

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA
FACULTAD DE RECURSOS NATURALES RENOVABLES
Escuela Profesional de Ciencias en Conservación de Suelos y Agua



**DETERMINACIÓN DE CADMIO EN FRACCIONES QUÍMICAS DE LA MATERIA
ORGÁNICA DEL SUELO Y EN ALMENDRAS DE CACAO EN CUATRO ZONAS
CACAOteras DEL DISTRITO DE LUYANDO**

Tesis

**Para optar el Título de:
INGENIERO EN CONSERVACION DE SUELOS Y AGUA**

**PRESENTADO POR:
MARTHA SOPHYA SOTO TASAYCO**

**Asesores
SANDRO JUNIOR RUIZ CASTRE
MIGUEL SÁNCHEZ RODRÍGUEZ**

**Tingo María – Perú
2024**



ACTA DE SUSTENTACION DE TESIS N° 068-2024-FRNR-UNAS

Los que suscriben, Miembros del Jurado de Tesis, reunidos con fecha 07 de diciembre de 2023, a horas 8:00 a.m. de la Escuela Profesional de Ingeniería en Conservación de Suelos y Agua de la Facultad de Recursos Naturales Renovables para calificar la tesis titulada:

“DETERMINACIÓN DE CADMIO EN FRACCIONES QUÍMICAS DE LA MATERIA ORGÁNICA DEL SUELO Y EN ALMENDRAS DE CACAO EN CUATRO ZONAS CACAOTERAS DEL DISTRITO DE LUYANDO”

Presentado por la Bachiller: **SOTO TASAYCO, Martha Sophya**, después de haber escuchado la sustentación y las respuestas a las interrogantes formuladas por el Jurado, se declara **APROBADO** con el calificativo de **“MUY BUENA”**.

En consecuencia, el sustentante queda apto para optar el Título Profesional de **INGENIERO EN CONSERVACIÓN DE SUELOS Y AGUA** que será aprobado por el Consejo de Facultad, Tramitándolo al Consejo Universitario para el otorgamiento del Título Correspondiente.

Tingo María, 28 de junio de 2024

Dr. LUCIO MANRIQUE DE LARA SUAREZ
PRESIDENTE

Dr. NELINO FLORIDA ROFNER
MIEMBRO

Dr. WILFREDO ALVA VALDIVIEZO
MIEMBRO



Ing. MSc. SANDRO JUNIOR RUIZ CASTRE
ASESOR



“Año del Bicentenario, de la consolidación de nuestra Independencia, y de la conmemoración de las heroicas batallas de Junín y Ayacucho”

CERTIFICADO DE SIMILITUD T.I. N° 295 - 2024 - 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:

Ingeniería en Conservación de Suelos y Agua

Tipo de documento:

Tesis	X	Trabajo de Suficiencia Profesional	
-------	---	------------------------------------	--

TÍTULO	AUTOR	PORCENTAJE DE SIMILITUD
DETERMINACIÓN DE CADMIO EN FRACCIONES QUÍMICAS DE LA MATERIA ORGÁNICA DEL SUELO Y EN ALMENDRAS DE CACAO EN CUATRO ZONAS CACAOTERAS DEL DISTRITO DE LUYANDO	MARTHA SOPHYA SOTO TASAYCO	18 % Dieciocho

Tingo María, 16 de octubre de 2024



UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA
UNIDAD DE GESTIÓN DE LA INVESTIGACIÓN

Dr. Tomas Monacho Mallqui
JEFE

C.C. Archivo

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA
FACULTAD DE RECURSOS NATURALES RENOVABLES
Escuela Profesional de Ciencias en Conservación de Suelos y Agua



**DETERMINACIÓN DE CADMIO EN FRACCIONES QUÍMICAS DE LA MATERIA
ORGÁNICA DEL SUELO Y EN ALMENDRAS DE CACAO EN CUATRO ZONAS
CACAOTERAS DEL DISTRITO DE LUYANDO**

- Programa de investigación** : Ciencias básicas
- Línea de investigación** : Química del suelo
- Eje temático** : Cadmio en fracción químico de la materia orgánica del suelo
y cadmio en almendras de cacao.
- Autor** : Bach. Soto Tasayco, Martha Sophya
- Asesor (es)** : Msc. Sandro Junior Ruiz Castro
: Ing. Miguel Sánchez Rodríguez
- Lugar de ejecución** : Distrito de Luyando
- Duración** : 08 meses
- Financiamiento** : Propio S/. 6 828,25 soles

Tingo María, Perú - Junio, 2024

**VICERRECTORADO DE INVESTIGACIÓN
OFICINA DE INVESTIGACIÓN**



**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA
REGISTRO DE TESIS PARA LA OBTENCION DEL
TITULO UNIVERSITARIO, INVESTIGACIÓN DOCENTE
Y TESISISTA**

(Resol. N° 113-2019-CU-R-UNAS)

I. Datos generales

Universidad	: Universidad Nacional Agraria de la Selva
Facultad	: Facultad de recursos naturales renovables
Título de la tesis	: Determinación de cadmio en fracciones químicas de la materia orgánica del suelo y en almendras de cacao en cuatro zonas cacaoteras del distrito de Luyando
Objetivo general	: Determinar el contenido de cadmio y carbono orgánico en las fracciones químicas de la materia orgánica del suelo y el contenido de cadmio en almendras de cacao en cuatro zonas cacaoteras del distrito de Luyando
Autor	: Bach. Soto Tasayco, Martha Sophya
Asesor (es)	: Msc. Sandro Junior Ruiz Castro : Ing. Sánchez Rodríguez, Miguel
Programa de investigación	: Química de suelo
Línea de investigación	: Fertilidad, clasificación, recuperación y manejo de suelos
Eje temático	: Cadmio en fracción química de la materia orgánica del suelo y cadmio en almendras de cacao
Lugar de ejecución	: Luyando
Duración	: Inicio : Marzo 2022 : Término : Noviembre 2022
Financiamiento	: FEDU : 0 soles : Propio : 6 828,25 soles : Otros : 0 soles

Tingo María, Perú - Junio 202.

DEDICATORIA

A Dios quien supo guiarme por el buen camino,
dándome la fuerza para seguir adelante y no
desmayar en los problemas que presentaban.

A mis queridos padres Humberto y Ofelia por
ser un ejemplo para mí, por su apoyo constante,
por haberme forjado como la persona que soy
en la actualidad, muchos de mis logros se los
debo a ustedes. Los AMO.

A mis hermanos Katherin y Diego por sus
consejos, sus valores y por compartir su
fortaleza; y a mis queridos sobrinos Valentina y
Job por ser mi motivación para salir adelante y
ser un ejemplo para ellos.

AGRADECIMIENTO

- A la Universidad Nacional Agraria de la Selva y a todo el personal que la conforman, por su apoyo y confianza, en especial a los docentes de la Facultad de Recursos Naturales Renovables que contribuyeron en mi formación profesional.
- Al M. Sc. Sandro Junior Ruiz Castro e Ing. Miguel Sánchez Rodríguez en condición de asesor por sus enseñanzas, consejos, revisión académica y supervisión hasta la culminación de este trabajo.
- Al Dr. Lucio Manrique De Lara Suarez, en su condición de presidente, por su apoyo en la ejecución, culminación y revisión académica del proyecto.
- A los miembros del jurado de tesis Dr. Nelino Florida Rosner y Msc. Wilfredo Alva Valdivieso por su revisión académica y científica, valiosa en el desarrollo y culminación del informe del presente trabajo de investigación.

ÍNDICE GENERAL

	Página
RESUMEN	
ABSTRACT	
I. INTRODUCCIÓN	1
II. REVISIÓN DE LITERATURA.....	3
2.1. Generalidades del cadmio.....	3
2.1.1. Cadmio en suelo.....	3
2.1.2. Cadmio en plantas.....	4
2.1.3. Cadmio en medio ambiente	4
2.1.4. Efecto del cadmio en la salud humana.....	4
2.2. Carbono orgánico del suelo	5
2.2.1. Fraccionamiento químico del carbón orgánico del suelo	6
2.2.1.1. Ácidos húmicos	7
2.2.1.2. Ácidos Fúlvicos	7
2.2.1.3. Huminas	8
2.3. El cultivo de cacao en Perú.....	8
2.4. Antecedentes.....	9
III. MATERIALES Y MÉTODOS	10
3.1. Lugar de ejecución.....	10
3.2. Características de las áreas de estudio	10
3.3. Materiales y métodos.....	11
3.3.1. Materiales.....	11
3.3.2. Metodología.....	12
3.3.2.1. Tipo y nivel de investigación.....	12
3.3.2.2. Diseño de la investigación	12
3.3.2.3. Procedimiento experimental	12
3.3.2.4. Obtención de la muestra de suelo	13
3.3.2.5. Obtención de muestras de almendras de cacao.....	14
3.3.3. Fraccionamiento químico de la materia orgánico del suelo	15
3.3.3.1. Extracción de humina	15
3.3.3.2. Extracción de ácidos fúlvicos	15
3.3.3.3. Extracción de ácidos húmicos	15

3.3.4.	Análisis de cadmio total en las fracciones químicas y en almendras de cacao	16
3.3.5.	Análisis de cadmio disponible en suelo y en las fracciones químicas...	16
3.3.6.	Análisis del carbono orgánico del suelo y de las fracciones químicas ..	16
3.3.7.	Análisis estadísticos	17
3.3.8.	Características a evaluar	17
3.3.8.1.	Del suelo	17
3.3.8.2.	De las almendras	17
IV.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	18
4.1.	Contenido de cadmio total y disponible en las fracciones químicas de la materia orgánica del suelo (huminas, ácidos húmicos y ácidos fúlvicos).	18
4.1.1.	Cadmio total.....	18
4.1.2.	Cadmio disponible	21
4.2.	Contenido de carbono en las fracciones químico de la materia orgánica del suelo (huminas, ácidos húmicos y ácidos fúlvicos).....	23
4.3.	Contenido de cadmio en almendras de cacao	25
4.4.	Correlación de Pearson entre cadmio disponible, total, carbono y almendras relacionado a las fracciones huicas	27
4.4.1.	Correlación entre cadmio disponible con cadmio total, carbono y almendras	27
V.	CONCLUSIONES	30
VI.	PROPUESTAS A FUTURO	31
VII.	REFERENCIAS	32
	ANEXOS	39

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla	Página
1. Bases para la separación química y las fracciones orgánicas obtenidas	6
2. Coordenadas en UTM de las parcelas muestreadas.	10
3. Análisis de correlación de Pearson entre cadmio disponible con cadmio (Cd), carbono y cadmio en almendras	27
4. Análisis de pH y cadmio en almendras de cacao	40
5. Análisis de cadmio total (ppm) en las fracciones químicas de materia orgánica del suelo	41
6. Análisis de cadmio disponible (ppm) en las fracciones químicas de materia orgánica del suelo	42
7. Análisis de carbono orgánico total (%) en las fracciones químicas de materia orgánica del suelo.....	43

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura	Página
1. Imagen satelital del campo experimental.....	10
2. Imagen de una parcela de cacao.....	13
3. Selección de cinco mazorcas por planta por cada sub parcela.....	14
4. Determinación de cadmio total en las fracciones químicas de la materia orgánica del suelo (huminas, ácidos húmicos y ácidos fúlvicos).....	18
5. Determinación de cadmio disponible en las fracciones químicas de la materia orgánica del suelo (huminas, ácidos húmicos y ácidos fúlvicos).....	21
6. Regresión lineal simple entre cadmio total con cadmio disponible en suelo.....	23
7. Determinación de carbono en las fracciones químicas de la materia orgánica del suelo (Huminas, ácidos húmicos y ácidos fúlvicos).....	24
8. Cadmio en almendras de cacao.....	26
9. Panorámica de una parcela en estudio.....	44
10. Ocho muestras de una parcela.....	44
11. Traslado de muestras al laboratorio de suelo – UNAS.....	45
12. Preparando patrones para las lecturas.....	45
13. Preparando muestras para determinar carbono orgánico.....	46
14. Muestra de suelo más dicromato y ácido sulfúrico para determinar carbono orgánico.....	46
15. Lectura de carbono orgánico.....	47
16. Digestión de cadmio en la campana.....	47
17. Muestras de cadmio para las lecturas.....	48

RESUMEN

La investigación tuvo como objetivo principal determinar el contenido de cadmio (Cd^{+2}) y carbono orgánico (CO) en distintas fracciones químicas de la materia orgánica del suelo (MOS), así como el contenido total de Cd^{+2} en las almendras de cacao, para el estudio se seleccionaron cuatro parcelas (Huáscar, Capitán Arellano, Zanja Seca y Alto San Juan), cada una dividida en ocho subparcelas. Se llevó a cabo el fraccionamiento químico del CO del suelo, de las sustancias húmicas se calcula el CO, el Cd^{+2} disponible y total en los suelos, así como el Cd^{+2} presente en las almendras de cacao. Los resultados indicaron que las parcelas de Huáscar y Alto San Juan presentaron los mayores contenidos de Cd^{+2} total y disponible (3,198 y 2,820 ppm), con la fracción humana (HUM) mostrando el mayor contenido de Cd^{+2} , seguida por la fracción ácidos fúlvicos (AF), mientras que la fracción ácidos húmicos (AH) mostró el menor contenido de Cd^{+2} . En cuanto al contenido de CO, la parcela Capitán Arellano exhibió el mayor contenido (3,540 %), seguida por Alto San Juan y Huáscar, con menores valores observados en Zanja Seca; la fracción HUM presentó el mayor contenido de CO, seguida por la fracción AF. Además, se encontró un mayor contenido de Cd^{+2} en las almendras de cacao de la parcela Capitán Arellano (5,464 ppm), seguido por Huáscar y Zanja Seca, mientras que Alto San Juan mostró el menor contenido. Se determinó una fuerte correlación entre el cadmio (Cd) disponible y el Cd total en el suelo, especialmente en las fracciones HUM, AH y AF, sin embargo, esta disponibilidad no se refleja en la acumulación de Cd en almendras, la interacción entre Cd y el carbono total varía según la fracción del suelo, lo que resalta la complejidad de su movilidad y disponibilidad.

Palabras claves: Cacao, fracciones húmicas, huminas, ácidos húmicos y ácidos fúlvicos

ABSTRACT

The main objective of the research was to determine the content of cadmium (Cd^{+2}) and organic carbon (CO) in different chemical fractions of soil organic matter (SOM), as well as the total content of Cd^{+2} in cocoa beans, for the study four plots are selected (Huáscar, Capitán Arellano, Zanja Seca and Alto San Juan), each divided into eight subplots. The chemical fractionation of the CO in the soil was carried out, the CO, the available and total Cd^{+2} in the soils, as well as the Cd^{+2} present in the cocoa beans, were calculated from the humic substances. The results indicated that the plots of Huáscar and Alto San Juan presented the highest contents of total and available Cd^{+2} (3,198 and 2,820 ppm), with the humic fraction (HUM) showing the highest content of Cd^{+2} , followed by the fulvic acids fraction (AF), while the humic acids fraction (AH) showed the lowest Cd^{+2} content. Regarding CO content, the Capitán Arellano plot exhibited the highest content (3,540 %), followed by Alto San Juan and Huáscar, with lower values observed in Zanja Seca; The HUM fraction presented the highest CO content, followed by the AF fraction. In addition, a higher Cd^{+2} content was found in the cocoa beans from the Capitán Arellano plot (5,464 ppm), followed by Huáscar and Zanja Seca, while Alto San Juan showed the lowest content. Significant correlations were identified between available and total Cd^{+2} with the HUM and AF fractions, as well as correlations with CO in different soil fractions and in cocoa beans, highlighting the influence of pH on these relationships.

Keywords: Cocoa, humic fractions, humins, humic acids and fulvic acids

I. INTRODUCCIÓN

El cacao es una especie neotropical originaria de la zona amazónica de América del Sur, que abarca Perú, Ecuador, Venezuela, Colombia y Brasil, los aztecas lo describían como "el alimento de los dioses", derivado de las palabras griegas Theo (dios) y broma (alimento), durante la conquista de América, los españoles llevaron el cacao a Europa y África, donde

El Cd^{+2} es un metal pesado sin función biológica esencial, tóxico en bajas concentraciones para plantas, animales y humanos (Gramlich et al., 2018). La presencia de Cd^{+2} en el cultivo de cacao genera preocupación a nivel local, regional, nacional y mundial. El cacao producido en América Latina es muy demandado para la producción de chocolates de calidad (Ramírez et al., 2018). Investigaciones en parcelas de cacao durante la última década han demostrado concentraciones elevadas de Cd^{+2} disponible en suelos y de Cd^{+2} total en cacao en el departamento de Huánuco. Tantalean y Huauya (2017) reportaron una concentración de 1,71 mg/kg de Cd^{+2} disponible en el suelo, y Zug et al. (2019) informaron un valor medio de 2,46 mg/kg de Cd^{+2} en cacao, señalando que el contenido de Cd^{+2} en el suelo es el principal impulsor de la acumulación de Cd^{+2} en el cacao. Los niveles de Cd^{+2} en los granos se deben a la absorción directa por las plantas de cacao desde los suelos que contienen Cd^{+2} (Ramtahal et al., 2018); estos se acumulan en hojas, mazorcas y granos (Ramtahal et al., 2016).

