

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA

ESCUELA DE POSGRADO

MAESTRÍA EN CIENCIAS EN AGROECOLOGÍA

MENCIÓN: GESTIÓN AMBIENTAL



**EVALUACIÓN DE CADMIO Y PLOMO EN GRANOS DE *Coffea arabica* L. (café)
SEGÚN VARIEDAD Y PISO ALTITUDINAL EN EL DISTRITO DE HERMILIO
VALDIZAN CAMPAÑA 2023**

Tesis

Para optar el Grado Académico de:

**MAESTRO EN CIENCIAS EN AGROECOLOGÍA,
MENCIÓN: GESTIÓN AMBIENTAL**

PRESENTADO POR:

NOI PATRICIA RODRIGUEZ AYALA

Tingo María – Perú

2023



UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA
FACULTAD DE RECURSOS NATURALES RENOVABLES
UNIDAD DE POSGRADO
DIRECCIÓN



"AÑO DE LA UNIDAD, LA PAZ Y EL DESARROLLO"

ACTA DE SUSTENTACION DE TESIS
Nro. 018-UPG-FRNR-UNAS

En la ciudad universitaria, siendo las 10:00 a.m. del miércoles 20 de diciembre de 2023, reunidos de manera presencial en el auditorio de la Escuela de Posgrado, se instaló el Jurado Calificador a fin de proceder a la sustentación de la tesis titulada:

"EVALUACIÓN DE CADMIO Y PLOMO EN GRAMOS DE *Coffea Arabica* L. (CAFÉ) SEGÚN VARIEDAD Y PISO ALTITUDINAL EN EL DISTRITO DE HERMILO VALDIZAN CAMPAÑA 2023"

A cargo del candidato al Grado de Maestro en Ciencias en Agroecología, mención: Gestión Ambiental **RODRIGUEZ AYALA, NOI PATRICIA**.

Luego de la exposición y absueltas las preguntas de rigor, el Jurado Calificador procedió a emitir su fallo declarando **APROBADO** con el calificativo de **MUY BUENO** Acto seguido, a horas **10:00 a.m.** el presidente dio por culminada la sustentación; procediéndose a la suscripción de la presente acta por parte de los miembros del jurado, quienes dejan constancia de su firma en señal de conformidad.

.....
Dr. JOSE DOLORES LEVANO CRISOSTOMO
Presidente del Jurado

.....
Ing. MSc. JAVIER NAZAR CIPRIANO
Miembro del Jurado

.....
Ing. M.Sc. FRANKLIN DIONISIO MONTALVO
Miembro del Jurado

.....
Dr. NELINO FLORIDA ROFNER
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° 054 - 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:

Maestría en Gestión Pública

Tipo de documento:

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

TÍTULO	AUTOR	PORCENTAJE DE SIMILITUD
EVALUACIÓN DE CADMIO Y PLOMO EN GRANOS DE Coffea arabica L. (café) SEGÚN VARIEDAD Y PISO ALTITUDINAL EN EL DISTRITO DE HERMILIO VALDIZAN CAMPAÑA 2023	NOI PATRICIA RODRIGUEZ AYALA	19 % Diecinueve

Tingo María, 15 de febrero de 2024


UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA
UNIDAD DE GESTIÓN DE LA INVESTIGACIÓN
Dr. Tomas Meruachio Malfique
JEFE

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA

ESCUELA DE POSGRADO

MAESTRÍA EN CIENCIAS EN AGROECOLOGÍA

MENCIÓN: GESTIÓN AMBIENTAL



EVALUACIÓN DE CADMIO Y PLOMO EN GRANOS DE *Coffea arabica* L. (café) SEGÚN VARIEDAD Y PISO ALTITUDINAL EN EL DISTRITO DE HERMILIO VALDIZAN CAMPAÑA 2023

Programa de investigación	: Gestión Ambiental
Línea de investigación	: Desarrollo sostenible
Eje temático	: Contaminación ambiental
Autor	: Ing. RODRIGUEZ AYALA, Noi Patricia
Asesor (es)	: Dr. FLORIDA ROFNER, Nelino
Lugar de ejecución	: Hermilio Valdizan, Leoncio Prado-Huánuco
Duración	: 07 meses
Financiamiento	: Propio S/. 6 625,00



**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 : FRNR-EPG-UNAS
Título de la tesis : Evaluación de cadmio y plomo en granos de *coffea arabica* l. (café) según variedad y piso altitudinal en el distrito de Hermilio Valdizan campaña 2023
Objetivo general : Evaluar los niveles de cadmio y plomo en granos de *Coffea arabica* L. (café) según variedad y piso altitudinal en el distrito de Hermilio Valdizan campaña 2023
Autor : Ing. Rodriguez Ayala, Noi Patricia
Asesor (es) : Dr. Florida Rofner, Nelino
Programa de investigación : Gestión Ambiental
Línea de investigación : Desarrollo sostenible
Eje temático : Contaminación ambiental
Lugar de ejecución : Hermilio Valdizan, Leoncio Prado-Huánuco
Duración : Fecha de inicio : Mayo 2023
: Fecha de término : Diciembre 2023
Financiamiento : FEDU : S/. 0,00
: Propio : S/. 6 225,00
: Otros : S/. 0,00

Tingo María, Perú, Enero, 2024.

.....
Ing. Rodriguez Ayala, Noi Patricia
Tesisista

.....
Dr. Nelino, Florida Rofner
Asesor

DEDICATORIA

A Dios, por escuchar mis oraciones, por todo lo bueno y malo que me ha pasado, por poner personas maravillosas en mi camino, que fueron arquetipo orientándome por el buen camino, darme fuerza para seguir adelante y no desistir en los problemas que se presentaron, enseñándome a enfrentar y superar las limitaciones sin perder los buenos valores.

A mis padres Toledo Rodriguez Cisneros y María Ayala Malpartida quienes con paciencia y amor me formaron en el camino del bien y la superación, agradecerles por el apoyo incondicional en mi vida, por haberme dejado sus mejores enseñanzas y siempre les tengo presente en mi corazón.

A mi hijo Ezzio Lian que ha sido mi gran motivación a salir adelante, por el ánimo que me brinda día a día en todos los proyectos de mi vida tanto personales como profesionales.

A mis familiares y amistades, quienes en mi estadía universitaria siempre me brindaron su apoyo y me animaban a no rendirme y ser un ejemplo.

El autor

AGRADECIMIENTOS

A Dios, el que en todo momento está conmigo guiándome por el buen camino y ayudándome a cumplir mis objetivos en la vida.

A la Universidad Nacional Agraria de la Selva, en especial a la Facultad de Recursos Naturales Renovables y la Escuela de Post Grado por brindarme la oportunidad de ser profesional, darme su acogedor calor en cada una de sus instalaciones durante toda mi formación profesional.

A mi asesor Ing. Dr. Nelino Florida Rofner, por su amistad y colaboración en el asesoramiento para poder realizar el presente trabajo.

Al Dr. José Dolores Lévano Crisóstomo; M. Sc. Javier Nazar Cipriano; M. Sc. Franklin Dionisio Montalvo jurados de la tesis, por brindarme su apoyo incondicional y constante en el desarrollo del presente trabajo de investigación.

Al Blgo. Cesar Augusto Gozme Sulca por su amistad y apoyo incondicional a lo largo de este proceso, dándome pautas y motivándome para mejorar profesionalmente.

Gracias a todas las amistades de la comunidad universitaria, de nuestra prestigiosa Universidad Nacional Agraria de la Selva (UNAS), que aportaron en el desarrollo de la presente investigación.

ÍNDICE GENERAL

Página

RESUMEN

ABSTRACT

I. INTRODUCCIÓN..... 1

II. REVISIÓN DE LITERATURA..... 3

2.1. Metales

pesados
3

2.1.1. Cadmio

.....
3

2.1.2. Plomo

.....
4

2.1.3. Niveles máximos de cadmio y plomo en
café

.....
5

2.2. Café.....
6

2.2.1. Características y
clasificación

.....
6

2.2.2. Variedades
locales

.....
7

2.2.3. Consumo y
producción

.....	
7	
2.2.4. Características morfométricas del fruto y granos de café	
.....	
8	
2.3. Indicadores de fertilidad del suelo.....	
9	
2.4. Comportamiento de los nutrientes en una gradiente altitudinal.....	
11	
2.5. Estado del arte	
13	
2.5.1. Antecedentes internacionales	
.....	
13	
2.5.2. Antecedentes nacionales	
.....	
14	
III. MATERIALES Y MÉTODOS.....	16
3.1. Área de estudio.....	
16	
3.1.1. Ubicación de parcelas estudiadas	
.....	
16	
3.1.2. Características ecológicas del área	

	
	17	
3.1.3. Criterios de selección de las plantaciones evaluadas	
	18	
3.1.4. Características de las plantaciones evaluadas	
	18	
3.2. Materiales y equipo	
	18	
3.2.1. Materiales de campo	
	18	
3.2.2. Materiales de laboratorio	
	18	
3.2.3. Equipos de campo	
	18	
3.2.4. Equipos de laboratorio	
	18	
3.3. Criterio y análisis de la investigación	
	19	

3.3.1. Enfoque	19
3.3.2. Tipo de investigación	19
3.3.3. Nivel de investigación	19
3.3.4. Diseño de la investigación	19
3.3.5. Variables en estudio	20
3.4. Metodología	20
3.4.1. Muestreo de campo	20
3.4.2. Determinación de la concentración de Cd y Pb en granos frescos de C. arábica según variedad y estrato altitudinal	21
3.4.3. Determinación de los principales indicadores de fertilidad del suelo	23

3.4.4. Determinación de diferencias y correlaciones a través de Pearson, entre la concentración de cadmio y plomo, los principales indicadores de fertilidad del suelo, e indicadores morfométricos del café, según variedad y piso altitudinal.	23
3.5. Población y muestra.....	24
IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	26
4.1. Concentración de cadmio y plomo en granos de C. arábica según piso altitudinal y variedad.....	26
4.2. Indicadores de fertilidad del suelo en plantaciones de C. arábica según estrato altitudinal y variedad.....	30
4.3. Determinación de las características morfométricas de los granos de C. arábica según estrato altitudinal y variedad.....	36
4.4. Análisis de correlaciones entre las variables evaluadas	39
V. CONCLUSIONES.....	42
VI. PROPUESTAS A FUTURO.....	43
VII. REFERENCIAS.....	44
ANEXOS	51

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura	Página
1. Variabilidad en tamaño y forma del café	8
2. Perfil de gradiente altitudinal entre 0 a 4000 m.....	12
3. Mapa de ubicación política y distribución de las muestras en el área de estudio	16
4. Parámetros de calibración del Cd: λ , R ² , LOD y el rango de linealidad	22
5. Parámetros de calibración del Pb: λ , R ² , LOD y el rango de linealidad.....	22
6. Modelo de análisis de varianza de dos factores	24
7. Visita de las áreas a estudiar	52
8. Colecta de frutos de café	52
9. Despulpado de frutos de café	53
10. Lavado de semillas de café	53
11. Muestreo aleatorio de suelo	54
12. Obtención de muestra compuesta de suelo	54
13. Medición de longitud y peso de semillas	55
14. Filtrado de las muestras digeridas	55
15. Lectura de Cd y Pb de muestras digeridas	56

ÍNDICE DE TABLAS

Figura	Página
1. Límites máximos para Cadmio y plomo en café	6
2. Calidad de la semilla con la altitud	9
3. Tamaño del grano con la altitud y variedad	9
4. Ubicación geográfica de las plantaciones estudiadas	17
5. Operacionalización de variables	20
6. Factor de correlación de Pearson	24
7. Niveles de Cd y Pb según piso altitudinal	26
8. Niveles de cadmio y plomo según variedad de C. arábica	27
9. Análisis de varianza del Cd según estrato altitudinal y variedad	28
10. Análisis de varianza del plomo según estrato altitudinal y variedad	28
11. Estadística básica de la textura del suelo según piso altitudinal	31
12. Estadística básica de la textura del suelo según variedad	31
13. Análisis de varianza para arena según piso altitudinal y variedad	32
14. Análisis de varianza para arena según piso altitudinal y variedad	32
15. Estadística básica de indicadores químicos del suelo según piso altitudinal	33
16. Estadística básica de indicadores químicos del suelo según variedad	33
17. Análisis de varianza para Ca según piso altitudinal y variedad	34
18. Análisis de varianza para CIC según piso altitudinal y variedad	34
19. Estadística básica de indicadores morfométricos del café según altitud	37
20. Estadística básica de indicadores morfométricos del café según variedad	37
21. Análisis de varianza para longitud de semilla según estrato altitudinal y variedad	38
22. Análisis de varianza para peso de semilla según estrato altitudinal y variedad	38
23. Correlación de indicadores	40

RESUMEN

La investigación evaluó los niveles de cadmio y plomo en granos de *Coffea arabica* L. (café) según variedad y piso altitudinal en el distrito de Hermilio Valdizan campaña 2023. Investigación descriptiva transversal ajustada a un Diseño Completamente Aleatorio (DCA), se evaluaron 30 plantaciones de diferentes altitudes y variedades, en ellas se evaluó variables fisicoquímicas del suelo (textura, pH, MO, P, K, Ca, Mg y CIC), características morfométricas (longitud y peso de semillas) y los niveles de cadmio y plomo en semillas secas. Los resultados no muestran diferencias significativas para los indicadores fisicoquímicos del suelo, excepto para la fracción arena y arcilla, además, el pH, MO, P y K presentan tendencias de incremento con la altitud y la zona media muestra condiciones de suelo apropiado para el cultivo de café. Las concentraciones de cadmio superan ligeramente los niveles máximos fijadas por la MERCOSUR ($<0,10 \text{ mg Kg}^{-1}$), estadísticamente no se encontró diferencias significativas considerando las altitudes y las variedades. El plomo supera ampliamente los límites máximos fijadas por la MERCOSUR ($<0.50 \text{ mg Kg}^{-1}$), estadísticamente se encontró diferencias significativas considerando las altitudes y las variedades evaluadas. La longitud y peso de las semillas presentan diferencias y son influenciadas por la altitud, presentando medias más altas a mayor altitud. La altitud y variedad de café no influye sobre los niveles de cadmio, contrariamente, los niveles de plomo presentan concentraciones muy altas y son influenciadas por la altitud y las variedades evaluadas, y debe evaluarse otras variables para determinar el origen de los altos niveles de plomo que pueden afectar la calidad del café y la salud del consumidor.

Palabras clave: Metales pesados, niveles máximos, MERCOSUR, contaminación, calidad.

ABSTRACT

In The research, the levels of cadmium and lead in *Coffea arabica* L. (coffee) beans were evaluated by variety and elevation floor in the Hermilio Valdizan district [of Peru, during the] 2023 season. [The] research [was] descriptive and cross-sectional, fit to a completely randomized design (CRD; DCA in Spanish). Thirty plantations at different altitudes, and with different varieties were evaluated; the physicochemical variables for the soil (texture, pH, OM, P, k, Ca, Mg, and CEC) were evaluated for them, [as well as], the morphometric characteristics (length and seed weight), and the level of cadmium and lead in the dry seeds. The results did not reveal any significant differences for the physicochemical indicators of the soil, except for the sand and clay fractions. Moreover, the pH, OM (MO in Spanish), P, and K presented tendencies to increase with the altitude and the middle zone revealed soil conditions that were appropriate for the coffee crop. The cadmium concentration slightly surpassed the maximum levels set by MERCOSUR ($<0.10 \text{ mg Kg}^{-1}$); statistically, no significant differences were found when considering the altitudes and varieties. The lead greatly surpassed the maximum limit set by MERCOSUR ($<0.50 \text{ mg Kg}^{-1}$); statistically, significant differences were found when the altitudes and varieties evaluated were considered. The length and weight of the seeds presented differences and were influenced by the altitude, presenting high averages at higher altitudes. The altitude and variety of the coffee did not influence the levels of cadmium; on the contrary, the levels of lead presented very high concentrations and were influenced by the altitude and the varieties evaluated. Other variables should be evaluated in order to determine the origin of the high levels of lead, which can affect the quality of the coffee and the health of the consumer.

Keywords: heavy metals, maximum levels, MERCOSUR, contamination, quality

I. INTRODUCCIÓN

El Instituto Nacional de Estadística e Informática- INEI (2018), a través de la encuesta nacional agropecuaria 2018, reporta que el cultivo de arroz en cascara, café pergamino y pasto brizantha, representan la mayor superficie cosechada a nivel nacional. Para este mismo año, el café pergamino es el principal cultivo permanente cosechado (15.4 % de la superficie nacional), siendo el principal cultivo permanente cosechado por los pequeños/as y medianos/as productores/as. Además, el Ministerio de Desarrollo Agrario y Riego- MIDAGRI (2022) reporta que Perú es segundo exportador de café orgánico, primer producto agrícola de exportación, y séptimo a nivel mundial con 425 416 ha, 6 % del área agrícola nacional; la región Huánuco es séptimo productor nacional, siendo la provincia de Leoncio Prado y en particular el distrito Hermilio Valdizan el mayor productor de café en la región.

