nacional para el Desarrollo y Vida sin Drogas – Agencia de los Estados Unidos para el Desarrollo Internacional. https://goo.gl/qP1JbV

Beckett, S. (2008). *The science of chocolate*. (2ª ed.). The Royal Society of Chemistry.

Benavides, M., Gallego, S. y Tomaro, M. (2005). Cadmium toxicity in plants. *Brazilian Journal of Plant Physiology, 17*(1), 21-34.

Caballero, J., Hernández, C. y Avendaño, C. (2014). *La fermentación y el secado al sol de granos de cacao* (Folleto Técnico N° 31). Centro de Investigación Regional Pacífico Sur Campo Experimental Rosario Izapa.

Cárdenas, A. (2012). *Evaluación de la presencia de cadmio en algunas parcelas de cacao orgánico de la cooperativa Agraria Industrial Naranjillo, Tingo María – Perú* [Tesis de Pregrado, Universidad Nacional Agraria de la Selva]. Repositorio Institucional UNAS. http://repositorio.unas.edu.pe/handle/UNAS/153

Chan, D. y Hale, B. (2004). Differential accumulation of Cd in durum wheat cultivars: uptake and retranslocation as sources of variation. *Journal of Experimental Botany, 55*(408), 2571-2579. https://doi.org/10.1093/jxb/erh255

Christensen, T. y Haung, P. (1999). Solid phase cadmium and the reactions of aqueous cadmium with soil surfaces. En McLaughlin, M. J. y Singh, B. R. (Eds), *Cadmium in Soils and Plants* (pp. 65-96). Kluwer Academic Publishers. Dordrecht, the Netherlands.

Chupillón, J. (2017). *Determinación de la absorción de cadmio y plomo en genotipos de cacao* (*Theobroma cacao* L.), *para el establecimiento de plantaciones comerciales* [Tesis de Pregrado, Universidad Nacional de San Martín-Tarapoto]. Repositorio Institucional. http://hdl.handle.net/11458/2473

Clemens, S., Palmgren, M. y Krämer, U. (2002). A long way ahead: understanding and engineering plant metal accumulation. *Trends in Plant Science, 7*(1), 309-315.

Clemens, S. (2006). Toxic metal accumulation, responses to exposure and mechanisms of tolerance in plants. *Biochimie, 88*(1), 1707-1719.

Csuros M. y Csuros C. (2002). *Environmental sampling and analysis for metals*. Lewis Publisher, CRC Press Company.

Dávila, E. (2019). *Uso de enmiendas en la reducción del contenido de cadmio en el suelo y en los granos del cacao* (*Theobroma cacao* L.) *clon CCN-51* [Tesis de Posgrado, Universidad Nacional Agraria de la Selva]. Repositorio Institucional UNAS. http://repositorio.unas.edu.pe/handle/UNAS/1623

Domínguez, J., López, M., Ager, F., Ynsa, M., Romero, L. y Gotor, C. (2004). Increased cysteine availability is essential for cadmium tolerance and accumulation in *Arabidopsis thaliana*. *Plant Biotechnology Journal*, *2*(6), 469-476.

Dostert, N., Roque, J., Cano, A., La Torre, M. y Weigend, M. (2011). *Hoja botánica: Cacao* (*Theobroma cacao* L.). Ministerio del Ambiente. http://localhost:8080/xmlui/handle/123456789/185

Falcón, G. (2019). *Cadmio y polifenoles totales en la fermentación de los granos de cacao* (*Theobroma cacao* L.) *clon CCN-51* [Tesis de Posgrado, Universidad Nacional Agraria de la Selva]. Repositorio Institucional UNAS. https://repositorio.unas.edu.pe/handle/UNAS/1627

Florida, N. (2021). Revisión sobre los límites máximos de cadmio en cacao (*Theobroma cacao* L.). *La Granja: Revista de Ciencias de Vida, 34*(2), 117-130.

