Universidad Nacional Mayor de San Marcos
Universidad del Perú. Decana de América
Facultad de Ingeniería Industrial
Escuela Profesional de Ingeniería Industrial

Evaluación de la contaminación por metales pesados en suelos y frutos de palta (Persea americana) y su impacto en los riesgos ecológicos y sanitarios mediante simulación Monte Carlo

TESIS
Para optar el Título Profesional de Ingeniera Industrial

AUTOR

Myryam YOPLAC NAVARRO

ASESOR

Dr. Jorge Enrique ORTIZ PORRAS

Lima, Perú

2026



Reconocimiento - No Comercial - Compartir Igual - Sin restricciones adicionales

https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/

Usted puede distribuir, remezclar, retocar, y crear a partir del documento original de modo no comercial, siempre y cuando se dé crédito al autor del documento y se licencien las nuevas creaciones bajo las mismas condiciones. No se permite aplicar términos legales o medidas tecnológicas que restrinjan legalmente a otros a hacer cualquier cosa que permita esta licencia.

Referencia bibliográfica

Yoplac, M. (2026). *Evaluación de la contaminación por metales pesados en suelos y frutos de palta (Persea americana) y su impacto en los riesgos ecológicos y sanitarios mediante simulación Monte Carlo*. [Tesis de pregrado, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Facultad de Ingeniería Industrial, Escuela Profesional de Ingeniería Industrial]. Repositorio institucional Cybertesis UNMSM.

Metadatos complementarios

Datos de autor	
Nombres y apellidos	Myryam Yoplac Navarro
Tipo de documento de identidad	DNI
Número de documento de identidad	70873657
URL de ORCID	https://orcid.org/0000-0001-6335-9510
Datos de asesor	
Nombres y apellidos	Jorge Enrique Ortiz Porras
Tipo de documento de identidad	DNI
Número de documento de identidad	40523944
URL de ORCID	https://orcid.org/0000-0002-9605-3670
Datos del jurado	
Presidente del jurado	
Nombres y apellidos	Oscar Rafael Tinoco Gómez
Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	08606920
Miembro del jurado 1	
Nombres y apellidos	Alcides Guillermo Joo Aguayo
Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	42151186
Miembro del jurado 2	
Nombres y apellidos	Luis Antonio Evangelista Yzaguirre
Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	10473466

Datos de investigación	
Línea de investigación	12. Calidad e inocuidad de los alimentos. ODS 12: Producción y consumo responsables. C.17.0.12
Grupo de investigación	No aplica
Agencia de financiamiento	Sin financiamiento
Ubicación geográfica de la investigación	Edificio o institución: Laboratorio de Investigación de Suelos y Aguas (LABISAG), Instituto de Investigación para el Desarrollo Sustentable de Ceja de Selva (INDES-CES), Universidad Nacional Toribio Rodríguez de Mendoza de Amazonas País: Perú Departamento: Amazonas Provincia: Chachapoyas Distrito: Chachapoyas Dirección: Calle Higos Urco N.° 342, Ciudad Universitaria Latitud: -6.23295 Longitud: -77.85357
Año o rango de años en que se realizó la investigación	2024-2026
URL de disciplinas OCDE	Alimentos y bebidas https://purl.org/pe-repo/ocde/ford#2.11.01 Ingeniería industrial https://purl.org/pe-repo/ocde/ford#2.11.04 Ciencias del medio ambiente https://purl.org/pe-repo/ocde/ford#1.05.08

UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE SAN MARCOS
Universidad del Perú. Decana de América

FACULTAD DE INGENIERÍA INDUSTRIAL

VICEDECANATO ACADÉMICO

ACTA DE SUSTENTACIÓN Nº021-VDAP-FII-2026

SUSTENTACIÓN DE TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERA INDUSTRIAL

El Jurado designado por la Facultad de Ingeniería Industrial, reunido en acto público en el Auditorio de la Facultad de Ingeniería Industrial, el día **martes 07 de julio de 2026**, a las 15:00 horas, dio inicio a la sustentación de la tesis:

"EVALUACIÓN DE LA CONTAMINACIÓN POR METALES PESADOS EN SUELOS Y FRUTOS DE PALTA (PERSEA AMERICANA) Y SU IMPACTO EN LOS RIESGOS ECOLÓGICOS Y SANITARIOS MEDIANTE SIMULACIÓN MONTE CARLO"

Que presenta la Bachiller:

MYRYAM YOPLAC NAVARRO

Para optar el Título Profesional de Ingeniera Industrial en la Modalidad: **Ordinaria.**

Luego de la exposición, absueltas las preguntas del Jurado y siendo las ...15:50... horas se procedió a la evaluación secreta, habiendo sido ...APROBADO... por ...UNANIMIDAD... con la calificación promedio de ...DIECIOCHO..., lo cual se comunicó públicamente.

Lima, 07 de julio del 2026

DR. OSCAR RAFAEL TINOCO GÓMEZ
Presidente

DR. LUIS ANTONIO EVANGELISTA YZAGUIRRE
Miembro

MG. ALCIDES GUILLERMO JOO AGUAYO
Miembro

DR. JORGE ENRIQUE ORTIZ PORRAS
Asesor

DR. JULIO ALEJANDRO SALAS BACALLA
Vicedecano Académico – FII

UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE SAN MARCOS
Universidad del Perú, Decana de América

CERTIFICADO DE SIMILITUD

Yo, **ORTIZ PORRAS JORGE ENRIQUE** en mi condición de asesor acreditado con el **DICTAMEN N° 026-EPII-FII-2026** de la tesis, cuyo título es **EVALUACIÓN DE LA CONTAMINACIÓN POR METALES PESADOS EN SUELOS Y FRUTOS DE PALTA (PERSEA AMERICANA) Y SU IMPACTO EN LOS RIESGOS ECOLÓGICOS Y SANITARIOS MEDIANTE SIMULACIÓN MONTE CARLO**, presentado por la bachiller **YOPLAC NAVARRO, MYRYAM** para optar el **TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERA INDUSTRIAL**, CERTIFICO que se ha cumplido con lo establecido en la Directiva de Originalidad y de Similitud de Trabajos Académicos, de Investigación y Producción Intelectual. Según la revisión, análisis y evaluación mediante la plataforma PIDS, el documento evaluado cuenta con el **12%** de similitud, nivel **PERMITIDO** para continuar con los trámites correspondientes y para su **publicación en el repositorio institucional.**

Se emite el presente certificado en cumplimiento de lo establecido en las normas vigentes, como uno de los requisitos para la obtención del Título Profesional de Ingeniera Industrial.



Lima, 15 de julio del 2026

Firma del Asesor

Nombres y Apellidos del asesor: **ORTIZ PORRAS JORGE ENRIQUE**

DNI: **40523944**

A Dios, a quienes siempre estuvieron,

a los que estuvieron a veces,

a los que estuvieron un poco;

pero llenaron mi corazón, alma y entusiasmo

en el tiempo y espacio precisos.

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN xii

ABSTRACT ix

CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN 1

1.1. Introducción 1

1.2. Planteamiento del problema 4

1.2.1. Determinación del problema 4

1.2.2. Formulación del problema 13

1.3. Objetivos 14

1.3.1. Objetivo principal 14

1.3.2. Objetivos secundarios 14

1.4. Importancia y alcance de la investigación 14

1.5. Limitaciones de la investigación 16

CAPÍTULO II: REVISIÓN DE LITERATURA 17

2.1. Marco teórico 17

2.2. Antecedentes del estudio 17

2.2.1. Antecedentes Nacionales 17

2.2.2. Antecedentes Internacionales 21

2.3. Bases teóricas 26

2.3.1. Cultivo de palta (Persea americana) 26

2.3.2. Metales pesados en sistemas agrícolas 29

2.3.3. Comportamiento ambiental de los metales 33

2.3.4. Transferencia suelo–planta–fruto 36

2.3.5. Bioacumulación de metales 39

2.3.6. Evaluación de la contaminación del suelo 41

2.3.7. Evaluación del riesgo ecológico 44

2.3.9. Enfoque One Health 51

2.3.10. Gestión de la calidad e inocuidad 53

2.3.11. Simulación Monte Carlo 54

2.4. Definición de términos 56

CAPÍTULO III: HIPÓTESIS Y VARIABLES 58

3.1. Hipótesis 58

3.1.1. Hipótesis principal 58

3.1.2. Hipótesis secundarias 58

3.2. Variables 59

3.2.1. Variable independiente 59

3.2.2. Variable dependiente 59

3.3. Operacionalización de las variables 60

CAPÍTULO IV: MATERIALES Y MÉTODOS 61

4.1. Área de estudio 61

4.2. Tipo y diseño de investigación 61

4.2.1. Tipo de Investigación 61

4.3. Población y muestra 64

4.3.1. Unidad de análisis 64

4.3.2. Población 64

4.3.3. Tamaño de muestra 66

4.3.4. Tipo de selección 66

4.4. Procedimientos, técnicas e instrumentos de recolección de datos 67

4.4.1. Procedimiento de recolección de muestras 67

4.4.2. Preparación y acondicionamiento de las muestras 70

4.4.3. Cuantificación de metales pesados en muestras vegetales (palta) 74

4.4.4. Cuantificación de metales pesados en muestras de suelo 78

4.4.5. Técnica e instrumento de análisis 82

4.5. Análisis estadístico 85

CAPÍTULO V: RESULTADOS 86

5.1. Concentración de Metales 86

5.1.1. Concentración de metales en el suelo 88

5.1.2. Concentración de metales en frutos de palta 95

5.2. Riesgo ecológico de metales 99

5.2.1. Índice de geoacumulación (Igeo) 99

5.2.2. Índice de Contaminación (PI) 102

5.2.3. Riesgo ecológico (ER) 104

5.2.4. Índice de riesgo ecológico potencial (RI) 106

5.3.1. Factor de bioacumulación (BAF) 107

5.4. Evaluación del riesgo a la salud humana 109

5.4.1. Ingesta diaria estimada (EDI) 109

3.4.2. Índice de peligro (HI) 111

5.4.3. Riesgo carcinogénico (CR) 112

CAPÍTULO VI: DISCUSIÓN 115

6.1. Concentración de metales en el suelo 115

6.2. Concentración de metales pesados en frutos de palta 120

6.3. Riesgo ecológico asociado a metales pesados en suelos agrícolas 125

6.3.1. Índice de geoacumulación (Igeo) 125

6.3.2. Índice de contaminación (PI) 126

6.3.3. Riesgo ecológico (ER) 128

6.3.4. Riesgo ecológico total (RI) 131

6.3. Bioacumulación de metales 131

6.3.1. Factor de bioacumulación (BAF) 131

6.4. Evaluación del riesgo a la salud humana 135

6.4.1. Ingesta diaria estimada (EDI) 135

6.4.2. Índice de peligro no carcinogénico (HI) 137

6.4.3. Riesgo carcinogénico (CR) 139

CAPÍTULO VII: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES 143

7.1. Conclusiones 143

7.2. Recomendaciones 145

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS 147

ANEXOS 164

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Características ambientales y sanitarias de los metales pesados evaluados 30

Tabla 2. Interpretación del índice de contaminación individual (PI) 42

Tabla 3. Interpretación del índice de geoacumulación (Igeo) 43

Tabla 4. Interpretación del Riesgo Ecológico (ER) 45

Tabla 5. Interpretación del Riesgo Ecológico Total (RI) 46

Tabla 6. Definición Operacional 60

Tabla 7. Características del diseño metodológico de la investigación 62

Tabla 8. Tamaño de muestras 66

Tabla 9. Diagrama de Operaciones del Proceso (DOP) para la recolección y conservación de muestras de suelo agrícola 68

Tabla 10. 69

Tabla 11. Diagrama de Operaciones del Proceso (DOP) para la preparación y acondicionamiento de muestras de suelo 71

Tabla 12. Diagrama de Operaciones del Proceso (DOP) para la preparación y acondicionamiento de muestras de pulpa de palta 73

Tabla 13. Diagrama de Operaciones del Proceso (DOP) para la digestión ácida y cuantificación de metales pesados en muestras de pulpa de palta (Persea americana) 77

Tabla 14. Diagrama de Operaciones del Proceso (DOP) para la digestión ácida y cuantificación de metales pesados en muestras de suelo agrícola 81

Tabla 15. Ecuaciones y parámetros relevantes: Riesgo para la salud..... 83

Tabla 16. *Ecuaciones y parámetros relevantes: Riesgo ecológico* 84

Tabla 17. *Concentración de metales pesados en suelos agrícolas de regiones productoras de palta*..... 87

Tabla 18. *Concentración de metales pesados en frutos de palta provenientes de regiones productoras (media ± desviación estándar, mg kg⁻¹).* 88

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Principales destinos de las exportaciones peruanas de palta fresca, 2024 5

Figura 2. Fuentes y vías de exposición al cadmio (Cd) en la dieta (síntesis EFSA)..... 6

Figura 3. Niveles máximos de cadmio (Cd) en frutas según el Reglamento (UE) 2023/915 (extracto) 8

Figura 4. Estándares de Calidad Ambiental para Suelo (ECA Suelo) – metales/inorgánicos en uso agrícola 9

Figura 5. Modelo conceptual One Health aplicado a metales en la cadena suelo–palta–salud..... 11

Figura 6. Árbol de problemas: contaminación por metales en suelos de palta, transferencia al fruto e impacto eco–sanitario..... 12

Figura 7. Principales fuentes de metales pesados en suelos agrícolas..... 33

Figura 8. Diagrama de vías de incorporación y exposición por consumo de palta 37

Figura 9. Anatomía del fruto de palta (Persea americana). 39

Figura 10. Elementos clave incluidos en One Health. 52

Figura 11. Modelo conceptual de la simulación Monte Carlo 55

Figura 12. Relación de variables..... 63

Figura 13. Mapa del Perú que muestra los sitios de muestreo. 65

Figura 14. Diagrama esquemático del acondicionamiento de muestras de suelo previo al análisis de metales pesados 71

Figura 15. Diagrama de flujo del acondicionamiento de muestras de pulpa de palta previo a la digestión ácida 73

Figura 16. Diagrama de flujo del procedimiento de los pasos 1 al 4 de digestión ácida a muestras de pulpa de palta 75

Figura 17. Diagrama de flujo del procedimiento de digestión ácida a muestras de pulpa de palta 76

Figura 18. Diagrama del procedimiento para el acondicionamiento de muestras de suelo antes de suelo 79

Figura 19. Diagrama del procedimiento para el acondicionamiento de muestras de suelo antes de suelo 80

Figura 20. Concentración de arsénico (As) en suelos agrícolas (mg/kg).... 89

Figura 21. Concentración de cadmio (Cd) en suelos agrícolas por región (mg/kg). 90

Figura 22. Concentración de cromo (Cr) en suelos agrícolas por región (mg/kg). 91

Figura 23. Concentración de mercurio (Hg) en suelos agrícolas por región (mg/kg). 92

Figura 24. Concentración de níquel (Ni) en suelos agrícolas por región (mg/kg). 93

Figura 25. Concentración de plomo (Pb) en suelos agrícolas por región (mg/kg). 94

Figura 26. Concentración de arsénico (As) en frutos de palta por región (mg/kg). 95

Figura 27. Concentración de cadmio (Cd) en frutos de palta por región (mg/kg). 96

Figura 28. Concentración de mercurio (Hg) en frutos de palta por región (mg/kg). 97

Figura 29. Concentración de níquel (Ni) en frutos de palta por región (mg/kg). 98

Figura 30. Concentración de plomo (Pb) en frutos de palta por región (mg/kg). 99

Figura 31. Valores medios, percentil 5 y percentil 95 del índice geoacumulativo (Igeo) por región 101

Figura 32. Índice de Contaminación 103

Figura 33. Valores medios y percentiles 5 y 95 del riesgo ecológico (ER) por región 105

Figura 34. Índice de riesgo ecológico potencial (RI) P95 106

Figura 35. Valores medios y percentiles 5 y 95 del factor de bioacumulación (BAF) por región 108

Figura 36. Valores medios, percentil 5 y percentil 95 de la ingesta diaria estimada (EDI) por región 110

Figura 37. Valores medios, percentil 5 y percentil 95 de Indice de Peligro (HQ/HI) por región 112

Figura 38. Valores medios y percentiles 5 y 95 del riesgo carcinogénico (CR) por región 114

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1. Parámetros de validación del procedimiento analítico..... 164

Anexo 2. Caracterización de la bioacumulación y del riesgo ecológico..... 164

Anexo 3. Caracterización del riesgo para la salud. 169

Anexo 4. Comparación de las concentraciones de Cd (mg/kg) en paltas peruanas 171

Anexo 5. Muestras pareadas de suelo y palta 171

Anexo 6. *Registro fotográfico del acondicionamiento de muestras de palta* 172

Anexo 7. Registro fotográfico del acondicionamiento inicial de muestras . 172

Anexo 8. *Trituración de muestras de suelo para acondicionamiento previo al análisis* 173

Anexo 9. Proceso de digestión y filtrado de muestras MCP-AES..... 173

Anexo 10. Lectura instrumental de muestras en espectrofotómetro MP-AES 174

RESUMEN

La presente investigación tuvo como objetivo evaluar los niveles de contaminación por arsénico (As), cadmio (Cd), cromo (Cr), mercurio (Hg), níquel (Ni) y plomo (Pb) en suelos agrícolas y frutos de palta (Persea americana), así como la transferencia suelo–fruto y los riesgos ecológicos y sanitarios asociados mediante simulación Monte Carlo. Se desarrolló un estudio cuantitativo, no experimental y transversal, a partir de 95 muestras pareadas de suelo y fruto procedentes de Amazonas, Áncash, Ayacucho, Cusco, Huancavelica, Ica, La Libertad y Lima. Las concentraciones se determinaron mediante espectrometría de emisión atómica con plasma de microondas (MP-AES). La contaminación y el riesgo ecológico se evaluaron mediante los índices PI, Igeo, ER y RI; la transferencia suelo–fruto mediante el BAF; y la exposición dietaria y el riesgo sanitario mediante EDI, HQ, HI y CR. La variabilidad e incertidumbre se analizaron mediante diez corridas de 100 000 iteraciones con muestreo Latin Hypercube.

En los suelos, las concentraciones siguieron el orden As > Cr > Pb > Ni > Cd > Hg. Lima presentó las mayores concentraciones medias de As (76,174 ± 17,349 mg/kg) y Pb (25,348 ± 6,015 mg/kg), mientras que Ica registró la mayor concentración de Cr (38,182 ± 15,564 mg/kg). En los frutos de palta, el orden fue Pb > Hg > As > Ni > Cd, y el Cr permaneció por debajo del límite de detección. Lima presentó las mayores concentraciones medias de Pb (0,325 ± 0,073 mg/kg) y Hg (0,167 ± 0,060 mg/kg).

El As y el Hg fueron los metales de mayor relevancia ecológica. La Libertad y Lima alcanzaron valores medios de RI de 182 y 169, respectivamente, correspondientes a riesgo ecológico potencial moderado. La transferencia suelo–fruto fue predominantemente limitada, con valores medios de BAF inferiores a 1; sin embargo, en el percentil 95, el BAF del Hg superó la unidad en Lima y Huancavelica. La mayor exposición dietaria correspondió al Pb en Lima, con una EDI media de $9{,}36\times10^{-5}$ mg/kg de peso corporal/día. Los valores de HQ y HI permanecieron por debajo de 1 y el mayor CR fue de $2{,}58\times10^{-5}$, inferior al umbral de 1×10^{-4}. Se concluye que existen diferencias regionales relevantes y puntos prioritarios de control ecológico, aunque los riesgos sanitarios se mantuvieron bajos o aceptables bajo los escenarios probabilísticos evaluados.

Palabras clave: palta; metales pesados; simulación Monte Carlo; riesgo ecológico; riesgo sanitario.

ABSTRACT

The present study aimed to evaluate the levels of contamination by arsenic (As), cadmium (Cd), chromium (Cr), mercury (Hg), nickel (Ni), and lead (Pb) in agricultural soils and avocado fruits (Persea americana), as well as soil–fruit transfer and the associated ecological and human health risks using Monte Carlo simulation. A quantitative, non-experimental, cross-sectional study was conducted using 95 paired soil and fruit samples collected from Amazonas, Áncash, Ayacucho, Cusco, Huancavelica, Ica, La Libertad, and Lima. Metal concentrations were determined by microwave plasma atomic emission spectrometry (MP-AES). Contamination and ecological risk were assessed using the PI, Igeo, ER, and RI indices; soil–fruit transfer was evaluated using the BAF; and dietary exposure and human health risk were estimated using EDI, HQ, HI, and CR. Variability and uncertainty were analyzed through ten runs of 100,000 iterations using Latin Hypercube sampling.

In soils, metal concentrations followed the order As > Cr > Pb > Ni > Cd > Hg. Lima showed the highest mean concentrations of As (76.174 ± 17.349 mg/kg) and Pb (25.348 ± 6.015 mg/kg), whereas Ica recorded the highest Cr concentration (38.182 ± 15.564 mg/kg). In avocado fruits, the concentration order was Pb > Hg > As > Ni > Cd, while Cr remained below the limit of detection. Lima showed the highest mean concentrations of Pb (0.325 ± 0.073 mg/kg) and Hg (0.167 ± 0.060 mg/kg).

As and Hg were the metals of greatest ecological relevance. La Libertad and Lima reached mean RI values of 182 and 169, respectively, corresponding to moderate potential ecological risk. Soil–fruit transfer was predominantly limited, with mean BAF values below 1; however, at the 95th percentile, the BAF for Hg exceeded

unity in Lima and Huancavelica. The highest dietary exposure corresponded to Pb in Lima, with a mean EDI of 9.36 × 10^{-5} mg/kg body weight/day. HQ and HI values remained below 1, and the highest CR was 2.58 × 10^{-5}, below the threshold of 1 × 10^{-4}. It is concluded that relevant regional differences and priority ecological control points exist; however, human health risks remained low or acceptable under the probabilistic scenarios evaluated.

Keywords: avocado; heavy metals; Monte Carlo simulation; ecological risk; human health risk.

CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN

1.1. Introducción

La palta (*Persea americana*) se ha consolidado como uno de los productos agrícolas de mayor dinamismo en el mercado internacional y gracias a su alta aceptación por los consumidores y a su valor agregado en la agroindustria. Desde la perspectiva nutricional, destaca por su densidad de nutrientes: aporta principalmente ácidos grasos monoinsaturados (p. ej., ácido oleico), fibra dietaria, vitaminas antioxidantes y minerales esenciales; además, contiene compuestos bioactivos (carotenoides, tocoferoles y fenoles) asociados a capacidad antioxidante y potencial efecto protector en la salud (Jimenez et al., 2021; Mahmassani et al., 2018; Nieble-Nuñez et al., 2022). Como consecuencia, el incremento de su demanda ha impulsado la expansión de las áreas de cultivo y el crecimiento de las exportaciones, especialmente en países productores como el Perú, donde la palta se ha convertido en un cultivo estratégico para cadenas de suministro orientadas al mercado externo.

En el contexto peruano, el desempeño exportador de la palta exige cumplir con estándares estrictos de inocuidad y calidad a lo largo de toda la cadena agroalimentaria. Sin embargo, uno de los riesgos emergentes para la sostenibilidad productiva y la aceptación comercial es la presencia de metales potencialmente tóxicos en suelos agrícolas y su posible transferencia al fruto. Durante el periodo 2024-2025, la palta peruana consolidó su posicionamiento como el segundo exportador global, alcanzando entre enero y noviembre de 2025 un valor de USD 1 357,23 millones FOB y un volumen de 765 783,68 toneladas, lo que representa un crecimiento del 9,33% respecto al mismo periodo de 2024 (PROMPERÚ, 2025). Sin

embargo, este dinamismo comercial en mercados de alta exigencia, como los Países Bajos (32,91% de participación), se ha visto condicionado por alertas internacionales vinculadas a incumplimientos en los niveles de cadmio (Cd) (Comisión Europea, 2024). De acuerdo con el Reglamento (UE) 2023/915, estos límites actúan como barreras técnicas que evidencian cómo la presencia de metales pesados trasciende lo ambiental para convertirse en un factor crítico de competitividad y gestión del riesgo bajo el enfoque One Health. (Comisión Europea, 2023; FAO et al., 2022)

Los metales en agroecosistemas pueden tener origen natural (material parental, mineralización geológica) o antropogénico (minería, actividades industriales, uso de agroquímicos, entre otros). Dado que muchos de ellos son persistentes y no biodegradables, tienden a acumularse en el suelo, alterar su funcionalidad ecológica y representar una amenaza para la salud humana cuando ingresan a la cadena alimentaria (Defarge et al., 2018; Satarug et al., 2017). En Perú, esta preocupación se intensifica por la proximidad de zonas agrícolas a actividades extractivas en diversas regiones y por la necesidad de cumplir límites regulatorios nacionales (p. ej., Estándares de Calidad Ambienta (ECA) para suelo) y exigencias del mercado internacional.

Desde un enfoque de ingeniería industrial, este problema debe abordarse como un sistema de riesgo en la cadena de valor: se requiere caracterizar fuentes, variabilidad espacial, probabilidad de exposición y consecuencias para el ambiente y para el consumidor. Además, la evidencia internacional promueve enfoques integrados como One Health, que articulan la salud humana + animal + ambiental orientando las decisiones de prevención y control con base científica (FAO, 2022). En esta línea, la evaluación de riesgo con métodos probabilísticos (p. ej., simulación

Monte Carlo) permite representar la incertidumbre y variabilidad de parámetros reales (concentraciones, ingesta, peso corporal, etc.), mejorando la robustez para la priorización de acciones y la toma de decisiones en control de calidad, monitoreo y gestión de proveedores.

En la presente investigación se evalúa la presencia de metales pesados, específicamente arsénico (As), cadmio (Cd), cromo (Cr), mercurio (Hg), níquel (Ni) y plomo (Pb), en suelos agrícolas y en la pulpa de palta (*Persea americana*) procedente de ocho regiones productoras del Perú. El estudio se desarrolla bajo una aplicación del enfoque One Health centrada en la interdependencia entre el ambiente, el sistema productivo y la salud humana, considerando que la presencia de estos contaminantes en el suelo puede relacionarse con su transferencia al fruto y, posteriormente, con la exposición de los consumidores.

La evaluación comprende la determinación de las concentraciones de metales pesados en los suelos agrícolas y en la pulpa de palta. En la dimensión ambiental, se analiza la contaminación y el riesgo ecológico del suelo mediante el índice de geoacumulación (Igeo), el índice de contaminación individual (PI), el riesgo ecológico individual (ER) y el índice de riesgo ecológico potencial (RI). En la dimensión productiva, se estima la transferencia de los metales desde el suelo hacia la pulpa mediante el factor de bioacumulación (BAF). Finalmente, en la dimensión humana, se evalúa la exposición dietaria mediante la ingesta diaria estimada (EDI), así como el riesgo sanitario no carcinogénico a través del cociente de peligro (HQ) y el índice de peligro (HI), y el riesgo carcinogénico mediante el riesgo de cáncer (CR). De esta manera, la investigación integra las dimensiones ambiental, productiva y humana dentro de un mismo marco de análisis basado en el enfoque One Health.

Asimismo, se incorpora un enfoque probabilístico mediante simulación de Monte Carlo combinada con muestreo Latin Hypercube. Para cada parámetro evaluado se realizaron diez corridas de 100 000 iteraciones, lo que permitió representar la variabilidad e incertidumbre de los datos de entrada y obtener distribuciones probabilísticas expresadas mediante valores medios y percentiles. Este enfoque fortalece la interpretación de los resultados y proporciona una base más robusta para la identificación de puntos críticos, la priorización del monitoreo y la toma de decisiones en la gestión de la calidad e inocuidad de la cadena agroindustrial de la palta.

1.2. Planteamiento del problema

1.2.1. Determinación del problema

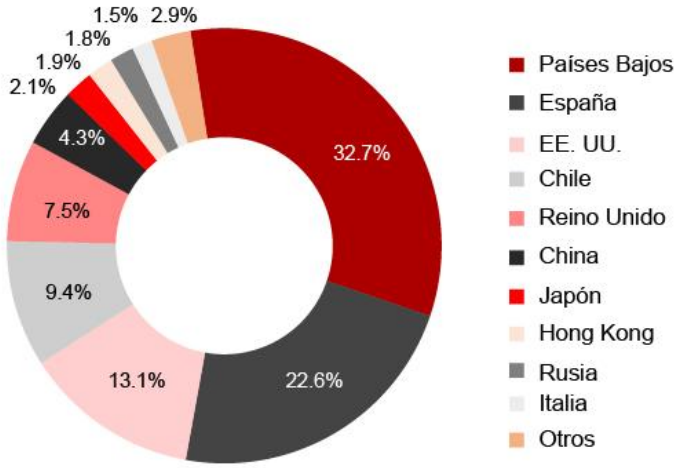
La palta (Persea americana) constituye uno de los principales productos de la agroexportación peruana. En 2024, el Perú se posicionó como el segundo exportador mundial de palta fresca, mientras que este producto ocupó el tercer lugar entre las principales agroexportaciones nacionales, con envíos valorizados en USD 1 247 millones y un volumen de 570 407 toneladas. Asimismo, Países Bajos y España concentraron conjuntamente el 55,3 % del total exportado durante dicho año, como se muestra en la Figura 1, lo que evidencia la importancia del mercado europeo para la cadena agroexportadora peruana (ComexPerú, 2025).

En este contexto, el cumplimiento de los estándares de calidad e inocuidad establecidos por los mercados de destino constituye un factor crítico para la continuidad de las exportaciones. En 2025, el Sistema de Alerta Rápida para Alimentos y Piensos de la Unión Europea (RASFF, por sus siglas en inglés)

registró nueve notificaciones relacionadas con paltas peruanas que superaron el nivel máximo de cadmio de 0,050 mg/kg, lo que ocasionó el retiro de diversos lotes en países europeos (Solórzano Acosta et al., 2025). Esta situación evidencia que la presencia de metales pesados puede generar consecuencias sanitarias, regulatorias y comerciales para la cadena agroexportadora.

Figura 1.