La problemática planteada genera la interrogante: ¿qué fracción del CO retiene mayor cantidad de CO y Cd^{+2} disponible y total del suelo? Este trabajo se justifica al proporcionar información sobre el contenido de CO y Cd^{+2} en las fracciones químicas del CO del suelo, evaluando estos indicadores en las diferentes fracciones químicas del CO (HUM, AH y AF), lo que permite entender el manejo de la materia orgánica en los suelos. Estos datos son aplicables en sistemas de manejo de la materia orgánica del suelo y permiten monitorear la evolución de estos individuos.

Esta investigación aporta datos científicos importantes sobre la calidad de la materia orgánica del suelo y su evolución y manejo. Con base en los resultados obtenidos, se logró contrastar parcialmente la hipótesis, ya que los indicadores establecen.

Objetivo general

Determinar el contenido de cadmio y carbono orgánico en las fracciones químicas de la materia orgánica del suelo y el contenido de cadmio en almendras de cacao en cuatro zonas cacaoteras del distrito de Luyando.

Objetivo específico

1. Determinar el contenido de cadmio total y disponible en las fracciones químicas de la materia (cadmio en huminas, ácidos húmicos y ácidos fúlvicos) en cuatro suelos cacaoteras del distrito de Luyando
2. Determinar el contenido de carbono orgánico total en las fracciones químicas de la materia (C.O en huminas, ácidos húmicos y ácidos fúlvicos) en cuatro suelos cacaoteras del distrito de Luyando
3. Determinar el contenido de cadmio en almendras de cacao en cuatro zonas cacaoteras del distrito de Luyando.
4. Correlacionar el cadmio en las fracciones químicas con cadmio en almendras de cacao.

II. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. Generalidades del cadmio

El cadmio, un metal pesado, se clasifica entre los elementos más perjudiciales, compartiendo esta distinción con el mercurio y el plomo. Se encuentra naturalmente disperso en diversas formas minerales en la naturaleza. No obstante, la influencia humana ha contribuido significativamente a su propagación, desde los primeros días de la actividad minera y metalúrgica de otros metales, hasta el reconocimiento posterior de su valor en la industria. La problemática asociada al cadmio no solo radica en su alta toxicidad, sino también en su prolongada vida media y su capacidad para acumularse en organismos vivos (Capó, 2007).

Elemento químico poco común, identificado con el símbolo Cd^{+2} y número atómico 48. Está estrechamente vinculado al zinc y suele encontrarse asociado a este en la naturaleza. Su peso atómico es de 112,40 y presenta una densidad relativa de 8,65 a 20 °C (68 °F). El cadmio exhibe un punto de fusión de 320,9 °C (610 °F) y un punto de ebullición de 765 °C (1410 °F), ambos inferiores a los del zinc. En la tabla periódica, pertenece al grupo IIB junto con el zinc y el mercurio. Sus propiedades químicas se sitúan en un punto intermedio entre las del zinc metálico en soluciones ácidas de sulfato. Con ocho isótopos estables en la naturaleza y una vez radioisótopos inestables de origen artificial, el cadmio se presenta como un elemento versátil. En compuestos estables, el Cd^{+2} es divalente y su ion es incoloro (Charrupi y Martínez, 2017).

El Cd^{+2} se dispersa de manera amplia, ya sea flotando en el aire, donde se adhiere en diminutas partículas como óxido de Cd^{+2} , viajando distancias considerables antes de regresar a la tierra en forma de polvo, se propaga en el suelo, debido a la aplicación de ciertos fertilizantes o al uso de excremento de animales en áreas de cultivo, encuentra su camino hacia el agua, aunque en cantidades reducidas, provenientes de derrames o escapes en sitios de desechos peligrosos, así como en aguas residuales industriales y domésticas (MINSA, 2013).

2.1.1. Cadmio en suelo

Los metales pesados tienen la capacidad de retenerse en el suelo, pero también pueden ser desplazados en la solución del suelo mediante diversos mecanismos biológicos y químicos (Yang et al., 1998). La concentración media de Cd^{+2} en los suelos oscila entre 0,07 y 1,1 mg/kg, con un nivel base natural que no sobrepasa los 0,5 mg/kg (Kabata-Pendias, 2010). En algunos casos, los suelos exhiben niveles elevados de Cd^{+2} debido a la presencia original del elemento en las rocas a partir de las cuales se formaron. La fertilización fosfática constituye una vía importante de introducción de Cd^{+2} en los suelos agrícolas. Las rocas fosfóricas, utilizadas como materia prima en la producción de fertilizantes fosfáticos,

contienen niveles de metales pesados que, aunque varían según su origen geográfico, generalmente superan los valores promedio de la corteza terrestre. Estos metales persisten en proporciones significativas en los fertilizantes industriales, que luego se aplican al suelo junto con el fósforo.

Los lodos derivados de las aguas residuales urbanas, ricos en nutrientes, se utilizan para fertilizar algunos cultivos. Gracias a su alto contenido de materia orgánica, se ha demostrado que estos lodos son beneficiosos en la recuperación de suelos afectados por procesos de desertificación, según investigaciones de la Universidad de Sevilla, España. Entre los metales pesados presentes en los lodos, el cadmio representa un riesgo ambiental significativo debido a su movilidad en el suelo y su facilidad de absorción por las plantas. Algunas fuentes locales de contaminación con cadmio, con menor impacto en suelos destinados a cultivos, incluyen la emisión aérea de polvo y vapores provenientes de operaciones mineras, fundiciones de metales y plantas incineradoras (Macano, 2000).

2.1.2. Cadmio en plantas

El Cd^{+2} no se clasifica como un elemento esencial para los procesos metabólicos; Sin embargo, es absorbido por los sistemas de organografía vegetal y se acumula en cantidades significativas. En cada escenario de estudio, se establece una relación lineal entre la presencia de cadmio en la planta y su presencia en el medio de crecimiento. El pH se identifica como el factor primordial que regula la asimilación total y relativa del cadmio; algunos resultados sugieren que el cadmio puede volverse más móvil en suelos alcalinos debido a la formación de complejos o quelatos metálicos, mientras que en otros casos, la asimilación del cadmio por la planta parece no depender del pH (Kabata-Pendias, 1992, según citado por Suaña, 2017)

2.1.3. Cadmio en medio ambiente

El Cd^{+2} es un componente no esencial en los sistemas biológicos y se detecta combinado como contaminante en alimentos, agua y aire, teniendo la capacidad de recorrer grandes distancias en estos medios acuosos y gaseosos. Aunque se encuentra en bajas concentraciones en la corteza terrestre, su presencia es notable en minerales como la greencknita o sulfuro de Cd^{+2} . Sin embargo, la principal fuente de su existencia en el entorno proviene principalmente de la contaminación causada por actividades humanas, como se señala en estudios como Repetto (1995) y Cemean y Repetto (2012).

2.1.4. Efecto del cadmio en la salud humana

El ingreso de cadmio en la dieta humana se produce a través de vegetales y productos animales, representando la fuente primordial de exposición para aquellos que no

tienen una exposición laboral. Los alimentos con las concentraciones más elevadas de cadmio son el pescado y los cereales, seguidos de los tubérculos, mientras que las frutas y semillas contienen cantidades inferiores en comparación con las hojas. Cabe destacar que el cadmio se adhiere a las plantas de manera más rápida que el plomo, según los estudios de Camean y Repetto (2012) y Ramírez (2012).

La ingesta de Cd^{+2} provoca complicaciones en la salud, siendo los efectos tóxicos del cadmio más prominentes en los huesos, los riñones y los pulmones. Entre los perjuicios que ocasionan en estos órganos se encuentran la osteomalacia y la necrosis del tejido renal. La semivida del cadmio en el organismo oscila entre 10 y 30 años, y su eliminación es un proceso lento. En términos de manifestaciones gastrointestinales, la ingestión oral de 10 mg de cadmio puede dar lugar a trastornos gastroduodenales, con náuseas y vómitos como respuestas inmediatas, aunque la dosis oral aguda que podría tener efectos mortales en un adulto supera los 350 mg. Otros síntomas relevantes incluyen diarrea, dolor abdominal y muscular, así como salivación excesiva (Pérez y Azcona, 2012).

Las plantas absorben el Cd^{+2} , y la ingesta de cadmio por parte de los humanos ocurre principalmente a través de los alimentos, como en el caso específico del cacao. La presencia de cadmio en los alimentos puede aumentar significativamente su concentración en los seres humanos, generando efectos adversos en la salud, como diarreas, dolor abdominal, vómitos intensos, daño al sistema nervioso central, fragilidad ósea, afectación del sistema inmunológico, problemas reproductivos, incluida la posibilidad de infertilidad, trastornos psicológicos, posibles daños en el ADN y el riesgo de desarrollar cáncer, según lo indicado por García y Azcona (2012).

2.2. Carbono orgánico del suelo

El carbono orgánico del suelo (COS) desempeña un papel crucial en el ciclo global del carbono, representando un 69,8 % del carbono orgánico presente en la biosfera (FAO, 2001). Su influencia se extiende a la sostenibilidad de los sistemas agrícolas, afectando las propiedades del suelo que impactan en el rendimiento continuo de los cultivos. El COS está directamente relacionado con la cantidad y disponibilidad de nutrientes en el suelo, aportando elementos como el nitrógeno, cuya contribución mineral suele ser deficiente. Asimismo, al ajustar la acidez y la alcalinidad hacia valores cercanos a la neutralidad, el COS aumenta la solubilidad de diversos nutrientes. Los coloides de alta capacidad de intercambio catiónico proporcionados por el COS asociado a la materia orgánica del suelo son fundamentales. Su impacto en las propiedades físicas se manifiesta al modificar la estructura y la distribución del

espacio poroso del suelo. La cantidad de COS no solo está condicionada por las condiciones ambientales locales, sino que también se ve significativamente afectada por las prácticas de manejo del suelo. Mientras que algunas prácticas de manejo conllevan una disminución del COS con el tiempo, existen otras que favorecen su acumulación (Martínez et al., 2008).

2.2.1. Fraccionamiento químico del carbón orgánico del suelo

Armado et al. (2009) señalan que la fracción orgánica del suelo, conocida como humus, ha sido categorizada desde diversas perspectivas. En términos de su composición química, existen categorías que destacan la estructura de los compuestos del humus y su comportamiento desde una perspectiva físico-química. Estas clasificaciones de los componentes orgánicos se basan principalmente en la solubilidad de dichos constituyentes en diferentes solventes, lo que conduce a la diferenciación entre ácidos fúlvicos, ácidos húmicos y huminas.

Se basa en las disparidades en las propiedades de los compuestos orgánicos, tales como su solubilidad en diferentes valores de pH, su resistencia frente a distintos oxidantes o su susceptibilidad a la hidrólisis (Tabla 1). El fraccionamiento químico clásico, utilizado durante mucho tiempo, implica la separación por solubilidad a pH ácido o básico, resultando en la obtención de las sustancias húmicas. Este método fue ampliamente aplicado y evolucionó para proporcionar una composición cada vez más precisa de los materiales obtenidos. No obstante, diversos protocolos químicos han sido desarrollados con el objetivo de separar fracciones orgánicas lábiles o resistentes (Galantini y Iglesias, 2018).

Tabla 1. Bases para la separación química y las fracciones orgánicas obtenidas

Origen de la contaminación		Metal pesado
Solubilidad	En agua caliente	CO soluble
	En diferente pH	Acido húmico Ácido fúlvico Humina
Resistencia a la oxidación	Dicromato de K	
	H ₂ O ₂	CO fácilmente oxidable
Resistencia a la hidrólisis	Permanganato de K	
	Hidrólisis ácida H ₂ SO ₄	CO recalcitrante

Fuente: Galantini y Iglesias, (2018).

Entre las técnicas más comunes se encuentra la separación de carbohidratos solubles o totales (Bongiovanni y Lobartini, Duval et al., 2014; Galantini et al., 2016), así como oxidaciones parciales que modifican el método clásico de Walkley y Black

(Chan et al., 2001) o emplear permanganato de potasio (Blair et al., 1995). En el caso de las fracciones resistentes, la hidrólisis ácida se utiliza para separar los materiales orgánicos más recalcitrantes presentes en el suelo (Paul et al., 2006).

2.2.1.1. Ácidos húmicos

Una sustancia orgánica de color negro o marrón, es soluble en agua en ambientes más alcalinos. Proviene de compuestos orgánicos presentes en el suelo, como el humus o la turba, y resulta del procesamiento de materia orgánica muerta por microorganismos. Su elevado peso molecular lo convierte en un excelente mejorador del suelo, especialmente en sustratos sin tierra, donde revitaliza el entorno de cultivo. La inclusión de ácido húmico enriquece la retención de agua, facilita la circulación y disponibilidad de nutrientes, y actúa como agente quelante al unirse a micronutrientes, favoreciendo su absorción por las plantas. Además, promueve un intercambio iónico más eficiente y contribuye a una mejor capacidad amortiguadora, facilitando la absorción de elementos como calcio, hierro, magnesio, zinc y manganeso. Estos beneficios se observan tanto en cultivos en suelo como en sistemas hidropónicos (Cerisola, 2015). Su composición elemental, con un predominio de núcleos aromáticos derivados de fenoles, quinonas, ácidos benzocarboxílicos, ácidos benzoicos y ácidos furánicos, se confirma mediante espectros IR, evidenciando la presencia de grupos atómicos como C=O, C=C y C=N (Camargo y Cruz, 1999).

2.2.1.2. Ácidos Fúlvicos

De tonalidad amarillo claro o marrón, se postula científicamente como una sustancia compuesta por el ADN de formas inactivas de vida orgánica, lo que implica que ocupa una posición intermedia entre el reino mineral y el orgánico. Dada su estrecha relación con el ácido húmico, algunos lo consideran una versión más "refinada" de este último. Posee un peso molecular inferior, menor cantidad de carbono y mayor contenido de oxígeno en comparación con el ácido húmico. Caracterizado por su bajo peso molecular, tiene la capacidad de penetrar fácilmente en las hojas y células de las plantas, llegando incluso a las mitocondrias. Esta propiedad hace que el ácido fúlvico sea altamente efectivo cuando se aplica en raíces y hojas (Cerisola, 2015). Los ácidos fúlvicos pueden entenderse como asociaciones de pequeñas moléculas hidrofílicas con suficientes grupos funcionales ácidos para mantener los grupos fúlvicos dispersos en la solución a cualquier pH (Lopez et al., 2014). En términos de composición elemental, contiene un 43,6% de carbono, 4,9% de hidrógeno, 1,7% de nitrógeno y 49,8% de oxígeno, demostrando una significativa capacidad de intercambio catiónico: 700 meq/100 g de ácido fúlvico (Camargo y Cruz, 1999).

2.2.1.3. Huminas

Camargo y Cruz (1999) describió que el ácido húmico exhibe las siguientes características: "Se trata de la fracción más duradera, no susceptible a la extracción mediante solventes convencionales, con un elevado peso molecular (superior a 100.000 g/mol) y una composición química que incluye un 55,9% de carbono, un 5,9% de hidrógeno, un 0,9% de nitrógeno y un 37,3% de oxígeno".

2.3. El cultivo de cacao en Perú

En los últimos años, la demanda de cacao ha superado la oferta a nivel mundial, y se prevé que la demanda de cacao destinada al consumo, ya sea en forma de chocolate u otras presentaciones, tienda a volverse más exclusiva, orientándose hacia nichos específicos de mercado. Solo un modesto 8% a 10% de la producción global de cacao recibe la categorización de cacao fino o cacao de aroma. En el caso de Perú, alrededor del 44% de las áreas cultivadas corresponden a este tipo de cacao, abarcando las variedades criollo y nativa. Es relevante destacar que Perú se ubica en el noveno lugar entre los principales productores mundiales de cacao y en el segundo lugar entre los principales productores y exportadores de cacao fino. A diferencia de la tendencia global, la producción nacional de cacao ha experimentado un crecimiento notable del 15,5% anual, especialmente entre 2009 y 2015, alcanzando una producción de 87,3 mil toneladas y una superficie cosechada de 121,3 mil hectáreas en 2015.