El café, primer producto agrícola con mayor extensión y participación económica en la provincia, destinada al mercado interno y en mayor medida al internacional, además, el café producido en Hermilio Valdizan, es reconocido internacionalmente por sus atributos de calidad, resultado de sus características edafoclimáticas favorables al cultivo. Sin embargo, estudios en determinadas zonas productoras han advertido la presencia de As, Cd, Pb y otros en granos frescos y tostados del café, atribuidos a factores geográficos, geológicos, aguas y suelos contaminados por el uso de insecticidas, herbicidas y fungicidas durante el proceso de producción, estos llegan a las aguas subterráneas y raíces de las plantas; su consumo puede generar potenciales afecciones negativas en la salud humana. Frente a esta realidad problemática se plantea la interrogante ¿Cuáles son los niveles de cadmio y plomo en granos de *Coffea arabica* L. (café) según variedad y piso altitudinal en el distrito de Hermilio Valdizan?.

El trabajo se justifica y fundamenta en los potenciales efectos que tendrían en la salud humana el ingerir café con altos niveles de metales pesados, niveles que se presentarían por factores locales y el manejo aplicado en el proceso productivo. La justificación práctica el trabajo se fundamenta en la búsqueda de información técnica y científica sobre potenciales efectos que tendría la altitud y variedad en el comportamiento de los niveles de metales pesados (Cd y Pb) en granos de café, y las posibles relaciones que se puedan encontrar con los principales indicadores de fertilidad del suelo y morfométricos del grano, que permitan explicar los niveles de Cd y Pb en granos de café producidas en el distrito Hermilio Valdizan.

El trabajo contribuye con nuevos conocimientos para la comunidad, que servirá para descartar la presencia de altos niveles de metales y reafirmar la alta calidad del café producido en este distrito, así contribuir al conocimiento a través de la publicación en las revistas científicas. Además, los hallazgos servirán para que las instituciones peruanas y los pequeños agricultores asociados e independientes puedan darle un valor agregado en el mercado (café libre de metales pesados) a su producción.

En este contexto, los resultados permitieron rechazar la hipótesis planteada “La concentración de cadmio y plomo en granos de *Coffea arabica* L. (café), según variedad y piso altitudinal del distrito de Hermilio Valdizan campaña 2023, se encuentran dentro de los niveles libres de contaminación exigidos por el MERCOSUR (2011)”, ya que los niveles encontrados, particularmente el plomo presentó valores ampliamente superiores a lo exigido por la MERCOSUR y otra normas internacionales usadas como referencia

Objetivo general

Evaluar los niveles de cadmio y plomo en granos de *Coffea arábica* L. (café) según variedad y piso altitudinal en el distrito de Hermilio Valdizan campaña 2023.

Objetivos específicos:

1. Determinar la concentración de cadmio y plomo en granos de *C. arábica* según variedad y estrato altitudinal (600-1000, 1000-1400 y mayores a 1400 msnm)
2. Determinar indicadores de fertilidad del suelo (Textura, pH, MO, P, K, Ca, Mg y CIC) en plantaciones de *C. arábica* según variedad y estrato altitudinal
3. Determinar indicadores morfométricos de *C. arábica* según variedad y estrato altitudinal
4. Determinar diferencias y correlaciones a través de Pearson, entre la concentración de cadmio y plomo, indicadores de fertilidad del suelo, e indicadores morfométricos del café, según variedad y piso altitudinal.

II. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. Metales pesados

Presentan alta densidad ($> 5 \text{ g cm}^{-3}$), masa y peso atómico > 20 , muy tóxicos en concentraciones trazas para diferentes sistemas humanos, animales y el medio ambiente (Puerta et al., 2017). Los metales incorporados a los agroecosistemas modifican la cadena trófica, generan riesgos en la salud humana y animal; además, ingresan a los agroecosistemas por diferentes factores, entre ellos: tipo de suelos, altitud y variedad de café, fisiografía y geología, aguas y suelos contaminados con plaguicidas, actividades mineras e industriales, así como actividad volcánica en el entorno (Londoño et al., 2016).

Actualmente, metal pesado hace referencia a metales y metaloides potencialmente tóxicos, que en la actualidad gracias a la revolución industrial se está liberando a los sistemas vivos cantidades alarmantes, debido principalmente a actividades antrópicas como la agricultura y otras actividades (Covarrubias & Peña, 2017). Los metales como el As, cromo y Cd tienen efectos perjudiciales en la salud humana y son considerados elementos cancerígenos (Londoño et al., 2016), porque, además de su toxicidad, son acumulables por los organismos y transferidos a cada uno de los eslabones de la cadena alimenticia, por ello, es importante el estudio sobre su concentración en suelos con uso agrícola (Soto et al., 2020).

Los modelos de agricultura actual han incorporado variedades de alto rendimiento, modificados genéticamente, sistemas de riego eficiente, uso de maquinaria agrícola y el uso masivo de fertilizantes químicos y pesticidas, todo esto ha traído consecuencias, entre ellas, la acumulación de metales pesados en el suelo que terminan contaminando los productos agrícolas y potenciales riesgo a la salud pública, especialmente en países con carencias y/o deficiencias en la aplicación de normas técnicas específicas que aseguren la calidad de sus productos agrícolas (Mahecha et al., 2015).

2.1.1. Cadmio

Metal pesado relativamente raro en la naturaleza y está asociado al zinc (Florida, 2021). Es de color blanco azulado, peso atómico 112, densidad relativa 8 g cm^{-3} , tiene ocho isótopos estables y once radioisótopos inestables de tipo artificial, naturalmente se encuentra en la greenockita (sulfuro de cadmio) único mineral de cadmio (Londoño et al., 2016).

Este metal es muy usado en la industria en los últimos 50 años (Antoine et al., 2017). Actualmente está provocando una serie de trastornos en la salud (Londoño et al., 2016), principalmente en los pulmones, riñones, hueso y probablemente desarrollo de diferentes

tipos de cáncer, gracias a su alta movilidad y bioacumulación (Reyes et al., 2016; Raju et al., 2020). Los estudios previos consideran al Cd, Pb, Hg y Cr muy peligrosos para la alimentación (Reyes et al., 2016); aspecto que motivó a los investigadores encontrar respuestas sobre su descripción y comportamiento en los sistemas biológicos (Florida, 2021).

El Cd es obtenido como subproducto de la fundición y refinado de los minerales de zinc en Estados Unidos, Canadá, México, Australia, Bélgica, Luxemburgo y República de Corea. El cadmio tiene múltiples aplicaciones en la industria: pinturas, plásticos, pilas, baterías, abonos, soldaduras, asbestos, pigmentos, reactores nucleares, farmacéutica, fotografía, vidrio, porcelana, etc. La principal fuente de ingesta para los seres vivos es a través de los alimentos y el agua (Londoño et al., 2016; Florida, 2021).

2.1.2. Plomo

Elemento con número atómico 82, peso atómico 207, color azulado, forma muchas sales, óxidos y compuestos organometálicos. En la industria, los compuestos más importantes son óxidos y tetraetilo de plomo, forma aleaciones con estaño, cobre, arsénico, bismuto, cadmio y sodio. Los minerales comerciales suelen contener plomo entre 3 al 10 %, muy usado como aditivo antidetonante en la gasolina, baterías, monitores de computadores y pantallas de televisión, joyería, latas de conserva, tintes para el pelo, grifería, pigmentos, aceites, cosmetología, aleaciones, cerámicas, municiones, soldaduras, plumadas, armamento, radiación atómica, insecticidas, y otros productos (Londoño et al., 2016)

El plomo es un metal pesado caracterizado por ocasionar efectos tóxicos sobre el tracto gastrointestinal, sobre el sistema renal y sobre el sistema nervioso central (SNC) y periférico, así como interferencias con sistemas enzimáticos (Rubio et al., 2004). Además, estudios recientes informan que hoy tenemos de 400 a 1 000 veces más plomo en los huesos que hace 400 años, debido a la presencia de este metal en alimentos y productos industriales (Londoño *et al.*, 2016). El plomo tiene graves efectos en diferentes órganos y en el cerebro afecta el desarrollo y capacidad mental de los niños (Londoño et al., 2016; Reyes et al., 2016)

La corteza terrestre de forma natural presenta normalmente concentraciones pequeñas de plomo, en promedio no supera el 0.002 %, y se lo puede encontrar en minerales como la galena (PbS), la anglesita (PbSO₄) y la curosita (PbCO₃). Es un catión divalente, se une de manera estrecha a los grupos sulfhidrilos de las proteínas ocasionando su desnaturalización (Covarrubias & Peña, 2017). La exposición a dosis elevadas de este elemento puede ocasionar una serie de efectos adversos en riñón, hígado, encéfalo y huesos por semejanza con el calcio (Londoño et al., 2016), incluyendo daño cerebral severo y aborto, mientras que en hombres altera la espermatogénesis (Covarrubias & Peña, 2017).

Las fuentes más importantes de emisión al ambiente es la industria de la fundición y procesamiento de metales, reciclamiento de baterías en base a plomo, la minería a través de la inapropiada disposición de relaves y la contaminación atmosférica debido al uso de gasolina con diferentes octanajes de plomo (Londoño et al., 2016). Además, gracias a su capacidad de combinarse con otros metales es común que áreas contaminadas con plomo se encuentren otros metales como As, Hg y Zn (Covarrubias & Peña, 2017).

2.1.3. Niveles máximos de cadmio y plomo en café

De acuerdo al Código Alimentario-CODEX (2019), el nivel máximo de un contaminante presente en alimentos o forrajes es la concentración máxima de esa sustancia recomendada legalmente en dicho producto y se establece solamente en alimentos donde el contaminante puede hallarse en cantidades importantes para la exposición total y resulte el consumidor suficientemente protegido, además, los niveles máximos se basan en principios científicos que conducen a niveles aceptables que permiten el comercio internacional.

La norma de referencia más importante en America del Sur es el Reglamento técnico N°12/11, resolución emitida por el Mercado Común del Sur-MERCOSUR (2011), en el que se establece límites máximos de 0.10 y 0.50 mg/kg de Cd y Pb respectivamente para granos de café (Tabla x), sin embargo, la misma tabla muestra otros valores máximos establecidos por países y por instituciones internacionales como el CODEX y la Unión Europea-UE (2021), quien establece un nivel máximo relativamente mayor (0.90 mg/kg) en comparación a las demás normas señaladas.

También se tiene otra norma de alcance internacional como el Codex Alimentarius” que significa “Código Alimentario [CODEX]”. Según el Ministerio de Comercio, Industria y Turismo-MINCIT (2023), es un órgano internacional creado por la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO) y la Organización Mundial de la Salud (OMS), para regular por la inocuidad de los alimentos y proteger la salud del consumidor, y promover prácticas justas en el comercio de alimentos aplicable a escala mundial. Respecto a los contaminantes Cd y Pb establece niveles bajos (0,10 y 0,20 mg/kg de café) en comparación con las otras normas señaladas en la (Tabla 1).

Tabla 1. Límites máximos para Cadmio y plomo en café

Institución o país	Producto alimenticio	LMP (mg/kg-µg/g)		Referencia
		Cd	Pb	
UE	Espicias de semillas		0,9	(UE, 2021)
Brasil	Café fresco y tostado		0,50	(Teixeira et al., 2018)
CODEX	Legumbres, cereales en grano	0,10	0,20	(CODEX, 2019)
MERCOSUR	Café tostado	0,10	0,50	(MERCOSUR, 2011)

LMP Límite máximo permitido

2.2. Café

2.2.1. Características y clasificación

Herrera & Cortina (2013) señalan que pertenece a la extensa familia de las Rubiáceas, conformada por más de 500 géneros y aproximadamente 6 000 especies, la mayoría de origen tropical y amplia distribución geográfica. Además, afirma que existen 103 especies el género *Coffea*, de ellos 41 son originarias del África continental (zona tropical húmeda) y 59 se encuentran silvestres en Madagascar.

El café arábico (*Coffea arábica* L.) representa el 60 % de la producción global, contrariamente, el café Libérica (*Coffea libérica*) y el Excelsa (*Coffea dewevrei*) son las especies cultivadas en menor escala (ICO, 2018). Para Herrera & Cortina (2013) la clasificación taxonómica del cafeto es:

Reino	: Plantae
División	: Magnoliophyta
Sub-división	: Angiosperma
Clase	: Magnoliata
Sub-clase	: Asteridae
Orden	: Rubiales
Familia	: Rubiaceae
Género	: <i>Coffea</i>
Especie	: <i>Coffea arábica</i> L.

2.2.2. Variedades locales

Las especies locales encontradas responden al Catimor, Caturra, Colombia y Catuai. El Caturra es un mutante de forma compacta de bourbon, también, se ha encontrado al Catuai, especie desarrollado como híbrido de Mundo Novo y Caturra, caracterizado por sus cerezas amarillas o rojas denominados como Catuaimarelo y Catuaivermelho (ICO, 2018). Sin embargo, la variedad dominante en más del 70 % del área en estudio fue el Catimor, esta proporción ha sido ya documentada para otras regiones del país (Julca et al., 2010), híbrido desarrollado en América Central a través del PROMECAFE a partir del Timor (H de T) y caturra, resultando el Catimor (Caturra x H de T) cultivares resistentes a la “roya del café”, este híbrido se desarrolló con criterios de productividad y de resistencia a la raza II de la roya.

Si bien el Catimor es el más difundido en el ámbito local por su rendimiento y tolerancia a la roya, pero, son susceptibles a otras plagas y enfermedades y son considerados de baja calidad organoléptica que han limitado su expansión (Julca et al., 2010). Aunque, existen referencias que señalan que la calidad de los Catimores no difiere de los cultivares más tradicionales como el Castillo, Típica, Caturra, Borbón y Colombia (Julca et al., 2018; Alvarado et al., 2005). En Perú las variedades más cultivadas son Catimor, Colombia y Costa Rica 95 (Julca et al., 2010).

2.2.3. Consumo y producción

Gotteland & de Pablo (2007) Afirman que el café en taza es la bebida más consumida a nivel mundial, producto de su amplia variedad de propiedades organolépticas y a su capacidad de quitar la somnolencia del consumidor, estas características son producidas por contener más de un millar de sustancias químicas: aminoácidos, compuestos nitrogenados, polisacáridos, azúcares, triglicéridos, ácido linoleico, diterpenos (cafestol y kahweol), ácidos volátiles (fórmico y acético) y no volátiles (láctico, tartárico, pirúvico, cítrico), compuestos fenólicos (ácido clorogénico), cafeína, sustancias volátiles (de más de 800 conocidos solo entre 60 a 80 contribuyen al aroma), vitaminas y minerales, que varían según variedad y tostado del café.

De acuerdo con los reportes del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos-USDA (2020) la producción mundial de café en la campaña comercial 2020/21 alcanzó una comercialización de 4 millones de sacos. Sin embargo, remarca que la producción peruana viene recuperándose de un brote de roya amarilla que diezmó el 50 % de la producción entre los años 2013 al 2016, los esfuerzos incluyen el tratamiento fitosanitario, poda, renovación y en muchos casos el cambio de la variedad cultivada.

Respecto a la producción peruana USDA (2020) estimó 350 000 ha para el 2021, disminuyendo un 4 % en comparación al año anterior de 363,000 ha. La cifra pone de manifiesto que muchos productores peruanos abandonaron el cultivo, producto de la roya y los bajos precios del mercado, ambos factores explican la reducción del área cosechada para el 2021. Por su parte MIDAGRI (2022) reporta que Perú produce principalmente café Arábica, del cual más del 70 % es de la variedad Typica, Caturra (20 %) y otras variedades (10 %), además, el 75 % del cultivo de café peruano se produce entre 1 000 y 1 800 msnm, bajo sombra, densidad promedio de 2 000 plantas por ha., cosechado manual y secado al sol; también señala que 90 000 ha cuentan con certificación orgánica, convirtiéndolo en el principal exportador mundial de café orgánico. Aunque, registramos rendimientos promedio en 2019/20 de 752 kg/ha, este dista de los 2 500 kg/ha que se pueden alcanzar.

2.2.4. Características morfométricas del fruto y granos de café

El fruto se clasifica como drupa globular u ovoide de peciolo corto y se le denomina cereza, formado por dos semillas (CENICAFÉ, 2013; Herrera & Cortina, 2013), cuando maduran son rojos o amarillos, normalmente con dos semillas, si fecunda un solo óvulos se forma una semilla redonda, conocida como café caracol.



Figura 1. Variabilidad en tamaño y forma del café

Fuente: Herrera & Cortina (2013)

Las semillas generalmente son oblongas, planoconvexas, representan del 35 al 38 % del fruto del café, están constituidas por el endocarpio o pergamino, este último, es una película plateada denominado embrión (Rodríguez et al., 2009). Además, las características

morfométricas de las semillas (1) difieren según la variedad y de los rangos de altitud donde se desarrolla la plantación. La altitud donde se cultiva el café tiene algunas implicancias tanto en la calidad de las semillas (Tabla 2), como en las dimensiones (Tabla 3).