Principales destinos de las exportaciones peruanas de palta fresca, 2024



Nota. Tomado de “Paltas y diversificación de mercados”, por ComexPerú (2025), con base en datos de la Superintendencia Nacional de Aduanas y de Administración Tributaria (Sunat).

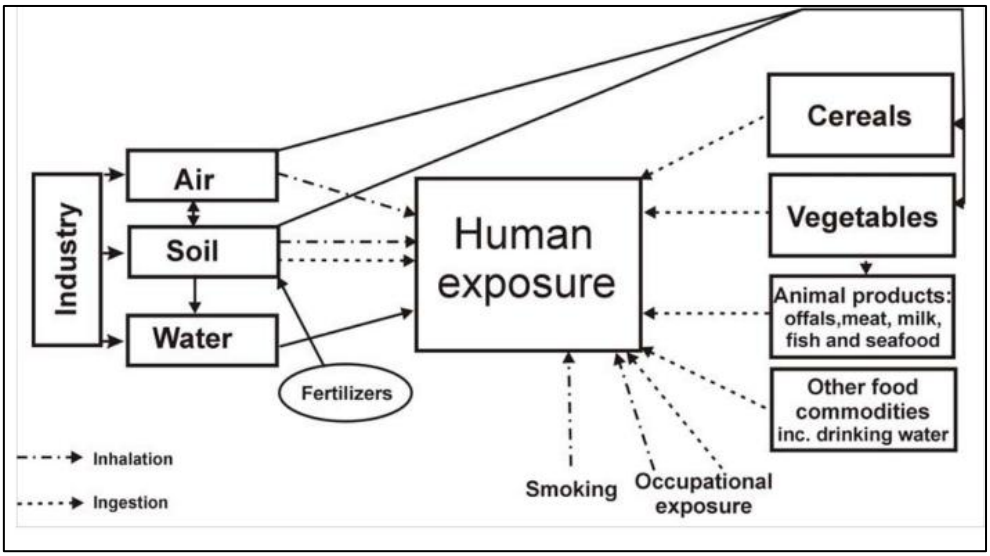
El problema no se limita al incumplimiento comercial asociado con el cadmio. Los metales pesados pueden permanecer en el ambiente, incorporarse al sistema suelo–cultivo y alcanzar la cadena alimentaria mediante su acumulación en las partes comestibles de los productos agrícolas. Sus efectos dependen del elemento, su forma química, la concentración y la duración de la exposición, y pueden comprometer los sistemas renal, óseo, neurológico y cardiovascular. Asimismo, el arsénico inorgánico, el cadmio y sus

compuestos, los compuestos de cromo hexavalente y los compuestos de níquel se encuentran clasificados como carcinógenos para los seres humanos (International Agency for Research on Cancer [IARC], 2012; World Health Organization [WHO], 2007).

Dentro de este conjunto, el cadmio adquiere especial relevancia por su relación directa con las notificaciones registradas en paltas peruanas. En la población no fumadora, los alimentos constituyen la principal fuente de exposición a este elemento; su acumulación prolongada puede afectar la función renal y producir desmineralización ósea, además de su reconocido carácter carcinogénico (WHO, 2019). Debido a estos efectos, el Panel sobre Contaminantes de la Cadena Alimentaria de la Autoridad Europea de Seguridad Alimentaria estableció una ingesta semanal tolerable de 2,5 µg de Cd/kg de peso corporal por semana (EFSA Panel on Contaminants in the Food Chain [CONTAM], 2009).

Figura 2.

Fuentes y vías de exposición al cadmio (Cd) en la dieta (síntesis EFSA).



Nota. Recuperado de Scientific Opinion on Cadmium in Food (EFSA) (2009)

La regulación permite evaluar esta problemática mediante valores cuantificables. Para frutas como la palta, el Reglamento (UE) 2023/915 establece niveles máximos de 0,050 mg/kg para Cd y 0,10 mg/kg para Pb, aplicables al peso húmedo después del lavado y de la separación de la parte comestible (European Commission, 2023). En el ámbito ambiental peruano, los Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para Suelo establecen, para suelos agrícolas y en base seca, valores de 50 mg/kg para As, 1,4 mg/kg para Cd, 0,4 mg/kg para Cr (VI), 6,6 mg/kg para Hg y 70 mg/kg para Pb. La norma no establece un valor aplicable al suelo agrícola para Ni ni para cromo total (Ministerio del Ambiente [MINAM], 2017). Estos referentes permiten diferenciar la conformidad del fruto destinado al consumo de la condición ambiental del suelo en el que se desarrolla el cultivo.

Figura 3.

Niveles máximos de cadmio (Cd) en frutas según el Reglamento (UE) 2023/915 (extracto)

3.2	**Cadmium**	Maximum level (mg/kg)	Remarks
3.2.1	Fruits and tree nuts		The maximum level applies to the wet weight. The maximum level applies after washing and separating the edible part.
3.2.1.1	Fruits except products listed in 3.2.1.2, 3.2.1.3 and 3.2.1.4	0,050	
3.2.1.2	Citrus fruits, pome fruits, stone fruits, table olives, kiwi fruits, bananas, mangoes, papayas and pineapples	0,020	
3.2.1.3	Berries and small fruits, except products listed in 3.2.1.4	0,030	
3.2.1.4	Raspberries	0,040	
3.2.1.5	Tree nuts		The maximum levels do not apply to tree nuts for crushing and oil refining, provided that the remaining pressed tree nuts are not placed on the market as food. In case the remaining pressed tree nuts are placed on the market as food, the maximum levels apply, taking into account Article 3(1) and (2).
3.2.1.5.1	Tree nuts except products listed in 3.2.1.5.2	0,20	
3.2.1.5.2	Pine nuts	0,30	
3.2.2	Root and tuber vegetables		The maximum level applies to the wet weight. The maximum level applies after washing and separating the edible part.
3.2.2.1	Root and tuber vegetables except products listed in 3.2.2.2, 3.2.2.3, 3.2.2.4, 3.2.2.5 and 3.2.2.6	0,10	For potatoes, the maximum level applies to peeled potatoes.
3.2.2.2	Beetroots	0,060	
3.2.2.3	Celeriac	0,15	

Official Journal of the European Union L

Nota. Recuperado de Commission Regulation (EU) 2023/915

Figura 4.

Estándares de Calidad Ambiental para Suelo (ECA Suelo) – metales/inorgánicos en uso agrícola

Parámetros en mg/kg PS[2]	Usos del Suelo[1]			Métodos de ensayo [7] y [8]
	Suelo Agrícola[3]	Suelo Residencial/ Parques[4]	Suelo Comercial[5]/ Industrial/ Extractivo[6]	
INORGÁNICOS				
Arsénico	50	50	140	EPA 3050 EPA 3051
Bario total [15]	750	500	2 000	EPA 3050 EPA 3051
Cadmio	1,4	10	22	EPA 3050 EPA 3051
Cromo total	**	400	1 000	EPA 3050 EPA 3051
Cromo VI	0,4	0,4	1,4	EPA 3060/ EPA 7199 ó DIN EN 15192[16]
Mercurio	6,6	6,6	24	EPA 7471 EPA 6020 ó 200.8
Plomo	70	140	800	EPA 3050 EPA 3051
Cianuro Libre	0,9	0,9	8	EPA 9013 SEMWW-AWWA-WEF 4500 CN F o ASTM D7237 y/ó ISO 17690:2015

Nota. Recuperado de *Decreto Supremo N.° 011-2017-MINAM, Aprueban Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para Suelo*, por Ministerio del Ambiente (MINAM) (2017).

La evidencia disponible confirma que la presencia de contaminantes químicos en los productos agrícolas constituye un problema de inocuidad en el Perú. La revisión realizada por Galagarza et al. (2021) identificó reportes de metales pesados en diversos productos vegetales, algunos de ellos con concentraciones superiores a valores nacionales o internacionales de referencia, y señaló como factores asociados la actividad minera, el uso de agua de riego contaminada y determinadas prácticas agrícolas.

De manera específica, Solórzano Acosta et al. (2025) analizaron 410 muestras de suelos destinados al cultivo de palta en siete regiones del Perú.

Las concentraciones de Cd variaron entre 0 y 11,98 mg/kg, con una media de 0,54 ± 1,00 mg/kg y un coeficiente de variación de 185,09 %. Además, se identificaron zonas críticas con concentraciones superiores a 3 mg/kg. Estos resultados demuestran una marcada heterogeneidad espacial y evidencian que la presencia de metales no puede asumirse como uniforme entre las regiones productoras.

La relación entre la condición ambiental del suelo, la incorporación de metales al cultivo y la exposición humana mediante el consumo requiere un análisis integrado. El enfoque One Health reconoce la interdependencia entre la salud humana, animal, vegetal y ambiental, y promueve la evaluación coordinada de los factores que generan riesgos en estos sistemas (Food and Agriculture Organization of the United Nations et al., 2022). Aplicado a la cadena de la palta, este enfoque permite vincular la contaminación del suelo, la transferencia hacia la pulpa del fruto y las posibles consecuencias para la salud de los consumidores.

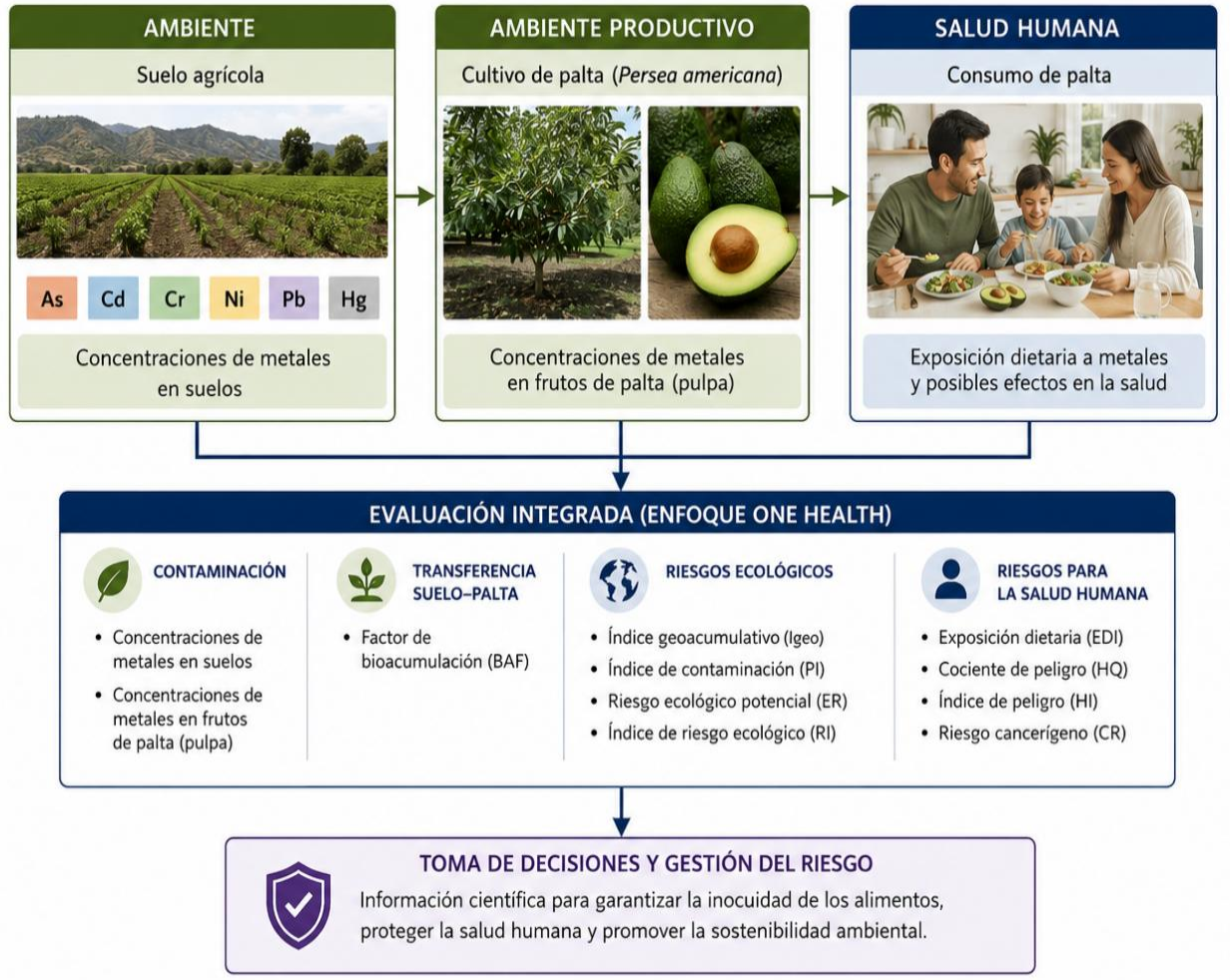
No obstante, la evidencia disponible se encuentra principalmente fragmentada entre estudios sobre contaminación de suelos y estudios sobre inocuidad de productos agrícolas. Esta separación limita la comprensión conjunta de la variabilidad regional de los metales, su transferencia suelo–fruto y los riesgos ecológicos y sanitarios derivados de su presencia. Asimismo, el uso exclusivo de valores promedio puede ocultar escenarios de mayor exposición en regiones o lotes con concentraciones elevadas.

Por tanto, el problema central radica en la insuficiente caracterización integrada y probabilística de la magnitud y distribución regional del arsénico,

cadmio, cromo, mercurio, níquel y plomo en suelos agrícolas y pulpa de palta, así como de su transferencia al fruto y de los riesgos ecológicos y sanitarios asociados. Esta brecha dificulta identificar los metales y regiones de mayor prioridad, establecer puntos críticos de monitoreo y orientar medidas preventivas para la gestión de la calidad e inocuidad en la cadena agroindustrial de la palta peruana.

Figura 5.

Modelo conceptual One Health aplicado a metales en la cadena suelo–palta–salud.

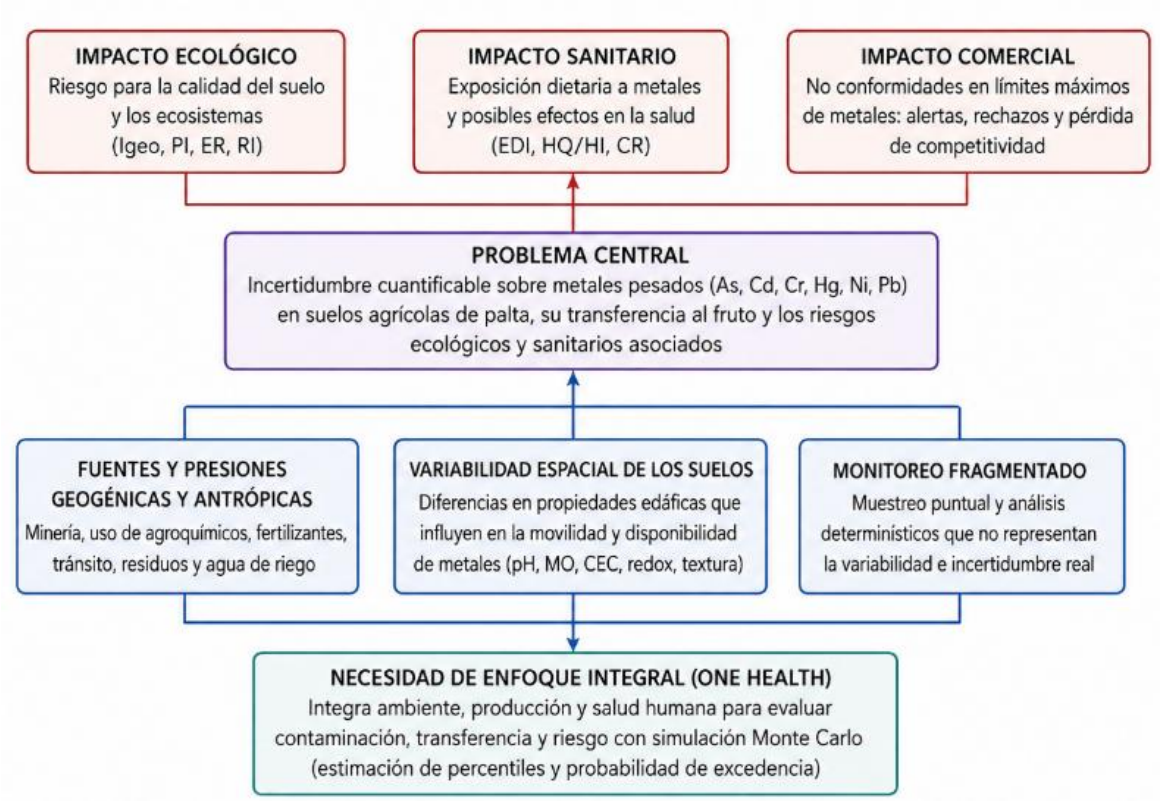


Nota. Elaboración propia.

La creciente preocupación por la presencia de metales pesados en sistemas agrícolas y su posible transferencia hacia alimentos destinados al consumo humano evidencia la necesidad de comprender las relaciones entre las fuentes de contaminación, la bioacumulación en los cultivos y los riesgos ecológicos y para la salud. En este contexto, el árbol de problemas sintetiza las principales causas y consecuencias que fundamentan la presente investigación.

Figura 6.

Árbol de problemas: contaminación por metales en suelos de palta, transferencia al fruto e impacto eco–sanitario.



Nota. Elaboración propia.

1.2.2. Formulación del problema

1.2.2.1. Problema principal

¿Cuáles son los niveles de contaminación por metales pesados en suelos y frutos de palta (*Persea americana*), y qué riesgos ecológicos y sanitarios están asociados a dicha contaminación mediante simulación Monte Carlo?

1.2.2.2. Problemas secundarios

PE1. ¿Cuáles son las concentraciones de As, Cd, Cr, Hg, Ni y Pb en los suelos agrícolas y existen diferencias estadísticamente significativas entre las regiones productoras?

PE2. ¿Cuáles son las concentraciones de As, Cd, Cr, Hg, Ni y Pb en los frutos de palta y existen diferencias estadísticamente significativas entre las regiones productoras?

PE3. ¿ Cuáles son los niveles de contaminación y riesgo ecológico asociados a los metales pesados presentes en los suelos , determinados mediante los índices Igeo, PI, ER y RI?

PE4. ¿Cuál es el nivel de transferencia de los metales pesados desde el suelo hacia la pulpa de palta, determinado mediante el BAF?

PE5. ¿ Cuáles son los niveles de exposición dietaria y de riesgo sanitario no carcinogénico y carcinogénico asociados al consumo de palta, estimados mediante EDI, HQ, HI y CR?

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo principal

Evaluar los niveles de contaminación por As, Cd, Cr, Hg, Ni y Pb en suelos y frutos de palta (*Persea americana*), así como los riesgos ecológicos y sanitarios asociados, mediante simulación Monte Carlo.

1.3.2. Objetivos secundarios

OE1. Determinar las concentraciones de As, Cd, Cr, Hg, Ni y Pb en los suelos y establecer si existen diferencias estadísticamente significativas entre las regiones productoras.

OE2. Determinar las concentraciones de As, Cd, Cr, Hg, Ni y Pb en los frutos de palta y establecer si existen diferencias estadísticamente significativas entre las regiones productoras.

OE3. Evaluar los niveles de contaminación y riesgo ecológico asociados a los metales pesados presentes en los suelos mediante los índices Igeo, PI, ER y RI.

OE4. Evaluar el nivel de transferencia de los metales pesados desde el suelo hacia la pulpa de palta mediante el BAF.

OE5. Estimar los niveles de exposición dietaria a metales pesados asociados al consumo de palta mediante la EDI, así como los riesgos sanitarios no carcinogénicos y carcinogénicos mediante HQ, HI y CR.

1.4. Importancia y alcance de la investigación

La importancia de esta investigación radica en abordar un problema que compromete simultáneamente la calidad ambiental de los suelos agrícolas, la inocuidad de la palta y la competitividad de una cadena agroexportadora estratégica

para el Perú. La presencia de metales pesados puede afectar la sostenibilidad del sistema productivo y generar consecuencias sanitarias, regulatorias y comerciales, por lo que su evaluación resulta necesaria para fortalecer la prevención y el control dentro de la cadena agroindustrial.

El principal aporte del estudio consiste en integrar, bajo el enfoque One Health, la contaminación del suelo, la transferencia de metales hacia la pulpa del fruto y la exposición humana asociada a su consumo. Esta integración permite analizar de manera articulada las dimensiones ambiental, productiva y humana, superando evaluaciones aisladas y proporcionando una visión más completa del riesgo en el sistema suelo–ambiente–salud humana.

Desde la Ingeniería Industrial, los resultados proporcionan evidencia cuantitativa para priorizar regiones y metales que requieren mayor vigilancia, orientar programas de monitoreo, fortalecer la trazabilidad de los lotes y sustentar medidas preventivas de gestión de la calidad e inocuidad. Asimismo, el enfoque probabilístico permite diferenciar las condiciones promedio de los escenarios de mayor exposición, mejorando la toma de decisiones frente a la variabilidad e incertidumbre presentes en la cadena agroexportadora.

El alcance geográfico comprende muestras de suelos agrícolas y frutos de palta procedentes de Amazonas, Áncash, Ayacucho, Cusco, Huancavelica, Ica, La Libertad y Lima. El alcance analítico incluye la determinación de As, Cd, Cr, Hg, Ni y Pb en los suelos y en la pulpa de los frutos; la evaluación de la contaminación y el riesgo ecológico; la estimación de la transferencia suelo–fruto; y la caracterización de la exposición dietaria y de los riesgos sanitarios. La evaluación probabilística se

realizó mediante simulación Monte Carlo combinada con muestreo Latin Hypercube, utilizando diez corridas de 100 000 iteraciones para los indicadores modelados.

1.5. Limitaciones de la investigación

La investigación comprende muestras obtenidas en ocho regiones productoras durante un periodo determinado, por lo que los resultados representan las condiciones evaluadas y no necesariamente las variaciones estacionales o interanuales de todas las zonas productoras de palta del Perú. Asimismo, el número de muestras varió entre regiones, aspecto que fue considerado en la interpretación de las comparaciones y estimaciones obtenidas.

La evaluación se basó en concentraciones totales de los metales analizados y en la exposición dietaria asociada al consumo de palta. Por ello, no se abordaron la especiación química de los elementos ni otras posibles vías de exposición. Del mismo modo, las estimaciones probabilísticas dependen de la información disponible y de las distribuciones estadísticas seleccionadas; sin embargo, la aplicación de 10 corridas de 100 000 iteraciones permitió representar de manera robusta la variabilidad de los parámetros y los escenarios evaluados.

CAPÍTULO II: REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. Marco teórico

Este capítulo desarrolla las bases teóricas que explican la dinámica de los metales pesados en el sistema suelo–palta–salud, así como los antecedentes que respaldan la evaluación de la contaminación, la bioacumulación y los riesgos ecológicos y sanitarios.

2.2. Antecedentes del estudio

2.2.1. Antecedentes Nacionales

Espinoza-Guillen et al. (2022) en su estudio titulado "*Identificación de la contaminación por metales pesados en suelos de la llanura amazónica peruana: uso de técnicas estadísticas multivariadas"*, tuvieron como objetivo identificar la contaminación por metales pesados en los suelos de la llanura amazónica peruana y determinar las posibles fuentes de dichos contaminantes mediante análisis multivariado. Para ello recolectaron muestras de suelos superficiales (0–20 cm) y subsuperficiales (100–150 cm) en 48 puntos distribuidos en Loreto, Amazonas, San Martín y Ucayali, empleando como instrumentos el muestreo sistemático de suelos y el análisis químico en laboratorio para once metales, complementado con técnicas estadísticas como análisis de componentes principales, conglomerados y correlaciones. Los autores concluyeron que los suelos presentaron enriquecimiento moderado de Be y Pb, que Fe, Co, Zn, Ni, V y Cr se vincularon principalmente a fuentes litogénicas, mientras que Hg se asoció a actividades antropogénicas (minería ilegal, emisiones y deposición atmosférica); además, identificaron que Be, Pb,

Cu y Mn mostraron aportes mixtos naturales y antrópicos, poniendo de manifiesto la urgencia de mejorar la gestión ambiental en la región amazónica del Perú.

Solórzano et al. (2025) en su estudio titulado ” *Distribución espacial del cadmio en suelos cultivados con palta en el Perú: influencia del material parental, cationes intercambiables y elementos traza*” propusieron caracterizar la distribución espacial del cadmio (Cd) en suelos destinados al cultivo de la palta en Perú y determinar los factores edáficos, geológicos y geoquímicos que explican su acumulación, dada la creciente preocupación por la presencia de elementos potencialmente tóxicos en sistemas agrícolas de exportación. Para ello, recolectaron 410 muestras de suelo de diversas regiones productoras de palta en Perú, analizaron 26 propiedades fisicoquímicas del suelo, las concentraciones totales de 22 metales y metaloides mediante espectrometría de masas y seis variables geoespaciales; además aplicaron estadística univariada (asimetría, curtosis), análisis multivariante (correlaciones de Spearman, análisis de componentes principales) y modelado espacial con la herramienta Geodetector. Los instrumentos de recolección de datos incluyeron muestreo sistemático de suelos en huertos de palta, análisis fisicoquímico y multielemental en laboratorio y modelado estadístico-espacial de la variabilidad de Cd. Como conclusión general señalan que la concentración total de Cd en los suelos de palta exhibe una distribución espacial altamente heterogénea, con focos de valores elevados (> 3 $mg \cdot kg^{-1}$) que no se explican por azar, sino por la influencia combinada de factores geogénicos y edáficos —en particular el tipo de material parental (rocas ígneas intermedias del Cretácico), la taxonomía de suelos (especialmente Leptosoles), el contenido de Zn, Pb y Mg,

el porcentaje de sodio intercambiable y ciertas relaciones de cationes—, lo cual sugiere que la gestión de suelos para cultivo de palta de exportación debe incorporar mapeo de riesgo de Cd, selección de zonas menos vulnerables y prácticas preventivas para evitar la acumulación excesiva de Cd en el sistema productivo.

Orellana Mendoza et al. (2021) en su investigación *"Evaluación del riesgo ecológico por metales pesados en suelos agrícolas alrededor de botaderos, provincia de Huancayo, Perú"* se planteó con el objetivo de evaluar el nivel de contaminación y el riesgo ecológico potencial asociado a metales pesados en suelos agrícolas que rodean los vertederos de residuos "Agua de las Vírgenes" y "El Edén" en la provincia de Huancayo, Junín, Perú. Para ello recolectaron muestras de suelo a una profundidad de 0-30 cm en zonas agrícolas adyacentes a los vertederos y midieron las concentraciones de metales como As, Cd, Cr, Pb, Cu, Fe y Zn mediante espectrometría de emisión óptica de plasma acoplado (ICP-OES); los instrumentos de recolección incluyeron muestreo de suelos, análisis físico-químico (pH, conductividad eléctrica, materia orgánica) y cálculo de índices de contaminación (factor de contaminación, grado de contaminación, índice de geoacumulación) y de riesgo ecológico (ERI, RI) junto con análisis multivariante (ACP) para identificación de fuentes. Como conclusión general, los autores reportaron que los suelos alrededor de los vertederos presentaron contaminación que va de alta a muy alta, en particular por As y Cd, siendo el Cd el mayor contribuyente al índice de riesgo ecológico; asimismo, identificaron que las fuentes principales de los metales pesados están asociadas con la composición variada de los residuos y la irrigación con aguas residuales, por lo que

recomiendan monitoreo continuo y gestión de suelos agrícolas afectados por lixiviados de vertederos.

Santos-Francés et al. (2017) en su estudio titulado "*Determinación del fondo geoquímico, valores de línea base y distribución espacial de la contaminación por metales pesados en suelos de la cordillera de los Andes (Cajamarca-Huancavelica, Perú)"*, tuvieron como propósito determinar los valores de fondo geoquímico, establecer valores basales regionales y caracterizar la distribución espacial de la contaminación por metales pesados en suelos andinos ubicados entre Cajamarca y Huancavelica, zonas mineras históricas con alta presión antrópica. Para alcanzar estos objetivos recolectaron 196 muestras de suelo superficial (0–20 cm) en áreas agrícolas, ganaderas y no intervenidas, aplicaron análisis químico mediante ICP-MS e ICP-OES para elementos como As, Cd, Pb, Cu, Zn, Ni, Cr, Hg y Sb, y emplearon como instrumentos metodológicos la determinación estadística de valores de fondo (media ± 2SD, Box-Plot, método de la mediana absoluta), análisis de componentes principales, elaboración de mapas de interpolación espacial mediante kriging y análisis geoestadístico para modelar patrones de dispersión. De manera general concluyeron que los suelos presentaron niveles elevados de As, Pb y Cd respecto a valores de fondo regionales, con zonas críticas claramente asociadas a drenajes mineros, áreas con mineralización natural y pasivos ambientales; además, demostraron que los valores basales obtenidos son más representativos para la región andina que los valores de referencia internacionales, por lo que su uso es esencial para evaluar adecuadamente el grado de contaminación y orientar estrategias de gestión ambiental en los Andes centrales del Perú.

Guadalupe et al. (2023) en su estudio titulado "*Caracterización probabilística del riesgo por metales pesados en café peruano: implicancias de la variedad, la región y el procesamiento* ", desarrollaron una investigación orientada a caracterizar de manera probabilística el riesgo para la salud asociado a la presencia de metales pesados en café peruano, considerando el efecto de la variedad, la región productora y el tipo de procesamiento. Para ello analizaron 180 muestras de café de diversas zonas cafetaleras del Perú, pertenecientes a las variedades típicas del mercado (Caturra, Catuaí y Bourbon), procesadas mediante métodos húmedo y seco. Cuantificaron las concentraciones de metales como Pb, Cd, As, Cu, Ni, Cr y Zn utilizando ICP-MS y evaluaron parámetros fisicoquímicos que influyen en la transferencia de metales. Los instrumentos metodológicos incluyeron muestreo estratificado por región y variedad, análisis multielemental de laboratorio, cálculos de ingesta diaria estimada (EDI), cocientes de riesgo (HQ) y riesgo carcinogénico (CR), así como simulaciones Monte Carlo para estimar la probabilidad de exceder umbrales toxicológicos. Los autores concluyeron que, si bien la mayoría de muestras se ubicaron dentro de los límites internacionales aceptados, el Cd presentó mayores niveles de preocupación en determinadas regiones y variedades, especialmente bajo procesamiento húmedo; además, identificaron diferencias significativas atribuibles al origen geográfico y a las condiciones poscosecha, evidenciando la necesidad de fortalecer el monitoreo de metales pesados en cadenas de valor agrícolas de exportación como el café peruano.