Los principales destinos de las exportaciones peruanas son la Unión Europea, que representó el 84% de las exportaciones en 2015, con un volumen importado de 47,7 mil toneladas. Este mercado se caracteriza por el aumento de precios en destinos clave como Holanda, Bélgica e Italia. Otro mercado destacado, aunque con volúmenes relativamente bajos, es Estados Unidos, con una participación promedio del 6,6%. Esta participación puede explicarse por los precios más bajos en ese mercado, lo que ha desincentivado mayores exportaciones (MINAGRI, 2016).

En el año 2013, la producción global de cacao alcanzó aproximadamente 3,9 millones de toneladas, con África contribuyendo con un 72 %, América con un 15 % y Asia con un 13 %. Es relevante destacar que más del 50 % de la producción mundial proviene exclusivamente de dos países en África Occidental: Costa de Marfil (1,46 millones de toneladas) y Ghana (850 000 toneladas). Aunque la tendencia de la producción ha sido creciente, hubo una disminución de casi el 3 % en comparación con 2012, principalmente debido a la reducción de rendimientos en ese año por parte de los principales productores, Costa de Marfil y Ghana, con disminuciones del 2,8 % y 5 %, respectivamente (ICCO, 2014).

En términos de la demanda de cacao en grano, la Unión Europea representa el 37 % del consumo mundial, seguida por América del Norte con un 24 % y Asia con un 16 %. A pesar de la recesión experimentada en 2009

2.4. Antecedentes

Se llevó a cabo un estudio en Cerro de Pasco, Perú, enfocado en la concentración de metales en la almendra de cacao de la Cooperativa Agropecuaria Bella en la Provincia de Leoncio Prado – Huánuco. El propósito era mejorar la producción de cacao para consolidar su presencia en el mercado internacional. A lo largo del tiempo, la cooperativa ha mejorado su capacidad organizativa y la calidad de sus productos, siendo reconocida en mercados como Francia, Italia y Rusia. Sin embargo, la producción de cacao orgánico en Tingo María enfrenta desafíos importantes, especialmente la presencia de metales en los suelos (cadmio, plomo, hierro y cobre), lo que representa una amenaza futura para la economía de la cooperativa según Lino (2019).

Se realizó un estudio en Huánuco, Perú, sobre la presencia de cadmio en el suelo y frutos de una plantación de cacao en Aucayacu durante 2020. En la evaluación del suelo, se identificó que la zona cacaotera de Aucayacu tiene un pH de 5.19, indicando alta acidez. Aunque la concentración de cadmio en el suelo (0,21 ppm) está por debajo del Estándar de Calidad Ambiental (ECA) para suelos agrícolas (1,4 ppm), se constató la presencia de cadmio en la plantación. En cuanto a los frutos, se encontró una concentración de cadmio en los granos de cacao (0.638 ppm), superando el Límite Máximo Permisible (LMP) establecido en 0.50 ppm (Chávez, 2020). Estos resultados resaltan la necesidad de evaluar y gestionar la contaminación por cadmio en la plantación de cacao de Aucayacu.

III. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Lugar de ejecución

El estudio de investigación se realizó específicamente en cuatro zonas cacaoteras como son: Huascar, Capitan Arellano, Sanja seca y Alto San Juan pertenecientes al distrito de Luyando, provincia de Leoncio Prado, región Huánuco, las coordenadas se presentan en las Tabla 1 y en la Figura 1, mostramos la imagen satelital de las zonas de muestreo.

Tabla 2. Coordenadas en UTM de las parcelas muestreadas.

Distrito	Lugar	Coordenadas		Altitud
		m E	m N	
Luyando	Huascar	399823	8973182	705
Luyando	Alto San Juan	403173	8973662	726
Luyando	Capitan Arellano	400396	8970424	772
Luyando	Zanja Seca	400534	8972504	703

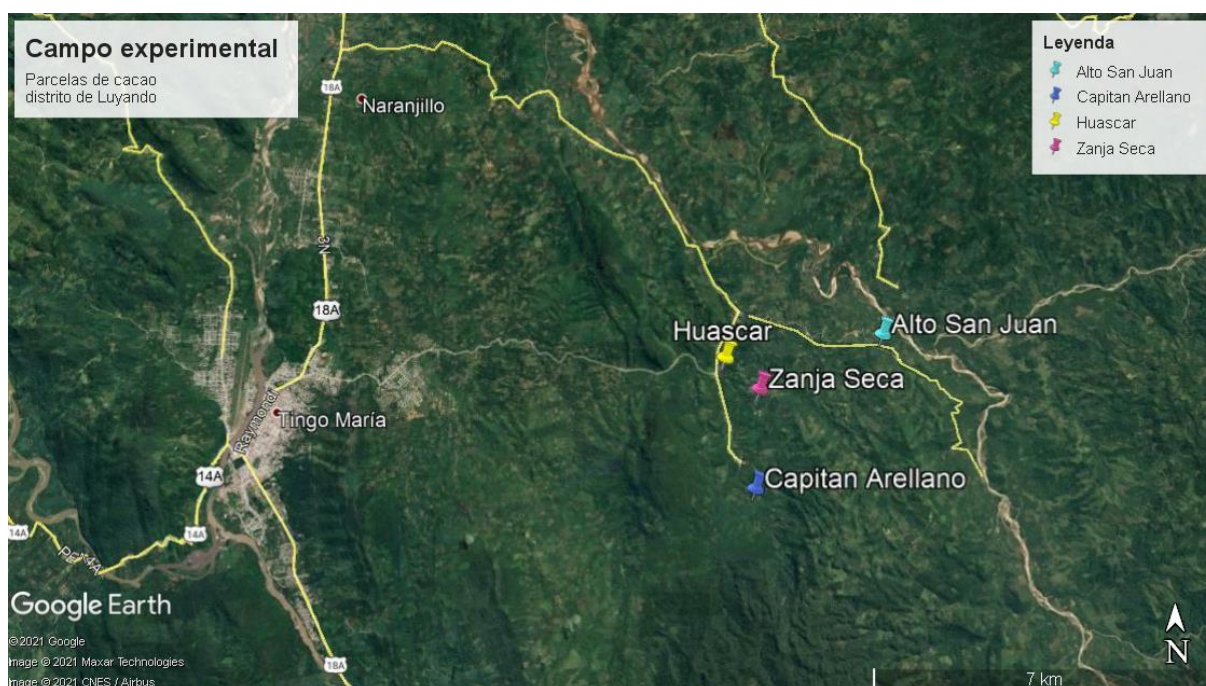


Figura 1. Imagen satelital del campo experimental

3.2. Características de las áreas de estudio

Las parcelas del experimento consistieron en monocultivos de cacao de la variedad CCN-51, manejados con un nivel técnico medio. En las localidades de Huascar y

Capitán Arellano, se emplea un sistema de siembra de tres bolillos, con plantas de 7 años de edad que tienen un rendimiento promedio de 1000 kg/ha, el terreno presenta una pendiente de 2 a 5 % y sigue un sistema de producción convencional, con dos podas anuales, control sanitario mediante el recojo de mazorcas enfermas y fertilización media.

Por otro lado, en las parcelas de las localidades Sanja Seca y Alto San Juan, el rendimiento promedio es de 800 kg/ha, también en un sistema de producción convencional con siete años de antigüedad. Aquí, se utiliza un sistema de siembra cuadrático y el terreno presenta una pendiente de 5 a 10 %. Las podas se realizan una vez al año, no hay fertilización, pero se controlan enfermedades y plagas.

La elección de estas parcelas se fundamentó en información obtenida del análisis de contenido de cadmio realizado por el Laboratorio de Suelos, Agua y Ecotoxicología de la Facultad de Agronomía (UNAS). Esta información fue crucial para asegurar que las parcelas seleccionadas fueran representativas y adecuadas para los objetivos del estudio ya que presentan contenido de cadmio en suelo alto.

3.3. Materiales y métodos

3.3.1. Materiales

Para la realización del estudio se utilizaron diversos materiales que fueron fundamentales en cada etapa del proceso. Se emplearon bolsas con cierre hermético (2 kg) y bolsas chequeras (5 kg) para el almacenamiento y transporte seguro de las muestras de suelo, garantizando la preservación de sus características. La cinta masking y las etiquetas marcadas fueron utilizadas para etiquetar y sellar las bolsas y otros recipientes, asegurando una correcta identificación y clasificación de las muestras.

Durante la fase de análisis y documentación, se utilizó papel milimétrico para la elaboración de gráficos y dibujos precisos de los datos recopilados, y papel reciclado para notas, registros y otros documentos necesarios. Plumones indelebles se usaron para marcar permanentemente las etiquetas y bolsas de muestras.

Para la recolección de muestras de suelo, se emplearon envases plásticos y un tubo muestreador, además de un machete para la limpieza de la superficie del suelo y la preparación del área de muestreo. Herramientas de laboratorio como balanzas, pipetas y frascos fueron esenciales para el análisis detallado de las muestras.

El uso de un GPS permitió registrar las coordenadas precisas de las áreas de muestreo, mientras que un USB se utilizó para el almacenamiento y transferencia de datos recopilados. Una laptop fue indispensable para el procesamiento y análisis de datos, así como

para la redacción de informes. Además, se utilizaron equipos de laboratorio especializados, como espectrofotómetros y agitadores, para llevar a cabo los análisis químicos necesarios. En conjunto, estos materiales aseguraron la precisión y confiabilidad de los resultados obtenidos en el estudio, permitiendo una gestión adecuada desde la recolección de muestras hasta el análisis y la interpretación final de los datos.

3.3.2. Metodología

3.3.2.1. Tipo y nivel de investigación

Es de tipo aplicada, porque se recurrió a conocimientos establecidos en las ciencias agrícolas y la geoestadística para evaluar la concentración de cadmio en la fracción química del suelo y en plantaciones permanentes de *T. cacao* en cuatro parcelas cacaoteras del distrito de Luyando, Sustentado en Vargas (2009), quien menciona que se basa fundamentalmente en los hallazgos tecnológicos de la investigación básica, ocupándose del proceso de enlace entre la teoría y el producto. Además, corresponde a un nivel de investigación descriptiva transversal, porque se evaluará la distribución del cadmio en la fracción física granulométrica del suelo en un momento determinado en cuatro parcelas cacaoteras del distrito de Luyando. Sustentado en Corona. (2016), quienes indican que la investigación no experimental se realiza sin manipular deliberadamente variables para observar fenómenos tal y como se dan en un contexto natural para después analizarlos.

3.3.2.2. Diseño de la investigación

Correspondió a una investigación no experimental, descriptiva transversal, que describe la distribución del cadmio en las fracciones química del suelo en un momento determinado. Los datos se someterán al análisis estadístico descriptivo general, para determinar las medias de los diferentes indicadores y la correspondiente determinación de cadmio en almendras de cacao en cuatro zonas cacaoteras del distrito de Luyando.

3.3.2.3. Procedimiento experimental

Se realizó en cuatro parcelas de cultivo de cacao, cada una con una superficie aproximada de una ha, antes de proceder con el muestreo de suelo y almendras, se realizó un recorrido exhaustivo/cada parcela para evaluar las condiciones generales del cultivo, cada parcela se identificó ocho subparcelas, cada una compuesta por nueve plantas, estas plantas se sembraron con un distanciamiento de 3 m entre ellas, garantizando así un espacio óptimo para su desarrollo, la disposición y distribución de las plantas en las subparcelas se muestra detalladamente en la Figura 2.

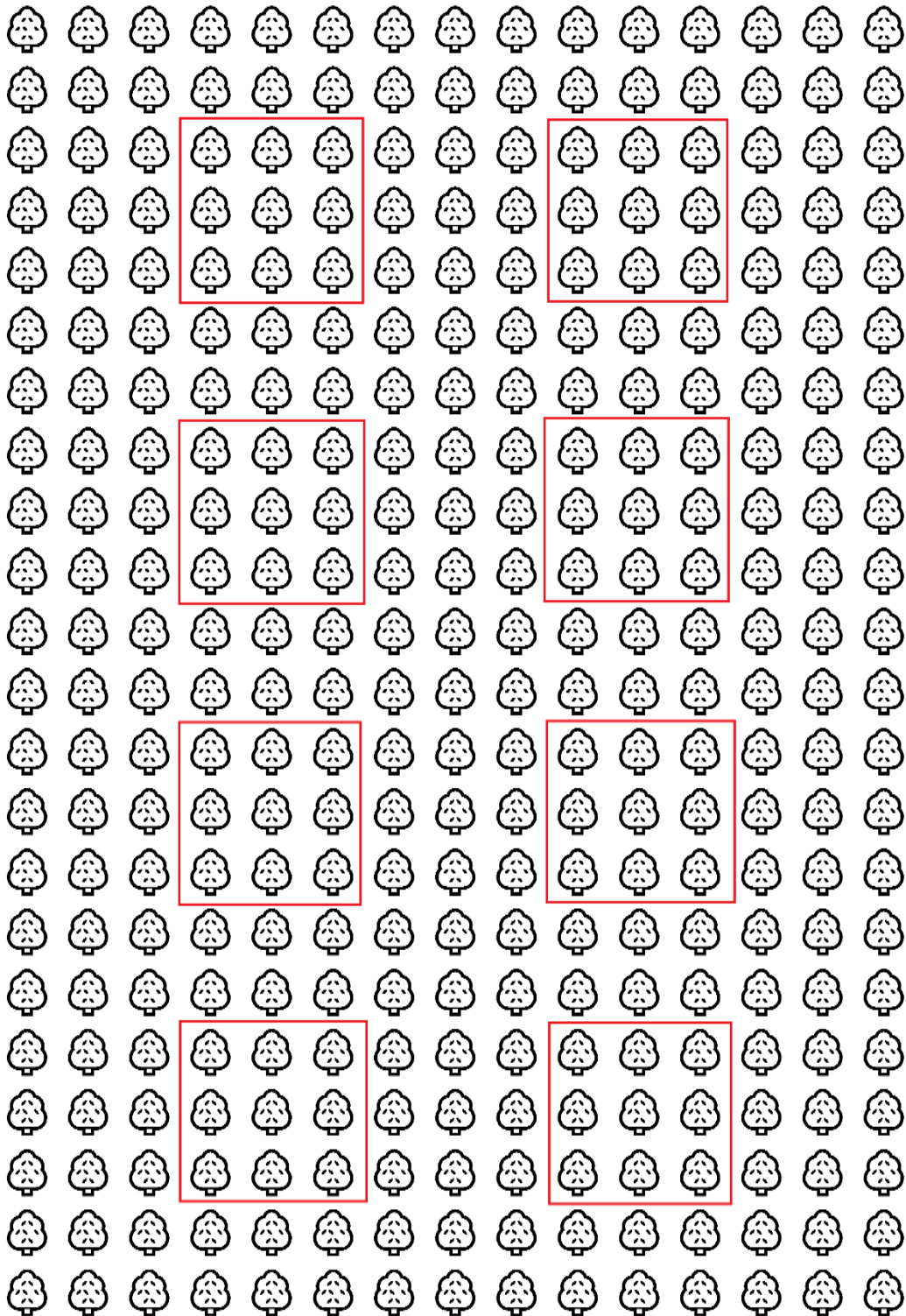


Figura 2. Imagen de una parcela de cacao

3.3.2.4. Obtención de la muestra de suelo

Después de identificar las subparcelas en cada parcela de cacao, se realizó un muestreo sistemático del suelo alrededor de las raíces de las plantas. De cada planta se obtuvieron cinco submuestras, sumando 45 submuestras por subparcela, lo que

permitió una cobertura exhaustiva del área de estudio. Estas submuestras se mezclaron homogéneamente y se aplicó el método de cuarteo para obtener una muestra representativa de aproximadamente 1 kg. Las muestras finales se etiquetaron detalladamente y se enviaron al Laboratorio de Suelo, Agua y Ecotoxicología de la Facultad de Agronomía de la Universidad Nacional Agraria de la Selva (UNAS) para su análisis.

3.3.2.5. Obtención de muestras de almendras de cacao

De las nueve plantas identificadas en cada subparcela, se reconocieron cinco mazorcas de cacao por planta, totalizando 45 mazorcas por subparcela. Las mazorcas se llevaron a una estación de procesamiento donde se extrajeron y homogeneizaron las semillas para obtener una muestra representativa de aproximadamente 1 kg. Estas muestras se colocan en bolsas de tocuyo, etiquetadas con información detallada sobre la parcela, la fecha de recolección y las condiciones del muestreo. Finalmente, las muestras se enviaron al Laboratorio de Análisis de Suelo, Agua y Ecotoxicología de la Facultad de Agronomía de la UNAS para realizar los análisis de cadmio.