Fundación Vasca para la Seguridad Agroalimentaria. (2014). *Cadmio*. https://seguridadalimentaria.elika.eus/fichas-de-peligros/cadmio/

García, L. (2010). *Catálogo de cultivares de cacao en el Perú.* Ministerio de Desarrollo Agrario y Riego. https://www.midagri.gob.pe/portal/download/pdf/direccionesyoficinas/dgca/cultivares_cacao.pdf

Gestión. (07 de agosto del 2018). *Unión Europea pone en jaque al cacao peruano por la presencia del cadmio*. https://goo.gl/C6Fojc

Gómez, R., García, R., Tong, F. y Gonzales, C. (2014). *Paquete tecnológico del cultivo del cacao fino de aroma*. Oficina de las Naciones Unidas contra la Droga y el Delito para el Perú y Ecuador - Comisión Nacional para el Desarrollo y Vida sin Drogas. https://vinculate.concytec.gob.pe/wp- content/files/Paquete_Tecnologico_Cultivo_Cacao.pdf

González, D. y Zapata, O. (2008). Mecanismos de tolerancia a elementos potencialmente tóxicos en plantas. *Boletín de la Sociedad Botánica de Méx*ico, *82*(1), 53-61.

González, C. (2016). *Evaluación de la concentración mínima aceptable e identificación de metales pesados presentes en el grano de cacao del Ecuador* [Tesis de Pregrado, Universidad Técnica de Machala]. Repositorio Digital. http://repositorio.utmachala.edu.ec/handle/48000/7789

Guerinot, M. (2000). The zip family of metal transporters. *Biochimica et Biophysica Acta (BBA)-Biomembranes, 1465*(1-2), 190-198.

Han, L., Zhuang, G., Cheng, S., Wang, Y. y Li, J. (2007). Characteristics of re-suspended road dust and its impact on the atmospheric environment in Beijing. *Atmospheric Environment, 41*(35), 7485-7499.

Herrera, T. (2011). La contaminación con cadmio en suelos agrícolas. *Venesuelos, 8*(1y2), 42-47.

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

Huauya, M. y Huamaní, H. (2014). Macrofauna edáfica y metales pesados en el cultivo de cacao, *Theobroma cacao* L. (Malvaceae). *The Biologist (Lima), 12*(1), 45-55.

Instituto de Cultivos Tropicales. (2018). *Avances de investigación en cadmio en cacao* [Diapositiva PowerPoint]. https://goo.gl/AVgicL

International Plant Nutrition Institute. (2015). *Metales pesados en cacao, perspectivas y posible manejo*. http://nla.ipni.net/article/NLA-3112

Jiménez, C. (2015). Estado legal mundial del cadmio en cacao (*Theobroma cacao*): fantasía o realidad. *Producción + Limpia, 10*(1), 89-104.

Lanza, J., Churión, P., Liendo, N. y López, V. (2016). Evaluación del contenido de metales pesados en cacao (*Theobroma cacao* L.) de Santa Bárbara del Zulia, Venezuela. *Saber, Universidad de Oriente, Venezuela, 28*(1), 106-115.

Lara, V. (2017). *Evaluación del contenido de cadmio en dos variedades de cacao (Theobroma cacao* L.*) considerando distintos métodos de secado en la localidad de luz de América* [Tesis de Pregrado, Universidad de las Fuerzas Armadas]. Repositorio DSpace. http://repositorio.espe.edu.ec/xmlui/handle/21000/12962

Luna, F., Crouzillat, D., Cirou, L. y Bucheli, P. (2002). Chemical composition and flavor of ecuadorian cocoa liquor. *Journal of Agricultural and Food Chemistry, 50*(12), 3527-3532.

Martínez, G. (2010). *Determinación de metales pesados cadmio y plomo en suelos y granos de cacao frescos y fermentados mediante espectroscopía de absorción atómica de llama* [Trabajo de Grado, Universidad Industrial de Santander].