2.2.2. Antecedentes Internacionales

Pei et al. (2023) En su estudio "*Riesgos socioambientales vinculados con la composición química de relaves mineros: promoviendo una gestión*

responsable y segura de relaves considerando experiencias de la minería del cobre y oro en Chile y Perú" se propuso describir y analizar los riesgos socio-ambientales vinculados a la composición química de los relaves mineros, considerando experiencias industriales del cobre y oro en Chile y Perú. Para ello, los autores recopilaron y revisaron datos de composición de relaves (metales/metaloides, componentes no metálicos y reactivos de proceso) de largo plazo en instalaciones de almacenamiento de relaves (TSF) en ambos países; utilizaron como instrumento metodológico el análisis de procesos de lixiviación, generación de drenaje ácido de roca (ARD), evaluación de tecnologías de gestión de relaves (TEC, BAP, BEP) y aplicación de un enfoque multidisciplinario que integra elementos geotécnicos, hidrológicos, geoquímicos y sociales. La conclusión general señala que los relaves mineros no pueden considerarse materiales inertes e inocuos — presentan un alto potencial de toxicidad para comunidades y ecosistemas — por esta razón, resulta fundamental garantizar un manejo responsable, supervisado y seguro, implementando las tecnologías más avanzadas disponibles (BATs), prácticas adecuadas (BAPs) y estrategias ambientales óptimas (BEPs), todo ello bajo un enfoque de ciclo de vida que abarque desde la etapa de construcción hasta el cierre y el post-cierre de las instalaciones

Custodio et al. (2021)en su estudio titulado "*Riesgo ecológico por contaminación de metales pesados en sedimentos y aguas de humedales naturales con influencia turística en la región central del Perú"*, desarrollaron una investigación orientada a evaluar la contaminación por metales pesados y el riesgo ecológico asociado en sedimentos y aguas de humedales naturales sometidos a presión turística en la región central del Perú. Para ello

recolectaron muestras de agua y sedimento en humedales ubicados en zonas de alta afluencia turística y analizaron las concentraciones de metales como As, Cd, Cr, Pb, Cu, Zn, Fe y Mn mediante ICP-OES y métodos estandarizados de calidad ambiental. Los instrumentos metodológicos incluyeron muestreo sistemático en puntos representativos, análisis fisicoquímico (pH, CE, turbidez, materia orgánica), determinación de índices de contaminación (Igeo, CF, PLI), cálculo del riesgo ecológico potencial (RI) y uso de estadística multivariante para identificar patrones y posibles fuentes. Los autores concluyeron que los sedimentos presentaron niveles moderados a altos de contaminación, especialmente por As y Pb, mientras que el Cd fue el principal contribuyente al riesgo ecológico; asimismo, demostraron que la actividad turística desordenada y la ausencia de manejo adecuado aumentan la presión sobre estos ecosistemas sensibles, recomendando monitoreo continuo, mitigación de impactos y ordenamiento turístico para preservar la integridad ecológica de los humedales

Soni et al. (2024) en su investigación titulada "*Mitigación de la acumulación y toxicidad de cadmio en plantas: el prometedor papel de las nanopartículas", publicada en Science of the Total Environment"*, tuvieron como objetivo analizar la eficacia de diversos tipos de nanopartículas para reducir la acumulación y toxicidad del cadmio (Cd) en plantas, un metal altamente móvil y fitotóxico que compromete el crecimiento vegetal, la calidad de alimentos y la seguridad ambiental. Para ello desarrollaron una revisión sistemática y analítica de investigaciones experimentales que evaluaron nanopartículas metálicas, metálico-óxidas y nano-bioformulaciones (como ZnO-NPs, TiO_2-NPs, Fe_3O_4-NPs, SiO_2-NPs y nanopartículas verdes

sintetizadas biológicamente), considerando como instrumentos metodológicos el análisis comparativo de concentraciones de Cd en raíces y brotes, biomarcadores de estrés oxidativo (H_2O_2, MDA), parámetros fisiológicos (clorofila, fotosíntesis, biomasa), actividad antioxidante (SOD, CAT, POD) así como alteraciones en la biodisponibilidad del cadmio presente en el suelo. Los autores concluyeron que diversas nanopartículas actúan como barreras físico-químicas que inmovilizan Cd en el suelo, reducen su transporte vía xilema y floema, y mitigan el daño celular mediante la activación de rutas antioxidantes; además, destacaron que las nano-formulaciones basadas en Zn, Fe y Si mostraron mayor eficiencia en disminuir la fitotoxicidad y la acumulación en tejidos comestibles, aunque subrayan la necesidad de evaluar riesgos ecotoxicológicos y su comportamiento a largo plazo antes de su aplicación masiva en sistemas agrícolas.

Buscaroli (2017), en su revisión titulada *"Una visión general de los índices para evaluar plantas terrestres con fines de fitorremediación",* tuvo como propósito sintetizar, clasificar y analizar críticamente los principales índices empleados para evaluar la capacidad de las plantas terrestres en procesos de fitorremediación, especialmente en ambientes contaminados por metales pesados. Para lograrlo, el autor realizó una revisión exhaustiva de estudios experimentales y aplicados que emplean índices como el Factor de Translocación (TF), Factor de Bioconcentración (BCF), Índice de Enriquecimiento (EI), Índice de Tolerancia (TI), Índice de Remediación Potencial (PRI), entre otros, analizando sus fundamentos teóricos, utilidad comparativa, limitaciones metodológicas y condiciones edafoclimáticas que influyen en su interpretación. Los instrumentos metodológicos consistieron en

la recopilación sistemática de literatura científica, extracción de datos de índices aplicados a metales como Cd, Pb, Zn, Ni, Cr y As, y evaluación crítica de su pertinencia para identificar especies hiperacumuladoras, tolerantes o eficientes en fitoestabilización o fitoextracción. De manera general, el autor concluyó que no existe un índice único capaz de evaluar integralmente la eficiencia fitorremediadora, por lo que recomienda el uso combinado de BCF, TF y TI junto con información fisiológica y ecofisiológica; asimismo, destaca que la estandarización de metodologías de muestreo y cálculo es esencial para comparar resultados entre especies y ambientes, lo cual fortalece la selección adecuada de plantas para programas de restauración ambiental.

Ur Rahman et al. (2024)en su revisión titulada "*Absorción, acumulación y translocación de Pb en plantas: respuesta fisiológica, bioquímica y molecular de las plantas"*, tuvieron como objetivo sintetizar el conocimiento actualizado sobre los mecanismos de absorción, acumulación y translocación del plomo (Pb) en plantas, enfatizando las respuestas fisiológicas, bioquímicas y moleculares frente a este metal altamente tóxico. Para ello recopilaron y analizaron estudios experimentales que evaluaron la dinámica del Pb desde el suelo hacia la raíz, su movilidad vía xilema y floema, los efectos sobre la fotosíntesis, crecimiento, integridad de membranas, estrés oxidativo (H_2O_2, MDA), actividad de enzimas antioxidantes (SOD, CAT, POD, APX), expresión de genes relacionados con transporte metálico (ZIP, NRAMP, HMA) y mecanismos de detoxificación como quelación mediante fitochelatinas y lignificación de paredes celulares. Los instrumentos metodológicos abarcaron una revisión sistemática de literatura indexada, extracción comparativa de datos fisiológicos y moleculares y análisis crítico de la evidencia para

establecer patrones de respuesta vegetal al Pb. Los autores concluyeron que el Pb se acumula principalmente en las raíces debido a su baja movilidad, donde causa daño estructural y metabólico, aunque ciertas especies pueden translocarlo hacia tallos y hojas; además, demostraron que la tolerancia al Pb depende de la activación de sistemas antioxidantes, depósitos en vacuolas, modificación de transportadores metálicos y fortificación de la pared celular, destacando la importancia de comprender estos mecanismos para desarrollar estrategias de fitorremediación y minimizar la posibilidad de que el plomo ingrese en la cadena alimentaria.

2.3. Bases teóricas

2.3.1. Cultivo de palta (Persea americana)

El palto (*Persea americana* Mill.) es una especie frutal perenne perteneciente a la familia Lauraceae, cultivada en regiones tropicales y subtropicales. Su fruto está conformado por la cáscara, la pulpa o mesocarpio y la semilla; la pulpa constituye la parte comestible y, por tanto, la matriz de interés para la evaluación de la exposición dietaria. En el contexto de esta investigación, los aspectos relevantes del cultivo se relacionan con la interacción entre las condiciones del suelo, la absorción de elementos por la planta y su posible transferencia hacia el fruto (Alcaraz et al., 2013; Reddy et al., 2014).

2.3.1.1. Características del cultivo

El desarrollo del palto y la composición del fruto dependen de la interacción entre el cultivar, las condiciones ambientales, las

propiedades del suelo y el manejo agrícola. Para el análisis de metales pesados, adquiere especial importancia la relación suelo–planta, debido a que factores como el pH, la materia orgánica y la capacidad de intercambio catiónico pueden modificar la movilidad y disponibilidad de los elementos presentes en el suelo.

No obstante, la concentración total de un metal en el suelo no determina necesariamente una concentración equivalente en la pulpa. La absorción radicular, la retención en las raíces y otros tejidos, así como la regulación fisiológica de la planta, pueden limitar o favorecer su transferencia hacia el fruto. En estudios realizados con palta se ha observado que la composición elemental del mesocarpio responde a interacciones complejas entre la calidad del suelo y la capacidad de absorción y exclusión del cultivo (Reddy et al., 2014).

2.3.1.2. Importancia agroindustrial en el Perú

La palta constituye un producto estratégico de la agroexportación peruana. En 2025, las exportaciones nacionales de palta fresca alcanzaron un valor FOB de USD 1 362,12 millones y un volumen de 769 784,72 toneladas, lo que evidencia la magnitud económica de esta cadena productiva (Comisión de Promoción del Perú para la Exportación y el Turismo [PROMPERÚ], 2026).

La cadena agroindustrial comprende actividades de producción, acopio, selección, empaque, conservación, transporte y exportación, en las que la calidad y la inocuidad deben mantenerse de manera continua.

Desde la Ingeniería Industrial, esta articulación requiere control de proveedores, trazabilidad de lotes, estandarización de procesos, monitoreo de contaminantes y gestión preventiva de las no conformidades que puedan afectar el acceso a los mercados internacionales.

2.3.1.3. Palta como alimento y vía de exposición

La pulpa de palta constituye la parte destinada al consumo humano y, en consecuencia, la matriz relevante para evaluar la exposición alimentaria a metales pesados. Estos elementos pueden incorporarse al sistema productivo a partir del material parental del suelo, el agua de riego, los insumos agrícolas o la deposición atmosférica. Una vez presentes en el suelo, su transferencia hacia el fruto depende de su movilidad y biodisponibilidad, de las propiedades edáficas y de los mecanismos de absorción y distribución de la planta.

La detección de un metal en el suelo no implica necesariamente su acumulación proporcional en la pulpa. Estudios realizados en palta han evidenciado diferencias entre las concentraciones presentes en el suelo y las determinadas en el mesocarpio, lo que confirma que la transferencia debe evaluarse mediante muestras correspondientes de ambas matrices y no inferirse únicamente a partir de la contaminación del suelo (Reddy et al., 2014). En el Perú, también se ha demostrado que las concentraciones de cadmio en suelos destinados al cultivo de palta presentan una marcada variabilidad espacial asociada con

factores edáficos, geológicos y territoriales (Solórzano Acosta et al., 2025).

2.3.2. Metales pesados en sistemas agrícolas

Los metales pesados pueden encontrarse en los sistemas agrícolas como resultado de procesos naturales y de actividades humanas. Su importancia ambiental y sanitaria depende de la concentración, la forma química, la movilidad en el suelo, la capacidad de incorporación por los cultivos y la exposición de los organismos. Debido a que estos elementos no se degradan, pueden permanecer en el suelo y participar en procesos de adsorción, transformación y transferencia hacia la cadena alimentaria (Hou et al., 2020; Wan et al., 2024)

2.3.2.1. Definición de metales pesados

El término “metales pesados” se emplea ampliamente en estudios ambientales y de inocuidad para agrupar elementos asociados con contaminación y efectos tóxicos; sin embargo, no posee una definición científica universal basada exclusivamente en propiedades como la densidad o la masa atómica (Duffus, 2002). En esta investigación se utiliza de manera operacional para referirse al arsénico (As), cadmio (Cd), cromo (Cr), mercurio (Hg), níquel (Ni) y plomo (Pb), seleccionados por su presencia en sistemas agrícolas, su posible transferencia hacia los alimentos y su relevancia ambiental, sanitaria y regulatoria. Aunque el As es un metaloide, se incluye dentro de esta denominación para mantener la coherencia terminológica con el título y las variables del estudio.

2.3.2.2. Metales prioritarios (As, Cd, Pb, Cr, Hg, Ni)

Los metales considerados en la investigación presentan diferencias en su comportamiento ambiental y en sus efectos sobre la salud. La toxicidad no depende únicamente de la cantidad total presente, sino también de la forma química, la vía de exposición, la dosis y el tiempo de contacto. Esta precisión es especialmente importante para As, Cr, Hg y Ni, debido a que sus distintas especies o compuestos no poseen la misma movilidad ni toxicidad.

La investigación determinó **c**oncentraciones totales de As, Cd, Cr, Hg, Ni y Pb. En consecuencia, la descripción de determinadas especies químicas en esta sección tiene una finalidad teórica y no implica que el estudio haya identificado arsénico inorgánico, Cr(VI), metilmercurio o compuestos específicos de níquel.

Tabla 1.

Características ambientales y sanitarias de los metales pesados evaluados

Elemento	Relevancia en sistemas agrícolas	Relevancia sanitaria
Arsénico (As)	Puede encontrarse naturalmente en rocas, suelos y aguas, o incorporarse mediante actividades humanas. Su movilidad depende de la forma química y de las condiciones del suelo.	El arsénico inorgánico constituye la forma de mayor preocupación sanitaria. La exposición prolongada se relaciona con alteraciones cardiovasculares, neurológicas y carcinogénicas.

Cadmio (Cd)	Puede acumularse en suelos agrícolas y ser incorporado por los cultivos. Sus posibles fuentes incluyen el material parental, determinados fertilizantes y actividades mineras o industriales.	En la población no fumadora, los alimentos constituyen una de las principales vías de exposición. La exposición crónica puede afectar los riñones y el sistema óseo; además, el Cd y sus compuestos están clasificados como carcinógenos para los seres humanos.
Cromo (Cr)	Su movilidad y toxicidad dependen de su estado de oxidación. El Cr(VI) suele presentar mayor movilidad que el Cr(III) en determinadas condiciones ambientales.	Los compuestos de Cr(VI) presentan mayor toxicidad y están clasificados como carcinógenos para los seres humanos. El análisis de Cr total no permite diferenciar ambas formas.
Mercurio (Hg)	Puede proceder de fuentes naturales, minería, combustión y deposición atmosférica. Su comportamiento depende de las condiciones redox, la materia orgánica y las transformaciones químicas o biológicas.	Sus efectos dependen de la forma química. El metilmercurio presenta especial relevancia por su neurotoxicidad, mientras que las formas inorgánicas pueden afectar principalmente los riñones.
Níquel (Ni)	Puede encontrarse naturalmente en el material parental del suelo o provenir de aportes industriales y agrícolas. Su movilidad puede aumentar en condiciones de mayor acidez.	La exposición alimentaria crónica puede generar efectos sistémicos, mientras que algunos compuestos de Ni presentan evidencia suficiente de carcinogenicidad.
Plomo (Pb)	Es un elemento persistente que puede acumularse en el suelo por influencia minera, industrial, atmosférica o por el uso de agua contaminada. Generalmente presenta movilidad limitada, aunque puede permanecer disponible en determinadas condiciones.	Puede afectar los sistemas nervioso, cardiovascular y renal. La población infantil presenta mayor vulnerabilidad frente a sus efectos sobre el neurodesarrollo.

Nota. Elaboración propia con base en International Agency for Research on Cancer (IARC, 2012)

2.3.2.3. Fuentes de contaminación en suelos agrícolas

La presencia de metales pesados en los suelos agrícolas responde a la combinación de fuentes geogénicas y antropogénicas. Las fuentes geogénicas se relacionan con la composición del material parental, la meteorización de rocas y los procesos de formación del suelo, los cuales determinan concentraciones naturales de fondo que pueden variar entre regiones. Este origen puede ser especialmente relevante para elementos como As, Cr y Ni, aunque su importancia depende de la geología local (Hou et al., 2020).

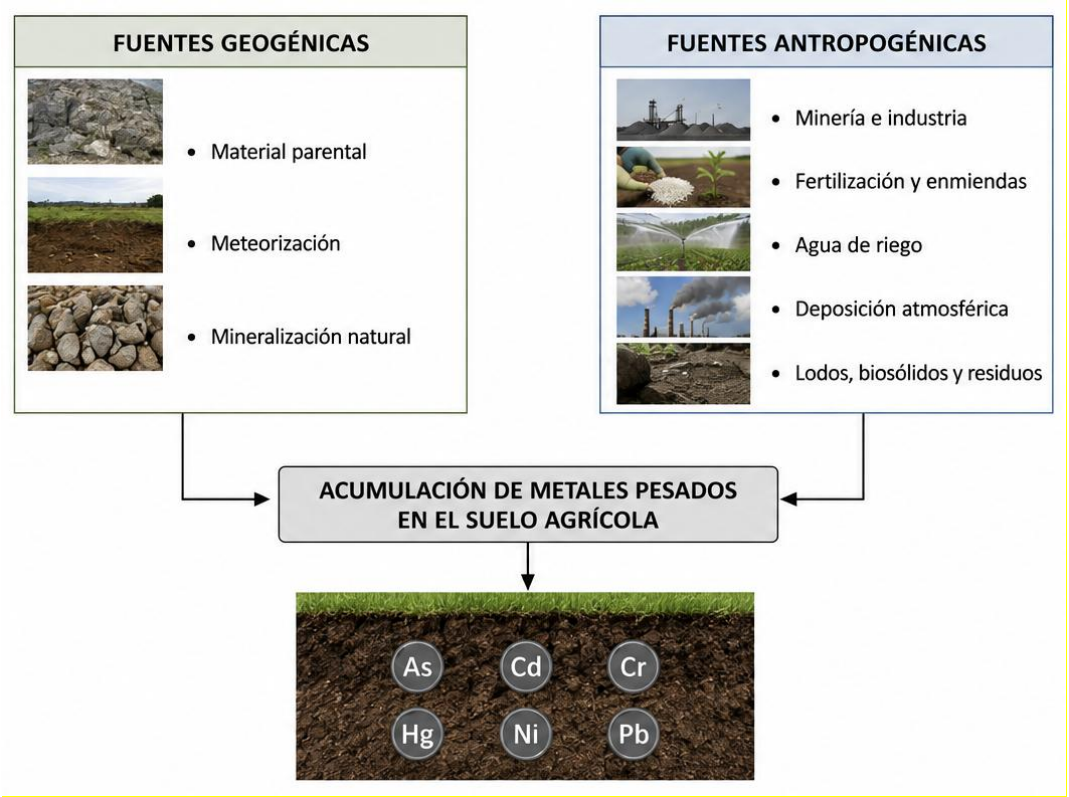
Las fuentes antropogénicas comprenden actividades mineras y metalúrgicas, deposición atmosférica, uso de agua de riego contaminada, aplicación continua de fertilizantes minerales y orgánicos, incorporación de lodos o biosólidos y emisiones industriales o vehiculares. La contribución de cada fuente depende del contexto territorial y de las prácticas desarrolladas en el sistema productivo; por ello, una concentración elevada no permite determinar automáticamente su origen sin análisis complementarios de fuentes y condiciones del sitio (Hou et al., 2020; Wan et al., 2024).

En los suelos peruanos destinados al cultivo de palta, Solórzano Acosta et al. (2025) identificaron una distribución espacial heterogénea del Cd y asociaciones con el material parental, los cationes intercambiables y otros elementos traza. Estos resultados muestran que las características geológicas y edáficas pueden influir en la

concentración del metal; sin embargo, no permiten atribuir un único origen a todos los valores registrados en las regiones productoras.

Figura 7.

Principales fuentes de metales pesados en suelos agrícolas.



Nota. Elaboración propia con base en Hou et al. (2020) y Wan et al. (2024).

2.3.3. Comportamiento ambiental de los metales

En los suelos agrícolas, los metales pueden encontrarse disueltos en la solución del suelo, adsorbidos en partículas minerales, asociados con la materia orgánica o formando compuestos de baja solubilidad. La distribución entre estas formas influye en su movilidad, persistencia y disponibilidad para la absorción vegetal. Por ello, la concentración total de un metal no representa

necesariamente la fracción que puede desplazarse o incorporarse a los cultivos (Templeton et al., 2000; Li et al., 2022).

El comportamiento de los metales depende tanto de sus propiedades químicas como de las características del suelo. Factores como el pH, el potencial de oxidación-reducción, la materia orgánica, las arcillas y los óxidos de hierro y manganeso pueden favorecer su retención o movilización. En consecuencia, suelos con concentraciones totales similares pueden presentar diferentes niveles de disponibilidad y transferencia hacia las plantas (Li et al., 2022; Deng et al., 2022).

2.3.3.1. Propiedades fisicoquímicas

La especiación química se refiere a la distribución de un elemento entre diferentes formas químicas, las cuales pueden variar según su estado de oxidación, su asociación con otros compuestos y las condiciones del medio. Estas diferencias influyen en la solubilidad, movilidad, biodisponibilidad y toxicidad de los metales presentes en el suelo (Templeton et al., 2000).

En la matriz edáfica, los metales pueden permanecer como iones disueltos, adsorberse en superficies de arcillas y óxidos de hierro o manganeso, formar complejos con la materia orgánica o precipitar como compuestos de menor solubilidad. Las formas disueltas presentan, generalmente, una mayor capacidad de desplazamiento y contacto con las raíces, mientras que las formas fuertemente retenidas presentan una movilidad más limitada (Li et al., 2022).

El estado de oxidación resulta especialmente importante para elementos como el arsénico y el cromo. Las diferentes formas de As presentan distinta afinidad por los componentes minerales del suelo, mientras que el Cr(VI) suele mostrar mayor movilidad que el Cr(III), el cual tiende a permanecer adsorbido o precipitado bajo determinadas condiciones (Li et al., 2022).

2.3.3.2. Biodisponibilidad y movilidad en suelos

Las propiedades del suelo regulan la retención, movilidad y disponibilidad de los metales. Su efecto depende del elemento, su forma química y la interacción entre los diferentes componentes de la matriz edáfica (Li et al., 2022).

El pH constituye uno de los principales factores de control. En términos generales, la disminución del pH puede favorecer la liberación de metales catiónicos como Cd y Ni desde la fase sólida hacia la solución del suelo. Sin embargo, el comportamiento de especies aniónicas, como los arsenatos y cromatos, puede variar según el pH y la composición mineral del suelo (Li et al., 2022).

El potencial de oxidación-reducción influye en la transformación de elementos sensibles a las condiciones redox, como As y Cr. También puede modificar la estabilidad de los óxidos de hierro y manganeso, provocando la retención o liberación de metales previamente asociados con estas fases minerales (Deng et al., 2022; Li et al., 2022).

La materia orgánica puede retener metales mediante procesos de adsorción y formación de complejos. No obstante, determinadas fracciones orgánicas disueltas también pueden aumentar su movilidad al formar complejos solubles. Por ello, su efecto depende de las características de la materia orgánica y del metal involucrado (Li et al., 2022).

Las arcillas y la capacidad de intercambio catiónico proporcionan superficies y cargas capaces de retener metales catiónicos. De manera similar, los óxidos de hierro y manganeso presentan una elevada capacidad de adsorción y pueden desempeñar un papel importante en la inmovilización de metales en el suelo (Li et al., 2022).

2.3.4. Transferencia suelo–planta–fruto

La transferencia de metales desde el suelo hacia los tejidos vegetales depende de la fracción disponible en la solución del suelo, la capacidad de absorción de las raíces y los mecanismos internos de transporte y acumulación. Este proceso varía según el elemento, las propiedades del suelo, la especie vegetal y el órgano evaluado, por lo que la concentración presente en el suelo no determina necesariamente una acumulación proporcional en el fruto (Adamo et al., 2014; Riyazuddin et al., 2021).

Figura 8.

Diagrama de vías de incorporación y exposición por consumo de palta



Nota. Elaboración propia basada para el enfoque de contaminantes y principios de control (GAP/GHP/GMP) aplicables a frutas frescas.

2.3.4.1. Absorción radicular

La absorción se inicia en la rizósfera, donde los metales disponibles entran en contacto con las raíces. Su ingreso puede producirse a través de los espacios de la pared celular o mediante transportadores de membrana empleados normalmente para elementos esenciales. Algunos metales no esenciales pueden utilizar estas mismas rutas debido a su semejanza química con nutrientes requeridos por la planta (Riyazuddin et al., 2021).

Sin embargo, una parte de los metales puede quedar retenida en las paredes celulares o almacenada en las células de la raíz, lo que

reduce su desplazamiento hacia los tejidos aéreos y comestibles (Riyazuddin et al., 2021).

2.3.4.2. Translocación interna

Después de ingresar a la raíz, los metales pueden permanecer retenidos en ella o ser transportados hacia otros órganos de la planta. El xilema participa principalmente en el movimiento desde la raíz hacia los tejidos aéreos, mientras que el floema interviene en la redistribución hacia órganos de almacenamiento, como los frutos (Mendoza-Cózatl et al., 2011).

La complejación y el almacenamiento celular contribuyen a reducir la concentración libre de los metales y condicionan la cantidad que finalmente alcanza los órganos comestibles. Por ello, la translocación depende tanto de las propiedades del elemento como de los mecanismos fisiológicos de regulación de la planta (Mendoza-Cózatl et al., 2011; Riyazuddin et al., 2021).

2.3.4.3. Particularidades de *Persea americana*

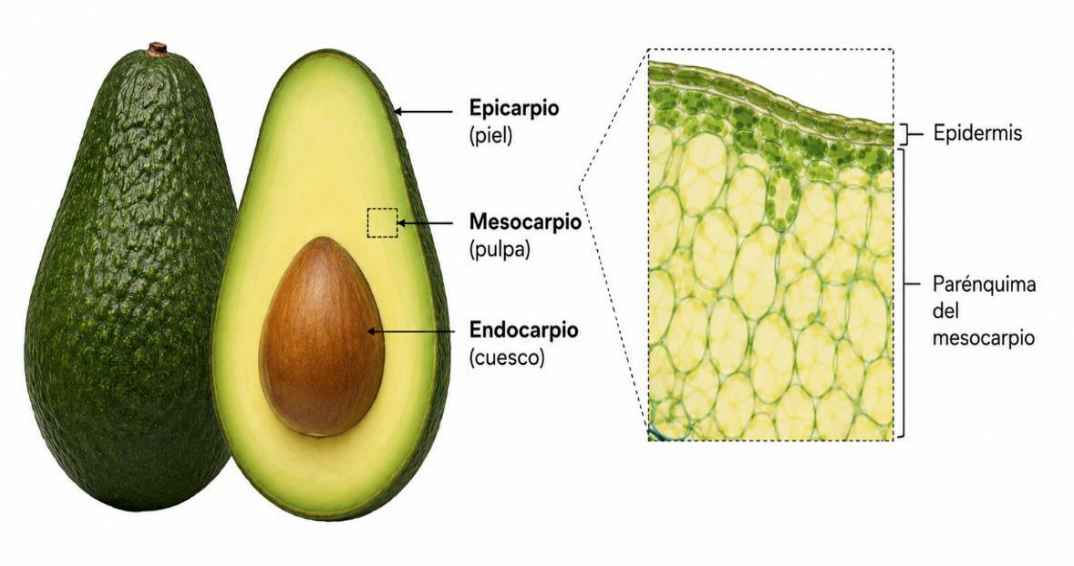
En el fruto de la palta, el mesocarpio o pulpa constituye la parte comestible y la matriz relevante para la exposición alimentaria. Su composición elemental depende de la disponibilidad de los metales en el suelo y de los mecanismos de absorción, retención y transporte del árbol.

Reddy et al. (2014) encontraron diferencias entre la composición elemental del suelo y la del mesocarpio de palta, lo que evidencia que

la planta puede limitar la acumulación de determinados elementos en la pulpa. No obstante, esta capacidad puede variar según las condiciones edáficas, el metal y el contexto territorial. En el Perú, la distribución heterogénea de Cd en suelos cultivados con palta confirma la importancia de evaluar conjuntamente la matriz suelo y la parte comestible del fruto (Solórzano Acosta et al., 2025).

Figura 9.

Anatomía del fruto de palta (Persea americana).



Nota. *Adaptado de Téliz, D. (2013). El cultivo del palto (Persea americana Mill.). INIA.*

2.3.5. Bioacumulación de metales

La bioacumulación describe la incorporación de un metal desde una matriz ambiental hacia un organismo o tejido biológico. En los sistemas agrícolas, su evaluación permite comparar la concentración presente en el suelo con la determinada en la parte vegetal de interés (Guadalupe et al., 2024).

2.3.5.1. Factor de bioacumulación (BAF)

El factor de bioacumulación (BAF) expresa la relación entre la concentración de un metal en el tejido vegetal y su concentración en el suelo. Para el sistema suelo–palta, se representa mediante la siguiente ecuación:

$$BAF_i = \frac{C_{\text{pulpa},i}}{C_{\text{suelo},i}}$$

Donde:

- BAF_i: factor de bioacumulación del metal i, adimensional.
- $C_{pulpa,i}$: concentración del metal $i$en la pulpa de palta, en mg/kg.
- $C_{\text{suelo},i}$: concentración del metal $i$en el suelo, en mg/kg.

Para que la relación sea comparable, ambas concentraciones deben estar expresadas en la misma unidad y en una base equivalente de peso (Guadalupe et al., 2024).