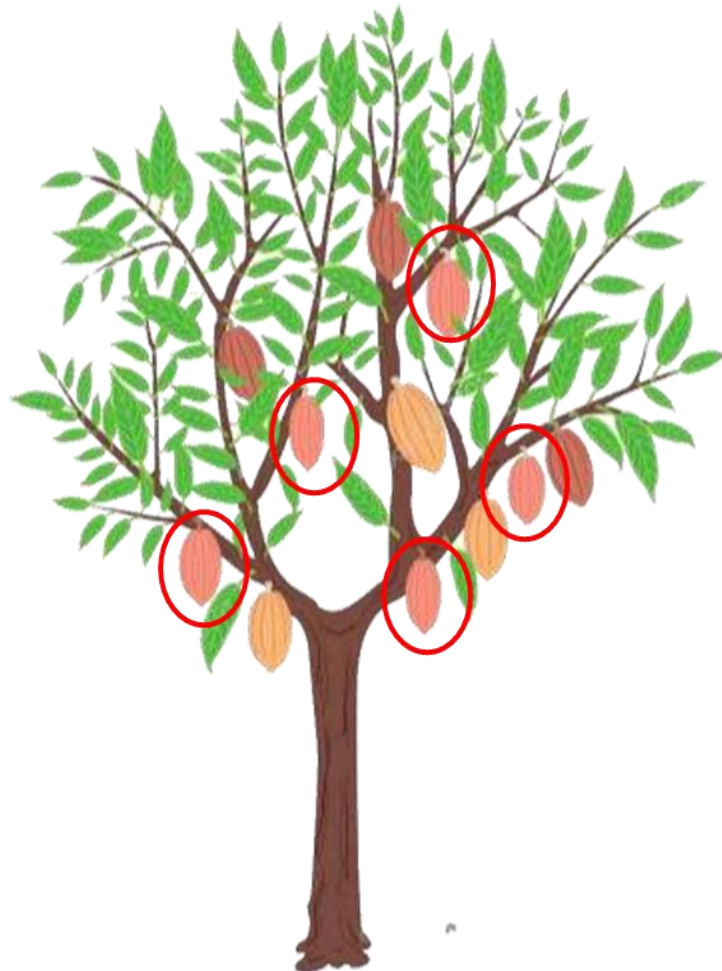


Figura 3. Selección de cinco mazorcas por planta por cada sub parcela

3.3.3. Fraccionamiento químico de la materia orgánico del suelo

El fraccionamiento químico de la materia orgánico del suelo se realizó de acuerdo al protocolo de la Sociedad Internacional de las Sustancias Húmicas (SHs), según lo propuesto por Swift, (1996):

3.3.3.1. Extracción de humina

En un tubo de centrifuga sin base y tapa rosca de 50 mL se pesó 4 g de suelo tamizado a 2 mm; se adicionó 40 mL de NaOH 1 mol, se agitó por 60 minutos a 150 rpm en un agitador horizontal; se dejó reposar por 12 horas, se centrifugó por 20 minutos a 5000 rpm, el sobrenadante (extracto alcalino) fue transferido a un matraz aforado de 200 mL. Se adicionó nuevamente 40 mL de NaOH (Merck) 1 mol a la muestra del tubo centrifuga, se llevó a agitación por 5 minutos a 150 rpm en un agitador horizontal, luego de la agitación, se dejó en reposo por 60 minutos, se centrifugó por 20 minutos a 5000 rpm en una Centrifuga, el sobrenadante (extracto alcalino) fue transferido al mismo matraz aforado de 200 mL, del procedimiento anterior; este proceso se repitió 1 vez más, quedando un volumen aproximado de 120 mL en el matraz, aforándolo este a 200 mL con agua destilada, quedando así la solución de extracto alcalino. El residuo remanente en el tubo centrifuga es la fracción Humina, el cual se procederá a lavarlo con mucho cuidado con agua destilada en un vaso beacker de 50 mL de capacidad, se secará en una estufa a 45° C por 72 horas, una vez obtenido el peso constante, el material seco se molió con mortero y pilón de ágata, luego de esto las muestras fueron codificadas y guardadas en bolsas de polietileno, para luego realizar el análisis de carbón orgánico y cadmio.

3.3.3.2. Extracción de ácidos fúlvicos

Del extracto alcalino de 200 mL obtenido en la extracción anterior (Humina), se tomará 50 mL en tubos centrifuga con base y tapa rosca de 50 mL. Se ajustará el pH a 2,0 con H₂SO₄ 98 %, luego se dejó reposar por 18 horas para la total precipitación de la fracción húmica, se centrifugó por 20 minutos a 5000 rpm, el sobrenadante (ácidos fúlvicos) fue separado para hacer los análisis de carbono total y cadmio.

3.3.3.3. Extracción de ácidos húmicos

Al precipitado retenido en los tubos de centrifuga, obtenido de la extracción anterior (ácidos fúlvicos), se le adiciono 15 mL de NaOH (Merck) 0,1 mol, se agitó manualmente para homogenizar la muestra, para luego ser transferido a una fiola de 25 mL y se enrazará a 25 mL con agua destilada. Las muestras de ácidos húmicos obtenidas, fueron refrigeradas para luego continuar con los análisis de carbono total y cadmio.

3.3.4. Análisis de cadmio total en las fracciones químicas y en almendras de cacao

El análisis de cadmio total en las fracciones químicas en almendras de cacao se realizó de acuerdo al protocolo de digestión ácida descrito por (Arévalo et al., 2017):

Para la humina y almendras de cacao se pesó 0,5 g, se añadió 10 mL de solución HNO₃ (65 %) y HClO₄ (98 %) de Merck en una relación de 4:1, se realizó la digestión en una plancha de calentamiento, marca VWR, por un periodo aproximado de 3 horas a 250°C, la solución obtenida se filtró a través de papel filtro Whatman N° 20, se enrasó con agua ultra pura tipo II en una fiola de 25 mL marca Durand y se realizaron las lecturas respectivas en el espectrofotómetro de absorción atómica (EAA). Solo para los ácidos húmicos se realizó la variación de peso a volumen de las muestras ya que son líquidas, utilizando 4 mL de muestra, el resto del procedimiento es el mismo.

3.3.5. Análisis de cadmio disponible en suelo y en las fracciones químicas

El análisis de Cd disponible en suelos, Cd disponible en Humina, se realizó de acuerdo a lo descrito por Ramtahal et al., (2015):

Se pesó 5 g de muestra (sólida) en vasos de polietileno de 50 mL de capacidad, se agregó 20 mL de EDTA 0.05 M (Merck), se agitó en un floculador de 11 viales, marca Efe medic por 120 minutos (tiempo óptimo de extracción), adicionalmente se centrifugó a 2000 rpm (opcional) en una Centrifuga, marca Hettich, modelo Rotofix 32 A, se filtró con papel Whatman N° 20, una vez obtenido el extracto, se realizaron las respectivas lecturas en el espectrofotómetro de absorción atómica (EAA). El Cd disponible en ácidos húmicos, se obtuvo de la cuantificación directa en el equipo de absorción atómica.

3.3.6. Análisis del carbono orgánico del suelo y de las fracciones químicas

El análisis de COT del suelo y COT en la fracción humina, se realizó de acuerdo al método de combustión húmeda de Walkley y Black modificado o técnica colorimétrica descrita por Arrieché et al., (2013), y se midió la absorbancia a una longitud de onda de 590 nm, mediante un espectrofotómetro UV visible marca Thermo Scientific, modelo genesys 10S:

Se pesó 0,5 g de las muestras en un matraz Erlenmeyer de 125 mL marca Durand, se añadió 5 mL de solución de dicromato de potasio (Merck) 1N, se agitó el matraz suavemente, se añadió 10 mL de H₂SO₄ (Merck) al 98% de pureza, se agitó nuevamente durante unos 10 segundos, se dejó reposar 4 horas, luego se enrasó con agua destilada a 50 mL, se mezcló y se dejó en reposo durante toda la noche. Al siguiente día se trasvasó el sobrenadante a las cubetas y se realizó las lecturas respectivas de las muestras, a una longitud de onda de 590 nm en el espectrofotómetro UV visible.

Previamente se preparó patrones en concentraciones de 0.000, 1.088, 2.175, 4.351, 6.526, 8.701, 10.877, 13.052 y 17.402 mg C/L, en fiolas aforadas de 50 mL, de una solución patrón de glucosa equivalente a 2,175 mg C/mL.

Para los patrones se agregó 5 mL de solución de dicromato de potasio (Merck) 1N, se agito el matraz suavemente, se añadió 10 mL de H₂SO₄ (Merck) al 98% de pureza y se enraso con agua destilada a 50 mL, se dejó reposar hasta el siguiente día y se realizó las lecturas en espectrofotómetro UV-Visible marca Thermo Scientific, modelo genesys 10S, a longitud de onda de 590 nm. Para la determinación del COT en los ácidos húmicos se reemplazó el peso por volumen, se utilizó un volumen de 4 mL de muestra, el resto del procedimiento de análisis es el mismo.

3.3.7. Análisis estadísticos

Los datos obtenidos a partir del análisis de suelos y almendras de cacao fueron procesados y analizados con el uso del programa InfoStat 2008.

3.3.8. Características a evaluar

3.3.8.1. Del suelo

- Cadmio en Huminas
- Cadmio en ácidos húmicos
- Cadmio en ácidos fúlvicos

3.3.8.2. De las almendras

- Cadmio en almendras.

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Contenido de cadmio total y disponible en las fracciones químicas de la materia orgánica del suelo (huminas, ácidos húmicos y ácidos fúlvicos).

4.1.1. Cadmio total

Los resultados de la concentración de Cd total del suelo en los diferentes lugares de estudio, se determinó mayor contenido en las parcelas de Huascar y Alto San Juan con promedios de 3,198 y 2,820 ppm; en la fracción química de la materia orgánica del suelo (MOS) de las cuatro parcelas en estudio, la mayor concentración de Cd se mostró en la fracción Humina (HUM) con valores promedios de 2,116; 0,465 y 0,076 ppm, seguido de la fracción Ácidos Fúlvico (AF) y con menor contenido de Cd en la fracción Ácidos Húmicos (AH), a excepción de la parcela Alto San Juan que muestra mayor contenido de Cd en la fracción AF con promedio de 1,982 mg Cd/kg, seguido de la fracción HUM y menor contenido en la fracción AH; el orden de fijación del Cd en la fracción química fue HUM>AF>AH, distinto se determinó en suelo de Alto San Juan, ya que el orden es el siguiente AF>HUM>AH (Figura 4).

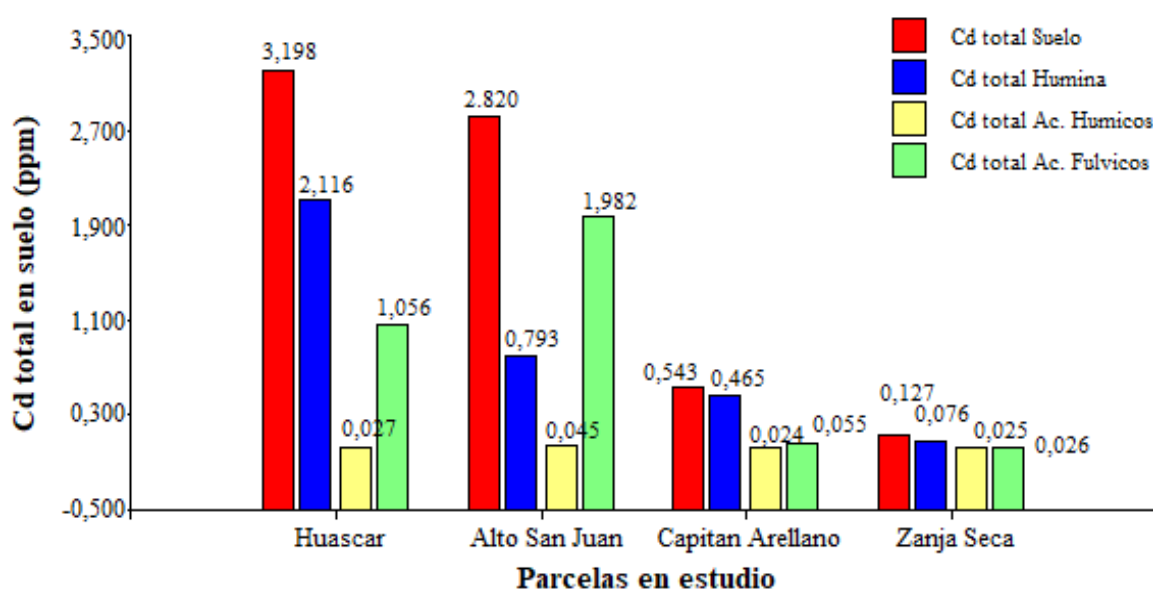


Figura 4. Determinación de cadmio total en las fracciones químicas de la materia orgánica del suelo (huminas, ácidos húmicos y ácidos fúlvicos)

Los compuestos de cada fracción química de la MOS se determinan como SHs, constituido por diferentes tamaños de moléculas, influenciado por los diferentes tipos de suelos, así como las diferentes condiciones ambientales (Mosquera et al., 2007), razones por las cuales las concentraciones de Cd son diferentes en cada fracción química de la MOS,

mostrando mayor contenido de Cd en la fracción HUM, según, Cortés et al. (2007), refiere que la fracción HUM, es la sustancia que no es soluble en medio alcalino ni ácido, considerada como un fracción estable, compuesto por un 55,9 % de carbono (C), de manera que, el Cd se asocia con los carbonatos del suelo, al respecto Huaraca-Fernández et al. (2020), refiere que los carbonatos en el suelo ayudan a inmovilizar gran cantidad de metales pesados, en especial Cd, razones por las cuales, se determinó mayor contenido de Cd en la fracción HUM.

Los resultados de nuestro experimento concuerdan con los resultados de Chávez (2020 y Dávila (2019), quienes también determino mayor contenido de Cd en la fracción HUM, aunque el menor contenido de Cd obtuvo en fracción AF, lo que no concuerda con nuestro experimento, toda vez que se determinó menor contenido de Cd en la fracción AH; Estos resultados difieren con lo obtenido por Ottos (2018), quien determino mayor contenido de Cd en la fracción AF, en su estudio realizado en plántones de cacao en vivero bajo sombra, se tiene conocimiento que el Cd en la fracción HUM, se atribuye a las condiciones climáticas como la temperatura y altas precipitaciones.

No obstante, los resultados obtenidos en la parcela Alto San Juan coinciden significativamente con los descubrimientos de Ottos (2018). Se evidencia que la concentración más alta de cadmio (Cd) se encuentra en la fracción AF (Arcilla Fina), y este fenómeno se atribuye a los grupos funcionales presentes en dicha fracción. Según las investigaciones de Angulo (2009) y Pimienta (2004), se ha reportado que la fracción AF es comparativamente más reactiva y posee un contenido de oxígeno dos veces superior al de la fracción AH (Arcilla Gruesa). Además, la fracción AF presenta una mayor cantidad de grupos carboxílicos (-COOH) e hidroxilos (-COH), generando compuestos químicos más reactivos y con una capacidad de intercambio aniónico y catiónico duplicada.

El método de análisis empleado permite la separación eficiente de las fracciones AF y AH, logrando aislar el cadmio y precipitarlo preferentemente en la fracción AF en forma solubilizada. Este fenómeno podría estar influenciado por las características específicas del suelo, según lo sugiere Salas (2019). Torres (2016) señala que la fracción AF contiene una mayor proporción de grupos carboxílicos en comparación con la fracción AH.

Cabe destacar además que las Sustancias Húmicas (HUM) que constituyen la fracción AF contienen más de 60 elementos, incluyendo metales pesados, según la investigación de Salas (2019). Estos resultados subrayan la complejidad y diversidad de las interacciones químicas en el suelo, proporcionando una perspectiva más detallada sobre la distribución y el comportamiento del cadmio en las diversas fracciones del suelo analizadas.

En este estudio actual, se evidencia que la proporción total de cadmio (Cd) en la fracción de materia orgánica humificada (HUM) alcanza el 66.166%, 85.635% y 59.843% en las parcelas Huascar, Capitán Arellano y Zanja Seca, respectivamente. Estas concentraciones elevadas de Cd en la fracción HUM se explican por la presencia de compuestos químicos y grupos funcionales con afinidad por el Cd, así como por minerales característicos de la HUM de la materia orgánica del suelo (MOS), según lo indicado por Fontana et Alabama. (2008).