Tabla 2. Calidad de la semilla con la altitud

Semillas defectuosas (%)	Rango de altitud (m)		
	<1 300	1 300 a 1 600	>1 600
Negro	0,07	0,09	0,08
Brocado	3,83	2,24	0,70
Vinagre	1,13	0,74	0,97
Decolorado	1,62	1,21	1,12
Mordido	1,12	1,39	1,23
Total	10,61	8,43	7,18

Valores medios obtenido de un tamaño de muestra n=580
Fuente: CENICAFÉ (2013)

La Tabla 3, revela que la calidad física de las semillas de café mejora a medida que se incrementa la altitud donde se cultiva. Para CENICAFÉ (2013), la calidad de las semillas es afectada por la altitud, por la reducción de los agentes (plagas y enfermedades) que provocan daños directos e indirectos sobre el fruto y semillas del café.

Tabla 3. Tamaño del grano con la altitud y variedad

Tamaño grano café (mm)	Altitud (m)			Altitud (m)		
	<1 300	1 300 a 1 600	>1 600	<1 300	1 300 a 1 600	>1 600
	Caturra (%)			Colombia (%)		
6,75	58,0	61,4	64,30	62,50	63,40	65,20
6,35	25,10	24,2	23,40	22,90	23,20	22,90
5,95	10,90	9,80	8,70	9,90	9,30	8,40
5,56	4,90	4,00	3,00	3,90	3,50	3,00

2.3. Indicadores de fertilidad del suelo

La fertilidad del suelo es un término usado tradicionalmente para comprender y conocer el estado y el comportamiento de los suelos en los contextos agropecuario y forestal (Havlin et al., 1999; García et al., 2012). Esta definición de suelo fértil se refiere a la capacidad que tiene el suelo de suministrar los nutrientes suficientes al cultivo, asegurando su crecimiento y su desarrollo (Havlin et al., 1999). Los principales indicadores se describen a continuación:

a. pH del suelo

Indica el grado de acidez o basicidad que presenta el suelo, también denota la actividad de los iones hidrógeno en la solución del suelo lo cual influye en la disponibilidad de nutrientes minerales para los cultivos (FAO, 2009). Las plantas crecen mejor cerca de la neutralidad, por lo que cuando el suelo es ácido existe mayor presencia de hidrogeniones y

aluminio mientras que el calcio, magnesio, potasio y sodio son bajos; por otra parte, si un suelo es básico va a presentar exceso de calcio y por sinergia impide que otros elementos ingresen a la solución del suelo (Havlin et al., 1999).

b. Materia orgánica del suelo

La materia orgánica es la principal fuente de N en el suelo y el alimento para los macro y microorganismos, además, mejora la estructura el suelo e influye de manera transversal en la calidad y salud del suelo (FAO, 2009). El contenido de materia orgánica se puede reconocer a simple vista a través del color del suelo y se expresa en porcentaje, lo que indica la cantidad de residuos orgánicos volátiles, si la materia orgánica está presente en gran cantidad indica que su CIC es alto y viceversa (Havlin et al., 1999).

c. Nitrógeno total

Es un elemento esencial que forma parte de las biomoléculas de los seres vivos; el nitrógeno ingresa al suelo por la acción de la materia orgánica y la fijación de bacterias del aire, luego es utilizado por los animales, microorganismo y plantas absorbiéndolo e incorporándolo en sus tejidos, al morir el nitrógeno vuelve a ingresar al suelo y así completando el ciclo (FAO, 2009). Mayormente en el horizonte superficial de los suelos, más del 90 % del nitrógeno se encuentra en forma orgánica mientras que el otro 10 % lo encontramos en forma de amonio retenidas en las arcillas; las plantas absorben en forma de nitrato, sin embargo, esta forma química es fácil de lavarse con las precipitaciones y riegos, por otra parte, el amonio es intercambiable y no supera el 2 % de nitrógeno total (SAGARPA, 2012).

d. Fosforo (P)

Es la principal fuente de energía y se encuentra en las semillas, sin embargo, su naturaleza química permite la formación de diversas especies que las plantas no pueden acceder con facilidad, particularmente en los suelos tropicales con altos niveles de acidez, sin embargo, este comportamiento no es exclusivo de estas zonas, también se observa este comportamiento en suelos alcalinos. La fuente primaria proviene de la mineralización de las rocas, sin embargo, la fertilización es necesaria para compensar el lento proceso de liberación de los minerales y satisfacer los requerimientos de los cultivos (SAGARPA, 2012).

e. Potasio (K)

Elemento importante en la nutrición vegetal, muy dinámico y fácilmente absorbido en forma de ion K^+ , en el suelo forma parte de la estructura interlaminar de los filosilicatos (SAGARPA, 2012). El K no es un componente estructural en las plantas, formar parte no constitutiva de prótidos, lípidos y glúcidos y tejidos, además es el encargado de

neutralizar los ácidos orgánicos que resultan del metabolismo, manteniendo un pH equilibrado dentro del citoplasma celular (Navarro & Navarro, 2003).

f. Calcio (Ca)

Presenta reacción básica y en la planta es un componente estructural, poco móvil entre las estructuras, por ello, las deficiencias en la planta se observan en tejidos jóvenes. Además, determinan el nivel de pH, en cierta medida influye sobre la CIC del suelo, y la concentración de Mg y K por acción antagónica (Navarro & Navarro, 2003). Es importante por dar rigidez a las paredes celulares; por ello, frente a deficiencias no es posible la traslocación a otros tejidos y se requiere aplicaciones externas para evitar deficiencias en tejidos jóvenes. La planta lo toma como ion Ca^{2+} de la solución del suelo y en ningún caso presenta toxicidad en el suelo (SAGARPA, 2012).

g. Magnesio (Mg)

Las plantas lo absorben como ion Mg^{2+} de la solución del suelo. Se encuentra como parte estructural de los filosilicatos, minerales arcillosos, por lo que, su disponibilidad depende del tipo de arcilla, concentración de Ca y K, pH, tipo de cultivo y de aportes externos según los requerimientos del cultivo; además, los suelos tropicales ácidos, arenosos y con baja CIC siempre presentan deficiencias de Mg (Havlin et al., 1999). Los suelos arenosos presentan baja disponibilidad de Mg por formación de cloruros y sulfatos muy solubles, estos se percolan y se pierden del perfil, sin embargo, las cantidades requeridas por la mayoría de los cultivos es similar a los requerimientos de P o S (FAO, 2009).

h. Capacidad de intercambio catiónico (CIC)

El intercambio de cationes está ligada a procesos que ocurren en el complejo coloidal que presenta cargas negativas en su superficie y aristas, y define el potencial del suelo de retener cationes como Ca, Mg, K y otros. Por lo tanto, depende de la presencia de los coloides como la arcilla y la materia orgánica del suelo (Havlin et al., 1999).

2.4. Comportamiento de los nutrientes en una gradiente altitudinal

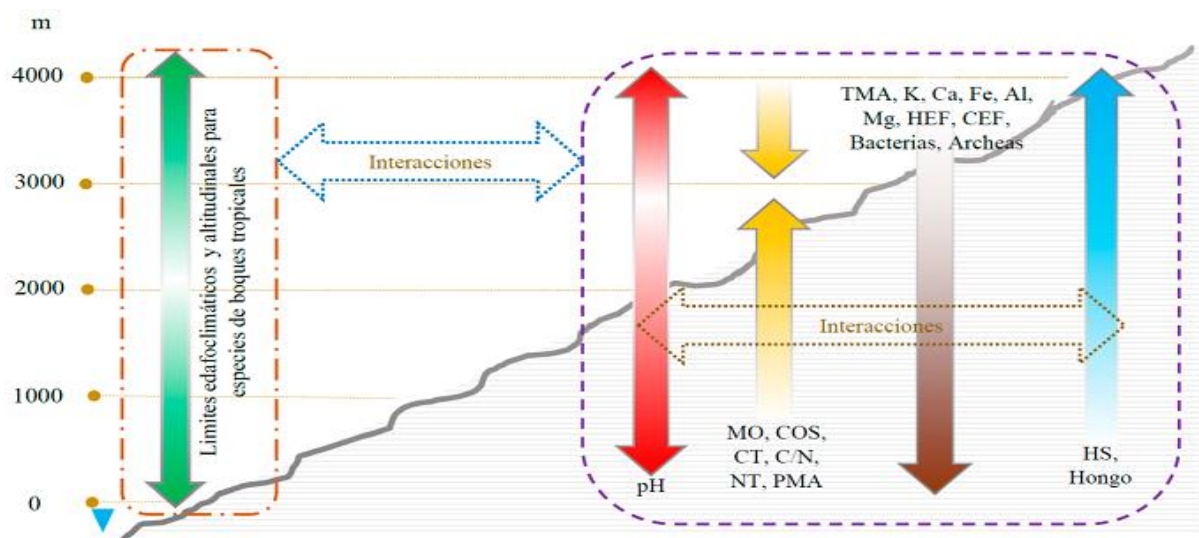
Los gradientes altitudinales ejercen cierto nivel de influencia en las condiciones climatológicas locales, que generan particularidades en las propiedades de los suelos (Murga et al., 2021) y terminan condicionando el manejo, el tipo de cultivo, la presencia de plagas y enfermedades, la calidad de los suelos y los niveles de producción de los diferentes cultivos.

El pH de los suelos en condiciones tropicales, en general, presentan niveles con algún grado de acidez (varían de 3.70 a 6.00), consecuencia de la pérdida de bases por lavado o lixiviación (Havlin et al., 1999); sin embargo, el pH distribuidos en una gradiente altitudinal, en general, disminuyen con el aumento de la altitud hasta alcanzar aproximadamente los 3 000

msnm, (Oliveras et al., 2020), a partir de los 3 000 m, el pH presenta comportamiento inverso y tiende a incrementarse (Peters et al., 2019), este comportamiento es generado por la disminución de la intensidad de las precipitaciones que producen menor lixiviación de bases del suelo, y por la disminución de las temperaturas medias que disminuyen la generación de ácidos orgánicos, reflejándose en un aumento del pH en el suelo sobre los 3000 m de altitud (Murga et al., 2021).

La MO es otra propiedad del suelo muy importante y que se ve notablemente influenciada por la altitud, ya que afecta la mineralización, disminuyendo con la altitud, esto por efecto de la reducción de las temperaturas (Wang et al., 2016) y por la saturación de agua en el suelo, ambos factores reducen la tasa de mineralización y produce mayor concentración de carbono orgánico en el suelo (De la Cruz et al., 2020), mejorando la agregación del suelo a mayores altitudes (Li et al., 2016).

Respecto al fósforo (P) disponible, existe una relación directa con tendencia de incremento con la altitud (Oliveras *et al.*, 2020), sin embargo, efecto contrario se observa con la absorción por las plantas, a pesar de que el P asimilable se incrementa con el aumento de la altitud (Murga et al., 2021; He et al., 2016). Las bases como Ca, Mg y K disminuyen con el aumento de la altitud en bosques tropicales (Murga et al., 2021), la tendencia de disminución de los nutrientes en el suelo se asocia con las bajas temperaturas, mayor humedad del suelo y altas concentraciones de fenoles que limitan la descomposición de la MO del suelo (Wilcke et al., 2008).



TMA temperatura media anual, PA precipitación anual, HS humedad de suelo, CT contenido total de carbono, PT fósforo total, NT nitrógeno total, C/N relación carbono/nitrógeno, HEF altura de especies forestales, CEF crecimiento de especies forestales. Fuente: Murga et al. (2021)

Figura 2. Perfil de gradiente altitudinal entre 0 a 4000 m

En general las plantas en suelos tropicales están condicionadas por propiedades del suelo, y elementos climáticos (2). Los gradientes altitudinales generan variaciones en los elementos climáticos (temperatura y precipitación) locales que terminan afectando las propiedades del suelo, los componentes biológicos, el medio ambiente, el uso de la tierra y la conservación de este (Murga et al., 2021)

2.5. Estado del arte

2.5.1. Antecedentes internacionales

Albals et al. (2021) compararon la composición elemental entre diferentes variedades de café consumidas en Jordania, en muestras de café; café en grano verde y tostado de cinco orígenes (Brasil, Etiopía, Kenia, Colombia e India). Los metales pesados detectados por ICP-MS y espectrometría de absorción atómica de llama (FAAS) se ajustaron linealmente y los coeficientes de correlación R^2 fueron mayores que 0.95 para los tres elementos comprobados. No se observó diferencia significativa entre los resultados de las dos técnicas ($p > 0,05$). Encontraron diferencias significativas para Cr, Co y Zn en los granos de café verde y tostado, sin embargo, los niveles encontrados son seguro para el consumo según organizaciones de salud.

Da Silva et al. (2017) evaluaron el contenido de metales pesados en café cultivado en la región de Cerrado Mineiro - Brasil. Se analizaron cincuenta muestras de granos de café mediante espectrofotómetro de absorción atómica. El 66 % de las muestras de café presentan niveles aceptables de Cr, y el 74 % contenían Pb en concentraciones superiores a las permitidas. Para las infusiones, los metales evaluados presentan concentraciones más bajas y fueron menos significativos con respecto a la ingesta diaria máxima permitida, excepto para el Pb que se cuantificaron niveles muy altos.

Puerta et al. (2017) compararon las concentraciones de 44 elementos químicos en café verde y tostado de 162 fincas ubicadas a altitudes de 1 050 a 2 050 m y 15 unidades de suelos en Colombia y parcelas con trazabilidad. A mayores altitudes encontraron mayores concentraciones de As, Bi, Cr, In, Mg, Ni, P, Pd, Pt, Sb, Se, Te y Zn; y menores los contenidos de Ba, Ca, Cu, K, Li, Mo, Rb, Sc, Sr. Encontraron diferencias por unidades de suelos y el café tostado presentó similares concentraciones de elementos minerales que el verde. Las diferencias halladas podrían utilizarse como variables químicas de diferenciación del grano de café para su comercialización destacando otros atributos del café de las regiones.

Chambi et al. (2012) determinaron Pb, Cd, Zn y As en suelos agrícolas del municipio Poopó a diferentes altitudes. Muestrearon suelos de parcelas agrícolas de Papa, Haba, Cebada y Alfalfa. La concentración se evaluó con la norma de la Agencia Ambiental Holandesa

y la Ley de Gestión Ambiental del Ecuador. Encontraron altos niveles de arsénico, superando el nivel peligroso (55 mg/kg de suelo), vía mineralización natural como por el aporte de la minería circundante, y el cultivo de haba fracción comestible presentan tendencias de mayor acumulación de As, llegando en algunos casos a superar el contenido máximo en cultivos (1.7 mg/kg).

2.5.2. Antecedentes nacionales

Murga et al. (2021) analizaron la influencia de los gradientes altitudinales en el crecimiento y desarrollo de las especies vegetales. Identificaron las variaciones edafoclimáticas en gradientes altitudinales geográficamente ubicadas entre 27° N y 27° S de latitud, y en gradientes altitudinales entre 0 a 5 000 m. Determinaron que la temperatura media anual disminuye con la altitud, mayores precipitaciones se presentan en altitudes medias. Los valores del pH del suelo disminuyen hasta 3000 m, aumentando sobre esta altitud; sin embargo, la materia orgánica, carbono orgánico, carbono total, nitrógeno total y la relación C/N del suelo aumentan hasta 3000 m; sobre esta altitud los valores disminuyen. El K, Ca, Mg, Fe y Al del suelo disminuyen con el aumento de la altitud por influencia de las bajas temperaturas y humedad del suelo (HS). Consideran importante el conocimiento de la altitud para diseñar políticas efectivas de uso de la tierra y de conservación.

Soto et al. (2020) evaluaron As, Cd, Pb y Hg en suelos, plátano y yuca en áreas de minería aluvial abandonadas en la Amazonía peruana. Evaluaron metales pesados en raíz, tallo, hoja y fruto. Se encontró que las concentraciones de As, Cd y Pb fueron superiores en áreas contaminadas. En yuca presenta elevada acumulación de Pb y As en las raíces y tallos (> 2.9 mg/kg), contrariamente el plátano presenta niveles bajos de todos los metales analizados (< 0.01 mg/kg). Mayor bioacumulación presentó el As y Pb en yuca, particularmente en raíces superan los niveles recomendados por la FAO/OMS.

Mego & Pintado (2019), evaluaron cadmio en granos frescos, secos y esencia de *Coffe arabica* L. (café) variedad Catimor y Pache cultivados en Las Pirias, Distrito Chirinos, Provincia de San Ignacio; Para sus evaluaciones realizó el típico proceso de tostado, molido y filtrado de los granos en las condiciones de fresco y secos. Encontró alto nivel de concentración de cadmio solo en granos secos de la variedad Catimor, resultado que supera los niveles máximos de la MERCOSUR (0.10 mg kg⁻¹), mientras los granos frescos y esencia cumplen con esta normativa.

Huamani (2022), cuantificó plomo y cadmio en granos de *Coffea arabica* L. (café) comercializados en el mercado Caquetá, distrito de San Martín de Porres, durante el periodo diciembre 2021. Encontró medias de plomo menor a 0.1729 y cadmio menor a 0.002

mg kg⁻¹, los mismos que no superan el nivel máximo establecido por el MERCOSUR. Los resultados de Cd y Pb de los cafés que fueron evaluados y comercializados en el mercado Caquetá del distrito de San Martín de Porres-Lima, corresponden a cafés de buena calidad.