Ministro de Agricultura y Riego. (2016a). *Estudio del cacao en el Perú y en el mundo: Un análisis de la producción y el comercio*. https://camcafeperu.com.pe/admin/recursos/publicaciones/Estudio-cacao-Peru-y-Mundo.pdf

Ministro de Agricultura y Riego. (2016b). *Boletín estadístico de producción agrícola, pecuaria y avícola*. http://hdl.handle.net/20.500.13036/222

Ministerio de Salud. (2013). *Guía de práctica clínica para el diagnóstico y tratamiento de la intoxicación por cadmio* (R.M N° 757-2013/MINSA). https://www.gob.pe/institucion/minsa/normas-legales/198798-757-2013-minsa

Ministerio del Ambiente. (2014). *Guía para el muestreo de suelos: En el marco del Decreto Supremo N° 002-2013-MINAM, Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para Suelo*. https://goo.gl/t65s1a

Miranda, D., Carranza, C., Rojas, C., Jérez, C., Fischer, G. y Zurita, J. (2008). Acumulación de metales pesados en suelo y plantas de cuatro cultivos hortícolas, regados con agua del Río Bogotá. *Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas, 2*(2), 180-191.

Mite, F., Carrillo, M. y Wuellins, D. (2010). *Avances del monitoreo de presencia de cadmio en almendras de cacao, suelos y aguas en Ecuador*. In XII Congreso Ecuatoriano de la Ciencia del Suelo. http://repositorio.iniap.gob.ec/handle/41000/5872

Mite, F., Carrillo, M., Albán, L., Durango, W. y Cargua, J. (2016). *Foro sobre la problemática de cadmio en el cultivo de cacao en Ecuador - Medidas de mitigación.* Instituto Interamericano de Cooperación para Agricultura.

Montero, M., Espinoza, P., Criollo, M., Jadán, M. y Fernández, L. (2018). Evaluación de la acumulación de cadmio en células de tomate de árbol a través de detección electroquímica indirecta de péptidos ricos en cisteína. *Infoanalítica, 6*(2), 27-43.

Morales, O., Borda, A., Argandoña, A., Farach, R., Garcia, L. y Lazo, K. (2015). *La alianza cacao Perú y la cadena productiva del cacao fino de aroma*. Universidad ESAN. https://hdl.handle.net/20.500.12640/111

Nogales, J., Graziani de Fariñas, L. y Ortiz de Bertorelli, L. (2006). Cambios físicos y químicos durante el secado al sol del grano de cacao fermentado en dos diseños de cajones de madera. *Agronomía Tropical, 56*(1), 5-20.

Orozco, L. y López, A. (2015). *Cacao y contenido de metales pesados* (Esquina Técnica N° 12). https://goo.gl/awNybJ

Orroño, D. (2011). *Acumulación de metales (cadmio, zinc, cobre, cromo, níquel y plomo) en especies del género Pelargonium: suministro desde el suelo, ubicación en la planta y toxicidad* [Tesis de Posgrado, Universidad de Buenos Aires]. http://ri.agro.uba.ar/files/download/tesis/doctorado/2011orronodanielaines.pdf

Ortega, N. (2012). *Asociación entre la fracción bioaccesible y la bioacumulación en algunas especies vegetales que crecen en el cauce del arroyo de San Pedro* [Tesis de Posgrado, Universidad Autónoma de San Luis Potosí]. Repositorio Institucional. https://repositorioinstitucional.uaslp.mx/xmlui/handle/i/3579

Ortiz, L., Camacho, G. y Graziani, L. (2004). Efecto del secado al sol sobre la calidad del grano fermentado de cacao. *Agronomía Tropical, 54(*1), 31-43.

Ortiz, L., Graziani, L. y Rovedas, L. (2009). Influencia de varios factores sobre características del grano de cacao fermentado y secado al sol. *Agronomía Tropical, 59*(1), 119-127.

Pacheco, F. (12 de agosto de 2009). Impacto ambiental de las plantas de asfalto. *Semanario Universidad.* Universidad de Costa Rica. https://historico.semanariouniversidad.com/opinion/impacto-ambiental-de-las-plantas-de-asfalto/

Paredes, M. (2003). *Manual de cultivo del cacao*. Ministerio de Agricultura – Programa para el desarrollo de la Amazonia. https://repositorio.midagri.gob.pe/bitstream/20.500.13036/372/1/cacao%20-%20copia.pdf

Park, S., Cheng, N., Pittman, J., Yoo, K., Park, J., Smith, R. y Hirschi, K. (2005). Increased calcium levels and prolonged shelf life in tomatoes expressing Arabidopsis H^+/Ca^{2+} transporters. *Plant Physiology, 139*(3), 1194-1206.