La HUM, al tener una acidez menor en comparación con los ácidos fúlvicos (AF) y ácidos húmicos (AH), muestra una fuerte asociación con minerales. Además, contiene una variedad de compuestos químicos que incluyen no solo componentes húmicos como hidrocarburos, ésteres y ácidos, sino también estructuras polares vinculadas a los minerales del suelo. Estos componentes son notables por su resistencia a la revisión, destacándose entre todas las sustancias húmicas (SH).

Los grupos funcionales presentes en la HUM exhiben una marcada afinidad con el Cd, especialmente los grupos carboxílicos, hidroxílicos y fenólicos, según señalan Ozkaraova y Bekbölet (2010). Además, Trujillo y Quiñones (2010) argumentan que la resistencia a la degradación microbiana de los ácidos húmicos se debe a la formación de complejos metálicos con la arcilla y la materia orgánica (MO). Con más de 60 elementos minerales, incluyendo aquellos derivados de minerales del suelo, es probable que estas interacciones expliquen los niveles elevados de Cd en la fracción HUM. La variabilidad en la concentración de Cd en esta fracción también se atribuye a las características específicas del suelo en cada parcela estudiada.

La fracción AF presenta una concentración de Cd considerablemente superior a la fracción AH, con porcentajes del 33,021%, 70,284%, 10,129%, y 20,472%, respectivamente. En este contexto, Ottos (2018) indica que un elevado contenido de materia orgánica (MO) en el suelo contribuye a la acumulación de Cd en la fracción AF, principalmente debido a la presencia destacada de carboxilatos. Asimismo, González-Mendoza y Zapata-Pérez (2008) han comunicado que la complejación de metales mediante carboxilatos representa un mecanismo esencial para prevenir la absorción de elementos tóxicos.

De acuerdo con Yáñez et al. (2018), las enmiendas orgánicas aumentan la retención de Cd al incrementar la carga superficial del suelo. La presencia de MO en el suelo transforma el Cd soluble/intercambiable en una fracción de enlace orgánico, disminuyendo de este modo su absorción (Huaraca-Fernández et al., 2020). El Cd se une al carbono del suelo, quedando inmovilizado en este proceso (Prieto et al., 2009). Es importante resaltar que, en suelos ligeramente ácidos a alcalinos, la absorción de Cd suele ser más pronunciada debido a

la presencia de carbonatos en el suelo. No obstante, este fenómeno está condicionado por la textura del suelo y la capacidad de intercambio catiónico (CIC), como indica Sánchez (2021).

La mayor retención de Cd en el suelo tiene relación con las características bioquímicas y composición del material que da la formación de MO en el suelo (Torres, 2016), también tendrá importancia en la biodisponibilidad del Cd (Marchive et al., 2021), La mayor retención del Cd está relacionado a las propiedades químicas-físicas del suelo así como los polímeros muy complejos originados por condensación y polimerización de moléculas orgánicas recalcitrantes (Alvarez et al., 2008), también por los grupos funcionales como carboxílicos, hidroxílicos y fenólicos con mucha afinidad de adsorber metales (Ozkaraova y Bekbölet, 2010) referencias que explican las diferencias de Cd en las diferentes fracciones químicas de la MOS, y parcelas del experimento.

4.1.2. Cadmio disponible

Los resultados de la concentración de Cd disponible del suelo en los diferentes lugares de estudio, se determinó mayor contenido en las parcelas de Huascar y Alto San Juan con promedios de 1.696 y 1,097 mg Cd/kg; en la fracción química de la materia orgánica del suelo (MOS) de las cuatro parcelas en estudio, la mayor concentración de Cd se mostró en la fracción HUM con valores promedios de 1,182; 0,806; 0,245 y 0,057 mg Cd/kg, seguido de la fracción AH y con menor contenido de Cd en la fracción AF, el orden de disponibilidad de Cd en la fracción química de la MOS fue HUM>AF>AH (Figura 6).

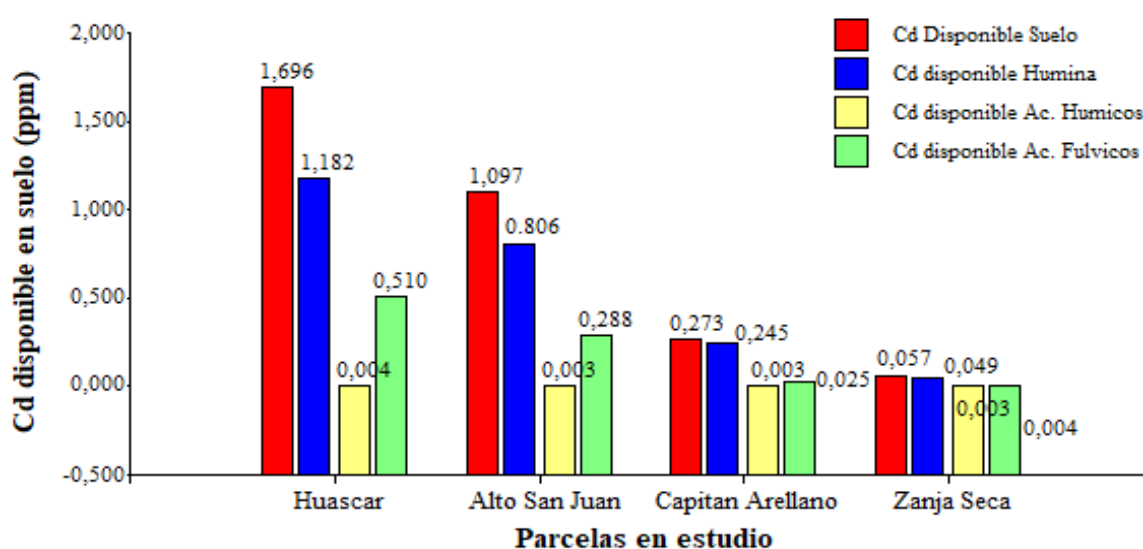


Figura 5. Determinación de cadmio disponible en las fracciones químicas de la materia orgánica del suelo (huminas, ácidos húmicos y ácidos fúlvicos)

Las fracciones químicas de la MOS, presentan diferentes concentraciones de Cd disponible, debido a su composición, tamaño de moléculas, además, influenciadas por las condiciones ambientales (Mosquera et al., 2007), al igual que Cd total, también en Cd disponible se muestra mayor en la fracción HUM, seguido de AF y menor en AH, es decir, a mayor concentración de Cd retenido en la fracción del suelo mayor fue su disponibilidad de Cd, sin embargo este Cd no es que esté disponible para las plantas, debido que la fracción HUM de la MOS es una fracción no solubles en medio alcalino, ni ácido y generalmente insolubles en agua (Vaca et al., 2006), sin embargo, en soluciones acuosas de los hidróxidos y sales básicas (Velarde, 2017), el Cd hidrosoluble es potencialmente móvil (Sánchez, 2021), la fracción AF de la MOS, que de naturaleza es coloidal y fácilmente dispersables en agua (Cerisola, 2015), razones por las cuales se considera al Cd potencialmente móvil en agua, se debe tener consideración al contenido de Cd disponible, en las diferentes fracciones de la MOS ya que, el Cd estaría disponible para fue absorbido por las plantas en solución acuosa e hidratada.

Los resultados de Cd disponible en la fracción HUM representa el 69,693; 73,473; 89,744 y 85,965 % en las parcelas Huascar, Alto San Juan, Capitan Arellano y Zanja Seca, el Cd muestra mayor afinidad a las propiedades químicas – físicas y grupos funcionales de la fracción HUM (Fontana et al., 2008), a esta fracción lo integra compuestos químicos, hidrocarburos, ésteres, ácidos y estructuras polares (Veobides et al., 2018), estos grupos funcionales como carboxílicos, hidroxílicos y fenólicos de la HUM tienen afinidad con el Cd (Ozkaraova y Bekbölet, 2010), los cuales justifica el mayor porcentaje de Cd en la fracción HUM, en el experimento.

Los resultados muestran a la fracción AF con porcentajes de 30,071; 26,253; 9,158 y 7,018 %, los AF tiene relación con al alto porcentaje de MOS y la alta presencia de carboxilatos (Ottos, 2018); la MO y las arcillas retiene al Cd gracias a las cargas negativas que presentan, de manera que, al aumentar el porcentaje de MOS aumentara la retención de Cd (Clark et al. 2007), el carbono del suelo inmoviliza al Cd (Prieto et al., 2009), aunque se debe tener en cuenta la clase textural, debido que las arcillas retienen mayor cadmio que los suelos de textura arenoso (Hernández-Baranda et al., 2019). Es importante mantener MOS fresca en el suelo, debido que cuando la MOS se descompone la liberación de Cd fue mayor. El diagrama de regresión entre Cd en total con Cd disponible en suelo, se muestra una regresión positiva, significa que mientras el contenido de Cd total incrementa, también incrementa el Cd disponible (Figura 7), el coeficiente de determinación (R^2) es 0,94, significa que la relación de las variables en estudio es de 94 %, al respecto Martínez (2005), establece que el R^2 oscila entre 0 y 1, y cuanto más se acerca su valor a 1, mayor fue la dependencia de las variables en estudio.

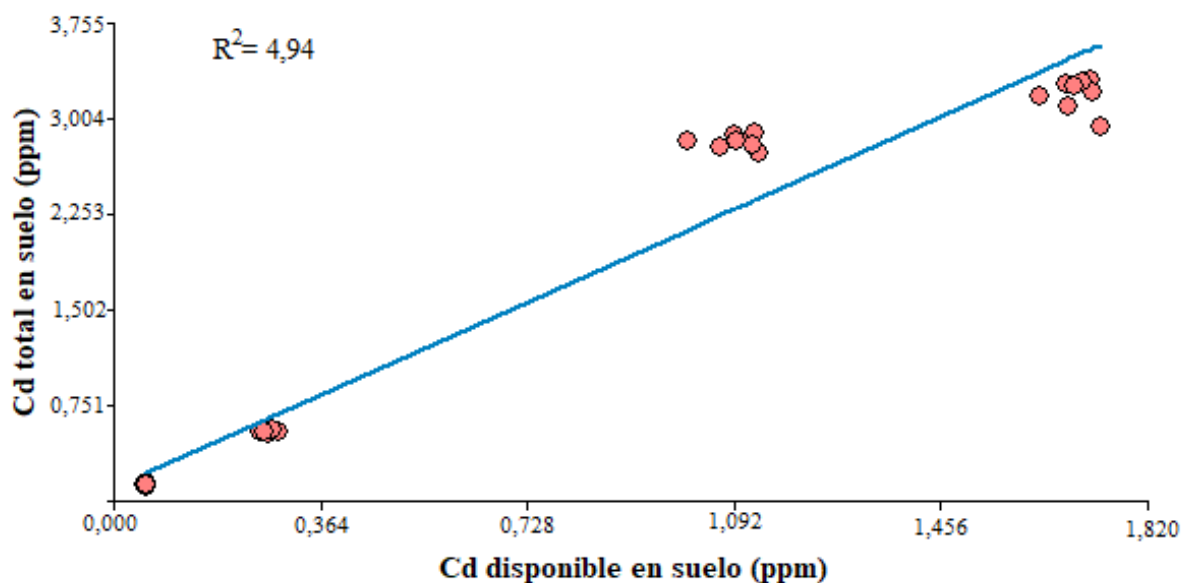


Figura 6. Regresión lineal simple entre cadmio total con cadmio disponible en suelo

Los resultados muestran que en las cuatro parcelas analizadas (Huáscar, Alto San Juan, Capitán Arellano y Zanja Seca), el porcentaje de Cadmio (Cd) disponible en relación con el Cd total fue del 53,03 %, 38,89 %, 50 ,23 % y 44,88 %, respectivamente. Estos resultados discrepan con los hallazgos de Dávila (2019), quien sostuvo que el Cd disponible representa el 30,95% del Cd total. De manera similar, Huauya y Huamani (2014) señalan que el Cd disponible constituye el 33 % del Cd total al evaluar el contenido de metales pesados en el cultivo de cacao orgánico en Centroamérica (República Dominicana). De acuerdo con las directrices del comité conjunto OMS-FAO (1992), que establece un límite máximo permitido de 0,99 ppm de cadmio disponible en el suelo (según Cárdenas, 2012), se evidencia que las parcelas Huáscar y Alto San Juan exceden dicho límite. En sintonía con la investigación de Cárdenas (2012), quien examinó 20 parcelas de cacao orgánico en la provincia de Leoncio Prado y encontró que algunas superaban los límites permisibles, nuestros resultados confirman la presencia de concentraciones de Cd que rebasan el límite permitido en ciertas parcelas. de la provincia de Leoncio Prado.

4.2. Contenido de carbono en las fracciones químico de la materia orgánica del suelo (huminas, ácidos húmicos y ácidos fúlvicos).

Los resultados del contenido de carbono total del suelo en los diferentes lugares de estudio, se determinó mayor contenido en las parcelas de Capitán Arellano con promedio de 3,540 %, seguido de las páselas de Alto San Juan y Huascar con promedios de

3,159 y 3,067 % y con menor contenido de carbono total fue la parcela Zanja Seca con promedio de 2,284 %, Vela et al. (2012), refiere que el carbono total para mayoría de los suelos, la capa superficial debe contener entre 0,5 a 3 % de carbono orgánico, teniendo en cuenta la referencias, se determinó que las parcelas Capitán Arellano, Alto San Juan y Huascar superar el valor preestablecido y la parcela de Zanja Seca está dentro del rango preestablecido; asimismo, se determinó mayor contenido de carbono orgánico en la fracción HUM, seguido de la fracción AF y menor carbono en la fracción AH, el orden del contenido de carbono en el suelo fue HUM>AF>HU (Figura 8).

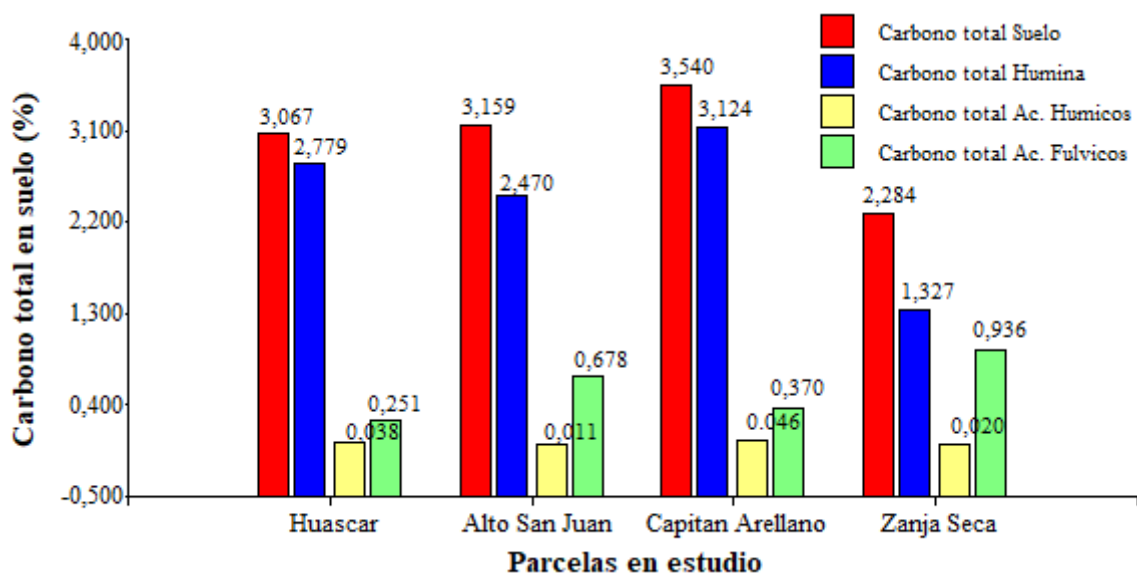


Figura 7. Determinación de carbono en las fracciones químicas de la materia orgánica del suelo (Huminas, ácidos húmicos y ácidos fúlvicos)

Se muestran mayor en fracción HUM con porcentajes promedios de 90,610; 78,189; 88,249 y 58,100 % en las parcelas de Huascar, Alto San Juan, Capitán Arellano y Zanja Seca respectivamente, la MO está compuesta por 65 a 75 % de ácidos húmicos (Julca-Otiniano et al., 2006), asimismo el contenido de carbono en los ácidos húmicos de suelo variar dentro del rango de 53,8-58,7 % (García-Silva et al., 2006), la fracción HUM, es una parte de las SHs, con pocos solubles, considerado como la fracción más resistente a la descomposición del material orgánico, resistente a la biodegradación; por lo que en ocasiones presentan restos vegetales no humificados (Julca-Otiniano et al., 2006), probablemente es por ello que en esta fracción se obtiene mayor porcentaje de carbono orgánicos. La distribución del carbono orgánico en la fracción AF varía en las cuatro parcelas estudiadas, presentando porcentajes de 8,184 %, 21,462 %, 10,452 %, y 40,981 %. En contraste, la fracción AH exhibe porcentajes

más bajos, con un promedio de 1,239 %, 0,348 %, 1,299 % y 0,876 % de carbono orgánico. Es fundamental resaltar que el contenido de carbono en las SHs contribuye de manera significativa a las propiedades edáficas, aportando porosidad y permeabilidad que afecta tanto el flujo de agua como la aireación del suelo (Henrique et al., 2018).