Mundaca & Tirado (2021), analizaron cadmio en granos frescos, café oro verde, granos tostados, tostado molido y esencia de café en fincas de Barrio Nuevo, Los Lirios y San Martín, distrito de San Ignacio-Cajamarca. Colecto cerezos en estado de madurez, los cuales fueron despulpados, fermentados, secados, trillados, tostados y molidos. El contenido de cadmio en granos frescos, granos oro verde, granos tostados, café tostado molido y bebida presentaron promedios de 0.379, 0.288, 0.228, 0.109 y 0.00 ppm, respectivamente. Los granos frescos, granos oro verde y granos tostados superaron los niveles máximos (0,10 mg kg⁻¹) dados por la MERCOSUR, excepto para café tostado molido y bebida, fueron inferiores a lo exigido por esta norma técnica.

III. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Área de estudio

El lugar donde se desarrolló la investigación es la jurisdicción del distrito de Hermilio Valdizan (3), que pertenece a la provincia de Leoncio Prado, región Huánuco.

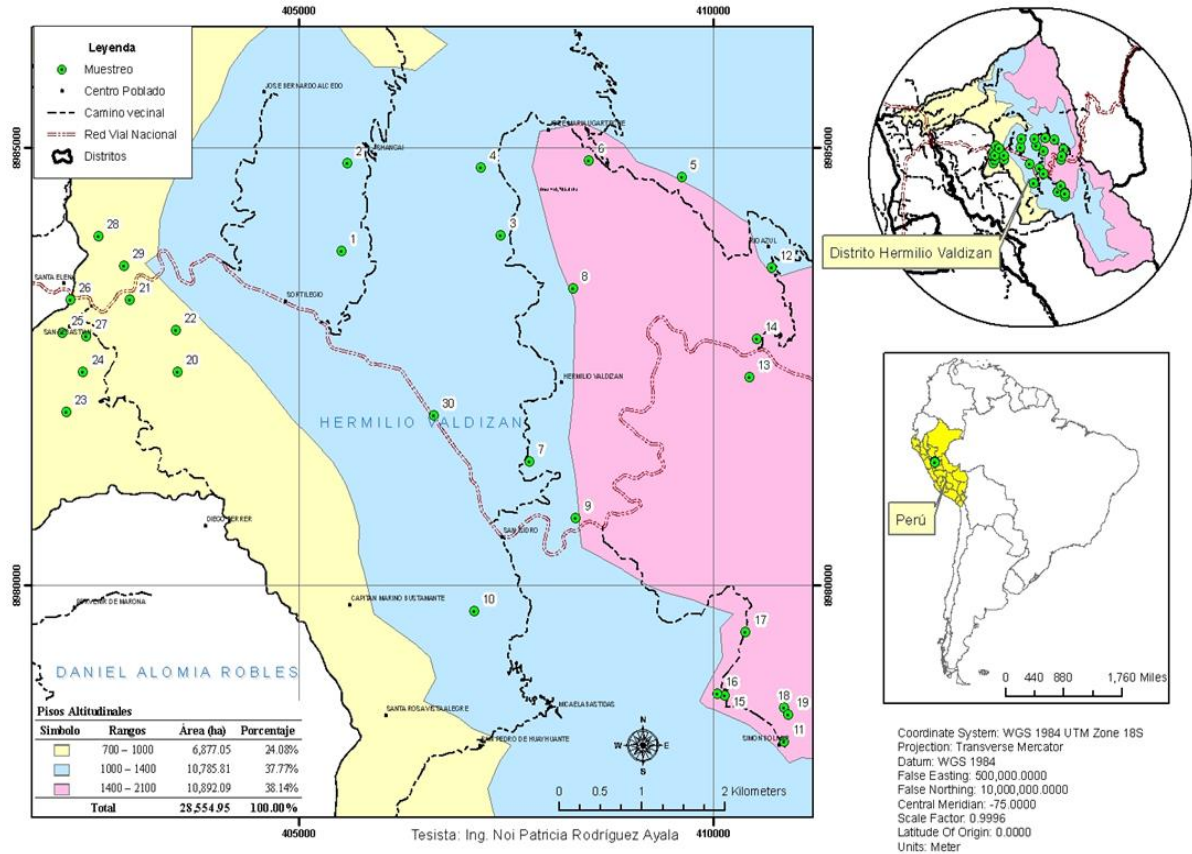


Figura 3. Mapa de ubicación política y distribución de las muestras en el área de estudio

3.1.1. Ubicación de parcelas estudiadas

La Tabla 4, muestra la ubicación de cada parcela, su altitud y el piso altitudinal en el que se ubica, esto, de acuerdo con los criterios metodológicos del proyecto

Tabla 4. Ubicación geográfica de las plantaciones estudiadas

Muestra	Nombre	Lugar	E	N	Altitud
1	Roberto Espinoza Luis Miguel	Sortilegio	405529	8983822	1331
2	González Atachahua Marcelina Rosario	Sortilegio	405600	8984821	1350
3	Paulina Espinoza De Rosas	Valdizan	407452	8983999	1286
4	Ramírez Laveriano Eloy	Ugarteche	407212	8984771	1268
5	Carrillo Orizano Fortunato	Ugarteche	409629	8984664	1284
6	Echevarría Aquino Bartola	Ugarteche	408513	8984846	1426
7	Héctor Martel Escobar	Valdizan	407790	8981416	1357
8	Briseño Adrián Serafín	Valdizan	408317	8983387	1511
9	Ramírez Bravo Adelina	San Isidro	408353	8980764	1299
10	Marcos Tolentino Eleodoro	San Isidro	407126	8979711	1144
11	Berta Benita Bravo Condezo	Simón Bolívar	410860	8978217	1520
12	Timoteo Facundo Vicente	Rio Azul	410714	8983630	1323
13	Huarauya Catalicio Marino	San Agustín	410442	8982374	1760
14	Sanchez Adán Orlando	San Agustín	410531	8982816	1659
15	Jorge Villanueva M	Simón Bolívar	410148	8978742	1545
16	José Villanueva M	Simón Bolívar	410054	8978760	1518
17	Condezo Fretel Jorge Luis	Simón Bolívar	410397	8979465	1518
18	Carlos Bravo Sambrano	Simón Bolívar	410860	8978600	1570
19	Miguel Bravo Sambrano	Simón Bolívar	410914	8978522	1549
20	Tomas Adriano Faustino	San Sebastián	403553	8982434	888
21	Lujan Dimas Jelacia	San Sebastián	402982	8983258	991
22	María Paredes	San Sebastián	403533	8982915	985
23	Justo Valdivia Rolin	San Sebastián	402213	8981983	906
24	Raúl Ponce Gomez	San Sebastián	402414	8982439	928
25	Adriano De Calixto Maximiliana	San Sebastián	402168	8982886	932
26	Carlos Gargate Tarazona	San Sebastián	402259	8983265	951
27	Juana Mori Gomez	San Sebastián	402456	8982849	909
28	Wilmer Ambrosio Apolinar	San Sebastián	402599	8983984	866
29	Dina Lujan Huerta	San Sebastián	402908	8983645	909
30	Aguilar Munalla Paulina	Sortilegio	406639	8981945	1267

E este, N norte

3.1.2. Características ecológicas del área

El distrito en general presenta características de la ecorregión Rupa Rupa (Pulgar, 2014), su altitud varia de 600 a 2 200 m, las características de su clima presentan una precipitación media anual de 3 400 mm, temperatura de 24.5 °C y una humedad relativa media anual de 86 %. Según Holdridge (2000), el distrito de Hermilio Valdizan presenta la formación de bosque húmedo Sub Tropical (bh-ST) con topografía variada, que van desde tierras ligeramente planas a muy accidentadas en gran parte de su territorio y en particular las áreas evaluadas forman parte de las cadenas de colinas y montañas de la Cordillera Azul, conocida como La divisoria.

3.1.3. Criterios de selección de las plantaciones evaluadas

Las plantaciones muestreadas se han seleccionado de manera aleatoria en la jurisdicción del distrito Hermilio Valdizan, para ello se aplicó los siguientes criterios:

Entrevista para explicar los objetivos del proyecto y obtener la autorización del propietario de la plantación para el muestreo correspondiente.

Determinación de la plantación a muestrear, teniendo como criterio técnico que la plantación este en etapa productiva y con manejo activo al momento de la evaluación, es decir que este en producción y no esté en abandono.

Delimitación de una subárea de muestreo de 1 000 m² (buscando homogeneidad en el terreno) para obtener muestras de café y suelo, 1 Kg para ambos casos

3.1.4. Características de las plantaciones evaluadas

La 4 muestra la numeración y ubicación de cada plantación muestreada, así como, al rango o gradiente altitudinal a la que pertenece. Las áreas evaluadas fueron 30, de ellas 13 pertenecen a la variedad Catimor (100 %), 08 parcelas combinadas entre Catimor y Caturra (en proporción de 80 Catimor y 20 % de Caturra), 03 áreas con Catimor y Catuai (similar al caso anterior, 80 y 20 %), 04 plantaciones de Caturra (100 %) y 02 plantaciones de variedad Colombia (100 %). Las áreas muestreadas tienen extensiones variables entre 0.5 hasta 3.50 hectáreas aproximadamente, estas no fueron medidas porque no forman parte de los objetivos del trabajo.

3.2. Materiales y equipo

3.2.1. Materiales de campo

Vestuario de campo, bolsas plásticas de 1 y 5 kg, marcador indeleble, pala recta, machete, botas de goma, tubos muestreadores y etiquetas.

3.2.2. Materiales de laboratorio

Matraz de Erlenmeyer de 50, 75 y 225 ml, tubos centrífugos, vasos precipitados de 50ml, fiolas de 50, 100 y 1 000 ml, buretas graduadas, tamiz de 0,20 mm de diámetro, papel filtro N°40, reactivos, indicadores, embudos, plástico estretch film, muestras de suelos, pinzas de laboratorio y pipetas graduadas.

3.2.3. Equipos de campo

Cámara fotográfica de alta resolución, GPS Garmin Map S26 y Wincha métrica.

3.2.4. Equipos de laboratorio

Balanza gramera, mortero de laboratorio, estufa, mufla, pH metro, computador portátil y agitador magnético.

3.3. Criterio y análisis de la investigación

3.3.1. Enfoque

La investigación se encuentra dentro del enfoque cuantitativo, debido a que se aplicó un conjunto de procesos: observación, recolección, procesamiento y análisis de datos cuantitativos (Hernández & Mendoza, 2018).

3.3.2. Tipo de investigación

Aplicada, porque se buscó generar conocimientos sobre, niveles de cadmio y plomo en granos frescos de café, indicadores de fertilidad del suelo y morfométricos de los granos de café, y encontrar relaciones entre estos indicadores según variedad y altitud de las plantaciones, los mismos, serán utilizadas para la toma de decisiones en la solución del problema de la contaminación por metales pesados en el ámbito del área de estudio (Hernández et al., 2014).

3.3.3. Nivel de investigación

La investigación es descriptiva transversal debido a que se determinó los niveles de Cd y Pb en granos de café, indicadores de fertilidad del suelo y morfométricos del grano de café en el distrito de Hermilio Valdizan en un momento determinado. Según Hernández & Mendoza (2018), los trabajos descriptivos cuantifican y analizan sin la manipulación de ninguna variable en el ámbito del estudio.

3.3.4. Diseño de la investigación

La investigación presenta un diseño no experimental, como define Hernández & Mendoza (2018). “La investigación no experimental es cualquier investigación en la que resulta imposible manipular variables, es decir, no hay condiciones o estímulos a los cuales se expongan los sujetos del estudio. Además, es descriptiva y comparativa, en el cual se aplicó un ajuste de diseño estadístico completamente al azar (DCA), donde los tratamientos lo constituyen las plantaciones de café en diferentes pisos altitudinales en el distrito de Hermilio Valdizan. Se utilizó el análisis de varianza ($p < 0.50$) para determinar si hay una diferencia significativa entre las medias de los metales pesados y la correlación de Pearson para determinar relaciones entre los indicadores de fertilidad del suelo y la concentración de cadmio y plomo en granos de café.

3.3.5. Variables en estudio

Tabla 5. Operacionalización de variables

Hipótesis	Variable	Dimensiones	Indicadores	
La concentración de cadmio y plomo en granos secos de café, según variedad y piso altitudinal se encuentran dentro de los niveles libres de contaminación exigidos por el MERCOSUR	Granos secos de café (Independiente)	<i>Granos de café según altitud</i>	Plantaciones de café de la zona baja (700 a 1 000 m), zona media (1 000-1 400m) y zona Alta (1400 a 2 100 msnm).	
		<i>Granos de café según Variedad</i>	Plantaciones de las variedades: Catimor, Caturra, Colombia y Catuai	
	Contaminación por metales en granos de café (Dependiente)	<i>Cadmio</i>	Niveles Máximos de la MERCOSUR: cadmio en granos secos de café $\leq 0,10$ $\mu\text{g/g}$	
		<i>Plomo</i>	Plomo en granos secos de café $\leq 0,50$ $\mu\text{g/g}$	
	Propiedades del suelo (Interviniente)	Físicas		Textura
				Densidad aparente (g/cm^3)
		Químicas		Resistencia a la penetración (kg/cm^2)
				pH
				MO (%)
				N (%)
			P (ppm)	
			K^+ ($\text{Cmol}^{(+)}/\text{kg}$)	
	CIC ($\text{Cmol}^{(+)}/\text{kg}$)			
	Ca^{2+} ($\text{Cmol}^{(+)}/\text{kg}$)			
	Mg^{2+} ($\text{Cmol}^{(+)}/\text{kg}$)			

3.4. Metodología

3.4.1. Muestreo de campo

La investigación muestreó aleatoriamente según pisos altitudinales (700-1 000, 1 000-1 400 y 1 400-2 100 msnm) en toda la jurisdicción, tomando en cuenta los análisis de 0 a 20 cm de profundidad en cada plantación de café seleccionada. Para ello, se delimitó la

jurisdicción distrital para establecer el área en estudio, utilizando los criterios del MINAM (2019), quien nos indica que entre más grande sea el tamaño de la muestra más exacta será la evaluación, por ello, se realizó el cálculo del tamaño de muestras mínimas en función de la superficie total del área a analizar (3) de interés utilizando la siguiente fórmula:

$$N = a + b (S)$$

N: Superficie total de la muestra (ha)

S: Superficie total a evaluar del área de la zona de interés (ha)

a: 5

b: 0.001

A partir de la obtención de la superficie total de la muestra (N), se procedió a dividir este valor entre el tamaño de la unidad de muestreo, en este caso fue 1 ha, ya que la muestra que se utilizó para el análisis se obtuvo como muestra compuesta.

$$N = a + b (S)$$

$$N = 5 + 0.001 (12\ 188.37)$$

$$N = 17.18 = 17 \text{ muestras a estudiar}$$

Como criterio de evaluación se ha considerado tres pisos altitudinales el primero (E1) de 600 a 1 000 msnm que representa el 37.59 %, en segundo (E2) de 1 000 a 1 500 msnm con 37.82 % y el tercero (E3) de 1 500 a 2 000 msnm que representa el 24.59 % del área total en estudio; en tal sentido le corresponde como mínimo 6 muestras para E1, 6 para E2 y 5 para E3. Sin embargo, tomando criterios estadísticos para tener un mejor ajuste se evaluó 10 plantaciones en cada estrato, teniendo un tamaño de $n=30$

3.4.2. Determinación de la concentración de Cd y Pb en granos frescos de *C. arábica* según variedad y estrato altitudinal

Para determinar Cd y Pb en granos frescos de café se seleccionó 10 plantaciones al azar en cada estrato altitudinal, en cada una de ellas se delimitó una subárea de muestreo de 1 000 m² y se cosechó 1 kg de granos maduros de café de manera aleatoria de las plantas que se encuentran dentro de la subárea de muestreo. Los granos secos se llevaron al laboratorio central de la UNAS para el análisis de Cd y Pb por el método de digestión ácida EPA-3050B (USEPA, 1996). Los granos secos fueron pesadas (0,5 g) y digeridas con 10 ml de una mezcla de HNO₃ (65 %) y HClO₄ (98 %) de la marca Merck en una relación 4:1 respectivamente, la digestión fue realizada en un bloque a 120 °C por 3 h y luego a 200 °C por 2 h. La solución digerida fue filtrada (filtro whatman N° 42), y diluida antes del análisis.