Pernía, B., De Sousa, A., Reyes, R. y Castrillo, M. (2008). Biomarcadores de contaminación por cadmio en las plantas. *Interciencia, 33*(2), 112-119.

Pinzón, J. y Rojas, J. (2002). *Guía técnica para el cultivo del cacao.* Federación Nacional de Cacaoteros - Corporación Nacional de Transferencia de Tecnología (PRONATTA). Fondo editorial de la Federación Nacional de Cacaoteros.

Pomponi, M., Censi, V., Di Girolamo, V., De Paolis, A., Di Toppi, L., Aromolo, R., Constantino, P. y Cardarelli, M. (2006). Overexpresion of arabidopsis phytochelatin synthase in tobacco plants enhances Cd^{2+} tolerance and accumulation but not translocation to the shoot. *Planta, 223*, 180-190.

Portillo, E., Graziani, L. y Cros, E. (2006). Efecto de algunos factores post-cosecha sobre la calidad sensorial del cacao criollo porcelana (*Theobroma cacao* L.). *Revista de la Facultad de Agronomía, 23*(1), 51-59.

Portillo, E., Labarca, M., Graziani, L., Cros, E., Assemat, S., Davrieux, F., Boulanger, R. y Marcano, M. (2009). Formación del aroma del cacao criollo (*Theobroma cacao* L.) en función del tratamiento poscosecha en Venezuela. *Revista UDO Agrícola, 9*(2), 458-468.

Prieto, J., González, C., Román, A. y Prieto, F. (2009). Contaminación y fitotoxicidad en plantas por metales pesados provenientes de suelos y agua. *Tropical and subtropical Agroecosystems, 10*(1), 29-44

Quiroz, V. y Elizalde, M. (2014). *Guía técnica del cultivo de cacao para la Amazonia Norte*. Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias.

Rábago, I. (2010). *Capacidad de amortiguación de la contaminación por plomo y por cadmio en suelos de la comunidad de Madrid* [Tesis de Posgrado, Universidad Complutense de Madrid]. Repositorio Institucional de la UCM. https://eprints.ucm.es/id/eprint/12511/

Ramírez, A. (2002). Toxicología del cadmio. Conceptos actuales para evaluar exposición ambiental u ocupacional con indicadores biológicos. *Anales de la Facultad de Medicina, 63*(1), 51-64.

Rangel, A., Zavaleta, H., Córdova, L., López, A., Delgado, A., Vidales, I. y Villegas, A. (2012). Anatomía e histoquímica de la semilla del cacao (*Theobroma cacao* L.) criollo mexicano. *Revista Fitotecnica Mexicana, 35*(3), 189-197.

Reyes, H. y Capriles, L. (2000). *Cacao en Venezuela: Moderna tecnología para su cultivo*. Editorial Chocolates el Rey.

Reynel, V., Loor, O., Bolaños, M. y Tezara, W. (2016). Efectos del tipo de secado en la calidad organoléptica del cacao (*Theobroma cacao* L.) en Esmeraldas, Ecuador. *Investigación y Saberes, 5*(1), 22-38.

Rodríguez, M., Martínez, N., Romero, M., Del Río, L. y Sandalio, L. (2008). Toxicidad del cadmio en plantas. *Ecosistemas, 17*(3), 139-146.

Rueda, G., Rodríguez, J. y Madriñán, R. (2011). Metodologías para establecer valores de referencia de metales pesados en suelos agrícolas. *Acta Agronómica, 60*(3), 203-217.

Ruíz, J. (2011). Evaluación de tratamientos para disminuir cadmio en lechuga (*Lactuca sativa* L.) regada con agua del río Bogotá. *Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas, 5*(2), 233-243.