Los agregados del suelo, que se identifican como polímeros amorfos con colores que varían de amarillo a negro, desempeñan un papel crucial como indicadores sensibles de cambios en la calidad del suelo asociados a los sistemas de manejo del mismo (García et al., 2012) . Estos agregados, con un peso molecular relativamente alto, se forman a través de reacciones secundarias de síntesis, ya sean bióticas o abióticas, y se clasifican según su solubilidad (Sánchez, 2021). La fracción AF, por ejemplo, presenta estructuras aromáticas y alifáticas altamente sustituidas con grupos funcionales oxigenados (Vázquez, 2013).

En cuanto a la composición, alrededor del 35 % de las moléculas de ácido húmico (HA) son aromáticas (anillos de carbono), mientras que el resto adopta una forma alifática (cadenas de carbono) (Pettit 2012). A diferencia de la fracción AF, el AH tiene un mayor peso molecular y una menor acidez. Compuesto principalmente por grupos hidroxilos (-OH) fenólicos y en menor medida por grupos carboxílicos (-COOH), el AH presenta una mayor agregación y estabilidad (Pimienta, 2004; Angulo, 2009). Es destacable que el AH tiene una acción más lenta pero persistente en la estructura del suelo, a diferencia del AF, que actúa de manera más rápida pero menos duradera (González y Sánchez, 2019).

Es esencial mencionar que el AH y el AF constituyen la fase líquida acuosa, mientras que los HUM representan la fracción sólida de la materia orgánica del suelo. Esta distinción explica la concentración más elevada de carbono orgánico en la fracción HUM.

4.3. Contenido de cadmio en almendras de cacao

El metal cadmio (Cd) está asociado con diversos trastornos, incluyendo el cáncer, lo que ha generado una atención especial, especialmente debido a su baja tolerancia en productos derivados del cacao. Estudios realizados por la Unión Europea han establecido un rango de tolerancia que varía desde 0,1 hasta 0,8 mg/kg en productos como chocolate y cacao en polvo (INIAP, 2015). En contraste, la Organización Mundial de la Salud (OMS) propone un rango de tolerancia más amplio, fijando en 7 mg/kg de peso corporal por semana, equivalente a 60-70 mg/día para un adulto (Jiménez, 2015; Barón, 2016). Destacar estas discrepancias en las directrices de tolerancia es crucial, ya que subraya la importancia de la regulación y la conciencia en el consumo de productos que podrían contener este metal perjudicial. Considerando los límites establecidos, el análisis de Cd en almendras de las cuatro parcelas en

estudio, superan ampliamente estos límites, donde se determinó mayor Cd en la parcela Capitán Arellano con valor promedio de 5,464 ppm, seguido de las parcelas Huascar y Zanja Seca con valores promedios de 3,650 y 1,579 ppm y con menor contenido de Cd en la parcela Alto San Juan con promedio de 0,935 ppm.

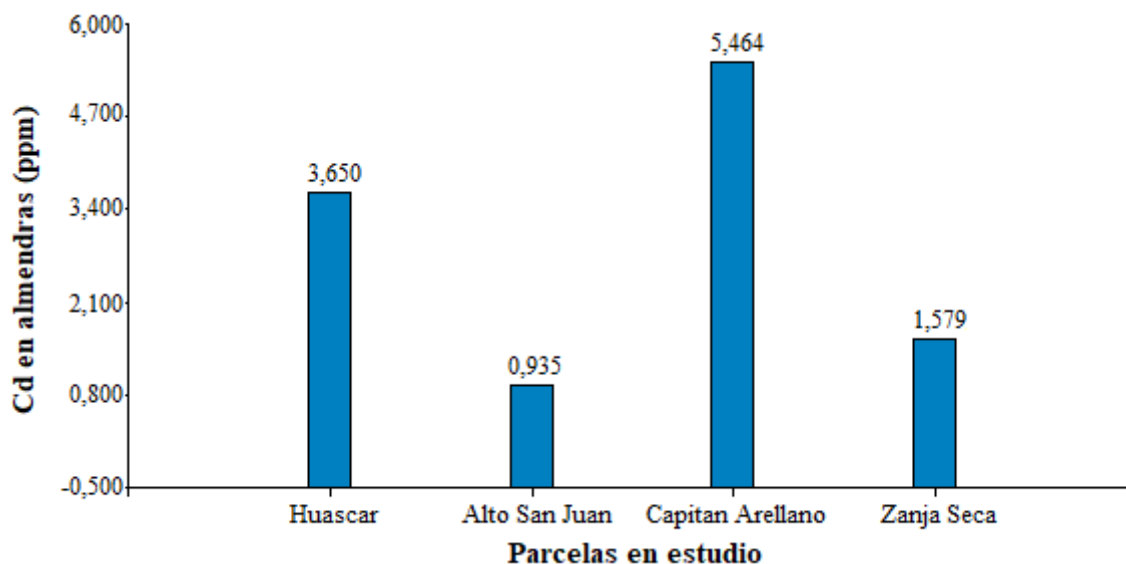


Figura 8. Cadmio en almendras de cacao

La información recopilada de diversos estudios indica que se han detectado concentraciones significativas de cadmio (Cd) en las almendras de cacao en la provincia de Leoncio Prado y otras zonas de producción. Un ejemplo concreto proviene del estudio de Cárdenas (2012), quien registró la presencia de 1,55 partes por millón (ppm) de cadmio en las almendras de cacao. Además, Arévalo-Hernández et al. (2017) identifican niveles de cadmio en el suelo y los granos que exceden los límites permitidos en las regiones de San Martín y Amazonas. Estos descubrimientos resaltan la preocupante presencia de cadmio en el cacao de estas áreas, enfatizando la necesidad de abordar y gestionar este problema para asegurar la calidad y seguridad de los productos derivados del cacao.

Las altas concentraciones de Cd en almendras, puede ser debido a las altas concentraciones de Cd disponible en el suelo, que además, dependerá de las características del suelo, como contenido de MO, coloides, textura, pH entre otros (Santamaria, 2019), el Cd es uno de los metales más móvil y biodisponible para las plantas (Huaraca-Fernandez et al., 2020); el Cd es absorbido por las plantas de cacao y los concentran en las semillas (Santander Ruiz et al., 2021), la presencia de Cd en tejidos comestibles del cacao, genera preocupación mundial, debido que es un riesgo potencial para la salud humana, por consumir productos contaminados

(Velásquez-Vélez et al., 2022), debido a ello la preocupación es mundial. En nuestro experimento el mayor contenido de Cd en almendras se muestra en la parcela Capitán Arellanos, puede estar relacionado al valor de pH, según Prieto et al. (2009), refieren que la adsorción de los metales pesados está fuertemente condicionada por el pH del suelo, también Prieto et al. (2009), señala que el pH de suelo está relacionado con la solubilidad del Cd; el rango del pH ha sido ampliamente estudiado en las cuales se determinó que el pH ácido el Cd es soluble (Cuizano et al., 2010), no obstante, la disponibilidad del Cd también estará en función a las características química del suelo (González-Flores et al., 2011), el tipo de suelo tiene importante influencia en la disponibilidad y absorción de Cd/la planta (Huamani et al., 2012), entre los parámetros que influyen en la absorción de Cd por las plantas es el pH, % de arcilla y la cantidad de Mg²⁺ (Arévalo-Hernández et al., 2017).

4.4. Correlación de Pearson entre cadmio disponible, total, carbono y almendras relacionado a las fracciones huicas

4.4.1. Correlación entre cadmio disponible con cadmio total, carbono y almendras

El análisis de correlación de Pearson entre el cadmio disponible y otras variables revela patrones interesantes (Tabla 3).

Tabla 3. Análisis de correlación de Pearson entre cadmio disponible con cadmio (Cd), carbono y cadmio en almendras

	Cd Disponible Suelo	Cd disponible Humina	Cd disponible Ac. Húmicos	Cd disponible Ac. Fúlvicos
Cd Total Suelo	0,972**	0,978**	0,090	0,944**
Sig.	0,000	0,000	0,624	0,000
Cd Total Humina	0,942**	0,936**	0,447*	0,941**
Sig.	0,000	0,000	0,010	0,000
Cd Total Ac. Húmicos	0,108	0,105	-0,133	0,112
Sig.	0,557	0,567	0,469	0,542
Cd Total Ac. Fúlvicos	0,725**	0,741**	-0,266	0,680**
Sig.	0,000	0,000	0,141	0,000
Carbono total Suelo	0,296	0,335	-0,405*	0,208
Sig.	0,100	0,061	0,022	0,253
Carbono total Humina	0,437*	0,467**	-0,217	0,366*
Sig.	0,012	0,007	0,232	0,039
Carbono total Ac. Húmicos	0,005	0,011	0,267	-0,006
Sig.	0,977	0,954	0,140	0,973
Carbono total Ac. Fúlvicos	-0,571**	-0,581**	-0,146	-0,543**
Sig.	0,001	0,000	0,426	0,001
Cd Total almendras	-0,059	-0,047	0,107	-0,086
Sig.	0,746	0,799	0,561	0,639

*Correlación significativa (p = 0,05) ** Correlación altamente significativa (P = 0,01)

Se observa una correlación altamente significativa entre el Cd disponible y el Cd total en el suelo (0,972**), lo cual sugiere que la disponibilidad de Cd está estrechamente relacionada con su concentración total, esta relación se mantiene tanto en HUM como en la fracción de AH y AF con correlaciones de 0,978**, 0,936** y 0,944**. En cuanto al carbono total, se observan correlaciones débiles con el Cd disponible en general, siendo más notable la correlación positiva significativa en HUM (0,437*) y la correlación negativa significativa en la fracción de ácidos fúlvicos (-0,571**). Por otro lado, no se encontró una relación significativa entre el Cd disponible y los niveles de Cd en almendras, indicando que la disponibilidad de cadmio en el suelo no se traduce directamente en su acumulación en los cultivos estudiados bajo estas condiciones.

El Cd disponible en HUM y varias variables muestra que existe una correlación altamente significativa y positiva con el Cd total en el suelo (0,978**) y con el Cd total específicamente en la fracción HUM (0,936**), indicando que a mayor cantidad de Cd total, mayor será el Cd disponible en esta fracción, asimismo, se observa correlación altamente significativa y positiva con el Cd total en la fracción de AF (0,741**). En cuanto al carbono, se encontró una correlación significativa y positiva con el carbono total en HUM (0,467**), y una correlación altamente significativa y negativa con el carbono total en la fracción de AF (-0,581**). No hay una correlación significativa entre el Cd disponible en HUM y el Cd presente en almendras.

El análisis de correlación de Pearson entre el Cd disponible en la fracción de ácidos húmicos (AH), existe una correlación significativa y positiva con el Cd total en HUM (0,447*), lo que indica que a mayor cantidad de Cd en huminas, mayor es la disponibilidad de Cd en la fracción de ácidos húmicos, además, hay una correlación significativa y negativa con el carbono total (-0,405*), sugiriendo que niveles más altos de carbono total están asociados con una menor disponibilidad de Cd en la fracción de AH. Estas relaciones muestran cómo las características del suelo, como el contenido de Cd en HUM y el carbono total, pueden influir en la disponibilidad de Cd en la fracción de AH

El análisis de correlación de Pearson entre el Cd disponible en la fracción de ácidos fúlvicos (AF), existe una correlación altamente significativa y positiva con el Cd total en el suelo (0,944**) y con el Cd total en HUM (0,941**), indicando que una mayor cantidad de Cd total y en HUM está asociada con una mayor disponibilidad de Cd en la fracción de AF, También se observa una correlación altamente significativa y positiva con el Cd total en la fracción de AF (0,680**), lo que refuerza la idea de que la disponibilidad de Cd en esta fracción está estrechamente relacionada con el contenido total de Cd en el suelo, además, hay una

correlación significativa y positiva con el carbono total en la fracción HUM (0,366*), sugiriendo que un mayor contenido de carbono en HUM está asociado con una mayor disponibilidad de Cd en AF. Por otro lado, existe una correlación altamente significativa y negativa con el carbono total en la fracción de AF (-0,543**), indicando que un mayor contenido de carbono en esta fracción se asocia con una menor disponibilidad de Cd.

V. CONCLUSIONES

1. Se determinan que las parcelas de Huáscar y Alto San Juan presentan los mayores contenidos de Cd^{2+} total y disponible (3,198 y 2,820 ppm), la fracción HUM mostró el mayor contenido de Cd^{2+} , seguida por la fracción AF, y la fracción AH presentó el menor contenido, el orden de fijación del Cd^{2+} en la fracción química fue $\text{HUM} > \text{AF} > \text{AH}$.
2. La parcela Capitán Arellano exhibió el mayor contenido de CO (3,540 %), seguida por las parcelas de Alto San Juan y Huáscar (3.159 y 3.067 %), en cambio, la parcela Zanja Seca mostró el menor contenido de CO (2,284 %), la fracción HUM presentó el mayor contenido de CO, seguida por la fracción AF, mientras que la fracción AH mostró el menor contenido. El orden del contenido de CO en el suelo fue $\text{HUM} > \text{AF} > \text{AH}$.
3. Se observaron que las almendras en la parcela Capitán Arellano registraron el mayor contenido de Cd^{2+} (5,464 ppm), seguidas por las parcelas Huáscar y Zanja Seca (3,650 y 1,579 ppm), la parcela Alto San Juan mostró el menor contenido de Cd^{2+} (0,935 ppm).
4. El estudio revela una fuerte correlación entre el cadmio (Cd) disponible y el Cd total en el suelo, especialmente en las fracciones HUM, AH y AF. Sin embargo, esta disponibilidad no se refleja en la acumulación de Cd en almendras. La interacción entre Cd y el carbono total varía según la fracción del suelo, lo que resalta la complejidad de su movilidad y disponibilidad.

VI. PROPUESTAS A FUTURO

1. Realizar más trabajos de investigación referente a las fracciones químicas, físicas densimétricas y granulométricas de la materia orgánica del suelo
2. Identificar mediante análisis de laboratorio, el material orgánico que genera más producción de humina (HUM).
3. Realizar trabajos de investigación aplicando enmiendas orgánicas líquidas para disminuir en lo posible el Cd^{+2} del suelo y Cd^{+2} en almendras de cacao.
4. Dilucidar si la retención del Cd^{+2} en las fracciones químicas, carboxílicos, oxidrilos, actividad microbiana, o su interacción entre estos.