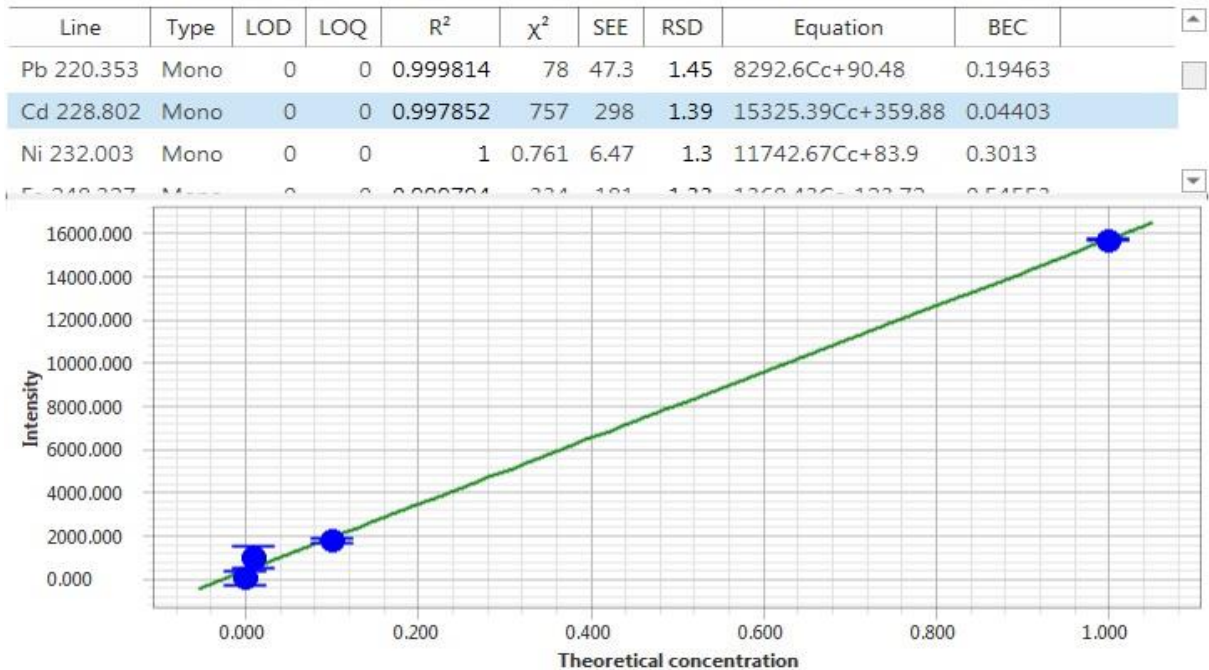


Figura 4. Parámetros de calibración del Cd: λ , R², LOD y el rango de linealidad

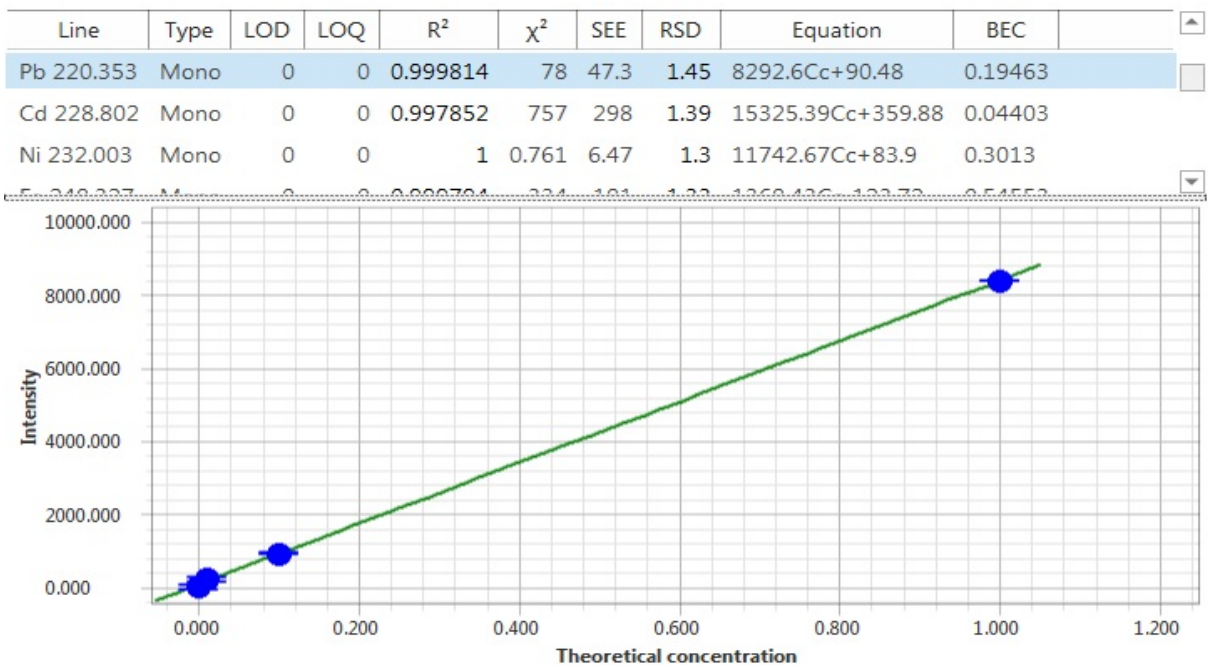


Figura 5. Parámetros de calibración del Pb: λ , R², LOD y el rango de linealidad

Las concentraciones de Cd y Pb fueron cuantificadas con espectrofotómetro de emisión óptica con plasma acoplado inductivamente ICP OES (marca Horiba, modelo Ultima Expert). El número de pruebas por cada medición fueron 3 en cada muestra. Los parámetros de calibración se muestran en las s 5 y 6, donde, el R² para ambos casos superan el 99 %.

3.4.3. Determinación de los principales indicadores de fertilidad del suelo

Con los mismos criterios del ítem anterior en cada subárea seleccionada se extrajo 10 submuestras de suelo para obtener una muestra compuesta de 1 Kg y se trasladó al laboratorio de Suelos, Agua y Ecotoxicología de la UNAS. Los indicadores de fertilidad que se analizó son: textura por el método de Bouyoucos, el pH por el método electrométrico con relación suelo agua de 1/2.5. El Ca^{2+} , Mg^{2+} y K^{+} por acetato de amonio a pH 7 y lectura en absorción atómica. El Al^{3+} e H^{+} extraerá con KCl, determinar por titulación con NaOH 0.05 mol L^{-1} . El P disponible por Olsen modificado y determinado por colorimetría. La MO por Walkley & Black y la CIC mediante saturación por acetato de amonio (CH_3COOH) a pH 7. Los protocolos están descritos en Bazán (2017).

3.4.4. Determinación de diferencias y correlaciones a través de Pearson, entre la concentración de cadmio y plomo, los principales indicadores de fertilidad del suelo, e indicadores morfométricos del café, según variedad y piso altitudinal.

Las diferencias se determinaron a través del análisis de varianza de dos factores, siendo, el primer factor la altitud (A) y el segundo factor la variedad (V). Razón por la cual, cada observación Y_{ij} corresponde a la variable dependiente que representa el comportamiento de los niveles de Cd y Pb; así como, los indicadores de fertilidad del suelo. Por ello, el modelo se encuentra especificado en la ecuación (1):

$$Y_{ij} = \mu + \alpha_i + \beta_j + \varepsilon_{ij} \quad (1)$$

Donde, Y es una combinación de tratamientos A_iV_j , donde: $i = 1, 2, 3, \dots$, k-factor A y $j = 1, 2, 3, \dots$, r-factor V. Para ello, A y V son las variables independientes. Por consiguiente, μ = es la media de los tratamientos totales, α_i = Recoge el efecto en Y del nivel i del factor A, β_j = Explica el efecto en Y del nivel j del factor V y ε_{ij} = Es el componente estocástico, independientes y normales con media cero ($E(\varepsilon_{ij}) = 0$) y varianza constante ($E(\varepsilon_{ij})^2 = \sigma^2$).

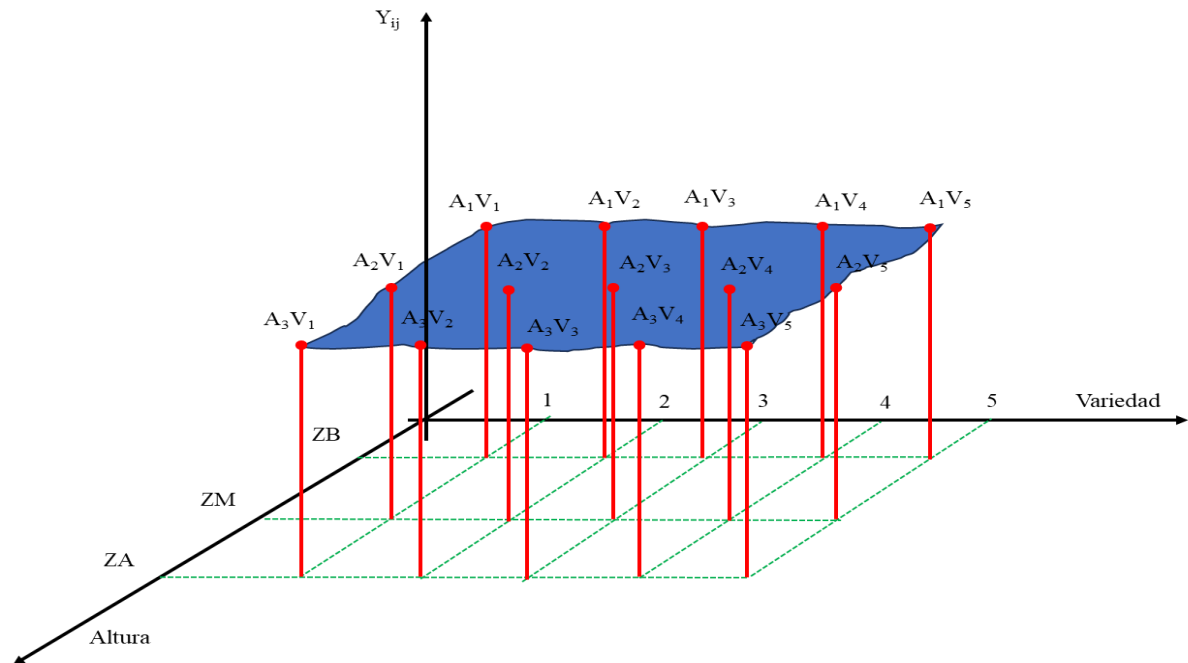


Figura 6. Modelo de análisis de varianza de dos factores

Además, se determinó las correlaciones entre variables mediante el factor de correlación de Pearson (Hernández et al., 2014). El factor r de Pearson (Tabla 6), varía de -1.00 a +1.00.

Tabla 6. Factor de correlación de Pearson

Pearson (r)	Trayectoria de la correlación	Extensión	Trayectoria	Extensión de la correlación
0,00		No existe		No existe
0,10		Muy débil		Muy débil
0,25		Débil		Débil
0,50		Media		Media
0,75	Negativa (-)	Considerable	Positiva (+)	Considerable
0,90		Muy fuerte		Muy fuerte
1,00		Negativa perfecta		Positiva perfecta

3.5. Población y muestra

Se tiene una población de 12 188, 37 hectáreas de tierras con aptitud para el cultivo de *C. arábica* en el ámbito del distrito de Hermilio Valdizan, esto, basado en los criterios de la metodología propuesta por el MINAM (2019), quien calcula el número mínimo de muestra teniendo en cuenta la superficie total en estudio (3). Además, se trabajó con una muestra de 10 000 m² en cada estrato altitudinal, determinado a partir de una subárea de

muestreo de 1 000 m² para cada plantación de café seleccionada de manera aleatoria en cada estrato altitudinal, para medir los indicadores de fertilidad de suelos y los niveles de Cd y Pb en granos de café.

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Concentración de cadmio y plomo en granos de *C. arábica* según piso altitudinal y variedad

a. Cadmio y plomo en granos de café según piso altitudinal

Se evaluó los niveles de cadmio y plomo en granos secos de café, cuyas plantaciones se encuentran ubicadas a diferentes altitudes (Tabla 4). La Tabla 7, muestra la estadística básica (promedios y desviación estándar) e inferencial (significancia, coeficiente de variación y la función de probabilidad) para cada metal evaluado según el piso altitudinal muestreado. Estadísticamente los resultados no muestran diferencias significativas ($p < 0.05$) para cadmio considerando los tres pisos altitudinales evaluados. Sin embargo, el plomo presenta diferencias para un valor de $p < 0.10$, mostrando ligera influencia de la altitud con los niveles de Cd y Pb en granos de café.

Tabla 7. Niveles de Cd y Pb según piso altitudinal

Tratamiento	Indicador	
	Cd (mg Kg ⁻¹)	Pb (mg Kg ⁻¹)
Altitud	Estadísticos	
ZB	0,12±0,04	23,32±2,03
ZM	0,10±0,03	19,47±8,92
ZA	0,12±0,12	23,04±6,72
CV	64,04	29,93
F	0,304	4,399
Sig.	0,741ns	0,024*

ZB zona baja (0,7 – 1,00 Km), ZM zona media (1,00 – 1,40 Km), ZA zona alta (1,40 – 2,10 Km), CV coeficiente de variación, F función de probabilidad, Sig significancia, * significativo a $p < 0,10$

Los resultados dejan en evidencia que la zona baja (ZB) y alta (ZA) presentan los valores medios más altos, tanto para cadmio y plomo, independientemente de las diferencias encontradas (para plomo), los valores de cadmio en la ZB y ZA corresponden a niveles que superan ligeramente los límites máximos fijadas por la MERCOSUR (0.10 mg Kg⁻¹), y en cuanto a los niveles de plomo la ZB y ZA presentan los valores medios más altos, sin embargo, en este caso, corresponden a niveles que superan ampliamente los límites máximos fijadas por la MERCOSUR (0.50 mg Kg⁻¹). En ambos casos, los niveles encontrados al parecer no están influenciadas por la altitud de las plantaciones muestreadas.

b. Cadmio y plomo en granos de *C. arábica* según variedad

La Tabla 8, muestra la estadística básica (promedios y desviación estándar) e inferencial (significancia, coeficiente de variación y la función de probabilidad) para cada metal evaluado según variedad de la plantación muestreada. Estadísticamente los resultados no muestran diferencias significativas ($p < 0.05$) para ambos metales considerando las cinco variedades evaluadas.

Tabla 8. Niveles de cadmio y plomo según variedad de *C. arábica*

Tratamiento	Indicador	
	Cd (mg Kg ⁻¹)	Pb (mg Kg ⁻¹)
Variedad	Estadísticos	
Catimor	0,11±0,03	20,33±5,77
Catimor-Caturra	0,08±0,04	22,48±5,62
Catimor-Catuai	0,12±0,03	25,40±12,75
Caturra	0,19±0,18	25,22±7,44
Catimor-Colombia	0,08±0,04	18,55±1,55
CV	64,04	29,93
F	1,823	2,527
Sig	0,159	0,068

Los resultados (Tabla 8) muestran que el Caturra presenta los valores medios más altos para cadmio y la combinación Catimor-Catuai la media más alta para plomo. La media más baja en Cd son la combinación Catimor-Caturra (0.08 mg Kg⁻¹) y Catimor-Colombia (0.08 mg Kg⁻¹), valores que no superan los límites máximos fijadas por la MERCOSUR (0,10 mg Kg⁻¹), y en cuanto a los niveles de plomo, la variedad Catimor (20.33 mg Kg⁻¹) y Catimor-Colombia (18.55 mg Kg⁻¹) presentan los valores medios más bajos, sin embargo, en todos los casos, corresponden a niveles que superan ampliamente los límites máximos fijadas por la MERCOSUR (0.50 mg Kg⁻¹). Además, la variedad Caturra presenta los mayores valores tanto para cadmio y plomo.

c. Análisis de varianza para cadmio y plomo en granos de *C. arábica* según variedad y altitud

La Tabla 9, muestra el efecto inter sujetos, a través del análisis de varianza de dos factores, puede observarse que no existe significancia estadística ($p=0.741$) para los niveles de cadmio entre los diferentes estratos evaluados (ZB, ZM y ZA), del mismo modo, no existe significancia estadística ($p=0.159$) para los niveles de cadmio entre variedades evaluadas.

Tabla 9. Análisis de varianza del Cd según estrato altitudinal y variedad

Variable dependiente: Cd					
Origen	SC	GI	MC	F	Sig.
Modelo corregido	0,039 ^a	6	0,007	1,275	0,307
Intersección	0,225	1	0,225	43,867	0,000
Altitud	0,003	2	0,002	0,304	0,741
Variedad	0,037	4	0,009	1,823	0,159
Error	0,118	23	0,005		
Total	0,547	30			
Total, corregido	0,158	29			

a. $R^2 = 0,25$ (R^2 ajustada = 0,054)

SC suma de cuadrados, MC media cuadrática, GI grados de libertad, F función de probabilidad, Sig significancia

Por el contrario, la Tabla 10, muestra que existe significancia estadística ($p=0.024$), para valores de $p<0.05$ entre los niveles de plomo y los diferentes estratos evaluados (ZB, ZM y ZA), del mismo modo, se observa que existe significancia estadística ($p=0.068$) para para valores de $p<0.10$ entre los niveles de plomo y las diferentes variedades evaluadas.

Tabla 10. Análisis de varianza del plomo según estrato altitud y variedad

Variable dependiente: Pb					
Origen	SC	GI	MC	F	Sig.
Modelo corregido	446,043 ^a	6	74,341	2,122	0,09
Intersección	9,266,590	1	9,266,590	264,548	0,00
Altitud	308,179	2	154,089	4,399	0,024*
Variedad	354,099	4	88,525	2,527	0,068 ⁺
Error	805,645	23	35,028		
Total	15,699,398	30			
Total, corregido	1,251,688	29			

a. $R^2 = 0,356$ (R^2 ajustada = 0,188)

SC suma de cuadrados, MC media cuadrática, GI grados de libertad, F función de probabilidad, Sig significancia, Sig significancia, * significativo $p\leq 0,05$, + significativo $p\leq 0,10$

En general, el análisis estadístico (Tabla 9 y 10) nos indica que la altitud y variedad de café no ejerce influencia significativa sobre los niveles de cadmio, contrariamente, los niveles de plomo son influenciadas por la altitud y las variedades evaluadas, los niveles de plomo presentan diferencias en ambas condiciones.