Sánchez, G. (2016). *Ecotoxicología del cadmio: Riesgo para la salud de la utilización de suelos ricos en cadmio* [Trabajo fin de grado, Universidad Complutense de Madrid]. Repositorio Institucional de la UCM. https://eprints.ucm.es/id/eprint/50902/

Sánchez, N., Subero, N. y Rivero, C. (2011). Determinación de la adsorción de cadmio mediante isotermas de adsorción en suelos agrícolas venezolanos. *Acta Agronómica, 60*(2), 190-197.

Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú. (2017). Datos Hidrometeorológicos a nivel nacional. https://www.senamhi.gob.pe/?p=estaciones

Shah, K. y Nongkynrih, J. (2007). Metal hyperaccumulator and bioremediation. *Biologia Plantarum, 51*, 618-634.

Steinau, I. (2017). *Evaluación de la incidencia de la fermentación en la calidad del grano de cacao trinitario en Caluco, Sonsonate, El Salvador* [Tesis de Pregrado, Universidad de El Salvador]. Repositorio Institucional. https://ri.ues.edu.sv/id/eprint/14635/1/13101640.pdf

Strassburger, E. (1994). *Tratado de botánica*. (8ª ed.). Editorial Omega.

Subero, N. (2013). *Evaluación de las fracciones de fósforo y del contenido de cadmio en suelos ácidos fertilizados con fosfatos por largos periodos y su absorción por el arroz* [Tesis de Posgrado, Universidad Central de Venezuela]. Repositorio Institucional UCV. http://hdl.handle.net/10872/4550

Sun Y., Zhou, O. y Diao, S. (2008). Effects of cadmium and arsenic on growth and metal accumulation of Cd-hyperaccumulator *Solanum nigrum* L. *Bioresour Technology, 99*(5), 1103-1110.

Tantalean, E. y Huauya, M. (2017). Distribución del contenido de cadmio en los diferentes órganos del cacao CCN-51 en suelo aluvial y residual en las localidades de Jacintillo y Ramal de Aspuzana. *Revista de Investigación Agroproducción Sustentable*, *1*(2), 69-78.

Tello, P. (2008). *Impacto que causa la tala de (Miconia barbeyana Cogniaux), "Paliperro" sobre la diversidad florística del bosque reservado de la Universidad Nacional Agraria de la Selva* [Tesis de Pregrado, Universidad Nacional Agraria de la Selva]. Repositorio Institucional UNAS. http://repositorio.unas.edu.pe/handle/UNAS/677

Teneda, W. (2016). *Mejoramiento del proceso de fermentación del cacao (Theobroma cacao* L.*) variedad Nacional y variedad CCN-51*. Servicio de publicaciones de la Universidad Internacional de Andalucía. http://hdl.handle.net/10334/3743

Thomine, S., Wang, R., Ward, J., Crawford, N. y Schroeder, J. (2000). Cadmium and iron transport by members of a plant metal transporter family in Arabidopsis with homology to Nramp genes. *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*, *97*(9), 4991-4996.

Unión Europea. (2014). *Reglamento (UE) No 488/2014 de la comisión de 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*. https://goo.gl/ggMYCZ

Villanueva, L. (2005). *Evaluación del impacto de los fertilizantes fosfatados en la acumulación de cadmio en los suelos cultivados con maíz (Zea mays)* [Tesis de Posgrado, Universidad de Chile]. http://mgpa.forestaluchile.cl/Tesis/Villanueva%20Liliana.pdf

Viloria, C. (2013). La excreción celular. Ryerson University. https://goo.gl/ALpCGQ

Volke, T., Velasco, J. y De La Rosa, D. (2005). *Suelos contaminados por metales y metaloides: muestreo y alternativas para su remediación* (pp. 19-31). Secretaría de Ambiente y Recursos Naturales Instituto Nacional de Ecología. https://www2.congreso.gob.pe/sicr/cendocbib/con4_uibd.nsf/B1E761B1E2F24A5C05257D490070F94F/$FILE/SuelosContaminadosPorMetalesYMetaloides.pdf