VII. REFERENCIAS

- Alvarez, F. C., Enedi, A., Abreu, C. H., Muraoka, T y Trevizam, A. R. (2008). Fitodisponibilidad de cambio en el suelo de diferentes pH tratado con lodos albañal estimada por método isotópico y extracción química. *Quimica Nova*, 31(5), 1020–1026.
- Angulo, F. R. (2009). *Evaluación de cuatro bioestimulantes comerciales en el desarrollo de plantas injertadas de cacao (Theobroma cacao). cultivar nacional*. [Tesis de pregrado inédita]. Escuela Superior Política de Chimbote.
- Arévalo-Gardini, E., Obando-Cerpa, M. E., Zúñiga-Cernades, L. B., Arévalo-Hernández, C. O., Baligar, V y He, Z. (2016). Metales pesados en suelos de plantaciones de cacao (*Theobroma cacao*.) en tres regiones del Perú. *Ecología Aplicada*, 15(2), 81–89. <https://doi.org/10.21704/rea.v15i2.747>
- Arévalo-Hernández, C. O., Arévalo-Gardini, E., Farfán-Pinedo, A., Baligar, V y He, Z. (2017). Metales pesados en suelos, hojas y granos de zonas cacaoteras del Perú. *International Symposium on Cocoa Research*, 1(1), 13–17.
- Armado, A., Contreras, F. Y., Garcia, P. (2009). Fraccionamiento químico de carbono orgánico y su relación con la actividad microbiológica, biomasa microbiana y cantidad de ADN en suelos cacaoteros venezolanos. *Revista Soc Quim Perú*. Vol 75. N° 1. 10 p. <http://www.scielo.org.pe/pdf/rsqp/v75n1/a07v75n1.pdf>.
- Barón, L. M. (2016). *Perfil del riesgo en inocuidad asociado a la presencia de residuos de cadmio en cacao (Theobroma cacao)*. Universidad de La Salle.
- Barrezueta-Unda, S. (2019). Propiedades de algunos suelos cultivados con cacao en la provincia El Oro, Ecuador. *Biotecnología y Ciencias Agropecuarias*, 14(1), 155–166. <https://doi.org/10.29059/cienciauat.v14i1.1210>
- Camargo, M., CRUZ, L. (1999). Sustancias húmicas en aguas para abastecimiento. *Revista Ingeniería e investigación* N° 44. 63 – 42 p.
- Camean, A., Repetto, M. (2012). *Toxicología Alimentaria*. Madrid: Ediciones Díaz de Santos. 317-319 p.
- Capó, M. (2007). *Principios de ecotoxicología: diagnóstico, tratamiento y gestión del medio ambiente*. Editorial Tebar.
- Cárdenas, A. A. (2012). *Presencia de cadmio en algunas parcelas de cacao orgánico en la Cooperativa Agraria Industrial Naranjillo - Tingo María - Perú*. [Tesis de pregrado inédita]. Universidad Nacional Agraria de la Selva.
- Cerisola, C. (2015). La materia orgánica edáfica. Su influencia sobre la productividad y

- funcionalidad de los suelos agroforestales. 19 p. <http://aulavirtual.agro.unlp.edu>.
- Cerisola, C. (2015). *Manejo y conservación de suelos*. Universidad Nacional de La Plata.
- Charrupi, N y Martínez, D. (2017). Estudio ambiental del cadmio y su relación con suelos destinados al cultivo de cacao en los departamentos de Arauca y Nariño. Bogotá. 132 p. <https://ciencia.lasalle.edu.co>.
- Chávez, J. J. (2020). *Efecto de fuentes y tres niveles de materia orgánica, en la reducción de la absorción de cadmio en almendras de cacao en Leoncio Prado. [Tesis de maestría inédita]*. Universidad Nacional Agraria de la Selva.
- Chavez, Y. (2020). Evaluación de la concentración de cadmio en el suelo y frutos de una plantación de cacao (*Theobroma cacao.*) en Aucayacu, Distrito de Jose Crespo Y Castillo – Huánuco 2020. Tesis para optar el título de Ingeniero Ambiental. 94 p. <http://repositorio.udh.edu.pe>.
- Clemens, S., Aarts, M. G. M., Thomine, S., Verbruggen, N. (2013). Ciencia de las plantas: La clave para prevenir el envenenamiento lento por cadmio. *Trends in Plant Science*, 18(2), 92-99. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2012.08.003>
- Corona, J. (2016). Apuntes sobre métodos de investigación. Universidad Nacional Experimental Francisco de Miranda. Venezuela. 3 p. <http://scielo.sld.cu/pdf/ms/v14n1/ms16114.pdf>
- Cortés, H. E., Ballesteros, M. I y Zamudio, A. M. (2007). Optimización de una metodología para la extracción de humina de un oxisol de Colombia fraccionamiento y caracterización físicoquímica. *Revista Colombiana de Química*, 36(3), 335–348.
- Cuizano, N. A., Reyes, Ú. F., Domínguez, S., Llanos, B. P y Navarro, A. E. (2010). Relevancia del pH en la absorción de iones metálicos mediante algas pardas. *Revista de La Sociedad Química Del Perú*, 76(2), 123–130.
- Dávila, E. C. (2019). *Uso de enmiendas en la reducción del contenido de cadmio en suelos y en los granos de cacao (Theobroma cacao.) clon CCN-51 [tesis de maestría inédita]*. Universidad Nacional Agraria de la Selva.
- Epetto, M. (1995). Toxicología Avanzada. Madrid: Ediciones Díaz de Santos.
- FAO. (2001). Soil carbon sequestration for improved land management. World soil reports 96. Rome, 58 p
- Florida, N., Claudio, S. L y Gómez, R. (2019). EL pH y la absorción de cadmio en almendras de cacao orgánico (*Theobroma cacao.*) en Leoncio Prado, Huánuco, Peru. *Folia Amazónica*, 27(1), 1–8. <https://doi.org/10.24841/fa.v27i1.438>.
- Fontana, A., Melo, V., Gervasio, M y Cuha, L. H. (2008). Substâncias húmicas como suporte à classificação de solos brasileiros. *Revista Brasileira de Ciência Do Solo*, 32(5), 2073–

2080.

- García, P y Azcona, M. (2012). Los efectos del cadmio en la salud. *Espa. Mèd Quir* 17: 199-205 p.
- García, Y., Ramírez, W y Sánchez, S. (2012). Indicadores de la calidad de los suelos: una nueva manera de evaluar este recurso. *Pastos y Forrajes*, 35(2), 125–138.
- García-Silva, R., Espinosa-Victoria, D., Figueroa-Sandoval, B., García-Calderón, N. E y Gallardo-Lancho, J. F. (2006). Reservas de carbono orgánico y de fracciones húmicas en un Vertisol sometido a siembra directa. *Terra Latinoamericana*, 24(2), 241–251.
- Gonzalez, A. L y Sanchez, G. S. S. (2019). *Estudio de la calidad física, química y biológica del humus elaborado y utilizado como enmienda orgánica en el valle del Santa - 2018. [tesis de pregrado inédita]. universidad Nacional del Santa. Chimbote - Perú.*
- González-Flores, E., Tornero-Campante, M. A., Sandoval-Castro, E., Pérez-Magaña, A y Gordillo-Martínez, A. J. (2011). Biodisponibilidad y fraccionamiento de metales pesados en suelos agrícolas mientras enmendados con biosólidos de origen municipal. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 27(4), 291–301.
- González-Mendoza, D y Zapata-Pérez, O. (2008). Mi feminismo es de tolerancia a elementos potencialmente tóxicos en plantas. *Fisiología Boletín de La Sociedad Botánica de México*, 82(1), 53–61.
- Henrique, L., Loss, A., Canton, L., dos Santos, E., Kurtz, C., Brunetto, G y José Comin, J. (2018). Efecto del contenido de carbono en sustancias húmicas en suelo en un cultivo de cebolla. *IDESIA (Chile)*, 36(1), 15–25.
- Hernández-Baranda, Y., Rodríguez-Hernández, P., Cartaya-Rubio, O., Peña-Icart, M y Meriño-Hernández, Y. (2019). Toxicity of Cadmium in plants and strategies to reduce its effects. Case study: The tomato. *Cultivos Tropicales*, 40(3), 10. <http://ediciones.inca.edu.cu>
- Huamaní-Yupanqui, H. A., Huauya-Rojas, M. ángel, Mansilla-Minaya, L. G., Florida-Rofner, N y Neira-Trujillo, G. M. (2012). Presencia de metales pesados en cultivo de cacao (*Theobroma cacao*) orgánico. *Acta Agronómica*, 61(4), 339–344. <https://doi.org/10.11.12>
- Huaraca-Fernandez, J. N., Pérez-Sosa, L., Bustinza-Cabala, L. S y Pampa-Quispe, N. B. (2020). Enmiendas orgánicas en la inmovilización de cadmio en suelos agrícolas contaminados: una revisión. In *Informacion Tecnologica* (Vol. 31, Issue 4, pp. 139–152). Centro de Informacion Tecnologica. <https://doi.org/10.4067/S0718-07642020000400139>
- Huauya, M y Hugo, H. (2014). Microfauna edáfica y metales pesados en el cultivo de cacao

- Theobroma cacao*. (Malvaceae). *The Biologist*, 12(1), 45–55.
- ICCO (International Cocoa Organization). (2014). *Cocoa Market Review*. Londres: ICCO.
- Jiménez, C. S. (2015). Estado legal mundial del cadmio en cacao (*Theobroma cacao*): fantasía o realidad. *Scielo*, 10(1), 89–104.
- Julca-Otiniano, A., Meneses-Florián, L., Blas-Sevillano, R y Bello-Amez, S. (2006). La materia orgánica, importancia y experiencias de su uso en la agricultura. *IDESIA (Chile)*, 24(1), 49–61.
- Kabata-Pendias, A. (2011). *Elementos Traza en Suelos y Plantas* (4ª ed.). CRC Press.
- KABATA-PENDIAS, A. 2010. Trace Elements in Soil and Plants (Fourth Edition Ed.). Boca Raton, Florida, U.S: Taylor & Francis Group.
- Lino, F. (2019). Determinación de la concentración de metales en la almendra de cacao en la Cooperativa Agropecuaria Bella en la Provincia de Leoncio Prado – Huánuco y posibles consecuencias de riesgos a la salud. Tesis para optar el título de Ingeniero Ambiental. 85 p. <http://repositorio.undac.edu.pe>.
- LMC International. (2012). *Cocoa Sustainability*. Oxford: LMC International. Recuperado de www.canacacao.org/.
- Lopez, R., Gonzales, G., Vasquez, R., Olivares, E., Vidales, J., Carranza, R., Ortega, M. (2014). Metodología para obtener ácidos húmicos y fúlvicos y su caracterización mediante espectrofotometría infrarroja. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*. N° 6. 1397 – 1407 p. <http://www.scielo.org.mx/pdf/remexca/v5nspe8/2007-0934-remexca-5-spe8-1397.pdf> (Revisado el 24 de setiembre del 2021).
- Macano, T. (2000). La contaminación con cadmio en suelos agrícolas. *Venesuelos*, 43 p.
- Marchive, L., López-Ulloa2, M., Chávez, E y Rachel Atkinson. (2021). *Factores que influyen en la biodisponibilidad de cadmio en suelo y su acumulación en la planta*. Ministerio de Agricultura y Ganadería. <https://balcon.mag.gob.ec/mag01/magapaldia/Caja%20>
- Martínez, E. (2005). *Errores frecuentes en la interpretación del coeficiente de determinación lineal*. Anuario Jurídico y Económico Escurialense.
- Martinez, E., Fuerontes, J., Acevedo, E. (2008). Carbono orgánico y propiedades del suelo. *R.C. Suelo Nutr. Veg.* 8 N° 01. 68 – 96 p. <https://scielo.conicyt.cl/pdf/rcsuelo/v8n1/art06.pdf>.
- McLaughlin, M. J., Parker, D. R., Clarke, J. M. (2000). Metales y micronutrientes: Problemas de seguridad alimentaria. *Field Crops Research*, 60(1-2), 143-163. [https://doi.org/10.1016/S0378-4290\(99\)00135-0](https://doi.org/10.1016/S0378-4290(99)00135-0)
- MINAGRI (Ministerio de Agricultura y Riego). (2016). Estudio del Cacao en el Perú y en el mundo. Un análisis de la producción y el comercio. 90 p. <https://camcafeperu.com.pe>.

- Ministerio De Salud. (2013). Resolución Ministerial No. 757-2013 MINSA, por la que se aprueba la Guía técnica: Guía de Práctica Clínica para el Diagnóstico y Tratamiento de la Intoxicación por Cadmio, que como anexo II forma parte integrante de la presente Resolución Ministerial. Lima. (Revisado el 24 de setiembre del 2021).
- Mosquera, C. S., Bravo, I y Hansen, E. W. (2007). Comportamiento estructural de los ácidos húmicos obtenidos de un suelo andisol del departamento Cauca. *Revista Colombiana de Química*, 36(1), 31–41.
- Osorio, N. W. (2012). pH del suelo y disponibilidad de nutrientes. *Manejo Integral Del Suelo y Nutrición Vegetal*, 1(4), 1–4.
- Ottos, E. (2018). *Fraccionamiento densiométrico y químico de la materia orgánica asociado al cadmio en suelo aluvial y residual cacaotero. [Tesis de maestría inédita] Universidad Nacional Agraria de la Selva.*
- Ozkarova, B. E y Bekbölet, M. (2010). Zinc release by humic and fulvic acid as influenced by pH, complexation and DOC sorption. *Geoderma*, 159(1–2), 131–138. <https://doi.org/10.1016/J.GEODERMA.2010.07.004>
- Pérez, P., Azcona, M. (2012). Los efectos del cadmio en la salud. *Revista de Especialidades Médico-Quirúrgicas*, vol. 17, 8.
- Pimienta, A. (2004). *Ácidos húmicos y fúlvicos de origen orgánico en el crecimiento de plántula de tomate (Lycopersicon esculentum Mill.) en invernadero. [Tesis de pregrado inédita]. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro.*
- Prieto, J., González, C. A., Román, A. D 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. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=93911243003>
- Ramírez, A. (2002). Toxicología del cadmio. Conceptos actuales para evaluar exposición ambiental u ocupacional con indicadores biológicos. *Anales de la Facultad de Medicina UNMSM*. 63(1): 51-64 p. <http://revistasinvestigacion.unmsm.edu.pe>.
- Rodriguez, F. (1995). *El recurso del suelo en la amazonia peruana, diagnóstico para su investigación (segunda aproximación)*. Instituto de Investigaciones de La Amazonía Peruana (IIAP).
- Salas, R. (2019). *Abonos orgánicos koripacha bio y ácidos húmicos en la producción de quinua (Chenopodium quinoa Willdenow) variedad blanca en Junín - barranca [Tesis de pregrado inédita]. Universidad Tecnológica de los Andes.*
- Sánchez, C. F. (2021). *Caracterización fisicoquímica de los suelos agrícolas contaminados con cadmio en el distrito de Leonor Ordoñez, provincia de Jauja, 2018.*

- Santamaria, S. V. (2019). *Uso de enmiendas para la reducción del contenido de cadmio en el grano de cacao orgánico en la parcela de la cooperativa Agraria Industrial Naranjillo. [Tesis de pregrado inédita]. Universidad Nacional Agraria de la Selva.*
- Santander Ruiz, W., Garay Montes, R., Verde Girbau, C y Mendieta Taboada, O. (2021). Determinación del contenido de cadmio en suelo, frutos, granos fermentados y secos, licor de cacao y chocolate productoras de la región San Martín. *Revista de La Sociedad Química Del Perú*, 87(1), 39–49. <https://doi.org/10.37761/rsqp.v87i1.321>
- Sposito, G. (2008). *La Química de los Suelos* (2ª ed.). Oxford University Press.
- Suaña, M. 2017. Capacidad del girasol (*Helianthus annuus* L.) para absorber cadmio de suelos contaminados en ambiente controlado – Puno. Tesis para optar el grado de doctor Scientiae en ciencia, tecnología y medio ambiente. 79 p. <http://repositorio.unap.edu.pe>.
- Torres, W. R. (2016). *Efecto de bioestimulantes en fréjol (Phaseolus Vulgaris L.) en el Cantón el Guabo, provincia el Oro.*
- Trujillo, N. A y Quiñones, A. L. (2010). *Evaluación del efecto de la generación de ácidos húmicos ácidos públicos y lumina por la degradación de 3 abonos orgánicos para mejorar el suelo del cultivo INIA. [Tesis de pregrado inédita]. Universidad Nacional del Centro del Perú.*
- Vaca, R., Lugo, J y Esteller, M. V. (2006). Caracterización de la materia orgánica soluble y de los ácidos húmicos en suelo acondicionado con lodo residual fresco y compostado. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental* , 22(1), 27–37.
- Vargas, Z. R. (2009). la investigación aplicada: una forma de conocer las realidades con evidencia científica Educación, Vol. 33, Núm. 1, pp. 155-165. Costa Rica. <https://www.redalyc.org/pdf/440/44015082010.pdf>
- Vázquez, P. elías. (2013). *Uso de la agricultura de sustancias húmicas. [Tesis de maestría inédita]. Centro de Investigación en Química Aplicada.*
- Vela, G., López, J y Rodríguez, M. de L. (2012). Niveles de carbono orgánico total en el Suelo de Conservación del Distrito Federal, centro de México. *Investigaciones Geográficas, Boletín Del Instituto de Geografía, UNAM*, 77(1), 18–30.
- Velarde, K. R. (2017). *Respuesta de enmiendas húmicas en el rendimiento y calidad de bulbos en el cultivo de cebolla amarilla Var. century (Allium cepa L.) en la zona de Pedregal. [Tesis de pregrado inédita]. Universidad Católica de Santa María. Arequipa - Perú.*
- Velásquez-Vélez, M. I., Galvis-Lora, C., Mejía-Córdoba, C. A y Zapata-Guzman, J. E. (2022). Implicaciones de la acumulación de Cadmio en la cadena productiva del cacao. *Manglar*, 19(4), 391–397. <https://doi.org/10.57188/manglar.2022.049>

- Veobides, H., Guridi, F y Vázquez, V. (2018). Las sustancias húmicas como bioestimulantes de plantas bajo condiciones de estrés ambiental. *Cultivos Tropicales*, 39(4), 102–109. <http://ediciones.inca.edu.cu>
- Victoria, M y Soledad, A. (2020). *Algunas propiedades del suelo que condicionan su comportamiento: el pH y la conductividad eléctrica*. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria - INTA.
- YANG, M., LIN, X y YANG, X. 1998 Impacto de Cd en el crecimiento y acumulación de nutrientes diferentes especies de plantas. *Barbilla. J. Appl. Ecol.* 19: 89-94 p.
- Yáñez, M. I., Cantú, I y González, H. (2018). Efecto del cambio de uso de suelo en las propiedades químicas de un vertisol. *Terra Latinoamericana*, 36(4), 369–379. <https://doi.org/10.28940/terra.v36i4.349>.