Interpretación

- **BAF < 1:** la concentración del metal en la pulpa es inferior a la registrada en el suelo, lo que indica transferencia relativa limitada.
- **BAF = 1**: las concentraciones en ambas matrices son equivalentes.
- **BAF > 1**: existe enriquecimiento relativo del metal en la pulpa respecto del suelo.

El BAF caracteriza la transferencia relativa suelo–fruto, pero no constituye por sí solo un criterio de inocuidad ni permite identificar los mecanismos fisiológicos responsables de la acumulación.

2.3.6. Evaluación de la contaminación del suelo

La contaminación por metales puede caracterizarse comparando las concentraciones determinadas en el suelo con valores de fondo. El PI muestra la relación directa con el fondo, mientras que el Igeo incorpora un factor de corrección para considerar la variabilidad natural del material parental (Guadalupe et al., 2024).

2.3.6.1. Índice de contaminación individual (PI)

Es un indicador utilizado para evaluar el nivel de contaminación de un metal específico en el suelo mediante la comparación entre la concentración medida del metal en la muestra y su valor de referencia o valor de fondo, se representa mediante la siguiente ecuación:

$$PI_i = \frac{C_i}{B_i}$$

Donde:

- PI_i: índice de contaminación del metal i(adimensional).
- C_i: concentración del metal $i$en suelo (mg/kg).
- B_i: valor de fondo del metal i(mg/kg).

Interpretación

Tabla 2.

Interpretación del índice de contaminación individual (PI)

Valor de PI	Nivel de contaminación
PI<1	Ausente
1≤PI<3	Bajo
PI≥3	Moderado

Nota. PI = índice de contaminación individual. La clasificación permite interpretar el nivel de contaminación de un metal específico respecto a su valor de fondo. Adaptado de Ferreira et al. (2022).

Su interpretación permite clasificar el nivel de contaminación individual del metal como bajo, moderado o fuerte, según su relación con el valor de fondo; sin embargo, debe complementarse con otros índices para una evaluación ambiental más integral (Ferreira et al., 2022).

2.3.6.2. Índice de geoacumulación (Igeo)

El índice de geoacumulación (Igeo) es un indicador utilizado para evaluar el grado de contaminación de metales pesados en suelos y sedimentos mediante la comparación entre la concentración medida de un metal en la muestra y su valor de fondo geológico. Este índice permite determinar el nivel de acumulación de metales en el ambiente y distinguir entre concentraciones naturales y aquellas derivadas de actividades antropogénicas.

El índice de geoacumulación incorpora un factor de corrección (1.5) para variaciones naturales del material parental:

$$Igeo_i = log_2\left(\frac{C_{soil,i}}{1.5\ B_i}\right)$$

Donde:

- $Igeo_i$: índice de geoacumulación del metal i(adimensional).
- $C_{suelo,i}$: concentración del metal $i$en suelo (mg/kg).
- B_i: valor de fondo del metal i(mg/kg).
- 1.5: factor de corrección por variabilidad natural del fondo.

Interpretación

Tabla 3.

Interpretación del índice de geoacumulación (Igeo)

Valor de Igeo	Clasificación
Igeo≤0	Prácticamente no contaminado
0<Igeo≤1	No contaminado a moderadamente contaminado
1<Igeo≤2	Moderadamente contaminado
2<Igeo≤3	Moderadamente a fuertemente contaminado
3<Igeo≤4	Fuertemente contaminado
4<Igeo≤5	Fuertemente a extremadamente contaminado
Igeo>5	Extremadamente contaminado

Nota. Clasificación empleada en Guadalupe et al. (2024).

El Igeo permite interpretar el grado de acumulación de cada metal en el suelo respecto a su valor de fondo, clasificando la contaminación desde niveles no contaminados hasta extremadamente contaminados. Su uso es útil para evidenciar enriquecimiento metálico en el suelo y apoyar la evaluación ambiental del área estudiada (Müller, 1969; Ferreira et al., 2022).

2.3.7. Evaluación del riesgo ecológico

La evaluación del riesgo ecológico potencial incorpora dos componentes: el nivel de contaminación del metal respecto del fondo y su toxicidad relativa. El ER representa la contribución individual de cada elemento, mientras que el RI integra el conjunto de metales evaluados (Guadalupe et al., 2024; Hamid et al., 2022).

2.3.7.1. Riesgo ecológico (ER)

El riesgo ecológico individual (ER) se obtiene multiplicando el índice de contaminación por el coeficiente de respuesta tóxica del metal, se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$ER_i = T_i \times PI_i$$

Donde:

- ER_i: riesgo ecológico individual del metal i, adimensional.
- T_i: coeficiente de respuesta tóxica del metal i, adimensional.
- PI_i: índice de contaminación individual del metal i, adimensional.

Interpretación

Tabla 4.

Interpretación del Riesgo Ecológico (ER)

Valor de ER	Nivel de riesgo ecológico
ER<40	Bajo
40≤ER<80	Moderado
80≤ER<160	Considerable
160≤ER<320	Alto
ER≥320	Muy alto

Nota. Clasificación basada en Hamid et al. (2022).

Un ER elevado puede deberse a una concentración superior al fondo, a un coeficiente de respuesta tóxica alto o a ambos factores. Por esta razón, un metal presente en menor concentración puede contribuir más al riesgo ecológico que otro metal más abundante, pero con menor ponderación toxicológica. El ER representa un riesgo potencial y no un daño ecológico observado directamente

2.3.7.3. Riesgo ecológico total (RI)

El riesgo ecológico total integra la contribución de todos los metales evaluados en el sitio:

$$RI = \sum_{i=1}^{n} E\,R_i$$

Donde:

- RI: índice de riesgo ecológico potencial, adimensional.

- ER_i: riesgo ecológico individual del metal i.

- n: número de metales incluidos en la evaluación.

Interpretación

Tabla 5.

Interpretación del Riesgo Ecológico Total (RI)

Valor de RI	Nivel de riesgo ecológico potencial
RI<150	Bajo
150≤RI<300	Moderado
300≤RI<600	Considerable
RI≥600	Muy alto

Nota. Clasificación basada en Hamid et al. (2022).

El RI representa el riesgo acumulado de los metales considerados. Debe analizarse conjuntamente con los valores individuales de ER, debido a que un solo metal puede contribuir de manera predominante al resultado total. Por tanto, un RI moderado no significa que todos los metales presenten riesgo moderado.

2.3.8. Evaluación del riesgo sanitario

La evaluación sanitaria por exposición dietaria relaciona la concentración del metal en la parte comestible con el consumo del alimento y el peso corporal. La EDI cuantifica la exposición, mientras que HQ, HI y CR permiten caracterizar sus posibles implicancias no carcinogénicas y carcinogénicas (Guadalupe et al., 2023) (Guadalupe et al., 2023)

2.3.8.1. Ingesta diaria estimada (EDI)

La ingesta diaria estimada (EDI) representa la cantidad de un metal ingerida diariamente mediante el consumo de palta por unidad de peso corporal. Se representa mediante la siguiente ecuación:

$$EDI_i = \frac{C_i \times IR}{BW}$$

Donde:

- EDI_i: ingesta diaria estimada del metal i(mg/kg·día).
- C_i: concentración del metal $i$en pulpa de palta (mg/kg).
- IR: tasa de ingesta de palta (kg/día).
- BW: peso corporal (kg).

Cuando el consumo se encuentre en gramos por día, debe convertirse a kilogramos:

$$IR_{\text{kg/día}} = \frac{IR_{\text{g/día}}}{1000}$$

Interpretación

La EDI caracteriza la magnitud de la exposición dietaria, pero no determina por sí sola la existencia de riesgo sanitario. Por ello, no debe clasificarse directamente como segura, peligrosa, alta o baja. Su interpretación requiere compararla con un valor toxicológico de

referencia mediante el HQ o incorporarla en la estimación del CR (Guadalupe et al., 2023).

2.3.8.2. Cociente de peligro (HQ)

El cociente de peligro (HQ) compara la exposición dietaria estimada con la dosis de referencia oral correspondiente al metal. Se expresa mediante la siguiente ecuación:

$$HQ_i = \frac{EDI_i}{RfD_i}$$

Donde:

- HQ_i: cociente de peligro del metal i, adimensional.
- EDI_i: ingesta diaria estimada del metal i, en mg/kg de peso corporal/día.
- RfD_i: dosis de referencia oral del metal i, en mg/kg de peso corporal/día.

Interpretación

- **HQ ≤ 1:** la exposición estimada se encuentra en el nivel de referencia o por debajo de él; los efectos no carcinogénicos adversos son poco probables.
- **HQ > 1:** la exposición supera el valor de referencia y señala una posible preocupación que requiere evaluación adicional.

El HQ no expresa una probabilidad de enfermar ni indica la gravedad de un posible efecto. Un valor superior a 1 tampoco significa

que el efecto ocurrirá necesariamente; muestra que la exposición excede el nivel de referencia utilizado (U.S. EPA, 2025)

2.3.8.3. Índice de peligro (HI)

El índice de peligro (HI) representa la suma de los cocientes de peligro de los metales considerados, bajo un supuesto de aditividad. Se expresa mediante la siguiente ecuación:

$$HI = \sum_{i=1}^{n} H\,Q_i$$

Donde:

- HI: índice de peligro, adimensional.
- HQ_i: cociente de peligro de cada metal.
- n: número de metales incluidos en la evaluación.

Interpretación

- **HI ≤ 1:** bajo nivel de preocupación por efectos no carcinogénicos combinados.
- **HI > 1:** posible preocupación por efectos no carcinogénicos combinados y necesidad de una evaluación más detallada.

La U.S. EPA recomienda interpretar la suma de HQ principalmente cuando las sustancias presentan efectos compatibles o

afectan un mismo órgano o sistema. Un HI superior a 1 no constituye una predicción directa de daño (U.S. EPA, 2026).

2.3.8.4. Riesgo carcinogénico (CR)

El riesgo carcinogénico (CR) estima la probabilidad incremental teórica asociada con una exposición crónica durante la vida. Se calcula únicamente para los metales que cuentan con un factor de pendiente carcinogénica aplicable a la vía de exposición evaluada. (U.S. EPA, 2026)

Riesgo carcinogénico por metal:

$$CR_i = EDI_i \times SF_i$$

Donde:

- CR_i: riesgo carcinogénico incremental del metal i, adimensional.
- EDI_i: exposición dietaria estimada del metal i, en mg/kg de peso corporal/día.
- SF_i: factor de pendiente carcinogénica, expresado en $(\mathrm{mg/kg\ de\ peso\ corporal/día})^{-1}$.

Interpretación

Valor de CR	Interpretación
$(\mathrm{CR} < 1 \times 10^{-6})$	Riesgo incremental bajo
$(1 \times 10^{-6} \leq \mathrm{CR} \leq 1 \times 10^{-4})$	Rango utilizado para la gestión del riesgo

$(\mathrm{CR} > 1 \times 10^{-4})$	Valor superior al rango de gestión y de atención prioritaria

La U.S. EPA utiliza 10^{-6}como riesgo objetivo de referencia para evaluaciones iniciales y recomienda precaución para evitar que el riesgo acumulado residual supere 10^{-4}. Estos valores constituyen criterios de gestión del riesgo, no límites máximos regulatorios para alimentos.

El CR tampoco representa un diagnóstico individual. Un valor de 1×10^{-5}, por ejemplo, expresa una estimación teórica de un caso adicional por cada 100 000 personas expuestas bajo las condiciones modeladas.

2.3.9. Enfoque One Health

One Health es un enfoque integrado que reconoce la interdependencia entre la salud de las personas, los animales, las plantas y los ecosistemas. Su aplicación permite abordar los peligros alimentarios considerando conjuntamente su origen ambiental, su incorporación al sistema productivo y la exposición de los consumidores. (FOA, 2026; WHO, 2021)

2.3.9.1. Dimensiones ambiental, productiva y humana

En el contexto de los metales pesados en la cadena de la palta, el enfoque comprende tres dimensiones directamente relacionadas:

- **Dimensión ambiental:** presencia, movilidad y riesgo ecológico de los metales en el suelo.

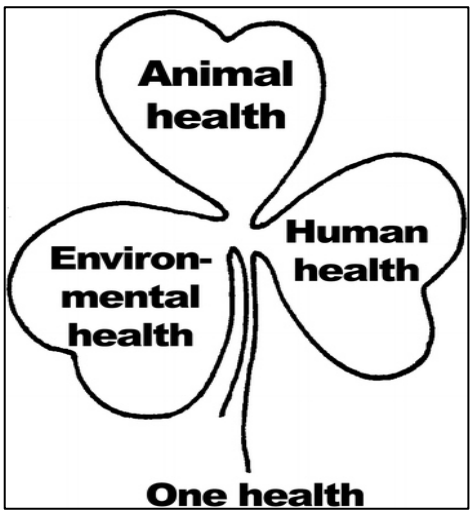
- **Dimensión productiva:** absorción y transferencia hacia la pulpa de palta.

- **Dimensión humana:** exposición dietaria y caracterización del riesgo sanitario.

La interacción entre estas dimensiones permite analizar el sistema suelo–cultivo–consumo humano como una cadena integrada y no como procesos independientes (Boqvist et al., 2018).

Figura 10.

Elementos clave incluidos en One Health.



*Nota***.** Recuperado de Boqvist et al. (2018, Fig. 1)

2.3.9.2. One Health e inocuidad alimentaria

En inocuidad alimentaria, One Health promueve la identificación y gestión de los peligros a lo largo de la cadena productiva. Para los contaminantes químicos, este enfoque vincula las condiciones del suelo con la calidad del producto y la protección de la salud del consumidor,

favoreciendo decisiones coordinadas y basadas en evidencia.(FAO, 2025)

2.3.10. Gestión de la calidad e inocuidad

2.3.10.1. Calidad e inocuidad alimentaria

La inocuidad alimentaria se refiere a la garantía de que un alimento no causará daño al consumidor cuando sea preparado y consumido de acuerdo con su uso previsto. La calidad comprende además atributos nutricionales, sensoriales, comerciales y de vida útil; sin embargo, estos atributos no sustituyen el cumplimiento de los requisitos de inocuidad. (Codex Alimentarius Commission, 2026; FOA & WAH, 2003)

En una cadena agroindustrial, la presencia de contaminantes químicos requiere una gestión preventiva basada en el monitoreo de suelos, agua e insumos; la verificación del producto; la trazabilidad de los lotes; y el cumplimiento de los límites establecidos por los mercados de destino. La información sobre contaminación, transferencia y exposición permite priorizar regiones, metales y escenarios que requieren mayor vigilancia.

Desde la Ingeniería Industrial, la evaluación de riesgos proporciona criterios para fortalecer la toma de decisiones, asignar recursos de control, reducir la probabilidad de no conformidades y mejorar la gestión de la calidad e inocuidad en la cadena agroexportadora.

2.3.11. Simulación Monte Carlo

La simulación Monte Carlo es una técnica numérica que utiliza muestreos repetidos de las variables de entrada para obtener una distribución de posibles resultados. A diferencia de una evaluación determinística, que genera un único valor, el enfoque probabilístico permite representar diferentes escenarios y estimar la probabilidad de que un indicador alcance determinados niveles (Guadalupe et al., 2023).

El muestreo Latin Hypercube divide el rango de cada distribución en intervalos y selecciona valores de manera estratificada, mejorando la representación de las variables con un número determinado de iteraciones.

2.3.11.1. Incertidumbre y variabilidad

La variabilidad representa diferencias reales entre regiones, muestras, concentraciones, consumidores o patrones de ingesta. Estas diferencias forman parte del sistema estudiado y no desaparecen mediante la obtención de más información.

La incertidumbre se origina en el conocimiento incompleto sobre los parámetros, las mediciones, el tamaño de muestra o los supuestos del modelo. Su reducción puede lograrse mediante información adicional o procedimientos analíticos más precisos.(Benford et al., 2018).

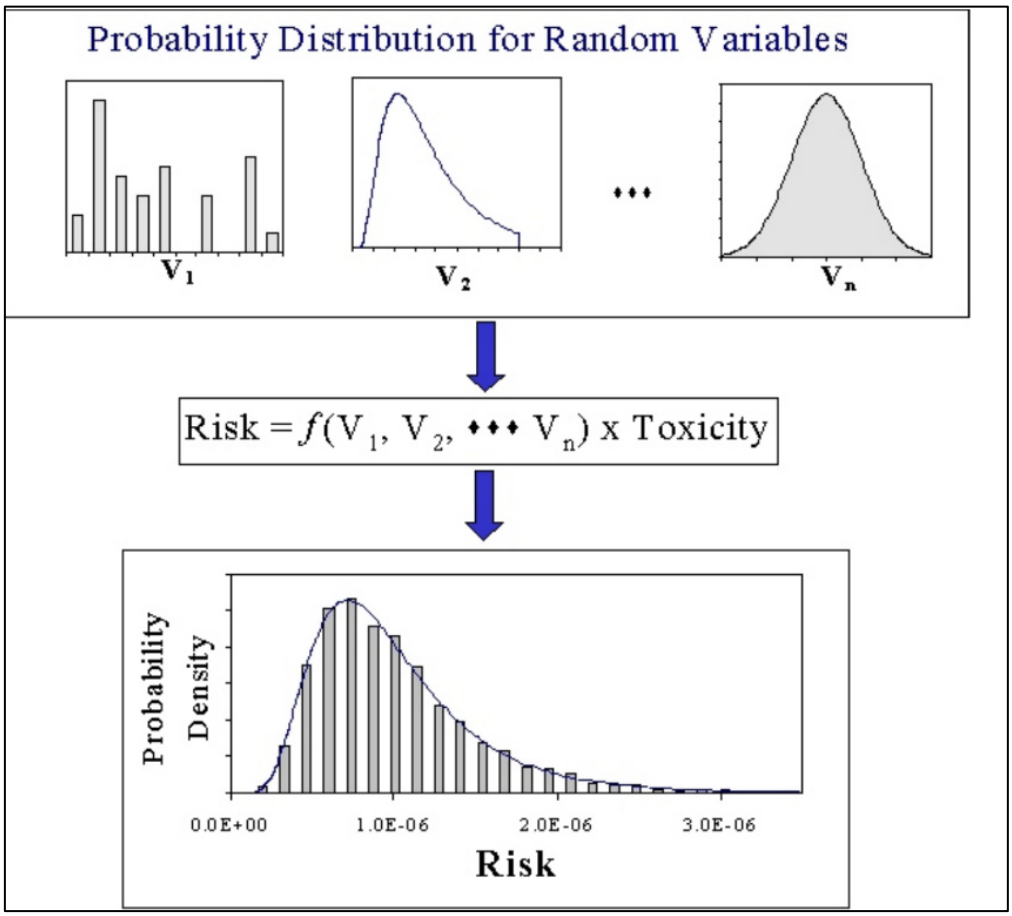
La simulación probabilística permite incorporar ambos componentes mediante distribuciones y expresar los resultados a través de estadísticos como la media y los percentiles:

- **P5:** extremo inferior de la distribución.
- **P50:** mediana o escenario central.
- **P95:** extremo superior o escenario de mayor exposición.

El P5 no debe denominarse “escenario base” y el P95 no representa automáticamente un “peor caso”; corresponde a un escenario alto dentro de la distribución modelada.

Figura 11.

Modelo conceptual de la simulación Monte Carlo



Nota. Tomado de *Risk Assessment Guidance for Superfund: Volume III—Part A, Process for Conducting Probabilistic Risk Assessment* (Figura 1-2, p. 1-14), por U.S. Environmental Protection Agency (2001)

2.4. Definición de términos

BAF: Relación entre la concentración de un metal en la pulpa y su concentración en el suelo.

Concentración de fondo: Valor natural o de referencia de un metal empleado para comparar la concentración determinada en el suelo.

CR: Estimación del riesgo incremental de cáncer asociado con una exposición crónica.

EDI: Cantidad diaria estimada de un metal ingerida por unidad de peso corporal.

ER: Indicador que integra el nivel de contaminación individual y la toxicidad relativa de un metal.

HQ: Relación entre la exposición estimada y la dosis de referencia de un metal.

HI: Suma de los HQ considerados en la evaluación no carcinogénica.

Igeo: Índice que compara la concentración de un metal con su valor de fondo, incorporando un factor de variación natural.

Incertidumbre: Falta de conocimiento sobre parámetros, mediciones o supuestos del modelo.

Inocuidad alimentaria: Garantía de que el alimento no causará daño cuando sea consumido según su uso previsto.

Metales pesados: Denominación operacional utilizada para As, Cd, Cr, Hg, Ni y Pb en esta investigación.

Muestreo Latin Hypercube: Técnica de muestreo estratificado utilizada para representar el rango de las distribuciones de entrada.

One Health: Enfoque integrador que reconoce la interdependencia entre la salud humana, vegetal, animal y ambiental.

PI: Relación entre la concentración de un metal en el suelo y su valor de fondo.

Pulpa o mesocarpio: Parte comestible del fruto de palta evaluada como vía de exposición alimentaria.

RfD: Estimación de la exposición diaria probablemente exenta de efectos no carcinogénicos apreciables.

RI: Suma de los riesgos ecológicos individuales de los metales evaluados.

SF: Parámetro que relaciona la exposición crónica con el riesgo carcinogénico incremental.

Simulación Monte Carlo: Técnica que utiliza muestreos repetidos para generar una distribución probabilística de resultados.

Transferencia suelo–planta–fruto: Movimiento de los metales desde el suelo, a través de la absorción y el transporte vegetal, hasta el fruto.

Variabilidad: Diferencias reales entre muestras, regiones, individuos o escenarios.

CAPÍTULO III: HIPÓTESIS Y VARIABLES

3.1. Hipótesis

3.1.1. Hipótesis principal

H_1. Los niveles de contaminación por metales pesados en los suelos y frutos de palta (*Persea americana*) presentan variabilidad entre las regiones productoras y están asociados con diferentes niveles de riesgo ecológico y sanitario, estimados mediante simulación Monte Carlo.

3.1.2. Hipótesis secundarias

H_1.1. Las concentraciones de al menos uno de los metales As, Cd, Cr, Hg, Ni y Pb presentes en los suelos difieren significativamente entre las regiones productoras.

H_1.2. Las concentraciones de al menos uno de los metales As, Cd, Cr, Hg, Ni y Pb presentes en los frutos de palta difieren significativamente entre las regiones productoras.

H_1.3. Los niveles de contaminación y riesgo ecológico de los suelos varían según el metal y la región, de acuerdo con los índices Igeo, PI, ER y RI.

H_1.4. La transferencia de metales pesados desde el suelo hacia la pulpa de palta es predominantemente limitada, con valores de BAF inferiores a 1 para la mayoría de los metales y regiones productoras.

H_1.5. La exposición dietaria a los metales presentes en el fruto de palta presenta niveles bajos, con valores de HQ y HI inferiores a 1 y valores de CR iguales o inferiores a 1×10^{-4} en los escenarios probabilísticos evaluados.

3.2. Variables

3.2.1. Variable independiente

Contaminación por metales pesados en suelos y frutos de palta *(Persea americana)*

La variable independiente corresponde a las concentraciones de Ar, Cd, Cr, Hg, Ni y Pb presentes en los suelos agrícolas y en la pulpa de palta. Comprende la caracterización de la contaminación del suelo mediante PI e Igeo y la evaluación de la transferencia relativa de los metales desde el suelo hacia la parte comestible mediante el BAF. La variable se organiza en una dimensión ambiental, referida a la presencia y contaminación de los metales en los suelos agrícolas, y una dimensión productiva, relacionada con su presencia en la pulpa y su transferencia dentro del sistema suelo–fruto.

3.2.2. Variable dependiente

Riesgos ecológicos y sanitarios

La variable dependiente comprende los riesgos potenciales asociados con la presencia de metales pesados en los suelos agrícolas y en la pulpa de palta. El riesgo ecológico se caracteriza mediante el ER y el RI, mientras que la exposición dietaria y los riesgos sanitarios se estiman mediante EDI, HQ, HI y CR. La variable se organiza en una dimensión ambiental, correspondiente al riesgo ecológico del suelo, y una dimensión humana, relacionada con la exposición por consumo de palta y los riesgos sanitarios no carcinogénico y carcinogénico.

3.3. Operacionalización de las variables

Tabla 6. *Definición Operacional*

Variables	Definición conceptual	Definición operacional	Dimensión (Enfoque One Health)	Indicadores
Contaminación por metales pesados en suelos y frutos de palta (Variable Independiente)	La contaminación por metales pesados implica la presencia de elementos tóxicos persistentes y bioacumulativos en el ambiente, representando un riesgo para la salud y la seguridad alimentaria (WHO, 2023; FAO, 2022).	Se determina mediante la cuantificación de As, Cd, Cr, Hg, Ni y Pb en muestras de suelo agrícola y pulpa de palta mediante espectroscopía de emisión atómica por plasma inducido por microondas (MP-AES). Las concentraciones se expresan en mg/kg.	**Ambiental:** Contaminación del suelo.	Concentración de As, Cd, Cr, Hg, Ni y Pb en suelo, expresada en mg/kg.
			Productiva: presencia de metales en frutos de palta.	Concentración de As, Cd, Cr, Hg, Ni y Pb en pulpa de palta, expresada en mg/kg
Riesgo ecológico y sanitarios (Variable Dependiente)	El riesgo ecológico representa la posibilidad de efectos adversos sobre los organismos o ecosistemas debido a la presencia de contaminantes, mientras que el riesgo sanitario se relaciona con los posibles efectos sobre la salud humana derivados de la exposición dietaria a metales pesados. (USEPA, 2023; ATSDR, 2022).	Se estima a partir de las concentraciones de metales determinadas en el suelo y en la pulpa de palta. La contaminación y el riesgo ecológico se evalúan mediante Igeo, PI, ER y RI; la transferencia suelo–fruto mediante BAF; y la exposición y el riesgo sanitario mediante EDI, HQ, HI y CR. La variabilidad de los resultados se analiza mediante simulación Monte Carlo.	**Ambiental:** evaluación de la contaminación y del riesgo ecológico del suelo**.**	Igeo: índice de geoacumulación; PI: índice de contaminación individual; ER: riesgo ecológico individual; RI: índice de riesgo ecológico potencial.
			Productiva: transferencia de metales del suelo hacia la pulpa de palta.	BAF: factor de bioacumulación suelo–fruto.
			Humana: exposición dietaria y riesgo sanitario asociado al consumo de palta.	EDI: ingesta diaria estimada; HQ: cociente de peligro; HI: índice de peligro; CR: riesgo carcinogénico.

Nota. Elaboración propia.

CAPÍTULO IV: MATERIALES Y MÉTODOS

4.1. Área de estudio

Según la clasificación OCDE–FORD adoptada por CONCYTEC, esta investigación se ubica principalmente en 4.00.00 Ciencias agrícolas, con énfasis en 4.01.04 Ciencia del suelo y 4.01.06 Agronomía, por evaluar metales en suelo agrícola y su transferencia al fruto. De manera complementaria, por el componente de contaminación y evaluación de riesgo, se vincula con 1.05.08 Ciencias del medio ambiente.

4.2. Tipo y diseño de investigación

4.2.1. Tipo de Investigación

La investigación se desarrolla bajo un enfoque cuantitativo, ya que se basa en la medición objetiva de las concentraciones de metales pesados en muestras de suelo agrícola y frutos de palta, así como en el cálculo de indicadores de contaminación, riesgo ecológico y riesgo sanitario. Asimismo, se incorpora simulación probabilística de Monte Carlo con el fin de analizar la variabilidad e incertidumbre asociadas a la estimación de los indicadores de riesgo.

De acuerdo con Hernández et al. (2018), el estudio corresponde a un nivel correlacional–explicativo, dado que analiza la relación entre la contaminación por metales pesados en el suelo, su transferencia hacia el cultivo y los riesgos ecológicos y sanitarios asociados. El diseño de investigación es no experimental, ya que las variables no son manipuladas y

se analizan en su contexto natural. Asimismo, el estudio es transversal, debido a que la información fue recolectada en un único periodo correspondiente a la campaña agrícola 2024–2025.

En términos analíticos, el estudio evalúa la interacción entre los componentes ambiental, productivo y sanitario del sistema agrícola. Para ello se analizan: la contaminación por metales pesados en el suelo mediante la concentración de metales y los indicadores Igeo, PI , ER y RI; la transferencia de metales hacia el fruto mediante el indicador BAF; la presencia de metales en frutos de palta; y el riesgo para la salud humana estimado mediante los indicadores EDI, HQ, HI y CR, cuyos resultados son evaluados mediante simulación probabilística de Monte Carlo.

En síntesis, el diseño se estructura como:

Tabla 7.