ANEXO

Tabla 30. Contenido de cadmio en los granos frescos

Partes del grano	x	Cultivares de cacao	Cadmio (ppm)		
			R_1	**R_2**	**R_3**
Testa		CCN-51	0,42	0,37	0,44
		ICS-95	0,60	0,69	0,64
		Híbridos	0,40	0,42	0,43
Cotiledón		CCN-51	0,34	0,31	0,33
		ICS-95	0,49	0,53	0,51
		Híbridos	0,41	0,45	0,43

Fuente: Laboratorio de suelos de la Universidad Nacional Agraria de la Selva

Tabla 31. Contenido de cadmio en los granos fermentados

Partes del grano	x	Cultivares de cacao	Cadmio (ppm)		
			R_1	**R_2**	**R_3**
Testa		CCN-51	0,24	0,29	0,37
		ICS-95	0,18	0,20	0,29
		Híbridos	0,35	0,37	0,38
Cotiledón		CCN-51	0,10	0,10	0,11
		ICS-95	0,14	0,14	0,13
		Híbridos	0,15	0,18	0,14

Fuente: Laboratorio de suelos de la Universidad Nacional Agraria de la Selva

Tabla 32. Contenido de cadmio en los granos secados

Partes del grano	x	Cultivares de cacao	x	Modos de secado	Cadmio (ppm)		
					R_1	R_2	R_3
Testa		CCN-51		Concreto	0,85	0,92	0,87
				Asfalto	0,95	0,75	0,80
				Madera	0,51	0,42	0,45
		ICS-95		Concreto	0,51	0,66	0,45
				Asfalto	0,45	0,41	0,53
				Madera	0,31	0,32	0,33
		Híbridos		Concreto	0,95	1,10	0,92
				Asfalto	1,08	1,04	0,95
				Madera	0,90	0,95	0,70
Cotiledón		CCN-51		Concreto	0,40	0,40	0,42
				Asfalto	0,54	0,36	0,31
				Madera	0,33	0,28	0,24
		ICS-95		Concreto	0,45	0,45	0,42
				Asfalto	0,27	0,30	0,36
				Madera	0,25	0,17	0,21
		Híbridos		Concreto	0,47	0,52	0,40
				Asfalto	0,42	0,52	0,53
				Madera	0,26	0,32	0,31

Fuente: Laboratorio de suelos de la Universidad Nacional Agraria de la Selva

Figura 9. Granos de CCN-51 secados en concreto

Figura 10. Granos de ICS-95 secados en concreto

Figura 11. Granos de CCN-51 secados en parihuela de madera

Figura 12. Granos de híbridos secados en parihuela de madera

Figura 13. Testas de los granos de cacao

Figura 14. Cotiledones de los granos de cacao

Figura 15. Granos secos del CCN-51, ICS-95 (aromático) e híbridos (criollo)

Figura 16. Análisis de cadmio en el laboratorio de suelos

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA

AV. UNIVERSITARIA S/N - TINGO MARIA - CELULAR 941531359

Facultad de Agronomía - Laboratorio de Análisis de Suelos

ANALISIS DE SUELOS

SOLICITANTE: BRAVO ARISTA WALTER — PROCEDENCIA: PUMAHUASI

N°	COD. LAB.	DATOS: SECTOR	CULTIVO	REFERENCIA	ANALISIS MECANICO: Arena %	Arcilla %	Limo %	Textura	pH 1:1	M.O. %	N %	P ppm	K ppm	CIC	CAMBIABLES Cmol(+)/kg: Ca	Mg	K	Na	Al	H	CICe	% Bas. Camb.	% Ac. Camb.	% Sat. Al
116	S0967	FUNDO SAN LUIS	CACAO	MS ICS95	36	19	45	Franco	6.89	1.26	0.06	5.16	96.96	10.76	8.93	1.50	0.20	0.14	--	--	--	100.00	0.00	0.00
117	S0968	FUNDO SAN LUIS	CACAO	MS CCN 51	36	19	45	Franco	6.85	2.26	0.10	10.14	94.83	9.77	8.19	1.40	0.10	0.08	--	--	--	100.00	0.00	0.00
118	S0969	FUNDO SAN LUIS	CACAO	MS MH	38	21	41	Franco	6.98	3.39	0.15	10.35	109.83	11.97	9.99	1.60	0.24	0.15	--	--	--	100.00	0.00	0.00