ANEXOS

Tabla 4. Análisis de pH y cadmio en almendras de cacao

Parcelas en estudio	Repetición	pH suelo	Cd en almendras (ppm)
Huascar	R1	6,580	3,655
Huascar	R2	6,980	3,480
Huascar	R3	6,550	3,690
Huascar	R4	6,500	3,570
Huascar	R5	6,670	3,812
Huascar	R6	6,510	3,642
Huascar	R7	6,380	3,761
Huascar	R8	6,620	3,593
Alto San Juan	R1	7,340	0,910
Alto San Juan	R2	7,480	0,970
Alto San Juan	R3	7,440	0,930
Alto San Juan	R4	7,130	0,955
Alto San Juan	R5	7,280	0,909
Alto San Juan	R6	7,560	0,926
Alto San Juan	R7	7,470	0,972
Alto San Juan	R8	7,350	0,909
Capitan Arellano	R1	5,040	5,455
Capitan Arellano	R2	5,170	5,370
Capitan Arellano	R3	5,130	5,510
Capitan Arellano	R4	5,080	5,475
Capitan Arellano	R5	5,180	5,464
Capitan Arellano	R6	5,200	5,509
Capitan Arellano	R7	5,070	5,392
Capitan Arellano	R8	5,730	5,539
Zanja Seca	R1	4,950	1,535
Zanja Seca	R2	4,580	1,565
Zanja Seca	R3	4,560	1,585
Zanja Seca	R4	4,490	1,580
Zanja Seca	R5	4,760	1,572
Zanja Seca	R6	4,810	1,557
Zanja Seca	R7	4,230	1,557
Zanja Seca	R8	4,720	1,681

Tabla 5. Análisis de cadmio total (ppm) en las fracciones químicas de materia orgánica del suelo

Parcelas en estudio	Repetición	Cd Total Suelo	Cd Total Humina	Cd Total Ac. Húmicos	Cd Total Ac. Fúlvicos
Huascar	R1	3,312	2,116	0,026	1,171
Huascar	R2	3,280	2,119	0,025	1,136
Huascar	R3	2,945	2,111	0,027	0,808
Huascar	R4	3,182	2,117	0,028	1,038
Huascar	R5	3,095	2,115	0,025	0,955
Huascar	R6	3,216	2,114	0,028	1,074
Huascar	R7	3,294	2,119	0,028	1,148
Huascar	R8	3,257	2,115	0,027	1,116
Alto San Juan	R1	2,835	0,798	0,021	2,015
Alto San Juan	R2	2,731	0,813	0,020	1,899
Alto San Juan	R3	2,825	0,777	0,023	2,025
Alto San Juan	R4	2,870	0,784	0,021	2,065
Alto San Juan	R5	2,786	0,804	0,020	1,961
Alto San Juan	R6	2,895	0,749	0,025	2,121
Alto San Juan	R7	2,825	0,824	0,022	1,979
Alto San Juan	R8	2,794	0,795	0,210	1,790
Capitan Arellano	R1	0,546	0,478	0,023	0,045
Capitan Arellano	R2	0,537	0,485	0,024	0,029
Capitan Arellano	R3	0,546	0,454	0,023	0,069
Capitan Arellano	R4	0,550	0,496	0,022	0,032
Capitan Arellano	R5	0,535	0,438	0,026	0,071
Capitan Arellano	R6	0,552	0,442	0,025	0,085
Capitan Arellano	R7	0,542	0,473	0,025	0,045
Capitan Arellano	R8	0,539	0,451	0,024	0,064
Zanja Seca	R1	0,113	0,075	0,024	0,013
Zanja Seca	R2	0,124	0,069	0,025	0,031
Zanja Seca	R3	0,133	0,086	0,024	0,023
Zanja Seca	R4	0,125	0,070	0,024	0,031
Zanja Seca	R5	0,128	0,069	0,027	0,032
Zanja Seca	R6	0,137	0,076	0,027	0,035
Zanja Seca	R7	0,132	0,084	0,024	0,024
Zanja Seca	R8	0,120	0,077	0,025	0,018

Tabla 6. Análisis de cadmio disponible (ppm) en las fracciones químicas de materia orgánica del suelo

Parcelas en estudio	Repetición	Cd Disponible Suelo	Cd disponible Humina	Cd disponible Ac. Húmicos	Cd disponible Ac. Fúlvicos
Huascar	R1	1,720	1,195	0,004	0,521
Huascar	R2	1,678	1,195	0,003	0,479
Huascar	R3	1,736	1,164	0,004	0,568
Huascar	R4	1,630	1,187	0,004	0,438
Huascar	R5	1,682	1,169	0,004	0,510
Huascar	R6	1,722	1,179	0,004	0,539
Huascar	R7	1,706	1,186	0,003	0,516
Huascar	R8	1,692	1,180	0,004	0,508
Alto San Juan	R1	1,010	0,819	0,003	0,189
Alto San Juan	R2	1,134	0,793	0,002	0,339
Alto San Juan	R3	1,120	0,827	0,003	0,290
Alto San Juan	R4	1,093	0,819	0,003	0,272
Alto San Juan	R5	1,068	0,777	0,003	0,289
Alto San Juan	R6	1,127	0,796	0,003	0,329
Alto San Juan	R7	1,096	0,813	0,003	0,280
Alto San Juan	R8	1,125	0,805	0,003	0,317
Capitan Arellano	R1	0,274	0,245	0,003	0,026
Capitan Arellano	R2	0,291	0,255	0,003	0,034
Capitan Arellano	R3	0,271	0,251	0,003	0,017
Capitan Arellano	R4	0,268	0,239	0,003	0,027
Capitan Arellano	R5	0,274	0,242	0,002	0,030
Capitan Arellano	R6	0,281	0,245	0,003	0,034
Capitan Arellano	R7	0,258	0,246	0,003	0,010
Capitan Arellano	R8	0,265	0,240	0,003	0,023
Zanja Seca	R1	0,058	0,048	0,004	0,006
Zanja Seca	R2	0,056	0,048	0,003	0,004
Zanja Seca	R3	0,057	0,051	0,003	0,003
Zanja Seca	R4	0,055	0,050	0,003	0,002
Zanja Seca	R5	0,057	0,050	0,004	0,004
Zanja Seca	R6	0,058	0,051	0,003	0,004
Zanja Seca	R7	0,056	0,049	0,003	0,005
Zanja Seca	R8	0,056	0,047	0,003	0,005

Tabla 7. Análisis de carbono orgánico total (%) en las fracciones químicas de materia orgánica del suelo

Parcelas en estudio	Repetición	Carbono total Suelo	Carbono total Humina	Carbono total Ac. húmicos	Carbono total Ac. Fúlvicos
Huascar	R1	3,024	2,828	0,038	0,158
Huascar	R2	3,091	2,745	0,038	0,308
Huascar	R3	3,058	2,812	0,038	0,208
Huascar	R4	3,091	2,792	0,038	0,261
Huascar	R5	3,068	2,697	0,038	0,333
Huascar	R6	3,081	2,814	0,038	0,229
Huascar	R7	3,062	2,806	0,038	0,218
Huascar	R8	3,064	2,735	0,038	0,291
Alto San Juan	R1	3,097	2,406	0,011	0,680
Alto San Juan	R2	3,134	2,512	0,011	0,611
Alto San Juan	R3	3,189	2,286	0,012	0,891
Alto San Juan	R4	3,214	2,374	0,011	0,829
Alto San Juan	R5	3,147	2,275	0,011	0,861
Alto San Juan	R6	3,207	2,687	0,010	0,510
Alto San Juan	R7	3,192	2,584	0,012	0,596
Alto San Juan	R8	3,095	2,637	0,011	0,447
Capitan Arellano	R1	3,485	3,039	0,046	0,400
Capitan Arellano	R2	3,518	3,142	0,045	0,331
Capitan Arellano	R3	3,550	3,039	0,046	0,465
Capitan Arellano	R4	3,647	3,208	0,046	0,393
Capitan Arellano	R5	3,492	2,971	0,047	0,474
Capitan Arellano	R6	3,514	3,137	0,046	0,331
Capitan Arellano	R7	3,638	3,264	0,045	0,329
Capitan Arellano	R8	3,479	3,192	0,047	0,240
Zanja Seca	R1	2,269	1,354	0,021	0,894
Zanja Seca	R2	2,261	1,295	0,020	0,946
Zanja Seca	R3	2,234	1,312	0,020	0,902
Zanja Seca	R4	2,301	1,368	0,020	0,913
Zanja Seca	R5	2,298	1,316	0,020	0,962
Zanja Seca	R6	2,285	1,337	0,021	0,927
Zanja Seca	R7	2,306	1,309	0,021	0,976
Zanja Seca	R8	2,317	1,326	0,020	0,971



Figura 9. Panorámica de una parcela en estudio



Figura 10. Ocho muestras de una parcela



Figura 11. Traslado de muestras al laboratorio de suelo – UNAS



Figura 12. Preparando patrones para las lecturas



Figura 13. Preparando muestras para determinar carbono orgánico



Figura 14. Muestra de suelo más dicromato y ácido sulfúrico para determinar carbono orgánico

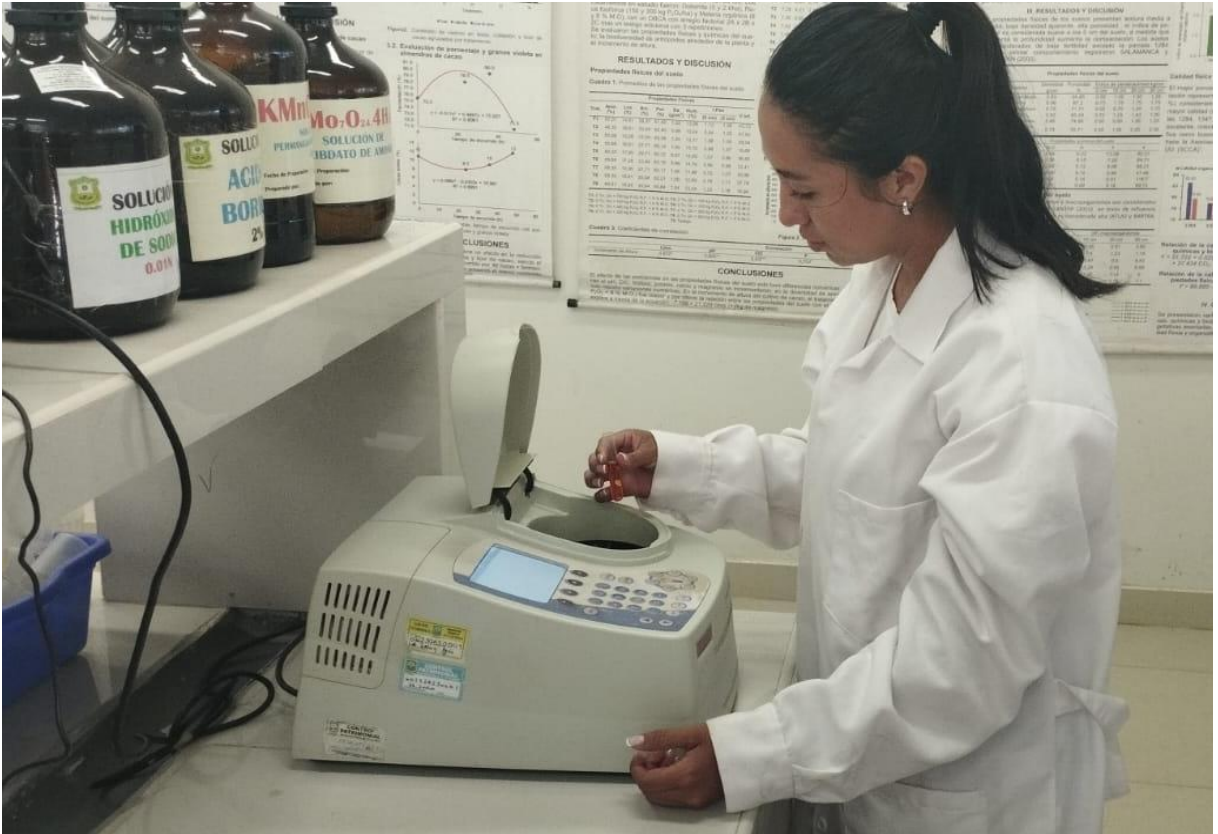


Figura 15. Lectura de carbono orgánico

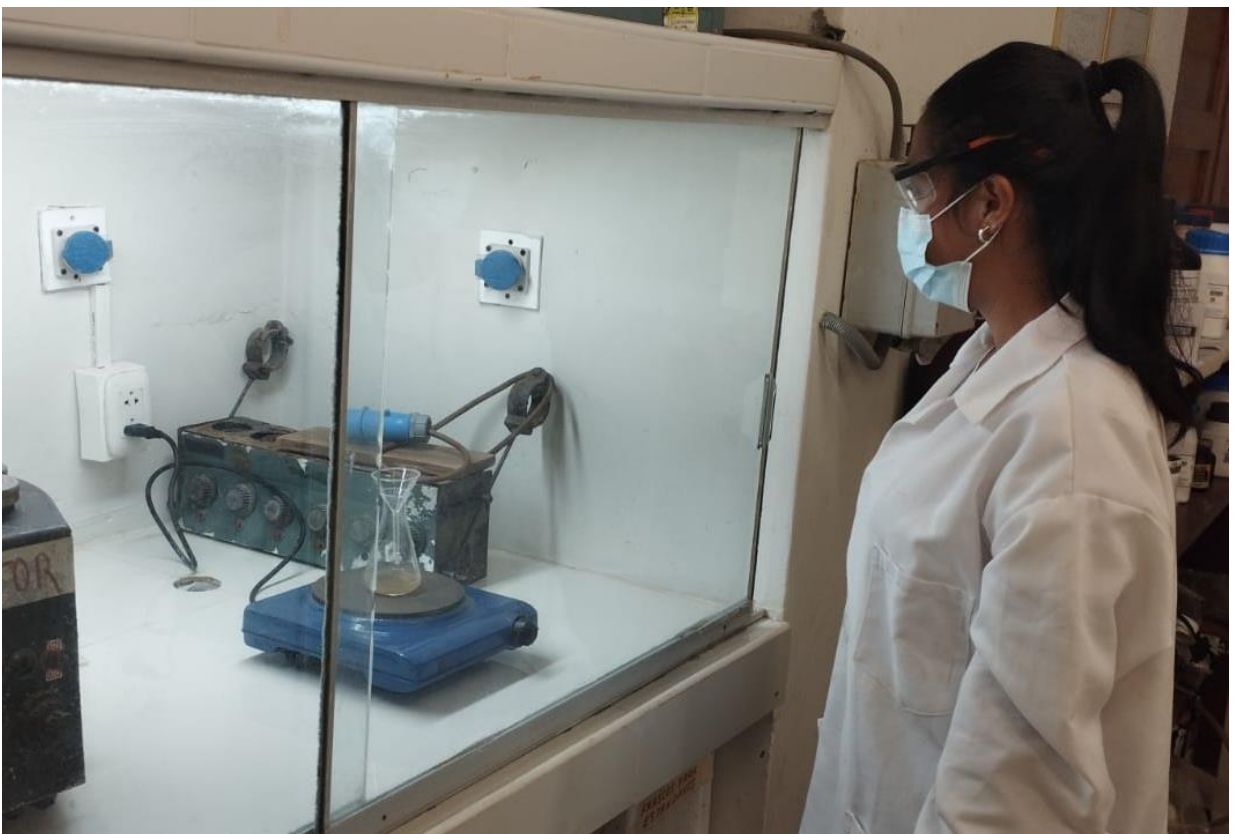


Figura 16. Digestión de cadmio en la campana



Figura 17. Muestras de cadmio para las lecturas