Características del diseño metodológico de la investigación

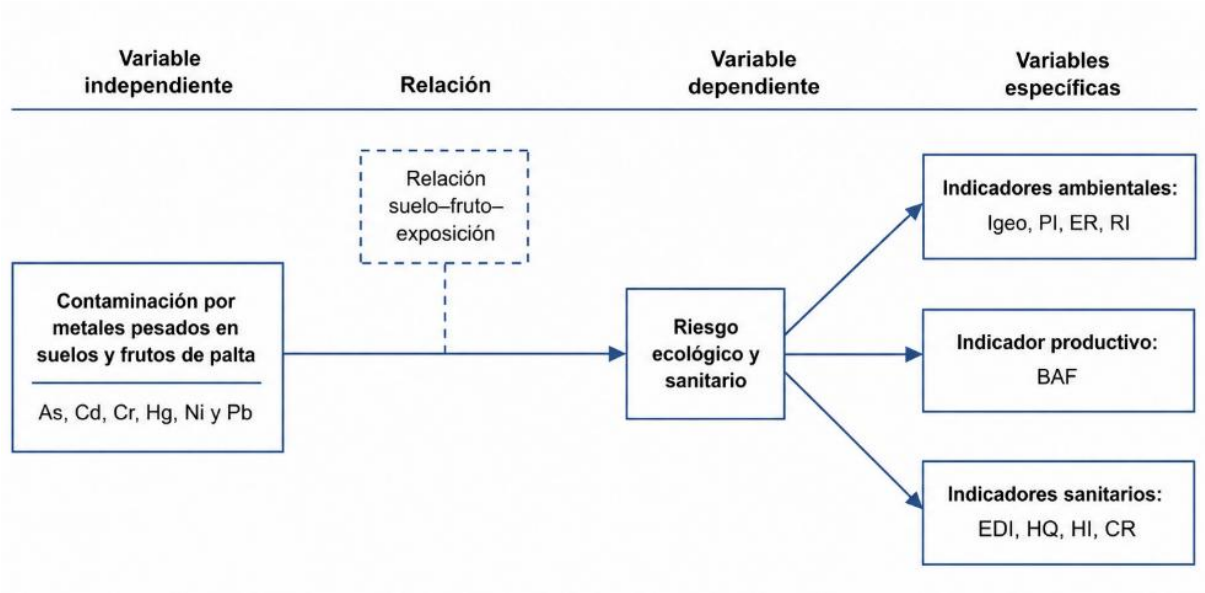
Elemento	Descripción
Enfoque	Cuantitativo
Nivel	Correlacional–explicativo
Diseño	No experimental
Temporalidad	Transversal (campaña agrícola 2024–2025)
Alcance	Análisis de la relación entre contaminación del suelo, transferencia al fruto y evaluación del riesgo ecológico y sanitario
Estrategia analítica	Modelación probabilística mediante simulación Monte Carlo para evaluar

	la incertidumbre en los indicadores de riesgo
Unidad de análisis	Sistema suelo–cultivo–fruto (*Persea americana*), considerando suelo agrícola y pulpa de palta
Fuente de datos	Mediciones primarias de laboratorio de concentraciones de metales pesados en suelo y fruto, utilizadas para el cálculo de indicadores de contaminación, bioacumulación y riesgo

Nota. Elaboración propia.

Figura 12.

Relación de variables



Nota. Elaboración propia.

4.3. Población y muestra

4.3.1. Unidad de análisis

Constituida por cada par de muestras suelo–fruto de palta (*Persea americana*) recolectadas en un mismo sitio agrícola. Cada unidad incluye:

- Una muestra de suelo agrícola (Csuelo),
- Una muestra del fruto producido en ese mismo punto de muestreo (Cpalta).

Este emparejamiento permite evaluar la relación directa entre la contaminación del suelo, la bioacumulación en el fruto y los riesgos ecológicos y sanitarios asociados.

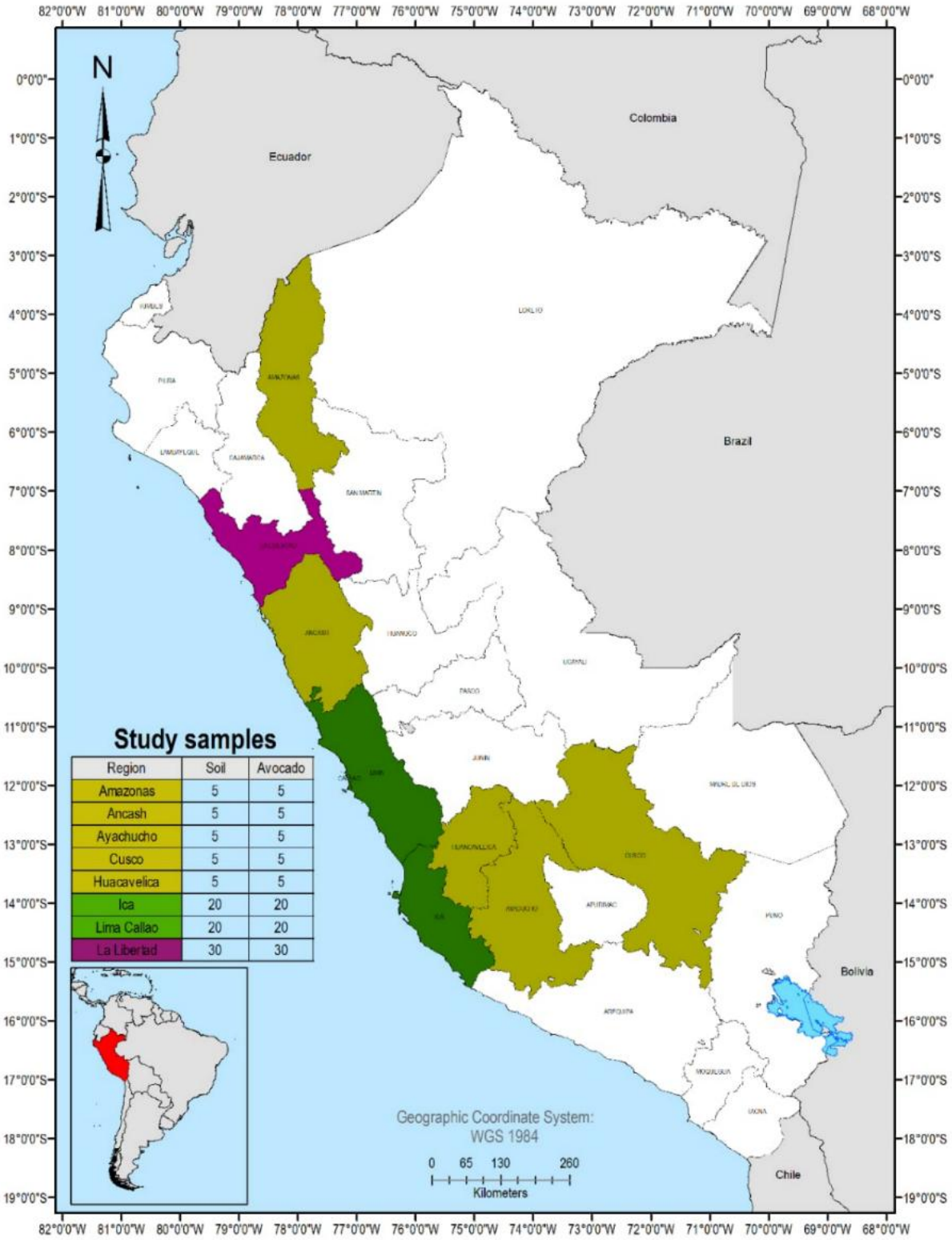
4.3.2. Población

Está constituida por:

1. **Población de suelos agrícolas:** Todos los suelos utilizados para el cultivo de palta en las regiones productoras del Perú consideradas en el estudio.
2. **Población de frutos de palta:** Todos los frutos generados en dichos suelos durante la campaña agrícola 2025.

Figura 13.

Mapa del Perú que muestra los sitios de muestreo.



Nota. Elaboración propia.

4.3.3. Tamaño de muestra

El tamaño de muestra total fue de 95 muestras pareadas, recolectadas entre enero y septiembre de 2025, distribuidas de la siguiente manera:

Tabla 8.

Tamaño de muestras

Departamento	Suelo	Fruto
Amazonas	5	5
Áncash	5	5
Ayacucho	5	5
Cusco	5	5
Huancavelica	5	5
Ica	20	20
La Libertad	30	30
Lima	20	20
Total	**95**	**95**

Nota. Elaboración propia.

Características del muestreo:

- Las muestras de suelo fueron aleatorias, tomadas de la capa superior (3–20 cm). Cada muestra de suelo es compuesta (3 submuestras mezcladas).
- Las muestras de fruto corresponden a paltas recolectadas en los mismos puntos, garantizando la relación suelo–fruto. Todas las muestras fueron almacenadas en condiciones controladas (4 °C y posteriormente –20 °C).

4.3.4. Tipo de selección

- Muestreo probabilístico aleatorio simple para las muestras de suelo, debido a que la selección se realizó de manera aleatoria dentro de la parcela agrícola (3-20 cm de profundidad).

- Muestreo no probabilístico dirigido (por conveniencia) para las muestras de fruto, ya que fueron recolectadas directamente de los árboles asociados a los mismos sitios de muestreo del suelo.

Se empleó un diseño mixto que corresponde a:

4.4. Procedimientos, técnicas e instrumentos de recolección de datos

4.4.1. Procedimiento de recolección de muestras

La recolección de muestras de suelo y frutos de palta (*Persea americana*) se realizó siguiendo un procedimiento sistemático y estandarizado, con el objetivo de asegurar la representatividad espacial y temporal de las muestras, así como minimizar riesgos de contaminación durante todas las etapas del muestreo.

La recolección se efectuó en dos fases consecutivas. La primera fase se llevó a cabo en las zonas de estudio seleccionadas, donde las muestras fueron recolectadas directamente de los productores. La segunda fase se realizó un mes después, aplicando el mismo procedimiento de muestreo, con la finalidad de garantizar la consistencia metodológica entre ambas campañas.

A. Recolección de muestras de suelo

Paso 1. Selección del punto de muestreo: Se seleccionaron puntos representativos dentro de las parcelas agrícolas, evitando zonas con alteraciones evidentes o fuentes puntuales de contaminación.

Paso 2. Extracción de submuestras: Las muestras de suelo se recolectaron aleatoriamente de la capa superficial (3–20 cm) utilizando

cucharas de acero inoxidable previamente limpiadas. En cada punto se obtuvieron tres submuestras.

Paso 3. Obtención de muestra compuesta: Las submuestras recolectadas fueron mezcladas completamente para conformar una muestra compuesta representativa del sitio de muestreo.

Paso 4. Envasado y rotulado: Las muestras compuestas fueron colocadas en bolsas de polipropileno y rotuladas.

Paso 5. Transporte y almacenamiento: Las muestras de suelo fueron transportadas en condiciones refrigeradas (4 °C) y posteriormente almacenadas a −20 °C hasta su procesamiento en laboratorio.

Tabla 9.

Diagrama de Operaciones del Proceso (DOP) para la recolección y conservación de muestras de suelo agrícola

N°	Descripción del Proceso	○	□	→	D	▽	⊙
1	Selección del punto de muestreo	X					
2	Verificación de ausencia de contaminación		X				
3	Extracción de submuestra 1 (3–20 cm)	X					
4	Extracción de submuestra 2	X					
5	Extracción de submuestra 3	X					
6	Mezcla de submuestras (muestra compuesta)						X
7	Envasado en bolsa de polipropileno	X					
8	Rotulado y verificación de datos		X				
9	Transporte al laboratorio en refrigeración			X			
10	Conservación en refrigeración (4 °C)				X		
11	Almacenamiento a −20 °C					X	

B. Recolección de muestras de palta

Paso 1. Selección de frutos: Los frutos de palta fueron recolectados manualmente, seleccionando únicamente aquellos con estado de madurez adecuado, libres de daños físicos visibles y sin signos de deterioro.

Paso 2. Envasado primario: Los frutos recolectados fueron colocados en bolsas de polipropileno limpias, evitando el contacto con superficies contaminantes.

Paso 3. Transporte refrigerado: Las muestras de palta fueron transportadas a 4 °C, bajo las mismas condiciones de conservación aplicadas a las muestras de suelo.

Paso 4. Almacenamiento previo al acondicionamiento: Una vez en laboratorio, las muestras fueron almacenadas a −20 °C hasta su posterior acondicionamiento y análisis químico.

Tabla 10.

Diagrama de Operaciones del Proceso (DOP) para la recolección y conservación de muestras de frutos de palta (Persea americana)

N°	Descripción del Proceso	○	□	→	D	∇	⊙
1	Selección de frutos con madurez adecuada	X					
2	Verificación de frutos sin daños físicos ni deterioro		X				
3	Recolección manual de frutos	X					
4	Envasado en bolsas de polipropileno limpias	X					
5	Transporte refrigerado a laboratorio (4 °C)			X			
6	Conservación previa al acondicionamiento				X		
7	Almacenamiento a −20 °C					X	

4.4.2. Preparación y acondicionamiento de las muestras

El acondicionamiento de las muestras se realizó de acuerdo con la naturaleza de cada matriz analizada (suelo y pulpa de palta), siguiendo procedimientos estandarizados que aseguran la homogeneidad, representatividad y adecuada conservación del material previo a la digestión ácida y análisis instrumental.

4.4.2.1. Preparación y acondicionamiento de muestras de suelo

Paso 1. Secado de las muestras: Las muestras de suelo fueron secadas en estufa a 60 °C hasta alcanzar peso constante, con el objetivo de eliminar la humedad residual y evitar interferencias durante el análisis químico.

Paso 2. Trituración y homogenización: Una vez secas, las muestras fueron trituradas y homogenizadas completamente, asegurando una distribución uniforme de los componentes del suelo.

Paso 3. Tamizado: Posteriormente, las muestras fueron tamizadas a través de una malla de nylon de 0.15 mm, obteniéndose una fracción fina y homogénea adecuada para el análisis de metales pesados.

Paso 4. Almacenamiento: Las muestras acondicionadas fueron colocadas en recipientes de polipropileno previamente limpios y almacenadas en condiciones controladas hasta su posterior digestión.

Figura 14.

Diagrama esquemático del acondicionamiento de muestras de suelo previo al análisis de metales pesados



Nota. Elaboración Propia

Tabla 11.

Diagrama de Operaciones del Proceso (DOP) para la preparación y acondicionamiento de muestras de suelo

N°	Descripción del Proceso	○	□	→	D	∇	⊙
1	Secado de las muestras en estufa a 60 °C	X					
2	Espera hasta alcanzar peso constante				X		
3	Trituración de las muestras	X					
4	Homogenización del suelo	X					
5	Tamizado con malla de nylon de 0.15 mm	X					
6	Colocación en recipientes de polipropileno	X					
7	Almacenamiento en condiciones controladas				X		

Nota. Elaboración Propia

4.4.2.2. Preparación y acondicionamiento de muestras de pulpa de palta

Paso 1. Separación de la matriz vegetal: Las muestras de palta fueron procesadas manualmente, retirándose completamente la cáscara del fruto. Para el análisis se utilizó exclusivamente la pulpa, evitando la inclusión de tejidos no comestibles.

Paso 2. Corte y reducción de tamaño: La pulpa fue cortada individualmente en rodajas finas de aproximadamente 2–3 mm de espesor, empleando cuchillos de acero inoxidable, con la finalidad de facilitar el proceso de secado y garantizar una adecuada homogenización posterior.

Paso 3. Secado de la pulpa: Las rodajas de pulpa de palta fueron secadas en estufa a 70 °C durante 24 horas, hasta lograr la eliminación de la humedad presente en la matriz vegetal.

Paso 4. Molienda y homogenización: Una vez secas, las muestras fueron triturada y homogenizadas con tamizador, con el fin de obtener un material uniforme para el análisis químico.

Paso 5. Almacenamiento y conservación: Las muestras acondicionadas fueron transferidas a recipientes de polipropileno, protegidas de la humedad y conservadas a −20 °C hasta su digestión ácida y análisis instrumental.

Figura 15.

Diagrama de flujo del acondicionamiento de muestras de pulpa de palta previo a la digestión ácida



Nota. Elaboración Propia

Tabla 12.

Diagrama de Operaciones del Proceso (DOP) para la preparación y acondicionamiento de muestras de pulpa de palta

N°	Descripción del Proceso	○	□	→	D	∇	⊙
1	Separación de la matriz vegetal (retiro de cáscara)	X					
2	Verificación de que solo se utilice pulpa		X				
3	Corte de la pulpa en rodajas de 2–3 mm	X					
4	Secado de la pulpa en estufa a 70 °C	X					
5	Tiempo de secado (24 horas)				X		
6	Molienda de las muestras	X					
7	Homogenización con tamizador	X					
8	Transferencia a recipientes de polipropileno	X					
9	Almacenamiento y conservación a −20 °C					X	

Nota. Elaboración Propia

4.4.3. Cuantificación de metales pesados en muestras vegetales (palta)

El procesamiento de las muestras de pulpa de palta se realizó en el Laboratorio de Investigación de Suelos y Aguas (LABISAG) del INDES-CES, siguiendo el método Multielement Plant Tissue Analysis Using ICP Spectrometry, el cual permite la determinación de metales pesados en matrices vegetales mediante digestión ácida previa al análisis instrumental.

Paso 1. Secado previo y acondicionamiento: Las muestras de pulpa de palta previamente acondicionadas fueron sometidas a un secado adicional junto con los materiales de trabajo (tubos y utensilios) a 60 °C durante 2 horas, con el fin de eliminar humedad residual y evitar interferencias durante el proceso de digestión.

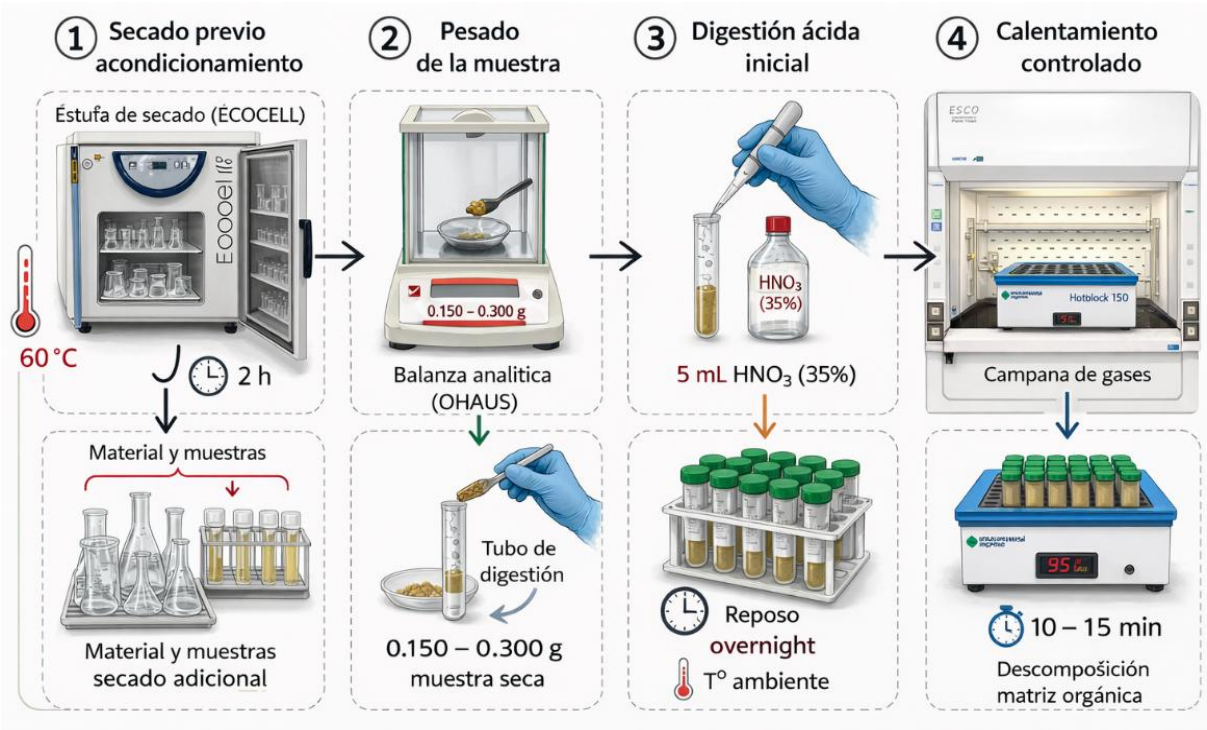
Paso 2. Pesado de la muestra: Se pesaron entre 0.150 y 0.300 g de muestra seca utilizando una balanza analítica. La muestra fue transferida cuidadosamente a tubos de digestión previamente limpios y secos.

Paso 3. Digestión ácida inicial: A cada tubo de digestión se le adicionaron 5 mL de ácido nítrico (HNO_3) al 35 %, cubriéndose y con un reposo nocturno a temperatura ambiente, con el objetivo de iniciar la descomposición de la matriz orgánica.

Paso 4. Calentamiento controlado (primera etapa): Los tubos fueron colocados en el digestor previamente estabilizado a 95 ± 1 °C. Las muestras se calentaron durante 10 a 15 minutos, asegurando que no alcanzaran la ebullición.

Figura 16.

Diagrama de flujo del procedimiento de los pasos 1 al 4 de digestión ácida a muestras de pulpa de palta



Nota. Elaboración Propia

Paso 5. Digestión ácida complementaria: Tras enfriar 10–15 min, se adicionaron 2.5 mL de HNO_3 concentrado a cada tubo y luego se recalentó a 95 ± 1 °C por 30 min, para oxidar la materia orgánica residual.

Paso 6. Oxidación con peróxido de hidrógeno: Una vez frías, se agregó 1.5 mL de H_2O_2 al 30%. Tras la efervescencia, se incorporaron alícuotas adicionales de 1 mL, repitiendo hasta que la reacción se detuviera o se alcanzara un máximo acumulado de 5 mL.

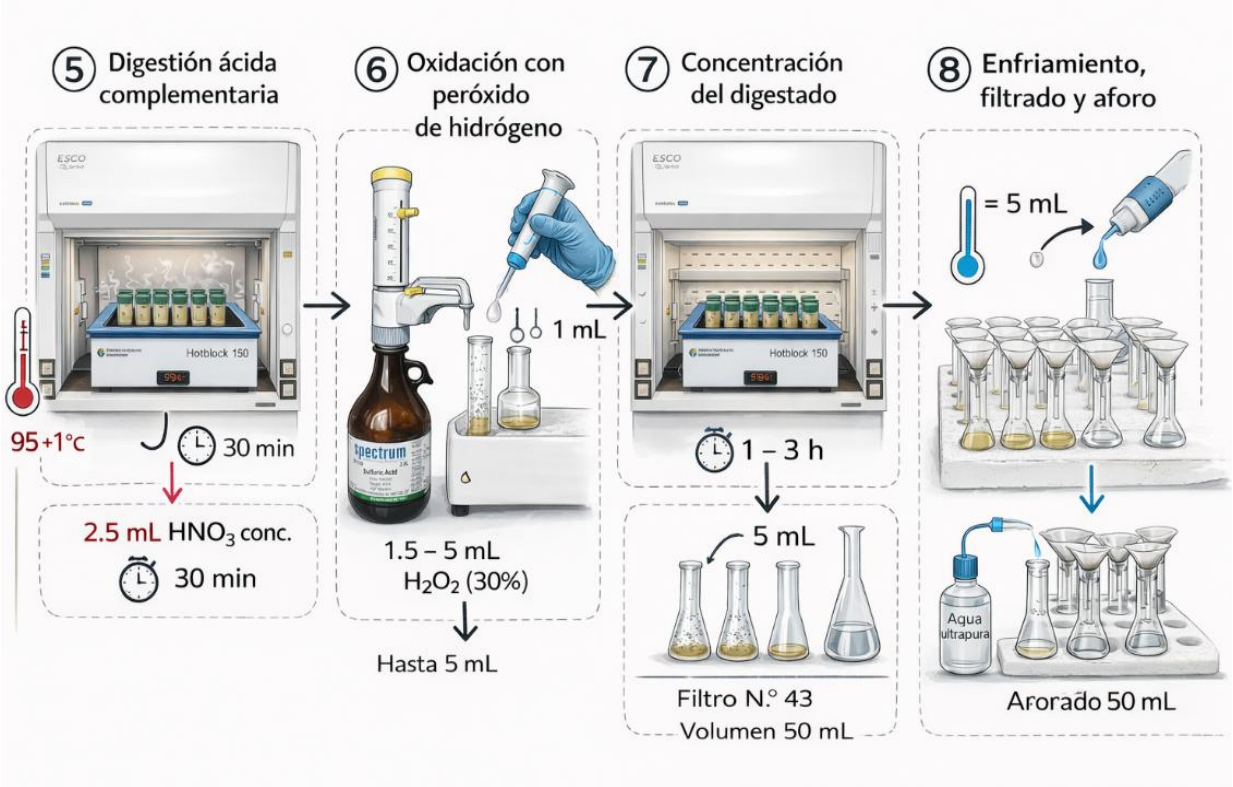
Paso 7. Concentración del digestado: El proceso de digestión continuó hasta reducir el volumen de la solución a aproximadamente 5 mL, lo

cual requirió un tiempo estimado de 1 a 3 horas, manteniendo siempre un calentamiento controlado.

Paso 8. Enfriamiento, filtrado y aforo: Al final, las muestras se enfriaron a temperatura ambiente, se filtraron con papel filtro N.° 43 y se aforaron a 50 mL con agua ultrapura, quedaron listas para la lectura instrumental en espectrofotómetro.

Figura 17.

Diagrama de flujo del procedimiento de digestión ácida a muestras de pulpa de palta



Nota. Elaboración Propia

Tabla 13.

Diagrama de Operaciones del Proceso (DOP) para la digestión ácida y cuantificación de metales pesados en muestras de pulpa de palta (Persea americana)

Nº	Descripción del Proceso	○	□	→	D	∇	⊙	Observaciones
1	Secado previo y acondicionamiento (muestras + materiales) a 60 °C por 2 h	X						Preparación previa para evitar humedad
2	Pesado de muestra seca (0.150–0.300 g) en balanza analítica	X						Precisión analítica
3	Transferencia de muestra a tubos de digestión			X				Movimiento interno
4	Adición de 5 mL de HNO_3 (35 %)	X						Inicia descomposición química
5	Reposo nocturno a temperatura ambiente				X			Digestión pasiva sin intervención
6	Calentamiento controlado a 95 °C por 10–15 min	X						Oxidación inicial
7	Enfriamiento de las muestras (10–15 min)				X			Preparación para siguiente etapa
8	Adición de 2.5 mL de HNO_3 concentrado	X						Digestión complementaria
9	Recalentamiento a 95 °C por 30 min	X						Oxidación prolongada
10	Enfriamiento de la muestra				X			Etapa previa a oxidación final
11	Adición de 1.5–5 mL H_2O_2 al 30% hasta cesar efervescencia	X						Oxidación orgánica intensiva
12	Concentración del digestado a ~5 mL (1–3 h)	X						Preparación para lectura
13	Enfriamiento final antes de filtrado				X			Evita interferencias posteriores
14	Filtrado con papel N.° 43	X						Clarificación de muestra
15	Aforo a 50 mL con agua ultrapura	X						Ajuste final del volumen
16	Lectura instrumental en espectrofotómetro		X					Verificación final de metales pesados

4.4.4. Cuantificación de metales pesados en muestras de suelo

Los metales pesados en suelo se determinaron mediante el método EPA 3050B (digestión ácida con HotBlock), que libera los metales de la fracción sólida antes del análisis instrumental.

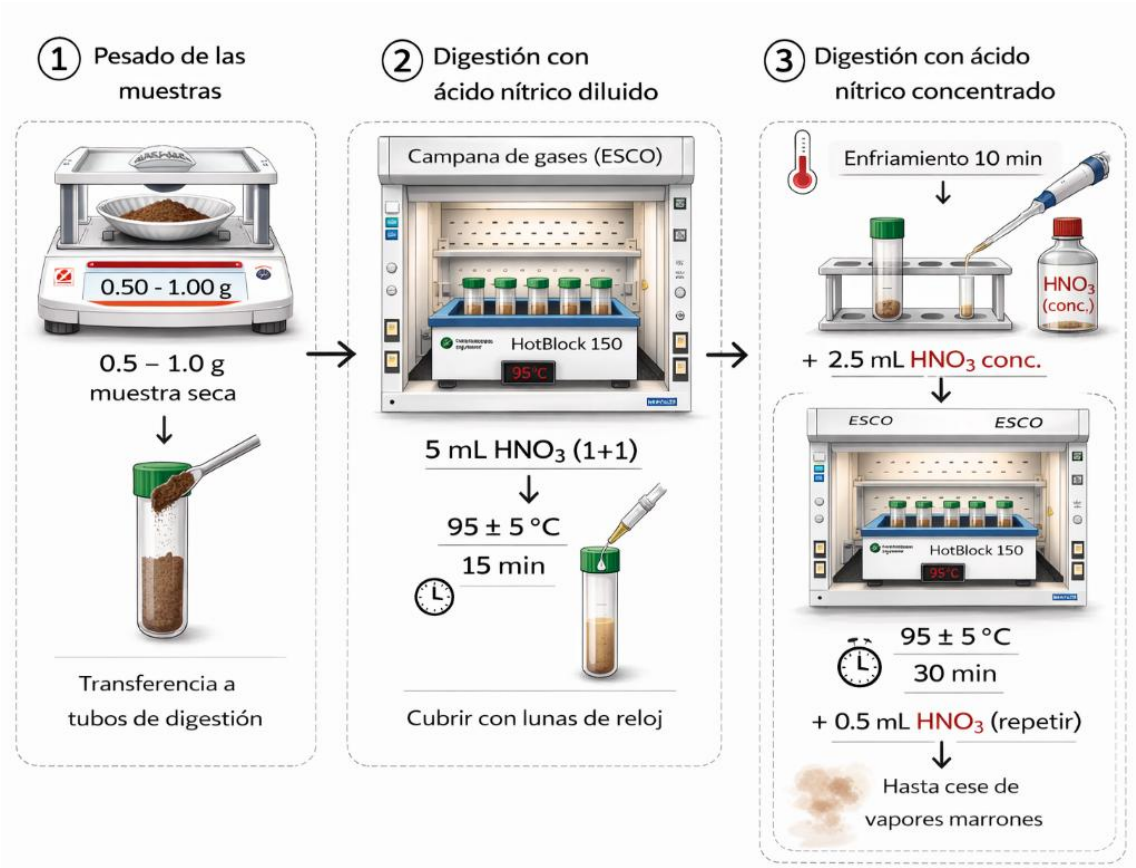
Paso 1. Pesado de las muestras: Las muestras de suelo previamente acondicionadas se pesaron entre 0.5 y 1.0 g de muestra seca, las cuales fueron transferidas a tubos de digestión adecuados.

Paso 2. Digestión con ácido nítrico diluido: Los tubos de digestión se colocaron en el sistema HotBlock, previamente estabilizado a 95 ± 5 °C. A c/muestra se adicionó 5 mL de ácido nítrico (HNO_3) diluido (1+1) con agua ultrapura, cubriéndose con lunas de reloj acanaladas. Las muestras se calentaron durante 15 minutos, evitando alcanzar la ebullición.

Paso 3. Digestión con ácido nítrico concentrado: Tras un periodo de enfriamiento de 10 minutos, se adicionó 2.5 mL de HNO_3 CC continuándose el calentamiento en el HotBlock por 30 minutos. Este procedimiento se repitió mediante la adición de 0.5 mL de HNO_3 hasta que cesó la emisión de vapores marrones, indicativo del avance de la oxidación.