MUESTREADO POR EL SOLICITANTE
RECIBO N° 0509612
TINGO MARIA, 25 DE AGOSTO 2017

Ing. Luis G. Manrique Minaya
JEFE

Figura 17. Análisis de suelos de las parcelas de los cultivares CCN-51, ICS-95 y mezcla de híbridos

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA

Tingo Maria

Facultad de Agronomía - Laboratorio de Análisis de Suelos

Av. Universitaria s/n Telef. (062) 562342 - Celular 941531359 Apdo. 156

ANALISIS ESPECIAL

SOLICITANTE: WALTER LUIS BRAVO ARISTA

SECTOR: MERCEDES FUNDO: SAN LUIS
DISTRITO: DANIEL ALOMIA ROBLES
PROVINCIA: LEONCIO PRADO
DEPARTAMENTO: HUANUCO

N°	Datos de la muestra: Codigo Laboratorio	Tipo de Muestra		Codigo del Solicitante		Porcentaje: P_2O_5 (%)	Ca (%)	Mg (%)	K (%)	Na (%)	PARTES POR MILLON (mg/Kg): Cu ppm	Fe ppm	Zn ppm	Mn ppm	Cd ppm	Pb ppm
1	M01099	TESTA	DE CACAO FRESCO	CCN51	1	--	--	--	--	--	--	--	--	--	0.42	33.10
2	M01100	TESTA	DE CACAO FRESCO	CCN51	2	--	--	--	--	--	--	--	--	--	0.37	31.83
3	M01101	TESTA	DE CACAO FRESCO	CCN51	3	--	--	--	--	--	--	--	--	--	0.44	31.37
4	M01102	TESTA	DE CACAO FRESCO	ICS	1	--	--	--	--	--	--	--	--	--	0.50	30.81
5	M01103	TESTA	DE CACAO FRESCO	ICS	2	--	--	--	--	--	--	--	--	--	0.59	31.96
6	M01104	TESTA	DE CACAO FRESCO	ICS	3	--	--	--	--	--	--	--	--	--	0.64	31.50
7	M01105	TESTA	DE CACAO FRESCO	MH	1	--	--	--	--	--	--	--	--	--	0.40	29.35
8	M01106	TESTA	DE CACAO FRESCO	MH	2	--	--	--	--	--	--	--	--	--	0.42	32.40
9	M01107	TESTA	DE CACAO FRESCO	MH	3	--	--	--	--	--	--	--	--	--	0.43	31.86
10	M01108	COTILEDON	DE CACAO FRESCO	CCN51	1	--	--	--	--	--	--	--	--	--	0.34	2.35
11	M01109	COTILEDON	DE CACAO FRESCO	CCN51	2	--	--	--	--	--	--	--	--	--	0.31	2.33
12	M01110	COTILEDON	DE CACAO FRESCO	CCN51	3	--	--	--	--	--	--	--	--	--	0.33	2.44
13	M01111	COTILEDON	DE CACAO FRESCO	ICS	1	--	--	--	--	--	--	--	--	--	0.49	4.06
14	M01112	COTILEDON	DE CACAO FRESCO	ICS	2	--	--	--	--	--	--	--	--	--	0.53	4.38
15	M01113	COTILEDON	DE CACAO FRESCO	ICS	3	--	--	--	--	--	--	--	--	--	0.51	4.34
16	M01114	COTILEDON	DE CACAO FRESCO	MH	1	--	--	--	--	--	--	--	--	--	0.41	5.89
17	M01115	COTILEDON	DE CACAO FRESCO	MH	2	--	--	--	--	--	--	--	--	--	0.45	6.21
18	M01116	COTILEDON	DE CACAO FRESCO	MH	3	--	--	--	--	--	--	--	--	--	0.43	5.95