Las investigaciones previas indican que las concentraciones de algunos elementos (As, Bi, Cr, In, Mg, Ni, P, Pd, Pt, Sb, Se, Te y Zn) tienden a incrementarse con la altitud y otros a disminuir (Ba, Ca, Cu, K, Li, Mo, Rb, Sc, Sr), sin embargo, el tipo de suelo si tienen influencia en las variaciones de los minerales del café, en particular sobre los niveles de plomo y cadmio (Puerta et al., 2017). Además, Mego & Pintado (2019) señalan que se tiene mayor nivel de concentración de cadmio en granos secos en comparación al tostado y que la variedad Catimor presentan mayores niveles que sobrepasa el límite máximo del Reglamento Técnico MERCOSUR.

Es importante tener en cuenta el tipo de grano evaluado, al respecto Mundaca & Tirado (2021), demostraron que los contenidos de cadmio presentaron una tendencia de disminución en el siguiente orden en granos frescos 0.379, granos oro verde 0.288, granos tostados 0.228, café tostado molido 0.109 y bebida 0.00 mg kg⁻¹, respectivamente, estos últimos serian inferiores a los niveles máximos de la MERCOSUR. Finalmente, las investigaciones muestran similares concentraciones de elementos minerales en granos oro verde y granos tostados (Mundaca & Tirado, 2021; Puerta et al., 2017).

Las investigaciones consideran al Cd, Pb, Hg y cromo muy peligrosos para la alimentación humana (Reyes et al., 2016), captando la atención de los científicos para explicar el comportamiento de estos metales en los sistemas biológicos, porque, además de su toxicidad, son acumulables y transferidos en la cadena alimenticia (Soto et al., 2020). El cadmio y plomo en el cuerpo humano causa daños a la salud a través de trastornos cancerígenos (Londoño et al., 2016), provocando afecciones en órganos vitales: pulmones, riñones, hueso y probablemente desarrollo de carcinogénesis, consecuencia de su alta movilidad y poder bioacumulativo (Reyes et al., 2016; Raju et al., 2020). Respecto al plomo, se caracteriza por ocasionar afecciones al tracto gastrointestinal, sistema renal y el sistema nervioso central y periférico, así como interferencias con sistemas enzimáticos (Rubio et al., 2004). Además, estudios recientes calculan 400 a 1 000 veces más plomo en los huesos que hace 400 años, por su presencia en alimentos y múltiples aplicaciones en la industria (Londoño et al., 2016). Lo más preocupante es su capacidad para dañar el cerebro que afecta el desarrollo y capacidad mental de los niños (Reyes et al., 2016).

En este contexto, los resultados (Tabla 7 y 8) muestran niveles de Cd que superan ligeramente los límites máximos fijadas por la MERCOSUR (0.10 mg Kg^{-1}), sin embargo, son similares a las concentraciones encontrados por Mundaca & Tirado (2021) Mego & Pintado (2019), aunque, relativamente mayores a lo reportado por Huamani (2022). Respecto al plomo superan ampliamente los límites máximos fijadas por la MERCOSUR ($0,50 \text{ mg Kg}^{-1}$) y son notablemente mayores a los niveles reportados por Mundaca & Tirado (2021), Mego & Pintado (2019) y Puerta et al. (2017). Por lo que, aunque los valores medios encontrados en granos frescos, secos y tostados generalmente presentan mayores concentraciones de Cd y Pb (Mundaca & Tirado, 2021; Puerta et al., 2017), son preocupantes y ameritan estudios más especializados que ayuden a identificar y explicar el origen principalmente de las altas concentraciones de plomo y si este logra durante el proceso de tostado y molido alcanzar los niveles exigidos por la MERCOSUR, ya que, los mismos resultados demuestran que la altitud y la variedad, en este caso, son responsables de los niveles encontrados solo en plomo, probablemente factores asociados al tipo de suelo, manejo de la plantaciones (uso de herbicidas, fungicidas, enmiendas y fertilizantes) y procesamiento de los granos de café verde aplicados serían los factores determinantes (Pohl et al., 2013; Ashu & Chandravanshi, 2011), que en este caso, demuestran afectación a su salubridad, seguridad y calidad del café producido en este distrito.

4.2. Indicadores de fertilidad del suelo en plantaciones de *C. arábica* según estrato altitudinal y variedad

a. Indicadores físicos del suelo en plantaciones de *C. arábica* según estrato altitudinal y variedad

Se evaluó las fracciones arena, arcilla y limo, en suelos cuyas plantaciones se encuentran ubicadas a diferentes altitudes (Tabla 4). La (Tabla 11), muestra la estadística básica (promedios y desviación estándar) e inferencial (significancia, coeficiente de variación y la función de probabilidad) para cada fracción evaluada.

Tabla 11. Estadística básica de la textura del suelo según piso altitudinal

Indicador	Tratamiento			Estadísticos		
	ZB	ZM	ZA	CV	F	Sig
Arena (%)	51,00±6,88 ^b	38,20±7,27 ^a	42,60±9,43 ^{ab}	21,33	9,028	0,001**
Arcilla (%)	24,20±4,02 ^a	27,00±5,49 ^a	25,80±9,39 ^a	25,59	0,593	0,561
Limo (%)	24,80±6,36 ^a	34,80±10,43 ^b	31,60±10,42 ^{ab}	32,56	3,58	0,044*
Textura	Franco	Franco	Franco arcillo arenoso	---	---	---

ZB zona baja, ZM zona media, ZA zona alta, CV coeficiente de variación, F función de probabilidad, Sig significancia, * significativo a $p<0,05$, ** altamente significativo a $p<0,05$

La Tabla 12, analiza las diferencias para las diferentes fracciones de acuerdo con la variedad estudiada, en ningún caso se encontró diferencias estadísticas, por lo que, las plantaciones presentan suelos con similares condiciones de textura.

Tabla 12. Estadística básica de la textura del suelo según variedad

Tratamiento	Indicador		
	Arena	Arcilla	Limo
Variedad	Estadísticos		
Catimor	46,62±11,18	26,23±8,02	27,15±12,50
Catimor-Caturra	43,75±8,84	25,75±6,14	30,50±7,69
Catimor-Catuai	38,00±3,46	28,33±4,62	33,67±1,15
Caturra	39,50±8,06	22,50±5,74	38,00±7,02
Catimor-Colombia	45,00±1,41	24,00±1,41	31,00±0,00
CV	21,33	25,59	32,56
F	1,954	0,459	1,421
Sig	0,135ns	0,765ns	0,2591ns

F Función de probabilidad, CV coeficiente de variabilidad, sig. Significancia, ns no significativo significativo $p\leq 0,10$

La Tabla 13, analiza las varianzas y muestra que existe significancia estadística ($p=0.001$), para valores de $p<0.01$ entre el % de arena y los diferentes estratos evaluados (ZB, ZM y ZA), del mismo modo, se observa que no existe significancia estadística ($p=0.135$) para valores de $p<0.05$ entre la arena y las diferentes variedades evaluadas.

Tabla 13. Análisis de varianza para arena según piso altitudinal y variedad

Variable dependiente: Arena					
Origen	SC	GI	MC	F	Sig.
Modelo corregido	1277,564 ^a	6	212,927	3,855	0,008
Intersección	32,219,687	1	32,219,687	583,367	0,000
Altitud	997,274	2	498,637	9,028	0,001**
Variedad	431,697	4	107,924	1,954	0,135
Error	1,270,303	23	55,231		
Total	60,452,000	30			
Total, corregido	2,547,867	29			

a. R al cuadrado = 0,501 (R al cuadrado ajustada = 0,371)

SC suma de cuadrados, MC media cuadrática, GI grados de libertad, F función de probabilidad, Sig significancia, Sig significancia, ** Altamente significativo $p \leq 0.01$

La Tabla 14, muestra que existe significancia estadística ($p=0,044$), para valores de $p < 0.05$ entre el % de limo y los diferentes estratos evaluados (ZB, ZM y ZA), del mismo modo, se observa que no existe significancia estadística ($p=0.259$) para valores de $p < 0.05$ entre el limo y las diferentes variedades evaluadas.

Tabla 14. Análisis de varianza para arena según piso altitudinal y variedad

Variable dependiente: Limo					
Origen	SC	GI	MC	F	Sig.
Modelo corregido	981,309 ^a	6	163,551	2,023	0,104
Intersección	14,025,251	1	14,025,251	173,441	0,000
Altitud	580,468	2	290,234	3,589	0,044*
Variedad	459,709	4	114,927	1,421	0,259
Error	1,859,891	23	80,865		
Total	30,566,000	30			
Total, corregido	2,841,200	29			

a. $R^2 = 0,345$ (R^2 ajustada = 0,175)

SC suma de cuadrados, MC media cuadrática, GI grados de libertad, F función de probabilidad, Sig significancia, Sig significancia, ** Altamente significativo $p \leq 0.01$

b. Indicadores químicos del suelo en plantaciones de *C. arábica* según estrato altitudinal y variedad

Se evaluó la fertilidad del suelo a través del pH, MO, P, K, Ca, Mg y CIC, en todas las plantaciones ubicadas a diferentes altitudes. La Tabla 15, muestra los promedios y desviación estándar, la significancia, coeficiente de variación y la función de probabilidad para cada fracción evaluada.

Tabla 15. Estadística básica de indicadores químicos del suelo según piso altitudinal

Indicador	Tratamiento				Estadísticos	
	ZB	ZM	ZA	CV	F	Sig
pH	5,16±0,49	5,90±0,57	5,22±0,67	12,13	0,992	0,386
MO (%)	2,12±0,60	2,25±0,93	2,55±1,05	37,67	0,924	0,411
P (ppm)	4,39±1,61	6,85±4,94	7,67±4,08	62,62	1,47	0,251
K (ppm)	112,47±81,93	114,04±50,82	123,71±68,13	56,50	0,20	0,820
Ca	2,97±1,92	6,19±2,62	2,88±2,54	69,28	3,54	0,046*
Mg	1,00±0,97	1,58±1,10	0,80±0,56	82,89	2,006	0,157
CIC	5,31±3,21	9,02±2,60	6,44±2,63	41,50	3,437	0,049*

ZB zona baja, ZM zona media, ZA zona alta, CV coeficiente de variación, F función de probabilidad, Sig significancia, ** significativo a $p < 0,01$

Estadísticamente los resultados de la Tabla 15 muestran que no existe diferencias significativas ($p < 0,05$) para todos los indicadores de fertilidad, excepto para Ca y CIC, entre los pisos altitudinales evaluados. Además, la Tabla 16, analiza las diferencias para los indicadores de fertilidad de acuerdo con la variedad estudiada, en ningún caso se encontró diferencias estadísticas.

Tabla 16. Estadística básica de indicadores químicos del suelo según variedad

Tratamiento	Indicadores						
	pH	MO	P	K	Ca	Mg	CIC
Variedad	Estadísticos						
C	5,10±0,4	2,37±0,6	5,39±3,51	100,07±60,69	2,89±1,9	0,79±0,6	5,71±2,0
C-Caturra	5,64±0,9	2,26±1,1	6,97±3,66	112,78±45,22	4,18±3,9	1,36±1,3	7,89±4,0
C-Catuai	5,75±0,6	3,10±1,0	5,08±1,68	89,21±18,42	6,22±2,7	1,34±0,8	9,05±1,7
Caturra	5,68±0,3	2,11±0,7	6,64±2,86	179,46±99,71	5,12±1,7	1,62±1,0	7,28±2,4
C-Co	5,75±0,4	1,31±0,5	10,77±11,0	156,81±110,4	5,13±2,6	1,09±0,5	7,03±3,1
CV	12,13	37,67	62,62	56,50	69,28	82,89	41,50
F	0,746	1,595	0,754	1,50	0,448	0,909	0,531
Sig	0,57ns	0,209	0,565	0,235	0,773	0,475	0,714

C Catimor, Co Colombia, F Función de probabilidad, CV coeficiente de variabilidad, sig. Significancia, ns no significativo

La Tabla 17, muestra que existe significancia estadística ($p=0.046$), para valores de $p<0.05$ entre el contenido de Ca y los diferentes estratos evaluados (ZB, ZM y ZA), sin embargo, se observa que no existe significancia estadística ($p=0.773$) para valores de $p<0.05$ entre el limo y las diferentes variedades evaluadas.

Tabla 17. Análisis de varianza para Ca según piso altitudinal y variedad

Variable dependiente: Ca					
Origen	SC	GI	MC	F	Sig.
Modelo corregido	82,190 ^a	6	13,698	2,217	0,078
Intersección	247,580	1	247,580	40,064	0,000
Altitud	43,760	2	21,880	3,541	0,046*
Variedad	11,082	4	2,770	0,448	0,773
Error	142,132	23	6,180		
Total	707,720	30			
Total, corregido	224,322	29			

a. $R^2 = 0,366$ (R^2 ajustada = 0,201)

SC suma de cuadrados, MC media cuadrática, GI grados de libertad, F función de probabilidad, Sig significancia, Sig significancia, ** Altamente significativo $p \leq 0,01$

La Tabla 18, muestra que existe significancia estadística ($p=0.049$), para valores de $p<0.05$ entre la CIC del suelo y los diferentes estratos evaluados (ZB, ZM y ZA), sin embargo, se observa que no existe significancia estadística ($p=0.714$) para valores de $p<0,05$ entre la CIC y las diferentes variedades evaluadas.

Tabla 18. Análisis de varianza para CIC según piso altitudinal y variedad

Variable dependiente: CIC					
Origen	SC	GI	MC	F	Sig.
Modelo corregido	86,443 ^a	6	14,407	2,166	0,084
Intersección	687,102	1	687,102	103,307	0,000
Altitud	45,717	2	22,859	3,437	0,049*
Variedad	14,120	4	3,530	0,531	0,714
Error	152,974	23	6,651		
Total	1,677,254	30			
Total, corregido	239,417	29			

a. $R^2 = 0,361$ (R^2 ajustada = 0,194)

SC suma de cuadrados, MC media cuadrática, GI grados de libertad, F función de probabilidad, Sig significancia, Sig significancia, ** Altamente significativo $p \leq 0,01$

La investigación evaluó indicadores más importantes que determinan la fertilidad, parámetros que permiten conocer el estado y comportamiento de los suelos (Havlin et al., 1999; García et al., 2012). Las propiedades físicas son buenos indicadores del estado de degradación

del suelo (Cervelati et al., 2011), por su relación con otras propiedades físicas y afectación del rendimiento en los cultivos (Demuner et al., 2013; Florida et al., 2022). Como indicador físico se evaluó la textura, de acuerdo con los valores medios encontrados (Tabla 11) y los criterios de clasificación de FAO (2009), los suelos presentan clase textural franca para la zona baja (ZB) y media (ZM) y Franco-arcillo-arenoso para la zona alta (ZA). Por lo tanto, las texturas encontradas revelan una condición física favorable, ya que los cultivares de café requieren de texturas francas, suelos drenados y ventilados, buen nivel nutricional y alto contenido orgánico que permitan buen desarrollo radicular (CENICAFE, 2013; Instituto Nacional de Innovación Agraria-INIA, 2022). Además, las diferencias encontradas en las fracciones de arena y limo son básicamente por las variaciones espaciales, debido a que responde a procesos pedogenéticos, independientemente del manejo del suelo (Inocencio et al., 2022).

Respecto a los indicadores químicos, basado en los pisos altitudinales y los criterios de clasificación de la FAO (2009) y Bazán (2017), los valores medios encontrados corresponden a pH mediana o moderadamente ácido (5.16 a 5.90), nivel medio a alto en MO (2.12 a 2.55 %), bajo a medio en P (4.39 a 7.67 ppm), bajo en CIC (5.31 a 9.02 $\text{Cmol}^{(+)}/\text{Kg}$); bajo en Ca^{2+} (2.88 a 6.19 $\text{Cmol}^{(+)}/\text{Kg}$) y Mg^{2+} (0.80 a 1.58 $\text{Cmol}^{(+)}/\text{Kg}$) bajo a medio en K^+ (112.47 a 123.71 ppm). Además, las tendencias muestran (Tabla 13) valores más altos en pH, Ca^{2+} , Mg^{2+} y CIC en la zona media (ZM) y la MO, P y K^+ mostró mayor concentración en la zona alta (ZA).

Basado en estos resultados podemos deducir que, de acuerdo con los niveles de pH exigidos por el cultivo, entre 5.5 a 6.5 (INIA, 2022), la zona media estaría dentro de estas exigencias y las otras zonas requieren mecanismos de corrección del pH para garantizar un adecuado rendimiento de las plantaciones. Sin embargo, los niveles medios encontrados en los tres pisos altitudinales son similares a los encontrados como promedio ($\text{pH} < 5.5$) para la mayoría de los suelos tropicales en el Perú (Florida et al., 2023), considerados suelos ácidos con deficiencias Ca^{2+} y Mg^{2+} (Bohn et al. 1993; Rosas et al. 2017), resultados de la pluviometría y las texturas francas encontradas, que generan pérdida de bases por lavado (Havlin et al., 1999; Bohn et al., 1993), lo que explicaría estos niveles de pH encontrados.