Figura 18.

Diagrama del procedimiento para el acondicionamiento de muestras de suelo antes de suelo



Nota. Elaboración Propia

Paso 4. Concentración del digestado: Las muestras se mantuvieron en el HotBlock durante aproximadamente 2 horas, hasta reducir el volumen del digestado a cerca de 5 mL, evitando la evaporación completa de la solución.

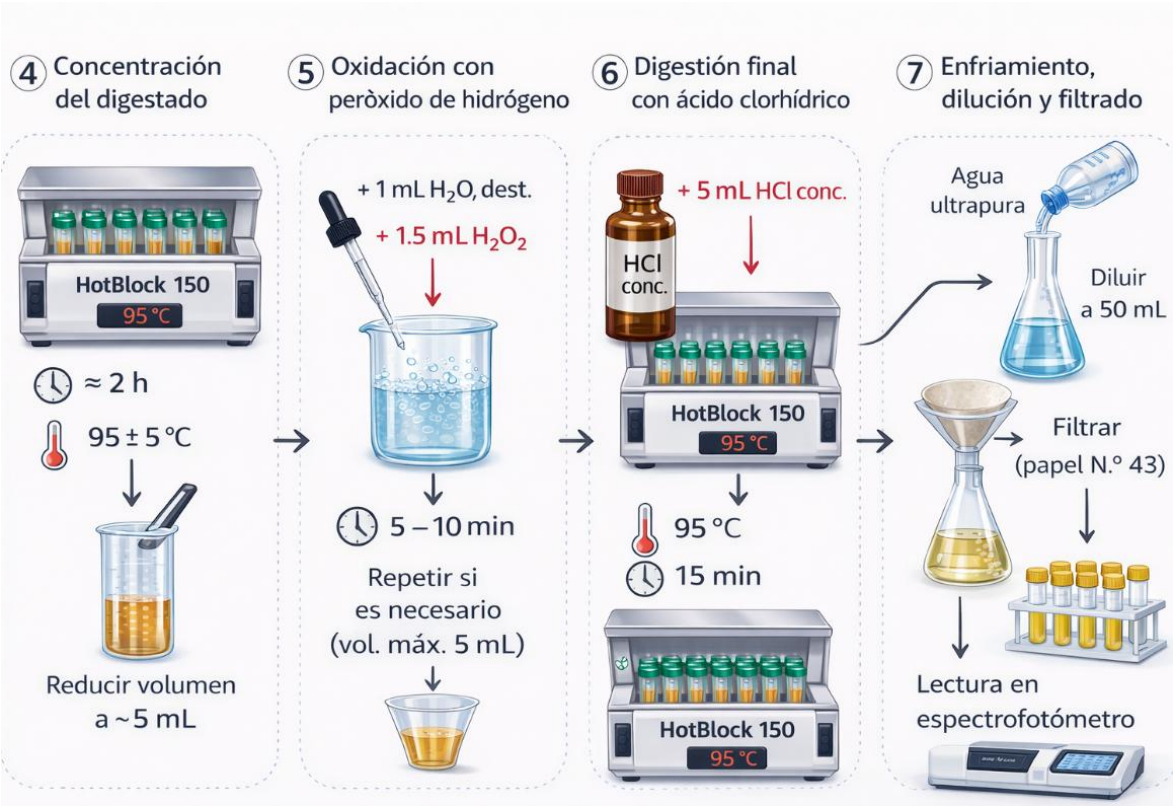
Paso 5. Oxidación con peróxido de hidrógeno: Luego del enfriamiento, se añadieron 1 mL de agua destilada y 1.5 mL de peróxido de hidrógeno (H_2O_2) al 30 %, esperando entre 5 y 10 minutos hasta que la efervescencia cesara. La adición de H_2O_2 se repitió en alícuotas hasta alcanzar un volumen máximo de 5 mL, si fue necesario.

Paso 6. Digestión final con ácido clorhídrico: Posteriormente, se añadieron 5 mL de ácido clorhídrico (HCl) concentrado a cada muestra, calentándose nuevamente a 95 °C durante 15 minutos, con el fin de estabilizar los metales en solución.

Paso 7. Enfriamiento, dilución y filtrado: Finalmente, las soluciones se dejaron enfriar a temperatura ambiente, se diluyeron hasta 50 mL con agua ultrapura, se filtraron utilizando papel filtro N.° 43 y quedaron listas para la lectura instrumental en espectrofotómetro.

Figura 19.

Diagrama del procedimiento para el acondicionamiento de muestras de suelo antes de suelo



Nota. Elaboración Propia

Tabla 14.

Diagrama de Operaciones del Proceso (DOP) para la digestión ácida y cuantificación de metales pesados en muestras de suelo agrícola

Nº	Descripción del Proceso	○	□	→	D	∇	⊙	Observaciones
1	Pesado de muestra de suelo seco (0.5–1.0 g)	X						Inicio del procedimiento analítico
2	Transferencia a tubos de digestión			X				
3	Adición de 5 mL de HNO_3 diluido (1+1)	X						Primera fase de digestión química
4	Calentamiento en HotBlock (95 °C, 15 min)	X						Descomposición inicial controlada
5	Enfriamiento por 10 min				X			Preparación para segunda adición
6	Adición de 2.5 mL de HNO_3 concentrado	X						Oxidación de materia orgánica residual
7	Calentamiento (30 min)	X						Continuación de oxidación
8	Adiciones de 0.5 mL de HNO_3 hasta cesar vapores	X						Oxidación completa
9	Concentración del digestado hasta ~5 mL (2 h)	X						Preparación para lectura
10	Enfriamiento antes de oxidación final				X			Estabilización de temperatura
11	Adición de 1 mL de agua + 1.5 mL de H_2O_2 al 30 %	X						Reacción oxidante intensiva
12	Repetición de alícuotas hasta 5 mL o cese de efervescencia	X						Finalización de oxidación orgánica
13	Adición de 5 mL HCl concentrado + calentamiento (95 °C, 15 min)	X						Estabilización de metales
14	Enfriamiento final de la solución				X			Paso previo a filtrado
15	Dilución con agua ultrapura hasta 50 mL	X						Ajuste de concentración
16	Filtrado con papel filtro N.º 43	X						Clarificación final
17	Lectura en espectrofotómetro		X					Medición instrumental final

4.4.5. Técnica e instrumento de análisis

4.4.5.1. Análisis químico

La determinación de As, Cd, Cr, Hg, Ni y Pb se realizó en el Laboratorio de Investigación de Suelos y Aguas (LABISAG) de la Universidad Nacional Toribio Rodríguez de Mendoza de Amazonas (Perú), acreditado por INACAL conforme a la norma ISO/IEC 17025:2017. La cuantificación se efectuó mediante espectrometría de emisión atómica con plasma de microondas (MP-AES), utilizando un equipo Agilent 4100 MP-AES (Agilent Technologies, Santa Clara, CA, EE. UU.) provisto de antorcha estándar, nebulizador Inert One Neb y cámara ciclónica de vidrio de doble paso. El protocolo analítico siguió la metodología descrita por Guadalupe et al. (2023).

Los límites de detección (LOD) y de cuantificación (LOQ) se definieron a partir de la señal mínima diferenciable del ruido instrumental, adoptando relaciones señal/ruido de 3:1 (LOD) y 10:1 (LOQ), reportadas en mg/kg (Oliveira et al., 2015). Para la lectura instrumental se emplearon las longitudes de onda de 228.802 nm (As), 405.781 nm (Cd), 193.695 nm (Cr), 425.433 nm (Hg), 214.160 nm (Ni) y 253.652 nm (Pb). La calibración se desarrolló con soluciones patrón multielementales en distintos niveles de concentración, preparadas a partir de una solución madre de 1000 mg/kg. El control de calidad consideró blancos analíticos y muestras duplicadas; adicionalmente, la verificación de parámetros se llevó a cabo con diez réplicas.

4.4.5.2. Análisis de datos

Evaluación del riesgo sanitario: La exposición dietaria a los metales se evaluó mediante la ingesta diaria estimada (EDI), el cociente de peligro (HQ), el índice de peligro (HI) y el riesgo carcinogénico (CR).

La tasa de ingesta diaria de palta (IR) se obtuvo a partir de información de consumo basada en la Encuesta Nacional de Hogares (ENAHO 2011), realizada por el Instituto Nacional de Estadística e Informática (INEI). El consumo se expresó en kilogramos por persona al día y se modeló mediante una distribución lognormal, con valores de 0,00354 kg/día en el percentil 5, 0,0238 kg/día en el percentil 50 y 0,0702 kg/día en el percentil 95. El peso corporal también se modeló mediante una distribución lognormal, con valores de 45,3 kg en el percentil 5, 62,2 kg en el percentil 50 y 85,4 kg en el percentil 95. .Las ecuaciones y parámetros utilizados se presentan en la Tabla 15.

Tabla 15.

Ecuaciones y parámetros relevantes: Riesgo para la salud

Parámetro	Abreviatura	Ecuación o valor	Unidades
		Riesgo para la salud	
Ingesta diaria estimada	EDI	(Cpalta × IR) / BW	mg/kgBw/día
Tasa de ingestión	IR	Lognormal (5th: 3.54×10^{-3}; 50th: 2.38×10^{-2}; 95th: 7.02×10^{-2})	kg/día
Peso corporal	BW	LogNormal (5th: 45.3; 50th: 62.2; 95th: 85.4)	kgBw
Cociente de peligro	HQ	EDI / RfD	-
Valor de referencia	RfD	Cd: 0.001; Cr: 1.5; Ni: 0.02	mg/kgBw/día
Índice de peligro	HI	ΣHQ_n	-
Riesgo cancerígeno	CR	EDI × SF	-
Factor de pendiente	SF	Cd: 0.38; Pb: 0.0085	$(mg/kgBw/día)^{-1}$

Nota. Adaptado de Guadalupe et al. (2023)

Evaluación de la transferencia y del riesgo ecológico: La transferencia de metales desde el suelo hacia la pulpa de palta se evaluó mediante el factor de bioacumulación (BAF). La contaminación del suelo se caracterizó mediante el índice de geoacumulación (Igeo) y el índice de contaminación individual (PI).

El riesgo ecológico individual se estimó mediante el ER, incorporando la concentración relativa del metal y su coeficiente de respuesta tóxica. El riesgo ecológico potencial acumulado se determinó mediante el RI, calculado como la suma de los valores de ER de los metales evaluados.Las ecuaciones, valores de fondo geoquímico y coeficientes de respuesta tóxica se presentan en la Tabla 16.

Tabla 16.

Ecuaciones y parámetros relevantes: Riesgo ecológico

Parámetro	Abreviatura	Ecuación o valor	Unidades
Riesgo ecológico			
Factor de bioacumulación	BAF	$BAF = C_{palta} / C_{suelo}$	
Concentración en palta	C_{palta}	Este estudio	mg/kg
Concentración en suelo	C_{suelo}	Este estudio	mg/kg
Índice de geoacumulación	Igeo	$Igeo = \log_2 (C_{suelo} / 1.5\ B_n)$	
Valor de fondo	B_n	As: 15; Cd: 1.0; Cr: 90; Hg: 0.25; Ni: 30; Pb: 70	mg/kg
Riesgo ecológico	ER	$ER_i = T_i \times PI$	
Índice de contaminación individual	PI	$PI = C_{suelo} / B_n$	
Coeficiente de respuesta tóxica	T_i	As: 10; Cd: 30; Cr: 2; Hg: 40; Ni: 2; Pb: 5	
Índice de riesgo ecológico potencial	RI	$RI = \Sigma ER_i\ (i = 1 \rightarrow n)$	

Nota. Adaptado de Guadalupe et al. (2023)

4.5. Análisis estadístico

Para comparar el efecto de la ubicación geográfica sobre las concentraciones de metales pesados, se aplicó un análisis multivariado de varianza (ANOVA) y una prueba post hoc de Tukey para la comparación de medias, usando SPSS v25 y un nivel de significancia de $\alpha = 0,05$.

La caracterización de la incertidumbre del riesgo se realizó con un enfoque probabilístico en @Risk v8, mediante simulación de Monte Carlo con muestreo latino hipercubo; para cada métrica se ejecutaron 10 corridas de 100 000 iteraciones.

CAPÍTULO V: RESULTADOS

En este capítulo se presentan los resultados del análisis experimental y estadístico de las muestras de suelo y fruto de palta, de acuerdo con el enfoque cuantitativo y el diseño no experimental, transversal y correlacional–explicativo.

Los resultados se organizan según la secuencia del estudio: contaminación del suelo, transferencia y bioacumulación, y evaluación del riesgo ecológico y sanitario bajo el enfoque One Health.

La información se reporta mediante estadística descriptiva (media, DE), pruebas inferenciales para comparación entre regiones y modelación probabilística mediante simulaciones Monte Carlo.

Cabe señalar que los resultados de esta investigación han sido publicados en la revista científica internacional Foods (MDPI), indexada en Q1, en el artículo Ecological and Human Health Risk Assessment of Metals in Peruvian Avocados Using a Probabilistic Approach.

5.1. Concentración de Metales

La Tabla 8 y 9 compila (mg/kg) las concentraciones de As, Cd, Cr, Hg, Ni y Pb medidas en suelos y frutos de palta en ocho regiones productoras: Amazonas, Áncash, Ayacucho, Cusco, Huancavelica, Ica, La Libertad y Lima. Para cada metal y matriz se reportan la media, la desviación estándar (DE) y el intervalo mínimo–máximo, con el fin de describir la variación dentro y entre regiones.

El análisis comparativo entre matrices sustenta la identificación de procesos de movilización y bioacumulación de metales suelo–fruto, información relevante para

la evaluación de inocuidad alimentaria y de riesgos ecológicos y sanitarios, integrando el enfoque One Health.

Las diferencias estadísticas entre regiones fueron evaluadas mediante ANOVA de efectos fijos, seguido del post hoc de Tukey ($p < 0,05$). En consecuencia, letras distintas dentro de una misma columna y matriz representan diferencias significativas entre grupos regionales, destacando patrones de acumulación diferencial asociados a factores edáficos, climáticos y/o agronómicos

Tabla 17.

Concentración de metales pesados en suelos agrícolas de regiones productoras de palta

Región	As (mg/kg)	Cd (mg/kg)	Cr (mg/kg)	Hg (mg/kg)	Ni (mg/kg)	Pb (mg/kg)
			Suelo			
Amazonas	42,414 ± 8,214^{a}	0,271 ± 0,214^{a}	7,458 ± 8,657^{a}	0,075 ± 0,043^{a}	4,415 ± 2,485^{a}	9,049 ± 3,007^{bc}
Ancash	45,114 ± 9,729^{a}	<LOD	15,304 ± 7,248^{a}	0,048 ± 0,057^{a}	5,648 ± 1,514^{a}	8,124 ± 1,243^{c}
Ayacucho	58,976 ± 7,625^{a}	0,339 ± 0,056^{a}	14,963 ± 8,942^{a}	0,161 ± 0,014^{a}	9,789 ± 2,348^{a}	22,081 ± 7,451^{a}
Cusco	52,674 ± 7,925^{a}	<LOD	16,428 ± 10,248^{a}	0,045 ± 0,075^{a}	4,250 ± 3,247^{a}	9,245 ± 2,864^{bc}
Huancavelica	34,014 ± 6,504^{a}	<LOD	12,635 ± 13,425^{a}	0,088 ± 0,064^{a}	5,261 ± 2,516^{a}	8,064 ± 1,974^{c}
Ica	42,414 ± 8,214^{a}	0,384 ± 0,867^{a}	38,182 ± 15,564^{a}	0,140 ± 0,057^{a}	5,826 ± 2,107^{a}	10,007 ± 4,614^{bc}
La Libertad	51,814 ± 18,321^{a}	0,479 ± 0,964^{a}	37,789 ± 18,476^{a}	0,278 ± 0,046^{a}	8,549 ± 1,932^{a}	22,217 ± 4,831^{ab}
Lima	76,174 ± 17,349^{a}	0,548 ± 1,045^{a}	35,612 ± 12,960^{a}	0,367 ± 0,244^{a}	10,823 ± 4,850^{a}	25,348 ± 6,015^{a}

Nota. Los valores se expresan como media ± desviación estándar (mg kg^{-1}). LOD indica concentraciones por debajo del límite de detección del método analítico. Letras diferentes dentro de una misma columna indican diferencias significativas entre regiones ($p < 0,05$).

Tabla 18.

Concentración de metales pesados en frutos de palta provenientes de regiones productoras (media ± desviación estándar, mg kg⁻¹).

Región	As (mg/kg)	Cd (mg/kg)	Cr (mg/kg)	Hg (mg/kg)	Ni (mg/kg)	Pb (mg/kg)
			Palta			
Amazonas	<LOD	<LOD	<LOD	0,007 ± 0,001[a]	<LOD	<LOD
Ancash	<LOD	<LOD	<LOD	0,008 ± 0,002[a]	<LOD	<LOD
Ayacucho	0,154 ± 0,031[a]	0,011 ± 0,068[a]	<LOD	0,023 ± 0,004[a]	0,134 ± 0,018[a]	0,220 ± 0,046[a]
Cusco	<LOD	<LOD	<LOD	0,005 ± 0,001[a]	<LOD	<LOD
Huancavelica	<LOD	<LOD	<LOD	0,011 ± 0,003[a]	<LOD	<LOD
Ica	<LOD	0,016 ± 0,059[a]	<LOD	0,020 ± 0,013[a]	<LOD	<LOD
La Libertad	0,125 ± 0,021[a]	0,028 ± 0,091[a]	<LOD	0,142 ± 0,013[a]	0,108 ± 0,021[a]	0,231 ± 0,046[a]
Lima	0,152 ± 0,029[a]	0,033 ± 0,098[a]	<LOD	0,167 ± 0,060[a]	0,147 ± 0,026[a]	0,325 ± 0,073[a]

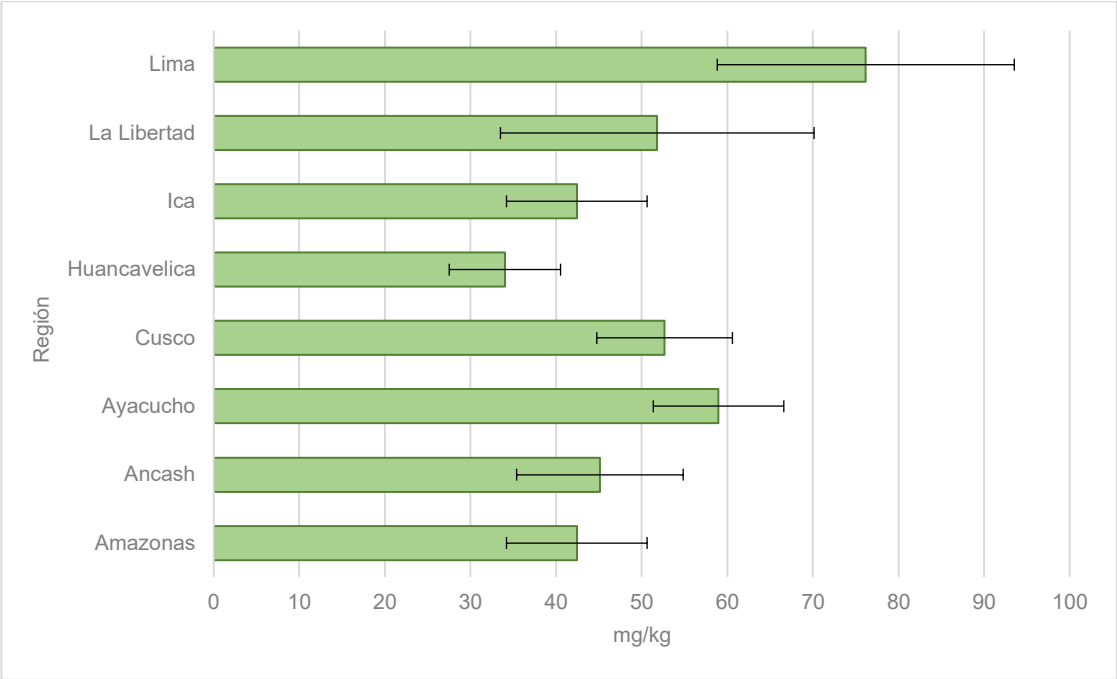
Nota. Los valores se expresan como media ± desviación estándar (mg kg⁻¹). LOD indica concentraciones por debajo del límite de detección del método analítico. Letras diferentes dentro de una misma columna indican diferencias significativas entre regiones ($p < 0,05$).

5.1.1. Concentración de metales en el suelo

El análisis de suelos bajo cultivo de palta mostró una variación espacial evidente en las concentraciones de metales, con niveles que, según el elemento y la región, fluctuaron desde valores relativamente bajos hasta contenidos elevados. A continuación, se presentan los resultados correspondientes a cada metal pesado evaluado.

Figura 20.

Concentración de arsénico (As) en suelos agrícolas (mg/kg)

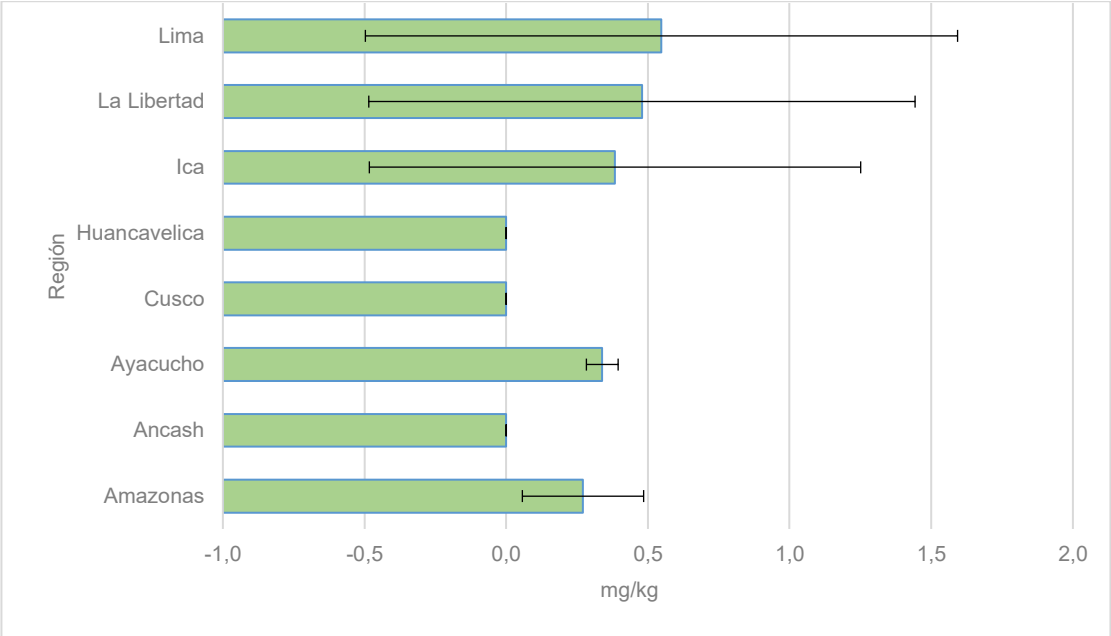


Nota. Las barras representan la media ± desviación estándar de la concentración de arsénico en suelos agrícolas. Las concentraciones se expresan en mg/kg. Elaboración propia.

Arsénico (As). La mayor concentración media se registró en Lima (76,174 ± 17,349 mg/kg), seguida de Ayacucho (58,976 ± 7,625 mg/kg) y Cusco (52,674 ± 7,925 mg/kg). Valores intermedios se observaron en La Libertad (51,814 ± 18,321 mg/kg) y Áncash (45,114 ± 9,729 mg/kg), mientras que Amazonas e Ica presentaron concentraciones similares (42,414 ± 8,214 mg/kg). La menor concentración media se registró en Huancavelica (34,014 ± 6,504 mg/kg).

Figura 21.

Concentración de cadmio (Cd) en suelos agrícolas por región (mg/kg).

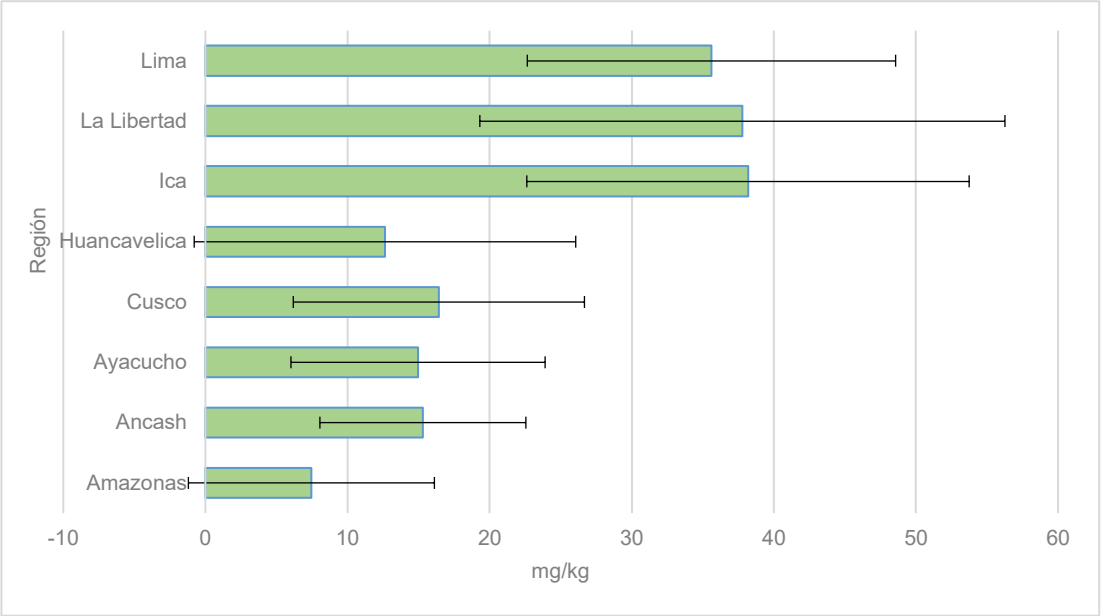


Nota. Las barras representan la media ± desviación estándar de la concentración de cadmio en suelos agrícolas. Las concentraciones se expresan en mg/kg. Elaboración propia.

Cadmio (Cd). Las concentraciones medias de cadmio en suelo oscilaron entre 0,271 ± 0,214 mg/kg en Amazonas y 0,548 ± 1,045 mg/kg en Lima. También se registraron valores en Ayacucho (0,339 ± 0,056 mg/kg), Ica (0,384 ± 0,867 mg/kg) y La Libertad (0,479 ± 0,964 mg/kg), mientras que en Ancash, Cusco y Huancavelica las concentraciones estuvieron por debajo del límite de detección (LOD).

Figura 22.

Concentración de cromo (Cr) en suelos agrícolas por región (mg/kg).

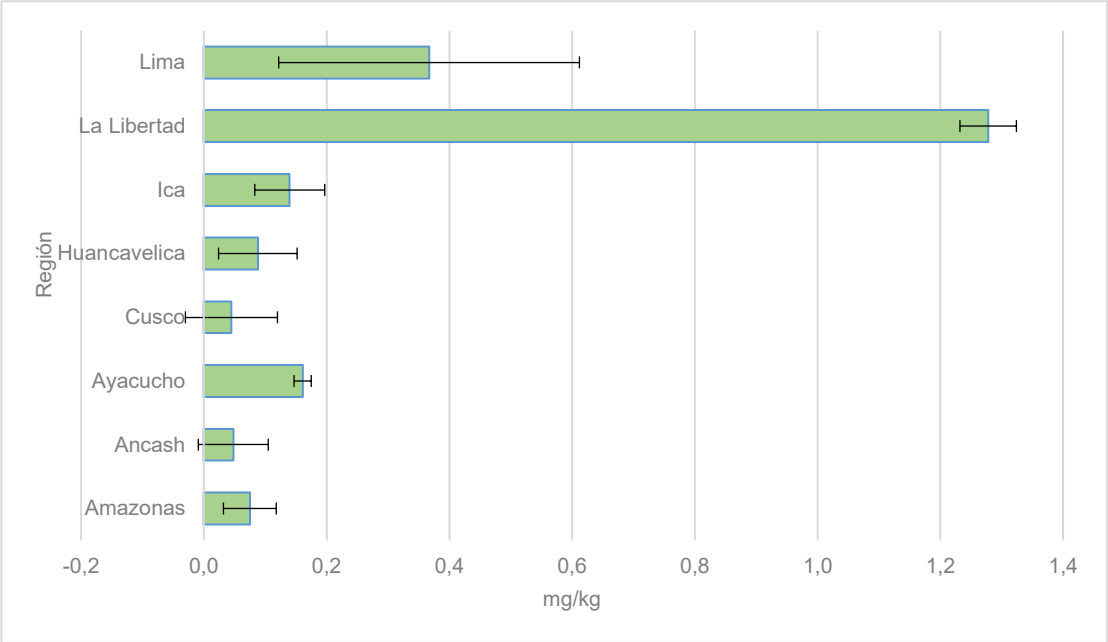


Nota. Las barras representan la media ± desviación estándar de la concentración de cromo en suelos agrícolas. Las concentraciones se expresan en mg/kg. Elaboración propia.

Cromo (Cr). Las concentraciones medias de cromo variaron entre 7,458 ± 8,657 mg/kg en Amazonas y 38,182 ± 15,564 mg/kg en Ica. Valores relativamente elevados también se observaron en La Libertad (37,789 ± 18,476 mg/kg) y Lima (35,612 ± 12,960 mg/kg), mientras que concentraciones intermedias se registraron en Cusco (16,428 ± 10,248 mg/kg), Ancash (15,304 ± 7,248 mg/kg), Ayacucho (14,963 ± 8,942 mg/kg) y Huancavelica (12,635 ± 13,425 mg/kg).

Figura 23.

Concentración de mercurio (Hg) en suelos agrícolas por región (mg/kg).