Testa: Cascarilla de la almendra de cacao
Cotiledón: Almendra de cacao sin testa

MUESTREADO POR EL SOLICITANTE
RECIBO N°0508395
TINGO MARIA 30 DE ABRIL 2017

Figura 18. Análisis de cadmio de los granos frescos

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA

Tingo María

Facultad de Agronomía - Laboratorio de Análisis de Suelos

Av. Universitaria s/n Telef. (062) 562343 - Celular 941531359 Aptdo. 156

ANALISIS ESPECIAL

SOLICITANTE: WALTER LUIS BRAVO ARISTA

SECTOR: MERCEDES FUNDO: SAN LUIS
DISTRITO: DANIEL ALOMIA ROBLES
PROVINCIA: LEONCIO PRADO
DEPARTAMENTO: HUANUCO

N°	Datos de la muestra					Porcentaje					PARTES POR MILLON (mg/Kg)					
	Codigo Laboratorio	Tipo de Muestra		Codigo del Solicitante		P_2O_5 (%)	Ca (%)	Mg (%)	K (%)	Na (%)	Cu ppm	Fe ppm	Zn ppm	Mn ppm	Cd ppm	Pb ppm
1	M01139	TESTA	DE CACAO FERMENTADO	CCN51	1	–	–	–	–	–	–	–	–	–	0.24	6.51
2	M01140	TESTA	DE CACAO FERMENTADO	CCN51	2	–	–	–	–	–	–	–	–	–	0.29	5.33
3	M01141	TESTA	DE CACAO FERMENTADO	CCN51	3	–	–	–	–	–	–	–	–	–	0.37	7.75
4	M01142	TESTA	DE CACAO FERMENTADO	ICS	1	–	–	–	–	–	–	–	–	–	0.18	4.85
5	M01143	TESTA	DE CACAO FERMENTADO	ICS	2	–	–	–	–	–	–	–	–	–	0.20	4.46
6	M01144	TESTA	DE CACAO FERMENTADO	ICS	3	–	–	–	–	–	–	–	–	–	0.29	5.12
7	M01145	TESTA	DE CACAO FERMENTADO	MH	1	–	–	–	–	–	–	–	–	–	0.35	7.79
8	M01146	TESTA	DE CACAO FERMENTADO	MH	2	–	–	–	–	–	–	–	–	–	0.37	9.06
9	M01147	TESTA	DE CACAO FERMENTADO	MH	3	–	–	–	–	–	–	–	–	–	0.38	10.01
10	M01148	COTILEDON	DE CACAO FERMENTADO	CCN51	1	–	–	–	–	–	–	–	–	–	0.10	3.43
11	M01149	COTILEDON	DE CACAO FERMENTADO	CCN51	2	–	–	–	–	–	–	–	–	–	0.10	3.61
12	M01150	COTILEDON	DE CACAO FERMENTADO	CCN51	3	–	–	–	–	–	–	–	–	–	0.11	3.55
13	M01151	COTILEDON	DE CACAO FERMENTADO	ICS	1	–	–	–	–	–	–	–	–	–	0.14	5.10
14	M01152	COTILEDON	DE CACAO FERMENTADO	ICS	2	–	–	–	–	–	–	–	–	–	0.14	5.23
15	M01153	COTILEDON	DE CACAO FERMENTADO	ICS	3	–	–	–	–	–	–	–	–	–	0.13	4.99
16	M01154	COTILEDON	DE CACAO FERMENTADO	MH	1	–	–	–	–	–	–	–	–	–	0.15	8.83
17	M01155	COTILEDON	DE CACAO FERMENTADO	MH	2	–	–	–	–	–	–	–	–	–	0.18	8.93
18	M01156	COTILEDON	DE CACAO FERMENTADO	MH	3	–	–	–	–	–	–	–	–	–	0.14	9.75

MUESTREADO POR EL SOLICITANTE
RECIBO N°0508395
TINGO MARIA 30 DE ABRIL 2017

Testa: Cascarilla de la almendra de cacao
Cotiledón: Almendra de cacao sin testa

Figura 19. Análisis de cadmio de los granos fermentados