Además, este parámetro no presentó diferencias entre pisos altitudinales, aspecto que ha sido evidenciado por otros trabajos (Inocencio et al., 2022; Chinea & Rodríguez, 2021), donde el pH espacialmente presenta variaciones bajas, ya que es un indicador del suelo que depende de procesos pedogenéticos, características intrínsecas e historial de manejo. Sin embargo, los valores medios del pH distribuidos en la gradiente altitudinal evaluada tienden a disminuir de la zona media (ZM) hacia la zona alta (ZA), coincidiendo con lo señalado por

Oliveras et al. (2020) y Murga et al. (2021), que el pH tiende a disminuir con la altitud hasta alcanzar los 3 000 msnm, y a partir de allí se observaría comportamiento inverso.

Los gradientes altitudinales ejercen cierto nivel de influencia en las condiciones climatológicas locales, que a partir de los 3 000 m afectan la mineralización de la materia orgánica y tiende a disminuir los contenidos de MO con la altitud (Murga et al., 2021), por disminución de la temperatura y saturación de agua en el suelo (Wang et al., 2016). Los resultados muestran incremento sostenido desde la zona baja, media y alta, contrastando lo señalado por las referencias, tendencia de incremento hasta los 3 000 m., aunque, corresponden a niveles medios en MO y según INIA (2022) y CINECAFE (2013) son suelos apropiados para la producción del café.

Respecto al fósforo (P) disponible, los resultados van de niveles bajos a medio con tendencia de incremento con la altitud, coincidiendo lo señalado por Oliveras et al. (2020) el P disponible tendría una relación directa con tendencia de incremento con la altitud y disminución de su absorción por las plantas (Murga et al., 2021; He et al., 2016). Además, hay que tener en cuenta la amplitud del área estudiada y el valor del CV (62.62 %), esta muestra una variabilidad alta, mayor a los 46.85 % reportado por Inocencio et al. (2022) para suelos similares, aunque estadísticamente no se encontró diferencias las áreas de las zona media y baja requieren ser fertilizados para una adecuada producción del café.

Finalmente, según Murga et al. (2021) las bases Ca, Mg y K disminuyen con la altitud en bosques tropicales, la tendencia de disminución se genera por las bajas temperaturas, mayor humedad del suelo y altas concentraciones de fenoles que limitan la descomposición de la MO del suelo (Wilcke et al., 2008). Los resultados cumplen con los señalados por estos autores en el caso del Ca y Mg, excepto el K, este último muestra concentraciones ligeramente mayores a medida que se incrementa la altitud. En todos los casos son niveles bajos, excepto el nivel de K para la zona alta que está en el límite de un nivel Medio, nutricionalmente no son suelos adecuados que respondan a las exigencias del cultivo del café (CINECAFE, 2013; INIA, 2022).

4.3. Determinación de las características morfométricas de los granos de *C. arábica* según estrato altitudinal y variedad

Se evaluó los principales indicadores morfométricos del café seco (Longitud y peso de 100 semillas) de todas las plantaciones muestreadas. La Tabla 19, muestra la estadística básica (promedios y desviación estándar) e inferencial (significancia, coeficiente de variación y la función de probabilidad) para cada indicador según estrato altitudinal.

Tabla 19. Estadística básica de indicadores morfométricos del café según altitud

Indicador	Tratamiento				Estadísticos	
	ZB	ZM	ZA	CV	F	Sig
Longitud (cm)	0,86±0,09a	1,02±0,04a	1,06±0,22b	16,1	2,493	0,105*
Peso (100)	16,56±1,84	21,20±0,87	22,09±1,57	14,2	22,20	0,00**
N	10	10	10		30	

ZB zona baja, ZM zona media, ZA zona alta, CV coeficiente de variación, F función de probabilidad, Sig significancia, * significativo a $p<0,10$, *** significativo a $p<0,01$,

Estadísticamente los resultados de la Tabla 19 muestran diferencias significativas ($p=0.105$) para $p\leq 0.10$ del indicador longitud del grano seco y diferencias altamente significativas ($p=0.00$) para $p\leq 0.01$ del peso de 100 semillas entre los pisos altitudinales evaluados. Además, la Tabla 20, analiza las diferencias para la longitud y el peso de las semillas de acuerdo con la variedad estudiada, en ningún caso se encontró diferencias estadísticas, por lo que, la variedad estadísticamente no influye sobre el tamaño y peso de las semillas de café, sin embargo, estas variables estadísticamente si son influenciadas por la altitud.

Tabla 20. Estadística básica de indicadores morfométricos del café según variedad

Tratamiento	Indicador		Tamaño muestra
	Longitud del grano (cm)	Peso de 100 semillas (g)	
Variedad	Estadísticos		
Catimor	0,91±0,13	18,60±3,44	13
Catimor-Caturra	1,08±0,23	21,79±1,48	8
Catimor-Catuai	1,00±0,04	21,08±1,43	3
Caturra	0,97±0,04	19,08±2,03	4
Catimor-Colombia	1,05±0,02	21,38±0,28	2
CV	16,19	14,29	
F	0,311	0,012	30
Sig	0,868ns	1,00ns	

C Catimor, Co Gran Colombia, F Función de probabilidad, CV coeficiente de variabilidad, sig. Significancia, ns no significativo

La Tabla 21, muestra que existe significancia estadística ($p=0.105$), para valores de $p<0.10$, entre los valores medios de la longitud de semillas y los diferentes estratos evaluados (ZB, ZM y ZA), sin embargo, para la misma variable no existe significancia estadística ($p=0,868$) entre la longitud de semilla y las diferentes variedades evaluadas.

Tabla 21. Análisis de varianza para longitud de semilla según estrato altitud y variedad

Variable dependiente: Longitud					
Origen	SC	GI	MC	F	Sig.
Modelo corregido	0,252 ^a	6	0,042	2,023	0,104
Intersección	15,379	1	15,379	739,927	0,000
Altitud	0,104	2	0,052	2,493	0,105
Variedad	0,026	4	0,006	0,311	0,868
Error	0,478	23	0,021		
Total	29,523	30			
Total, corregido	0,730	29			

a. $R^2 = 0,345$ (R^2 ajustada = 0,175)

SC suma de cuadrados, MC media cuadrática, F función de probabilidad, GI Grados de libertad, sig. Significancia

La Tabla 22, muestra que existe significancia estadística altamente significativas ($p=0.00$), para valores de $p<0.01$ entre los valores medios del peso de semillas y los diferentes estratos evaluados (ZB, ZM y ZA), sin embargo, para la misma variable no existe significancia estadística ($p=0.531$) entre la longitud de semilla y las diferentes variedades evaluadas.

Tabla 22. Análisis de varianza para peso de semilla según estrato altitud y variedad

Variable dependiente: Peso					
Origen	SC	GI	MC	F	Sig.
Modelo corregido	176,383 ^a	6	29397	11,377	0,000
Intersección	6,225,556	1	6,225,556	2,409,370	0,000
Altitud	114762	2	57381	22,207	0,000
Variedad	0,126	4	0,032	0,012	1000
Error	59430	23	2584		
Total	12,173,893	30			
Total, corregido	235812	29			

a. $R^2 = 0,748$ (R^2 ajustada = 0,682)

SC suma de cuadrados, MC media cuadrática, F función de probabilidad, GI Grados de libertad, sig. Significancia

El fruto del café está formado por dos semillas plano-convexas, que representan del 35-38 % del fruto, sus características morfométricas de las semillas difieren según la variedad y de los rangos de altitud donde se desarrolla la plantación (CENICAFÉ, 2013; Herrera & Cortina, 2013;). La altitud donde se cultiva el café tiene algunas implicancias en la calidad física de las semillas que mejora a medida que se incrementa la altitud donde se cultiva, así como en las dimensiones de las semillas (CENICAFÉ, 2013), esto por la reducción de los

agentes (plagas y enfermedades) que provocan daños directos e indirectos sobre el fruto y semillas del café (Rodríguez et al., 2009).

De los resultados (Tabla 15 y 16), la variedad estadísticamente no influye sobre el tamaño y peso de las semillas de café, sin embargo, estas variables estadísticamente si son influenciadas por la altitud, por lo que, los resultados concuerdan con las referencias citadas, el café producido en altitudes mayores a 1 400 m presenta mayor dimensión y peso, siendo este un aspecto favorable, independientemente del alto contenido de Cd y Pb encontrado en este estrato altitudinal.

4.4. Análisis de correlaciones entre las variables evaluadas

El análisis de correlación (Tabla 23) encuentra: correlación negativa significativa media (-0.38*) entre la altitud de las plantaciones y el % de arena, positiva significativa considerable (0.56**) con la longitud y positiva muy fuerte (0.80**) con el peso de las semillas. Respecto a los niveles de cadmio y plomo, solo se encuentra correlación significativa media (0.44*) entre el % de arena y la concentración de plomo. También se observa correlación positiva considerable (0.63**) entre la longitud de las semillas y el peso, respecto a los indicadores de fertilidad solo el fosforo muestra correlación positiva media (0.37*) con el peso de la semilla, en ningún caso se correlacionan con los niveles de Cd y Pb.

Tabla 23. Correlación de indicadores

Variable		Arena	Arcilla	Limo	pH	MO	P	K	Ca	Mg	CIC	Pb	Cd	Long.	Peso
Pb	Cor.	0,44*	-0,25	-0,26	-0,17	0,24	-0,06	0,20	-0,17	-0,13	-0,23				
	Sig.	0,01	0,18	0,17	0,35	0,20	0,76	0,28	0,36	0,48	0,22				
Cd	Cor.	-0,03	-0,27	0,21	0,00	0,03	-0,02	0,30	-0,06	-0,15	-0,19	0,35			
	Sig.	0,85	0,15	0,26	0,99	0,88	0,93	0,11	0,74	0,42	0,30	0,06			
Long.	Cor.	-0,04	-0,28	0,22	0,09	0,03	0,14	-0,02	0,05	-0,02	0,11	0,04	-0,07		
	Sig.	0,85	0,14	0,24	0,65	0,89	0,48	0,93	0,77	0,91	0,56	0,83	0,72		
Peso	Cor.	-0,29	-0,07	0,32	0,21	0,33	0,37*	0,05	0,18	-0,01	0,23	0,00	-0,12	0,63**	
	Sig.	0,12	0,72	0,09	0,26	0,07	0,04	0,79	0,34	0,96	0,22	0,99	0,52	0,00	
Altura	Cor.	-0,38*	0,04	0,33	0,04	0,14	0,33	0,08	-0,02	-0,11	0,14	-0,00	-0,04	0,56**	0,80**
	Sig.	0,04	0,84	0,07	0,83	0,45	0,08	0,67	0,90	0,58	0,45	0,99	0,84	0,00	0,00
N		30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30

** . La correlación es significativa en el nivel 0,01 (bilateral), * . La correlación es significativa en el nivel 0,05 (bilateral)

De estos resultados se puede deducir que los niveles de cadmio no están influenciadas de manera significativa por la altitud y variedad de café evaluado en este distrito, contrariamente, los niveles de plomo son influenciadas por la altitud y las variedades evaluadas, presentan diferencias en ambas condiciones, en ningún caso el Cd y Pb se ven influenciada por los indicadores del suelo, excepto el % de arena que por su naturaleza química (Havlin et al, 1999) no explicaría los altos niveles de plomo encontrados.

Por lo que, contrariamente a lo señalado por Puerta et al. (2017) el tipo de suelo si tendría influencia en las variaciones de los minerales del café, en particular sobre los niveles de plomo y cadmio, sin embargo la respuesta podría estar en lo las afirmaciones de Pohl et al. (2013) y Ashu & Chandravanshi (2011), quienes atribuyen la presencia del plomo a otros factores como el manejo de la plantaciones (uso de herbicidas, fungicidas, enmiendas y fertilizantes) y procesamiento post cosecha de los granos de café verde, y finalmente Londoño et al. (2016) mencionan que una fuente de contaminación por plomo es la combustión de hidrocarburos, que en este caso, las parcelas evaluadas está cerca de la carretera central, con un alto tránsito de vehículos pesados. Estos factores requieren ser estudiados para encontrar el origen de estos altos niveles de plomo encontrados, y así, mejorar la salubridad, seguridad y calidad del café producido en este distrito.

V. CONCLUSIONES

1. Las concentraciones de cadmio superan ligeramente los niveles máximos fijadas por la MERCOSUR ($<0.10 \text{ mg Kg}^{-1}$), estadísticamente no se encontró diferencias significativas considerando los pisos altitudinales y las variedades evaluadas. Respecto al plomo, corresponden a niveles que superan ampliamente los límites máximos fijadas por la MERCOSUR ($<0.50 \text{ mg Kg}^{-1}$), estadísticamente se encontró diferencias significativas considerando los pisos altitudinales y las variedades evaluadas. La zona baja y alta presentó la media más alta en Cd y Pb, y las plantaciones de Caturra presentan concentraciones mayores de plomo.
2. Se evaluó las fracciones arena, arcilla, limo y corresponde a suelos de textura Franco para la zona baja y media y Franco-arcillo-arenoso para la zona alta, encontrando diferencias altamente significativas para arena y limo; la textura encontrada muestra una condición física favorable para los cultivares de café. Los niveles críticos de los indicadores de fertilidad corresponden a: pH mediana o moderadamente ácido, nivel medio a alto en MO, bajo a medio en P, bajo en CIC, bajo en Ca^{2+} y Mg^{2+} , y bajo a medio en K^+ . Además, se tiene mayores valores medios de pH, Ca^{2+} , Mg^{2+} y CIC en la zona media (ZM), y MO, P y K^+ en la zona alta (ZA). Los indicadores pH, MO, P y K presentan tendencias de incremento con la altitud y la zona media muestra condiciones químicas de suelo apropiado para el cultivo de café.
3. Los indicadores morfométricos fueron longitud y peso de las semillas, la variedad estadísticamente no influye sobre la longitud y peso de las semillas de café, sin embargo, estas variables estadísticamente presentan diferencias significativas y son influenciadas por la altitud, presentando medias más altas a mayor altitud.
4. Se encontró correlación significativa considerable entre la altitud y la longitud del grano, y positiva significativa muy fuerte con el peso de las semillas. Respecto al Cd y Pb, presenta correlación significativa media entre el % de arena y la concentración de plomo. Los indicadores de fertilidad solo el fósforo muestra correlación significativa positiva media con el peso de la semilla, en ningún caso se correlacionan con los niveles de Cd y Pb. Por lo que, los resultados ponen en evidencia que la altitud y variedad de café no ejerce influencia significativa sobre los niveles de cadmio, contrariamente, los niveles de plomo presentan concentraciones muy altas y son influenciadas por la altitud y las variedades evaluadas, y debe evaluarse otras variables para determinar el origen de los altos niveles de plomo encontrados.

VI. PROPUESTAS A FUTURO

1. De los resultados obtenidos se pone en alerta los altos niveles de plomo en granos secos de café producido en el Distrito Hermilio Valdizan, los mismos, requieren nuevos estudios para determinar el origen del plomo y plantear alternativas de mitigación o control, así, garantizar la calidad.
2. Las concentraciones de cadmio y plomo superan los niveles máximos fijadas por la MERCOSUR (<0.10 y 0.50 mg Kg^{-1}), por lo que, requiere evaluar con mayor detalle las variedades con medias más bajas (Catimor-Caturra, Catimor-Colombia y Caturra), así, encontrar alternativas que ayuden a reducir los niveles de ambos metales.
3. Es necesario evaluar la influencia de la carretera central sobre los niveles de plomo en café de esta zona, toda vez que gran parte de las plantaciones se encuentran cerca a esta principal vía y determinar si la combustión de los vehículos tenga alguna relación con los altos niveles de plomo encontrado.
4. Es necesario evaluar los niveles de cadmio y plomo total y disponible en suelos, enmiendas y fertilizantes que se utilizan durante el manejo de las plantaciones, para identificar la fuente que da origen de estos altos niveles encontrados.
5. Investigar los efectos del procesamiento post cosecha y determinar si el secado, tostado y molido logran disminuir a niveles aceptables la concentración de cadmio y plomo a nivel de taza o bebida.