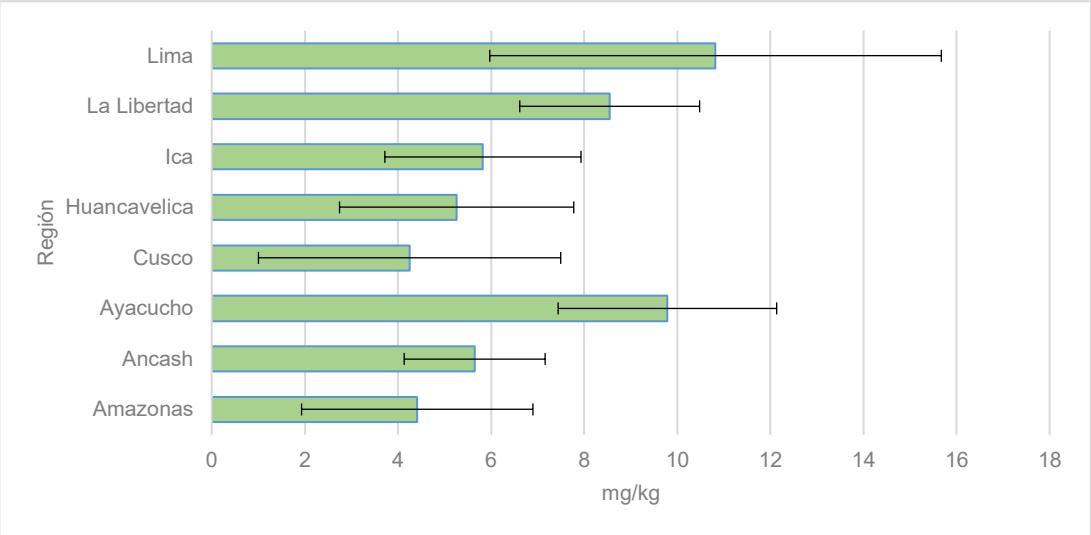


Nota. Las barras representan la media ± desviación estándar de la concentración de mercurio en suelos agrícolas. Las concentraciones se expresan en mg/kg. Elaboración propia.

Mercurio (Hg). Las concentraciones medias de mercurio en suelos agrícolas oscilaron entre 0,045 ± 0,075 mg/kg en Cusco y 0,367 ± 0,244 mg/kg en Lima. Valores intermedios se observaron en La Libertad (0,278 ± 0,046 mg/kg), Ayacucho (0,161 ± 0,014 mg/kg), Ica (0,140 ± 0,057 mg/kg), Huancavelica (0,088 ± 0,064 mg/kg), Amazonas (0,075 ± 0,043 mg/kg) y Ancash (0,048 ± 0,057 mg/kg).

Figura 24.

Concentración de níquel (Ni) en suelos agrícolas por región (mg/kg).

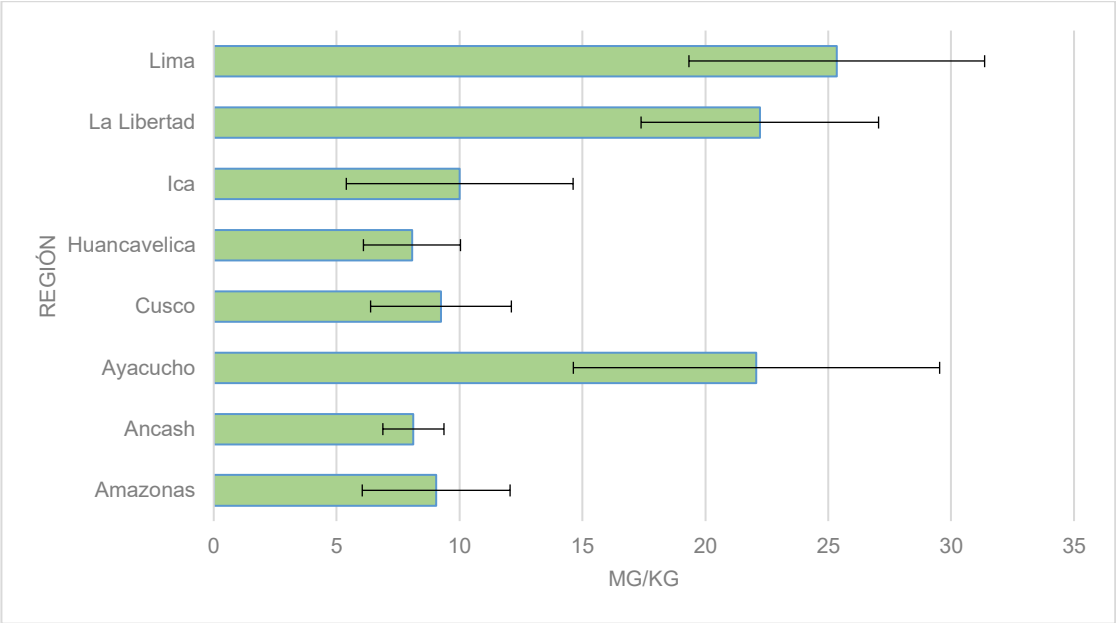


Nota. Las barras representan la media ± desviación estándar de la concentración de níquel en suelos agrícolas. Las concentraciones se expresan en mg/kg. Elaboración propia.

Níquel (Ni). Las concentraciones medias de níquel en los suelos evaluados variaron entre 4,250 ± 3,247 mg/kg en Cusco y 10,823 ± 4,850 mg/kg en Lima. Valores intermedios se registraron en Ayacucho (9,789 ± 2,348 mg/kg), La Libertad (8,549 ± 1,932 mg/kg), Ica (5,826 ± 2,107 mg/kg), Ancash (5,648 ± 1,514 mg/kg), Huancavelica (5,261 ± 2,516 mg/kg) y Amazonas (4,415 ± 2,485 mg/kg).

Figura 25.

Concentración de plomo (Pb) en suelos agrícolas por región (mg/kg).



Nota. Las barras representan la media ± desviación estándar de la concentración de plomo en suelos agrícolas. Las concentraciones se expresan en mg/kg. Elaboración propia.

Plomo (Pb). Las concentraciones medias de plomo en suelo variaron entre 8,064 ± 1,974 mg/kg en Huancavelica y 25,348 ± 6,015 mg/kg en Lima. Valores relativamente elevados también se observaron en Ayacucho (22,081 ± 7,451 mg/kg) y La Libertad (22,217 ± 4,831 mg/kg), mientras que concentraciones menores se registraron en Ica (10,007 ± 4,614 mg/kg), Cusco (9,245 ± 2,864 mg/kg), Amazonas (9,049 ± 3,007 mg/kg) y Ancash (8,124 ± 1,243 mg/kg).

En conjunto, estos resultados confirman una heterogeneidad espacial en la distribución de As, Cd, Cr, Hg, Ni y Pb en suelos palteros: algunas regiones —especialmente costeras y del centro-sur— evidencian incrementos

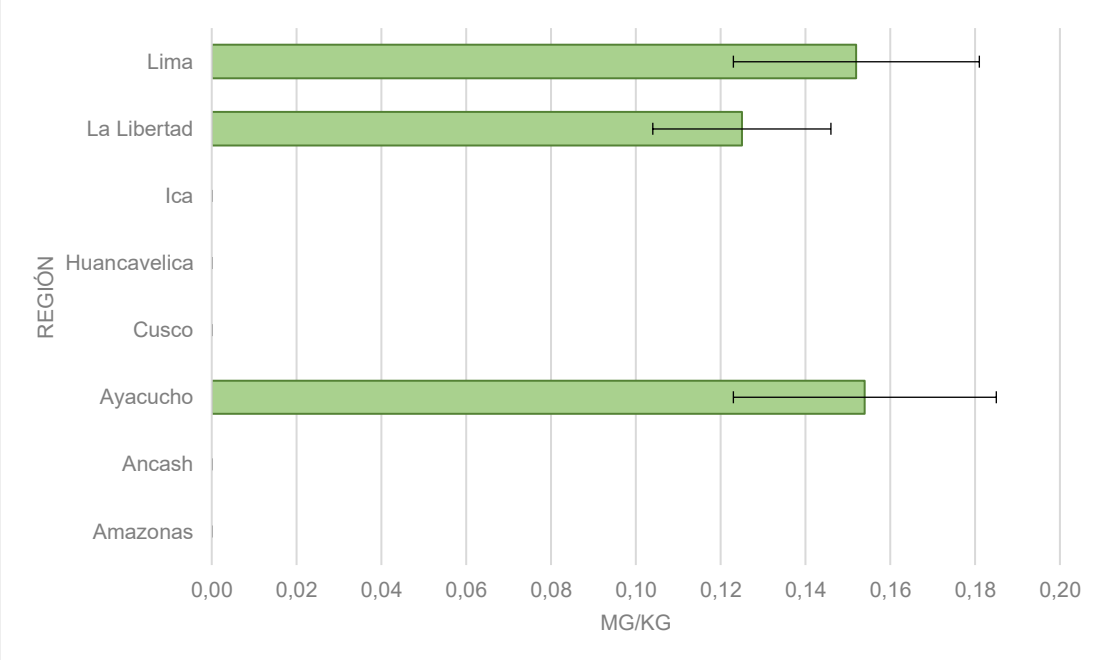
que pueden superar estándares nacionales para ciertos metales, mientras que otras se aproximan a niveles compatibles con el fondo geoquímico.

5.1.2. Concentración de metales en frutos de palta

La Figura 26 presenta las concentraciones medias, desviaciones estándar de As, Cd, Cr, Hg, Ni y Pb en frutos de palta procedentes de distintas regiones productoras del Perú. En términos generales, las concentraciones observadas fueron bajas y, para algunos elementos, se registraron valores por debajo del límite de detección (LOD), lo que sugiere una translocación limitada desde el suelo hacia el tejido comestible del fruto. A continuación, se presentan los resultados correspondientes a cada metal pesado evaluado.

Figura 26.

Concentración de arsénico (As) en frutos de palta por región (mg/kg).

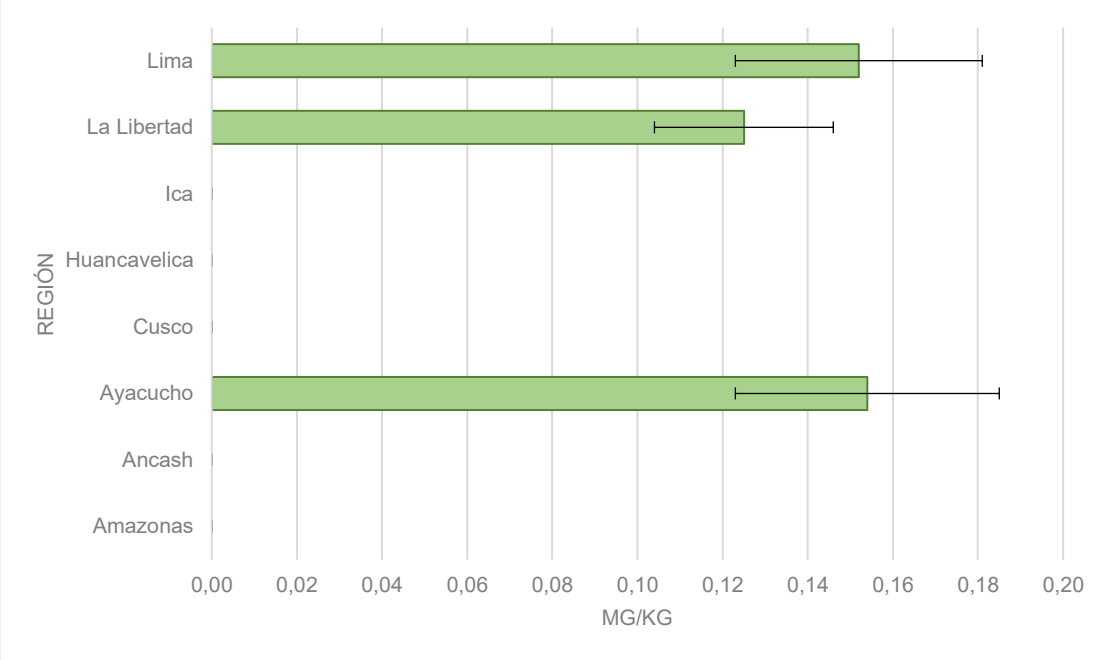


Nota. Las barras representan la media ± desviación estándar de la concentración de arsénico en frutos de palta. Las concentraciones se expresan en mg/kg. LOD indica concentraciones por debajo del límite de detección del método analítico. Elaboración propia.

Arsénico (As). En los frutos de palta, el arsénico presentó concentraciones detectables únicamente en Ayacucho (0,154 ± 0,031 mg/kg), La Libertad (0,125 ± 0,021 mg/kg) y Lima (0,152 ± 0,029 mg/kg). En las regiones de Amazonas, Ancash, Cusco, Huancavelica e Ica las concentraciones se encontraron por debajo del límite de detección (LOD).

Figura 27.

Concentración de cadmio (Cd) en frutos de palta por región (mg/kg).



Nota. Las barras representan la media ± desviación estándar de la concentración de cadmio en frutos de palta. Las concentraciones se expresan en mg/kg. LOD indica concentraciones por debajo del límite de detección del método analítico. Elaboración propia.

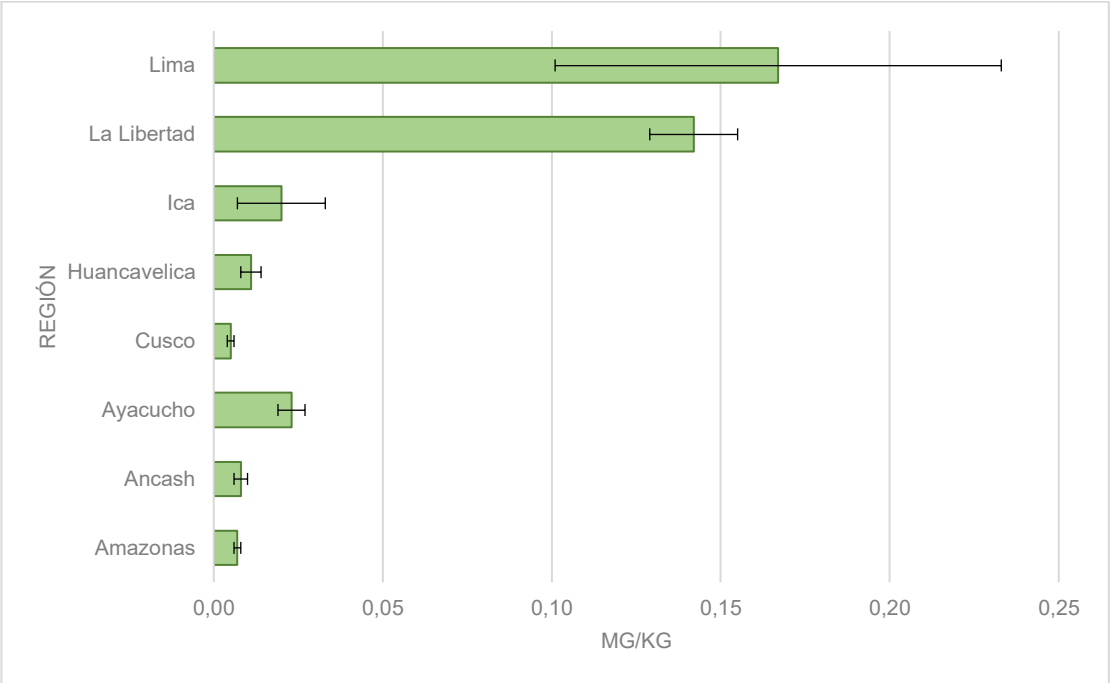
Cadmio (Cd). Las concentraciones de cadmio en frutos de palta fueron bajas en todas las regiones evaluadas, registrándose valores en Ayacucho (0,011 ± 0,068 mg/kg), Ica (0,016 ± 0,059 mg/kg), La Libertad (0,028 ± 0,091 mg/kg) y Lima (0,033 ± 0,098 mg/kg), mientras que en Amazonas, Ancash,

Cusco y Huancavelica los valores se encontraron por debajo del límite de detección (LOD).

Cromo (Cr). El Cr se mantuvo por debajo del LOD (<0,003 mg/kg) en todas las muestras evaluadas.

Figura 28.

Concentración de mercurio (Hg) en frutos de palta por región (mg/kg).



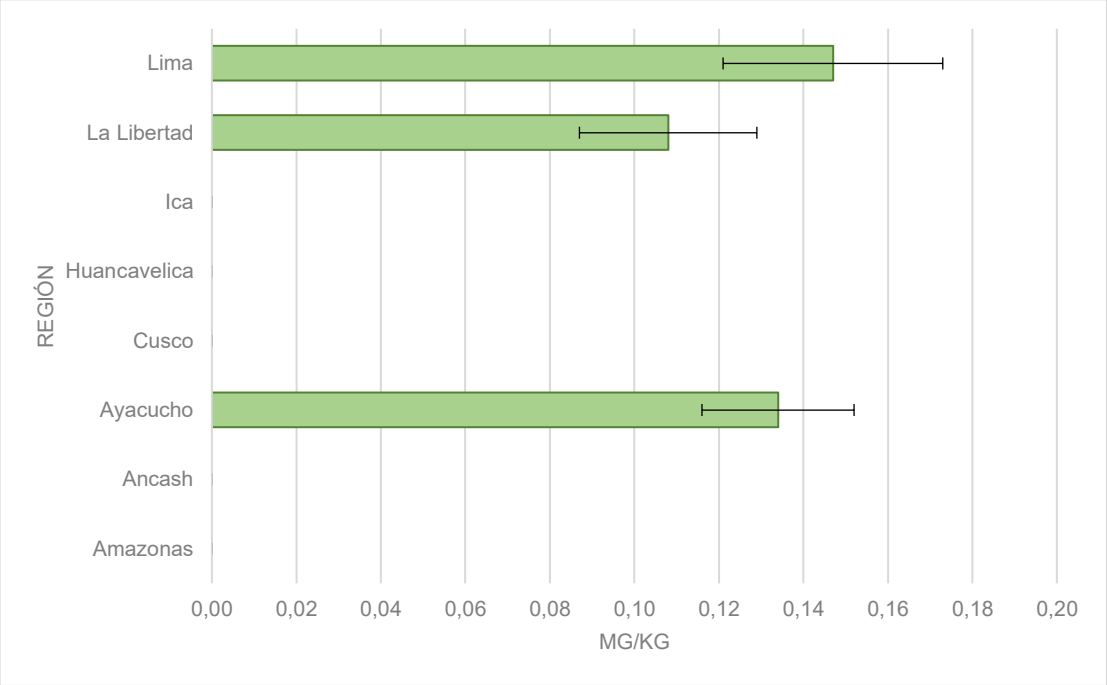
Nota. Las barras representan la media ± desviación estándar de la concentración de mercurio en frutos de palta. Las concentraciones se expresan en mg/kg. LOD indica concentraciones por debajo del límite de detección del método analítico. Elaboración propia.

Mercurio (Hg). El mercurio presentó concentraciones detectables en todas las regiones evaluadas, variando entre 0,005 ± 0,001 mg/kg en Cusco y 0,167 ± 0,060 mg/kg en Lima. Valores intermedios se observaron en Amazonas (0,007 ± 0,001 mg/kg), Ancash (0,008 ± 0,002 mg/kg), Huancavelica (0,011 ±

0,003 mg/kg), Ica (0,020 ± 0,013 mg/kg), Ayacucho (0,023 ± 0,004 mg/kg) y La Libertad (0,142 ± 0,013 mg/kg).

Figura 29.

Concentración de níquel (Ni) en frutos de palta por región (mg/kg).

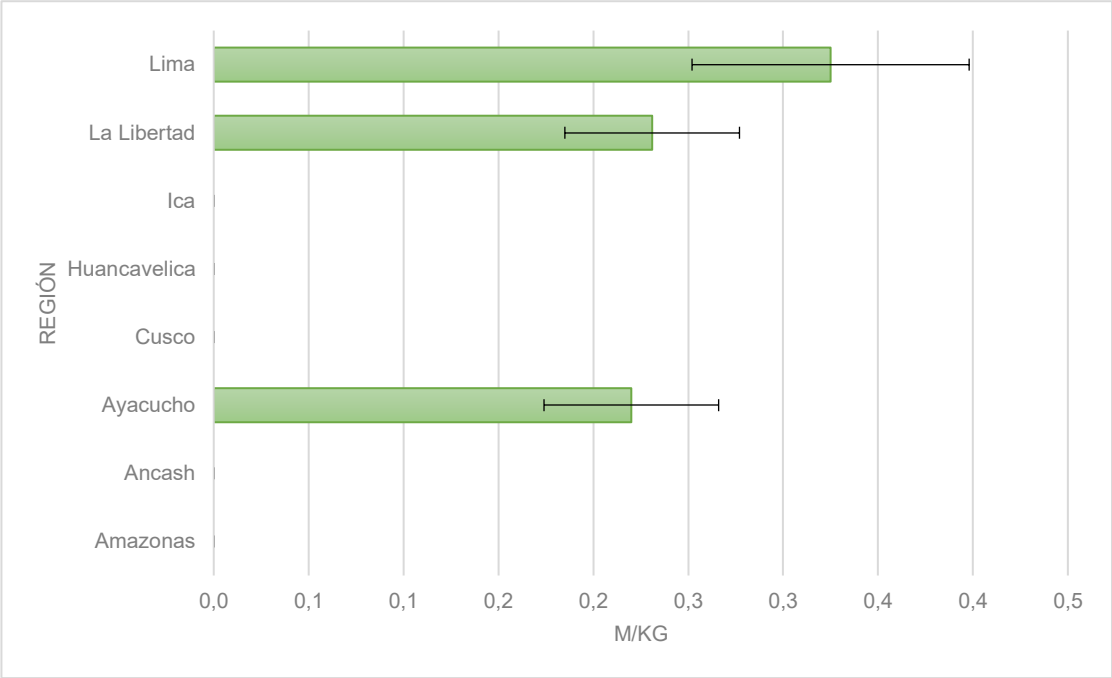


Nota. Las barras representan la media ± desviación estándar de la concentración de níquel en frutos de palta. Las concentraciones se expresan en mg/kg. LOD indica concentraciones por debajo del límite de detección del método analítico. Elaboración propia.

Níquel (Ni). El níquel fue detectado únicamente en tres regiones: Ayacucho (0,134 ± 0,018 mg/kg), La Libertad (0,108 ± 0,021 mg/kg) y Lima (0,147 ± 0,026 mg/kg). En Amazonas, Ancash, Cusco, Huancavelica e Ica las concentraciones se encontraron por debajo del límite de detección (LOD).

Figura 30.

Concentración de plomo (Pb) en frutos de palta por región (mg/kg).



Plomo (Pb). Las concentraciones de plomo en frutos de palta se detectaron en Ayacucho (0,220 ± 0,046 mg/kg), La Libertad (0,231 ± 0,046 mg/kg) y Lima (0,325 ± 0,073 mg/kg), mientras que en las demás regiones los valores estuvieron por debajo del límite de detección (LOD).

5.2. Riesgo ecológico de metales

5.2.1. Índice de geoacumulación (Igeo)

La calidad ambiental de los suelos se evaluó mediante el índice de geoacumulación (Igeo) para As, Cd, Cr, Hg, Ni y Pb. La Figura 31 muestra los valores medios y los percentiles 5 y 95 de Igeo para cada metal y región (véase en el Anexo 2)

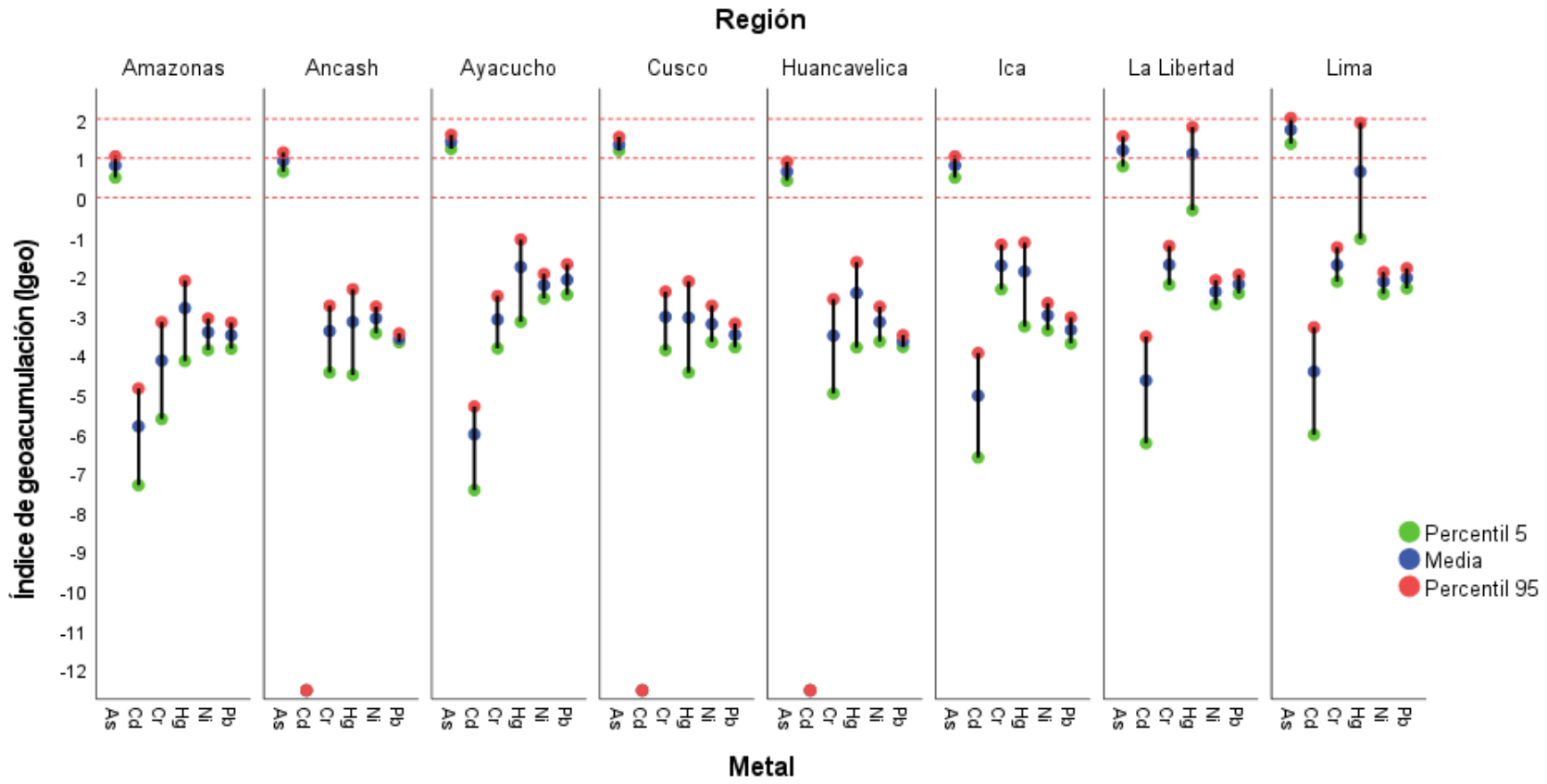
En términos generales, los suelos no evidenciaron contaminación por Cd, Cr, Ni ni Pb, ya que en todas las regiones los valores de Igeo para estos elementos se mantuvieron en el rango negativo (Igeo < 0). Esta tendencia se observó de manera consistente tanto en los promedios como en los percentiles, lo que indica que las concentraciones de estos metales corresponden mayormente a niveles de fondo geogénico, sin señales claras de enriquecimiento antrópico.

Dentro del marco, se observaron diferencias regionales marcadas para As y Hg. En La Libertad y Lima, los valores medios y del percentil 95 fueron más altos para Hg, mientras que para As se apreciaron incrementos en prácticamente todas las regiones, con valores que alcanzaron el rango de no contaminado a moderadamente contaminado (0 ≤ Igeo ≤ 2). Este comportamiento refleja una mayor acumulación localizada de estos dos metales en comparación con el resto, sugiriendo la influencia de fuentes antrópicas en determinadas zonas.

En las regiones de Ayacucho y Cusco se registraron incrementos moderados del Igeo para As, mientras que en Amazonas, Áncash, Huancavelica e Ica los valores se mantuvieron relativamente homogéneos y predominantemente negativos, lo que es consistente con condiciones de fondo natural y una baja presión antropogénica reciente

Figura 31.