VII. REFERENCIAS

- Albals, D., Al-Momani, IF., Issa, R., & Yehya, A. (2021). Determinación de elementos múltiples de metales esenciales y tóxicos en granos de café verdes y tostados: un estudio comparativo entre diferentes orígenes utilizando ICP-MS. *Science Progress*. 104(2). doi: 10.1177/00368504211026162
- Alvarado, A., H. Posada, y H. Cortina. 2005. La variedad Castillo: Una variedad de café *Coffea arabica* L. con elevada productividad y amplia resistencia a enfermedades. *Fitotecnia Colombiana* 8:1-21
- Antoine, J., Hoo, L.A., & Grant, C.N. (2017). «Assessment of the potential health risks associated with the aluminium, arsenic, cadmium and lead content in selected fruits and vegetables grown in Jamaica». En: *Toxicology Reports* 4, 181-187. <https://doi.org/10.1016/j.toxrep.2017.03.006>
- Ashu, R., & Chandravanshi, B.S. (2011). Concentration levels of metals in commercially available Ethiopian roasted coffee powders and their infusions. *Bulletin of the Chemical Society of Ethiopia* 25(1),11–24.
- Bazan, T.R. (2017). Manual de procedimientos de los análisis de suelos y agua con fines de riego. Instituto Nacional de Innovación Agraria-INIA. Lima, Perú. [https://repositorio.inia.gob.pe/bitstream/20.500.12955/504/1/Bazan-Manual de procedimientos de los.pdf](https://repositorio.inia.gob.pe/bitstream/20.500.12955/504/1/Bazan-Manual%20de%20procedimientos%20de%20los.pdf)
- Bohn, H. L., B.L. McNeal and G.A. O’Conor. 1993. *Soil Chemistry*. Editorial Limusa. 1° Edition . México. 363 pp.
- CENICAFÉ [Centro Nacional de Investigaciones de Café]. (2013). *Manual Del Cafetero Colombiano. Investigación y tecnología para la sostenibilidad de la caficultura. Tomo I.* 326p. <https://www.academia.edu/37439232/TOMO>
- Cervelati, K.F., Neto, E.L., Neto, E.L., Sadayuki, E., Silva, M.R., & Pierangeli, M.A., (2011). Efeito de diferentes sistemas de pastejo em atributos físicos do solo. *Pubvet* 5(22):1142. doi: 10.22256/pubvet.v5n22.1142
- Chambi, L. J., Orsag, V., & Niura, A. (2012). Evaluación de la presencia de metales pesados y arsénico en suelos agrícolas y cultivos en tres micro-cuencas del municipio de Poopó. *Revista Boliviana de Química*, 29(1), 111-119.

http://www.scielo.org.bo/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0250-54602012000100012&lng=es&tlng=es.

- China, A., Rodríguez, L. (2021). Comportamiento geoespacial de algunas propiedades del suelo en el cultivo de la caña de azúcar. *Revista Ingeniería Agrícola*. 11(1):3-8. <https://www.redalyc.org/journal/5862/586269368001/html/>
- CODEX [Código de Alimentos]. (2019). Norma general del Codex para los contaminantes y las toxinas presentes en los alimentos y piensos. FAO/OMS. 76 p. https://www.fao.org/fileadmin/user_upload/livestockgov/documents/CXS_193s.pdf
- Covarrubias, S. A., & Peña J. J. (2017). Contaminación ambiental por metales pesados en México: Problemática y estrategias de fitorremediación. *Rev. Int. Contam. Ambie.* 33 (Especial Biotecnología e ingeniería ambiental) 7-21. Doi: 10.20937/RICA.2017.33. esp01.01
- Da Silva, S.A., Mendes, F.Q., Reis, M.R., Passos, F.R., de Carvalho, A.M.X., Rocha, K.R., & de O. y Pinto, FG (2017). Determinación de metales pesados en los granos de café tostado y molido y en la infusión. *Revista Africana de Investigación Agrícola*, 12(4), 221-228.
- De la Cruz, L., Bañares, G., Cala, V., Granzow, I., Espinosa, C.I., Ledo, A., Salinas, N., Macía, M.J., & Cayuela, L. (2020). Trade Offs Among Aboveground, Belowground, and Soil Organic Carbon Stocks Along Altitudinal Gradients in Andean Tropical Montane Forests. *Frontiers in Plant Science*. 11,106. doi: 10.3389/fpls.2020.00106
- Demuner Molina G; Cadena Zapata M; Campos SG. 2013. Resistencia a la penetración en un suelo franco arcilloso a dos años de manejo con tres sistemas de labranza. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 22(5):68–71. <http://scielo.sld.cu/pdf/rcta/v22s1/rcta12513.pdf>
- FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations). 2009. Guide for soil description 4th Edition. <http://www.fao.org/3/a-a0541s.pdf>
- Florida, N. (2021). Revisión sobre límites máximos de cadmio en cacao (*Theobroma cacao* L.). *LA GRANJA: Revista de Ciencias de la Vida* 34(2),117-130. <http://doi.org/10.17163/lgr.n34.2021.08>
- Florida, N., Paredes, M., Paredes, R. M., Navarro, L., & Rengifo, A. (2022). An organic management alternative that improves soil quality in cocoa plantations under agroforestry systems. *Scientia Agropecuaria*, 13(4), 335-342. <https://dx.doi.org/10.17268/sci.agropecu.2022.030>

- Florida Rofner, N., Abad Principe, R. M., Rengifo-Rojas, A., & Nazar Cipriano, J. (2023). Long-term effects of rotational grazing in *Urochloa brizantha* cv. Marandú pastures on soil quality indicators. *Tropical Grasslands-Forrajes Tropicales*, 11(2), 131–144. [https://doi.org/10.17138/tgft\(11\)131-144](https://doi.org/10.17138/tgft(11)131-144)
- García, Y., Ramírez, W., Sánchez, S. (2012). Indicadores de la calidad de los suelos: una nueva manera de evaluar este recurso. *Pastos y Forrajes*, 35(2), 125-137.
- Gotteland, M., de Pablo, S. (2007). Algunas verdades sobre el café. *Rev Chil Nutr.* 34(2), 105-115. <http://dx.doi.org/10.4067/S0717-75182007000200002>
- Havlin, J.L., Beaton, J.D., Tisdale, S.L., & Nelson. W.L. (1999). Soil fertility and fertilizers: an introduction to nutrient management. 6ta ed. Prentice Hall. Upper Saddle River. New Jersey-USA. 499 p.
- He, X., Hou, E., Liu, Y., & Wen, D. (2016). Altitudinal patterns and controls of plant and soil nutrient concentrations and stoichiometry in subtropical China. *Scientific reports*, 6, 24261. doi: 10.1038/srep24261
- Hernández, R. & Mendoza, C. (2018). Metodología de la investigación: Las rutas cuantitativa, cualitativa y mixta. McGraw-Hill Interamericana editores. Ciudad de México.
- Hernández, R., Fernández, C. & Baptista, M. P. (2014). Metodología de la Investigación. 6ª Edición. Mc GRAW-HILL. <http://observatorio.epacartagena.gov.co/wp-content/uploads/2017/08/metodologia-de-la-investigacion-sexta-edicion.compressed.pdf>
- Herrera, J. C., & Cortina, H. A. (2013). Taxonomía y clasificación del café. En Federación Nacional de Cafeteros de Colombia, Manual del cafetero colombiano: Investigación y tecnología para la sostenibilidad de la caficultura. *Cenicafé* 01(1), 117–121. https://doi.org/10.38141/cenbook-0026_07
- Huamani, R.C. (2022). Cuantificación de plomo y cadmio en granos de *coffea arabica* l. (café) expendido en el mercado Caquetá, del distrito de San Martín de Porres-Lima, diciembre 2021. [Tesis de pregrado en Ciencias de la Salud, Universidad Roosevelt]. Repositorio Institucional UR. <https://repositorio.uroosevelt.edu.pe/handle/20.500.14140/1051>
- ICO [International Coffee Organization]. (2018). Aspectos Botánicos. http://www.ico.org/es/botanical_c.asp?section=Acerca_del_caf%EA9.
- INEI [Instituto Nacional de Estadística e Informática]. (2018). Encuesta Nacional Agropecuaria 2018.

https://www.inei.gov.pe/media/MenuRecursivo/publicaciones_digitales/Est/Lib1697/libro.pdf

- INIA [Instituto Nacional de Innovación Agraria]. (2022). Manual del cultivo de café en el VRAEM. 1° Edición. Lima-Perú. 50p.
<https://repositorio.inia.gov.pe/bitstream/20.500.12955/1625/1/Manual%20del%20cultivo%20de%20caf%C3%A9%20en%20el%20VRAEM.pdf>
- Inocencio-Vasquez, E.T.; Florida-Rofner, N. 2022. Comportamiento espacial de indicadores fisicoquímicos y calidad del suelo en plantación de Theobroma cacao en Padre Abad, Ucayali, Perú. Rev. U.D.C.A Act. & Div. Cient. 25(2):e2320.
<http://doi.org/10.31910/rudca.v25.n2.2022.2320>
- Julca, A., Alarcón, G., Alvarado, L., Borjas, R., & Castro, V. (2018). Comportamiento de tres cultivares de café (Catimor, Colombia y Costa Rica 95) en el valle del Perené, Junín, Perú. Chilean J. Agric. Anim. Sci., ex Agro-Ciencia (2018) 34(3):205-215
- Julca, A., Blas, R., Borjas, R., Bello, S., Anahui, J., Talaverano, D., et al. (2010). Informe de colecta de germoplasma de café en el Perú. 38 p. UNALM-FDA-Café Perú-FINCYT. Lima, Perú
- Li, L., Vogel, J., He, Z., Zou, X., Ruan, H., Huang, W., ..., & Bianchi, T. S. (2016). Association of soil aggregation with the distribution and quality of organic carbon in soil along an elevation gradient on Wuyi Mountain in China. PLoS ONE, 11(3). doi: 10.1371/journal.pone.0150898
- Londoño, L., Londoño, P., & Muñoz, F. (2016). Risk of heavy metals in human and animal health. Biotecnología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial 14(2): 145-153.
<http://www.scielo.org.co/pdf/bsaa/v14n2/v14n2a17.pdf>
- Mahecha, J., Trujillo, J., & Torres, M. (2015). Contenido de metales pesados en suelos agrícolas de la región del Ariari, Departamento del Meta. ORINOQUIA 19(1), 118-122.
- Mego, R., & Pintado, M. M. (2019). *Determinación del nivel de concentración de cadmio en granos y esencia de café (Coffea arabica L.), en el distrito de Chirinos, provincia de San Ignacio*. [Tesis de pregrado en Industrias Alimentarias, Universidad Nacional de Jaén]. Repositorio Institucional UNJ. <https://repositorio.unj.edu.pe/handle/UNJ/46?mode=full>
- MERCOSUR [Mercado Común del Sur]. (2011). Reglamento técnico MERCOSUR sobre límites máximos de contaminantes inorgánicos en alimentos. Res. N°12/11. 18p.
http://www.sice.oas.org/trade/mrcsrs/resolutions/RES_012-2011_ES.pdf

- MIDAGRI [Ministerio de Desarrollo Agrario y Riego]. (2022). Situación actual del café en el país. <https://www.midagri.gob.pe/portal/485-feria-scaa/10775-el-cafe-peruano>
- MINAM (Ministerio del Ambiente). (2019). Guía de evaluación del estado de ecosistemas de Yunga: bosques basimontano y montano. <https://sinia.minam.gob.pe/documentos/guia-evaluacion-estado-ecosistemas-yunga-bosques-basimontano-montano>
- MINCIT [Ministerio de Comercio, Industria y Turismo]. (2023). Regulación Códex Alimentarius. <https://www.mincit.gov.co/minindustria/estrategia-transversal/regulacion/codex-alimentarius>
- Mundaca, Y. M., & Tirado, J., (2021). Evaluación de cadmio en granos de café, café tostado molido y esencia de café (*Coffea arabica* L.) procedentes de fincas manejadas convencionalmente, en el distrito San Ignacio, Cajamarca, campaña 2020. [Tesis de pregrado en Industrias Alimentarias, Universidad Nacional de Jaén]. Repositorio Institucional UNJ. https://repositorio.unj.edu.pe/bitstream/UNJ/104/1/Mundaca_RYM_Huam%C3%A1n_GJS.pdf
- Murga, H., Coronado, M. F., Abanto, C., & De Almeida, F. (2021). Gradiente altitudinal y su influencia en las características edafoclimáticas de los bosques tropicales. *Madera y bosques*, 27(3), e2732271. <https://doi.org/10.21829/myb.2021.2732271>
- Navarro, B., & Navarro, G. (2003). Química agrícola. El suelo y los elementos químicos esenciales para la vida vegetal. Segunda edición. Ediciones Mundi–Prensa, Madrid. <https://repositorio.lamolina.edu.pe/bitstream/handle/UNALM/2628/F04-S3423-T.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Oliveras, I., Bentley, L., Fyllas, N. M., Gvozdevaite, A., Shenkin, A. F., Prepah, T., ..., & Schwantes Marimon, B. (2020). The influence of taxonomy and environment on leaf trait variation along tropical abiotic gradients. *Frontiers in Forests and Global Change*, 3, 18. doi: 10.3389/ffgc.2020.00018
- Peters, M. K., Hemp, A., Appelhans, T., Becker, J. N., Behler, C., Classen, A., ..., & Gebert, F. (2019). Climate-land-use interactions shape tropical mountain biodiversity and ecosystem functions. *Nature*, 568(7750), 88-92. doi: 10.1038/s41586-019-1048-z
- Pohl, P., Stelmach, E., Welna, M., Szymczycha, A. (2013). Determinación de la Composición Elemental del Café mediante Métodos Instrumentales. *Food Anal. Methods* 6:598–613). <https://doi.org/10.1007/s12161-012-9467-6>

- Puerta, G. I., Bolívar, C.P., & Gallego, C.P. (2017). Composición química de elementos minerales en café verde y tostado, con relación a suelos y altitud. *Revista Cenicafé* 68(2):28-60. 2017
- Raju, M., Dhatri, K., García, C., Chakraborty, S., Venkateswarlu, K., & Megharaj, M. (2020). Cocoladen cadmium threatens human health and cacao economy: A critical view. *Science of The Total Environment*, 720(10):137645
- Reyes, Y., Vergara, I., Torres, O., Díaz, M., & González, E. (2016). Contaminación por metales pesados: Implicaciones en salud, ambiente y seguridad alimentaria. *Ingeniería Investigación y Desarrollo*, 16(2):66–77.
- Rodríguez, C., Munro, D., & Victor, H. (2009). Paquete tecnológico para el cultivo del café orgánico en el estado de Colima. Colima
- Rosas, P.G., Puentes Y.J., & Menjivar, J.C. (2017). Relationship between pH and nutrient availability for cocoa in an entisol of the Colombian Amazon. *Corpoica Agricultural Science and Technology* 18(3): 529-541
- Rubio, C., Gutiérrez, A.J., Martín, R.E., Revert, C., Lozano, G., & Hardisson, (2004). El plomo como contaminante alimentario. *Revista de Toxicología*, 21(2-3), 72-80. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=91921303>
- SAGARPA (Secretaría de Agricultura, Ganadería y Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación). (2012). Subíndice de Uso Sustentable del Suelo–Metodología de Cálculo. FAO y SAGARPA México. https://www.fao-evaluacion.org.mx/rn/ind_fin/suelos/Documento_metodologico_suelos.pdf.
- Soto, M., Rodriguez, L., Olivera, M., Arostegui, V., Colina, C., & Garate, J. (2020). Riesgos para la salud por metales pesados en productos agrícolas cultivados en áreas abandonadas por la minería aurífera en la Amazonía peruana. *Scientia Agropecuaria*, 11(1), 49-59. <https://dx.doi.org/10.17268/sci.agropecu.2020.01.06>
- Teixeira, M., Passos, F.R., & Queiroz, F. (2018). Quality of Commercial Coffees: Heavy Metal and Ash Contents. *Journal of Food Quality*, 2018(5908463), 1-7. <https://doi.org/10.1155/2018/5908463>
- UE (Union Europea). (2021). Reglamento (UE) 2021/1317. Modifica el Reglamento (CE) 1881/2006 en lo relativo a los contenidos máximos de plomo en determinados productos alimenticios. Diario Oficial de la Unión Europea. L 286/1-4. <https://www.boe.es/doue/2021/286/L00001-00004.pdf>

- USDA (United States Department of Agriculture). (2020). Coffee Annual Peru. Report Number: PE2020-0020 of May 09,2020. https://juntadelcafe.org.pe/wp-content/uploads/2020/05/Coffee-Annual_Lima_Peru_05-15-2020.pdf
- USEPA [United States Environmental Protection Agency]. (1996) Method 3050 B: Acid digestion of sediment, sludges, and soils. 12p. <https://www.epa.gov/sites/default/files/2015-06/documents/epa-3050b.pdf>
- Wang, H. C., Chou, C. Y., Chiou, C. R., Tian, G., & Chiu, C. Y. (2016). Humic acid composition and characteristics of soil organic matter in relation to the elevation gradient of moso bamboo plantations. PLoS ONE, 11(9). doi: 10.1371/journal.pone.0162193
- Wilcke, W., Oelmann, Y., Schmitt, A., Valarezo, C., Zech, W. y Homeier, J. (2008). Soils along the altitudinal transect and in catchments. In Gradients in a Tropical Mountain Ecosystem of Ecuador (pp. 75-85). Springer, Berlin, Heidelberg. doi: 10.1007/978-3-540-73526-7_9

ANEXOS

Muestreo de campo



Figura 7. Visita de las áreas a estudiar



Figura 8. Colecta de frutos de café



Figura 9. Despulpado de frutos de café



Figura 10. Lavado de semillas de café



Figura 11. Muestreo aleatorio de suelo



Figura 12. Obtención de muestra compuesta de suelo



Figura 13. Medición de longitud y peso de semillas



Figura 14. Filtrado de las muestras digeridas



Figura 15. Lectura de Cd y Pb de muestras digestadas