Valores medios, percentil 5 y percentil 95 del índice geoacumulativo (Igeo) por región



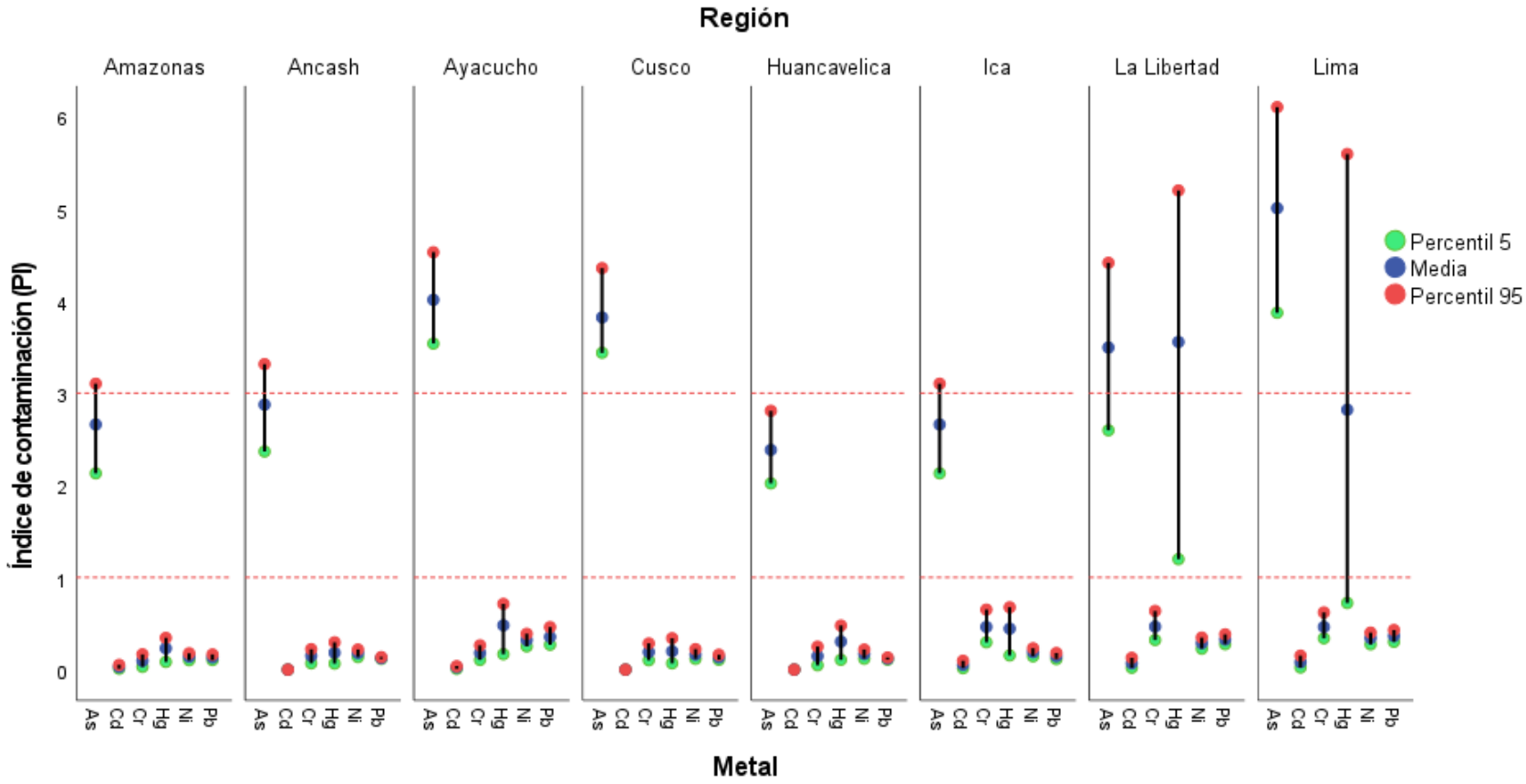
Nota. Elaboración Propia

5.2.2. Índice de Contaminación (PI)

La Figura 32 presenta el PI (P5, media y P95) para As, Pb, Cd, Cr, Ni y Hg por región. En general, Pb, Cd, Cr y Ni muestran PI < 1 en todas las regiones, indicando contaminación individual ausente o baja. En contraste, As concentra los valores más altos del PI y define las diferencias regionales. Ayacucho y Cusco alcanzan niveles fuertes (PI > 3), mientras que Lima presenta los valores más críticos, con media y P95 en categoría alta (≈ o > 5). El Hg se mantiene bajo en la mayoría de regiones, pero destaca en La Libertad y Lima, donde el P95 aumenta, evidenciando mayor variabilidad y presencia de puntos críticos. La mayor dispersión (P5–P95) se observa en Lima (y luego La Libertad), sugiriendo heterogeneidad espacial y posibles “hotspots”.

Figura 32.

Índice de Contaminación



Nota. Elaboración Propia

5.2.3. Riesgo ecológico (ER)

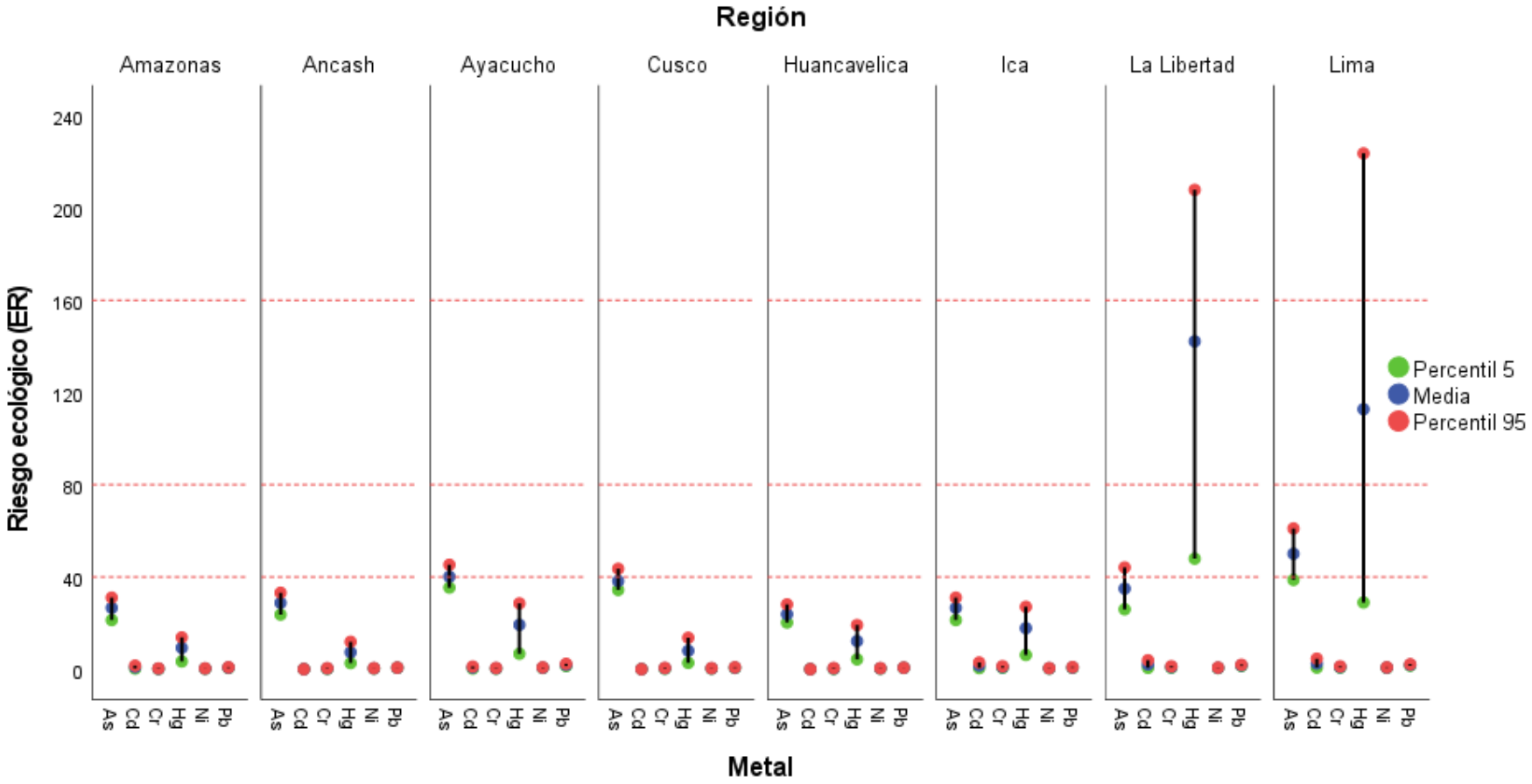
El riesgo ecológico potencial (ER) asociado a los metales evaluados se estimó a partir de las concentraciones determinadas en suelo y los factores de toxicidad correspondientes. La Figura 33 muestra los valores medios y los percentiles 5 y 95 de ER por región.

En términos generales, los valores de ER obtenidos se ubicaron mayoritariamente dentro de la categoría de riesgo bajo (ER ≤ 40) para los metales analizados. No se observaron valores correspondientes a riesgo alto o muy alto, y solo en casos puntuales algunos metales se aproximaron al límite superior del riesgo bajo o al umbral de riesgo moderado, lo que sugiere un escenario de afectación ecológica limitada bajo las condiciones actuales.

En conjunto, frente a estos antecedentes, los valores de ER del presente estudio se sitúan en un escenario más favorable, con niveles inferiores y ausencia de categorías de riesgo alto o muy alto. No obstante, las variaciones regionales observadas respaldan la pertinencia de fortalecer estrategias de monitoreo periódico y gestión preventiva en el largo plazo, especialmente en áreas con mayor presión antrópica.

Figura 33.

Valores medios y percentiles 5 y 95 del riesgo ecológico (ER) por región



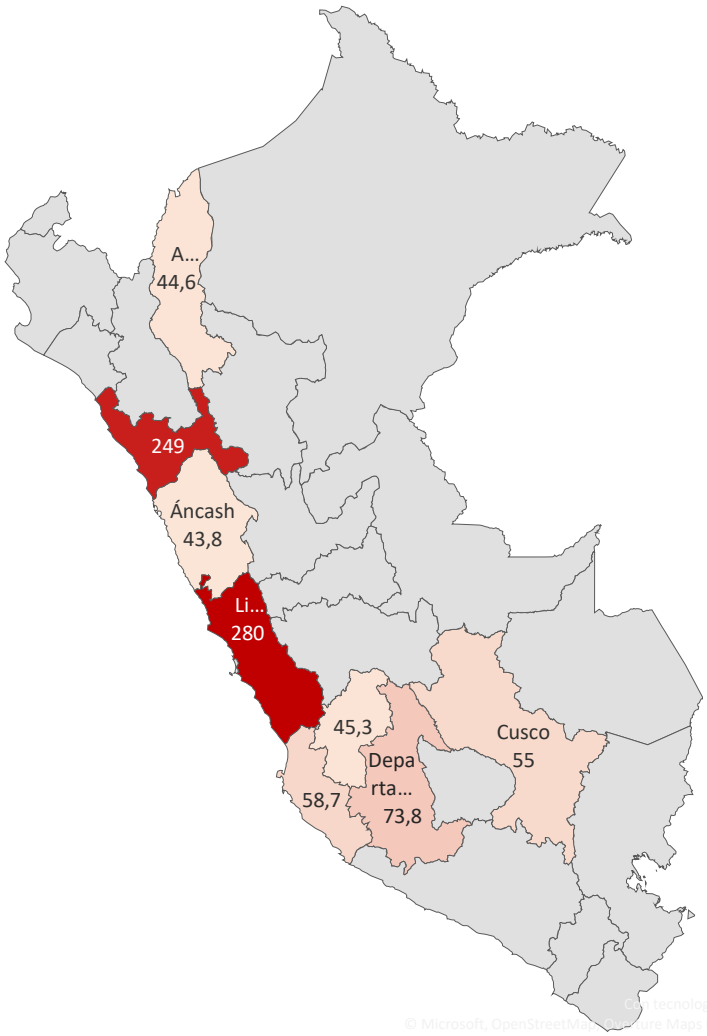
Nota. Elaboración Propia

5.2.4. Índice de riesgo ecológico potencial (RI)

El RI integró el riesgo ecológico individual de los seis metales. En general, las regiones presentaron riesgo bajo; sin embargo, en el percentil 95, La Libertad alcanzó un RI de 249 y Lima un RI de 280, ambos correspondientes a riesgo ecológico moderado.

Figura 34.

Índice de riesgo ecológico potencial (RI) P95



Nota. Elaboración propia

5.3. Bioacumulación de metales

5.3.1. Factor de bioacumulación (BAF)

El factor de bioacumulación (BAF) se empleó para evaluar la transferencia de metales desde el suelo hacia el fruto comestible de la palta. En la Figura 35 se presentan los valores medios y los percentiles 5 y 95 de BAF para As, Cd, Cr, Hg, Ni y Pb, clasificados por región productora.

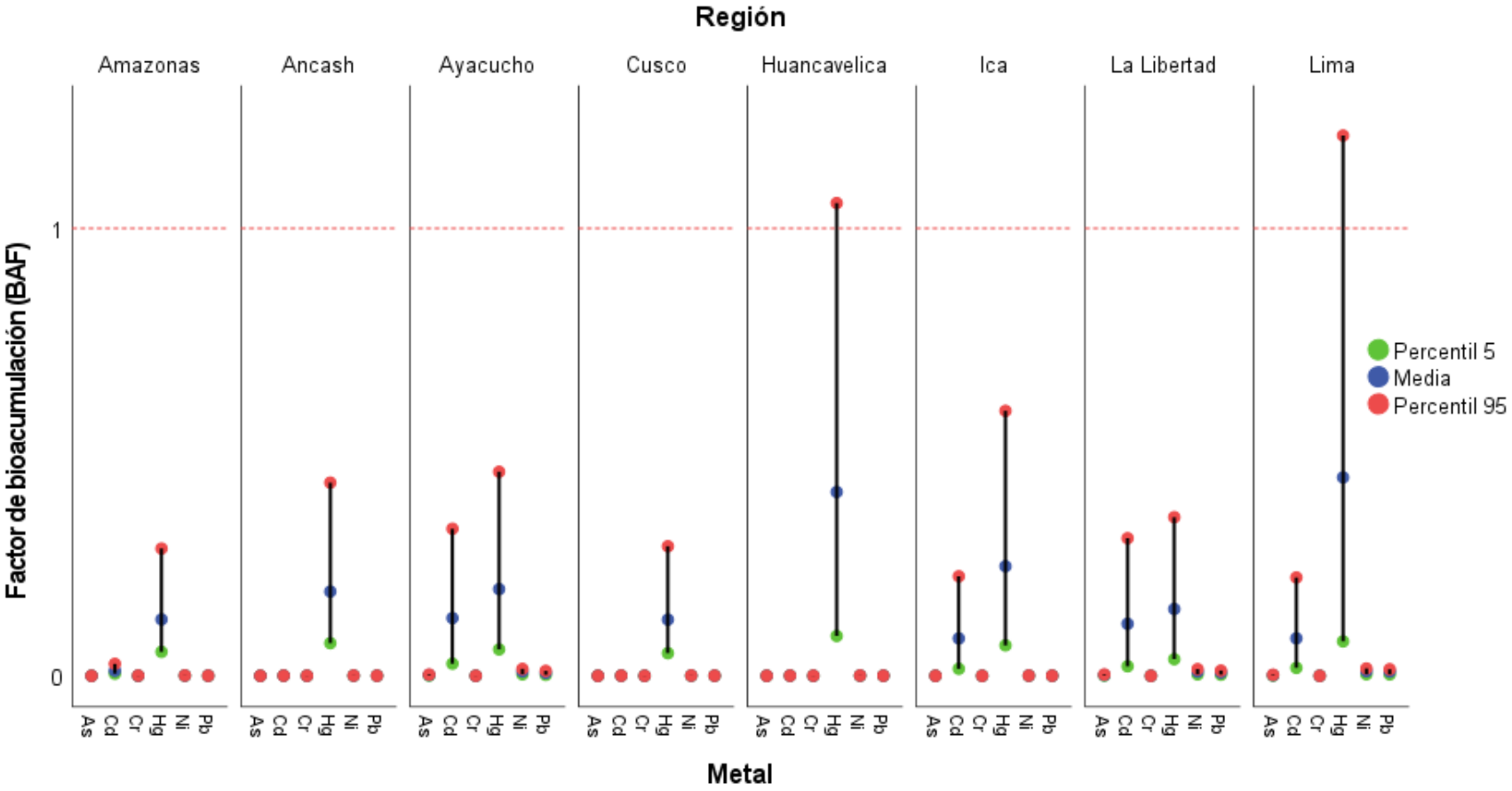
En términos generales, los BAF fueron inferiores a 1, lo que indica una baja eficiencia de translocación para la mayoría de los metales evaluados. Este comportamiento es coherente con la fisiología de *Persea americana,* en la cual la arquitectura radicular, la composición delxilema y la presencia de mecanismos de exclusión limitan la acumulación de elementos potencialmente tóxicos en tejidos comestibles.

Las diferencias regionales fueron notorias. En Huancavelica y Lima se observó una mayor dispersión y valores más elevados para Hg, especialmente en el percentil 95, lo que sugiere que, bajo determinadas condiciones edáficas, climáticas o agronómicas, podría producirse una bioacumulación incrementada de este metal. Por el contrario, regiones como Amazonas, Cusco y Ayacucho exhibieron valores de BAF consistentemente bajos, lo que puede reflejar bajos niveles de metales en el suelo, menores tasas de biodisponibilidad metálica o una combinación de ambos factores.

En conjunto, los resultados sugieren que los metales As, Cd, Cr, Ni y Pb presentan bioacumulación limitada, mientras que el Hg es el único metal que muestra un potencial de acumulación mayor en situaciones específicas.

Figura 35.

Valores medios y percentiles 5 y 95 del factor de bioacumulación (BAF) por región



Nota. Elaboración propia, resultados obtenidos mediante simulación Monte Carlo en el software @RISK

5.4. Evaluación del riesgo a la salud humana

5.4.1. Ingesta diaria estimada (EDI)

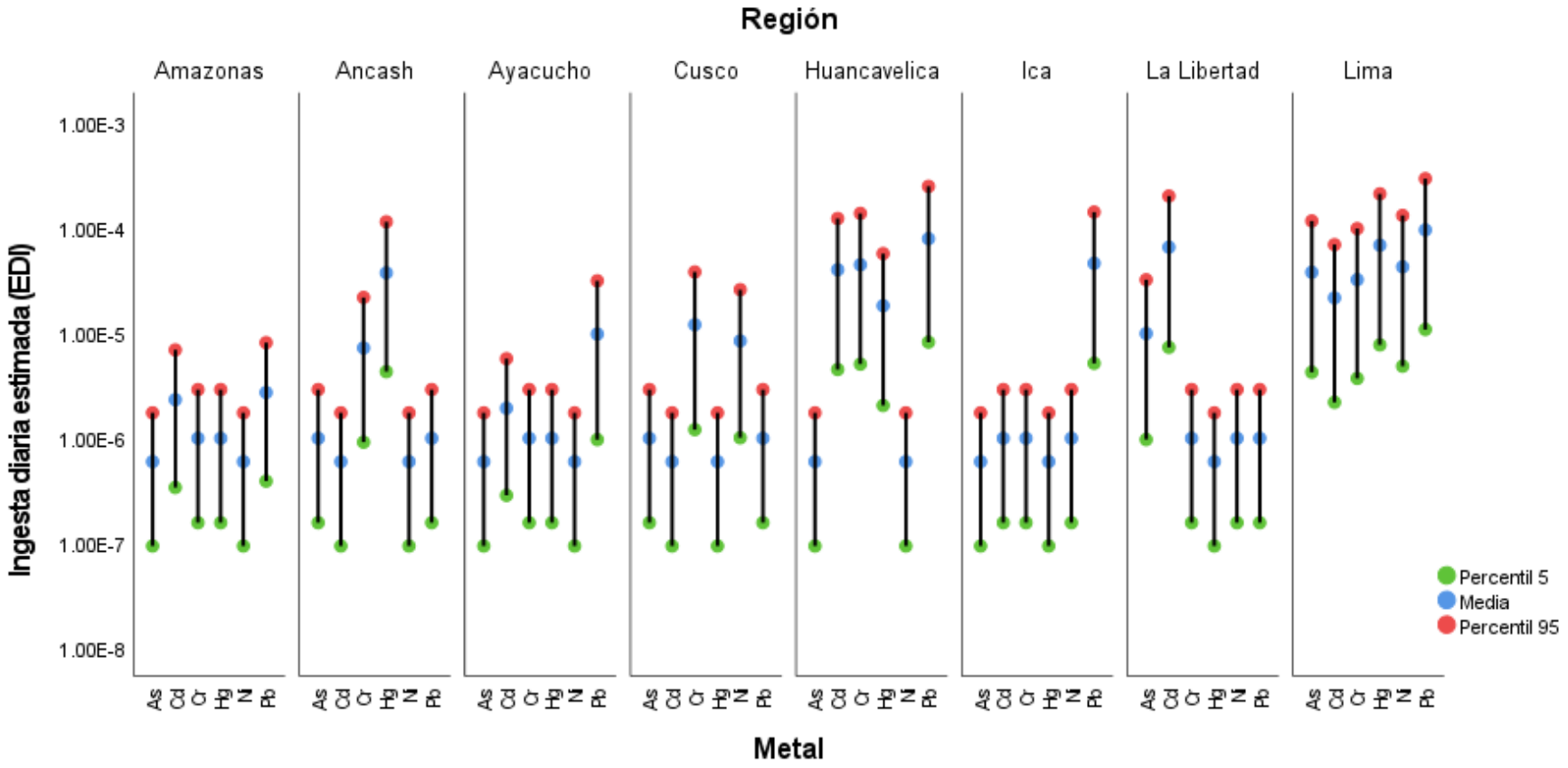
La ingesta diaria estimada (EDI) se calculó con base en las concentraciones de As, Cd, Cr, Hg, Ni y Pb determinadas en el fruto, considerando el consumo estimado de palta para la población y ajustando por peso corporal. La Figura 36 presenta los valores obtenidos de EDI para las principales regiones productoras del Perú, mostrando los percentiles 5, media y 95, generados mediante simulaciones probabilísticas (véase Anexo 3).

Las estimaciones evidencian una variabilidad regional marcada, indicando que los consumidores de distintas zonas podrían experimentar niveles de exposición diferenciados. En particular, las regiones de Huancavelica, Ica, La Libertad y Lima presentaron valores medios y del percentil 95 más elevados, lo cual es consistente con los patrones de concentración metálica observados anteriormente. Por contraste, regiones como Amazonas y Ayacucho mostraron valores de EDI más reducidos, reflejando menor acumulación y, consecuentemente, menor exposición potencial.

En términos cuantitativos, la mayoría de los valores de EDI se situaron en el rango de 10^{-6} a 10^{-5} mg/kg peso corporal/día, lo que corresponde a niveles considerados bajos desde el punto de vista toxicológico para los elementos evaluados, conforme a los rangos de referencia documentados para alimentos de origen vegetal y frutas en estudios internacionales.

Figura 36.

Valores medios, percentil 5 y percentil 95 de la ingesta diaria estimada (EDI) por región



Nota. Elaboración propia, resultados obtenidos mediante simulación Monte Carlo en el software @RISK

3.4.2. Índice de peligro (HI)

La Figura 37 muestra los valores medios y los percentiles 5 y 95 del cociente de peligro (HQ) y del índice de peligro (HI) asociados a Cd, Cr y Ni para las distintas regiones productoras de palta del Perú (véase Anexo 3). En todos los escenarios evaluados, el HI se mantuvo muy por debajo de la unidad (HI < 1), lo que indica ausencia de riesgo no carcinogénico significativo para la población consumidora bajo las condiciones de exposición modeladas.

A pesar de los bajos valores absolutos de HI, se evidenció una variabilidad regional apreciable. Las regiones de Ica, La Libertad y Lima presentaron los valores relativamente más elevados, especialmente en el percentil 95, lo que sugiere escenarios de exposición máxima asociados a condiciones locales específicas, tales como mayores concentraciones metálicas en fruto, variaciones en la biodisponibilidad o patrones diferenciales de consumo.

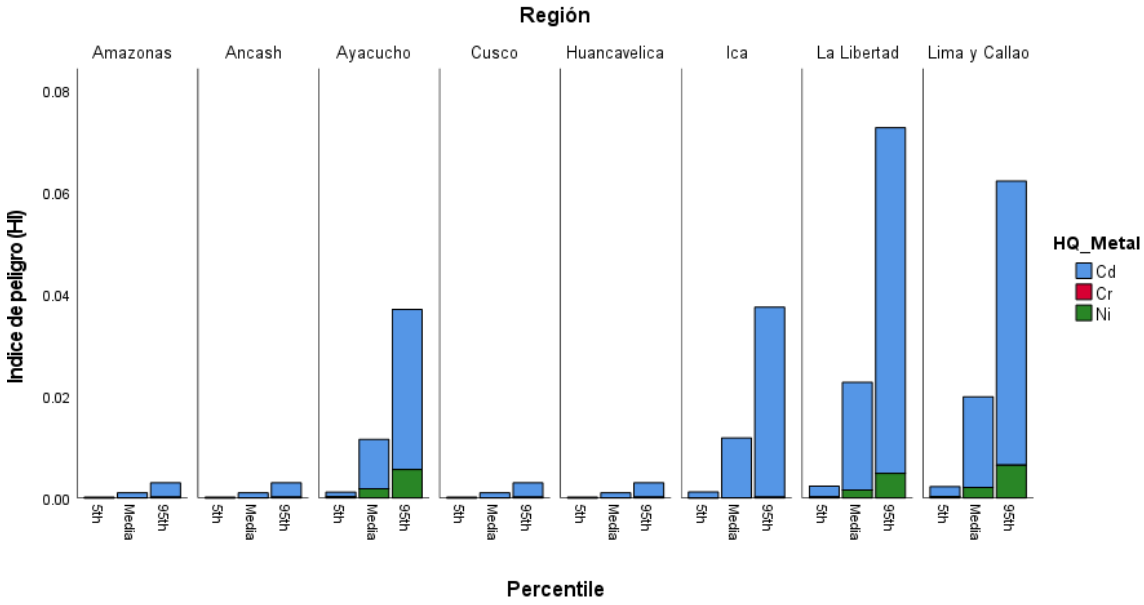
En cuanto a la contribución relativa de cada metal al HI total, el cadmio (Cd) fue el principal componente, seguido por el níquel (Ni), mientras que el cromo (Cr) aportó de manera mínima o marginal. Este comportamiento concuerda con la baja movilidad fisiológica y la escasa presencia de Cr en el fruto, previamente evidenciada, y con las diferencias toxicológicas establecidas para la vía oral entre Cd, Ni y Cr.

En conjunto, el Gráfico 17 evidencia que la contribución combinada de Cd, Cr y Ni al HQ y al HI en las regiones productoras de palta del Perú se mantiene por debajo de los umbrales de preocupación, confirmando un

escenario de riesgo no carcinogénico bajo para el consumo del fruto (véase Anexo 3).

Figura 37.

Valores medios, percentil 5 y percentil 95 de Indice de Peligro (HQ/HI) por región



Nota. Elaboración propia, resultados obtenidos mediante simulación Monte Carlo en el software @RISK

5.4.3. Riesgo carcinogénico (CR)

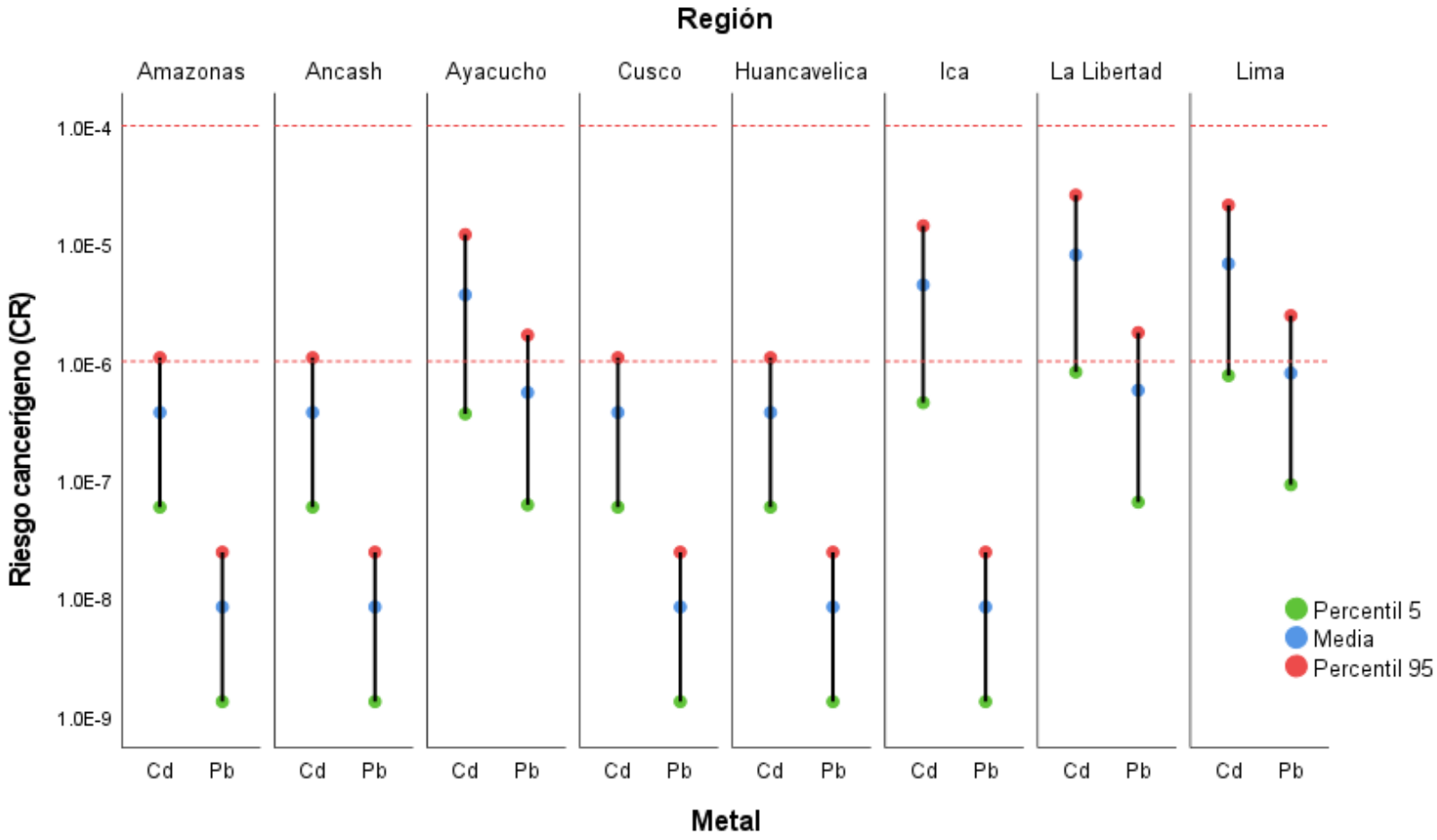
La Figura 38 muestra los valores estimados del riesgo carcinogénico (CR) asociados a la ingesta de cadmio (Cd) y plomo (Pb) a través del consumo de palta en las principales regiones productoras del Perú (véase Anexo 3). En términos cuantitativos, los valores de CR se ubicaron en el rango de 10^{-8} a 10^{-5}, lo que corresponde a un riesgo bajo ($<10^{-6}$) o dentro del rango aceptable

(10^{-6}–10^{-4}) según los criterios toxicológicos usualmente empleados para evaluaciones de exposición crónica en alimentos.

Si bien ningún valor superó el umbral de preocupación (1×10^{-4}), la variabilidad regional observada sugiere diferencias en la exposición potencial de los consumidores. Las regiones de Ayacucho, Ica, La Libertad y Lima exhibieron los valores más elevados, especialmente en el percentil 95, lo que refleja un escenario de exposición máxima que se aproxima al límite superior del rango tolerable. Por contraste, regiones como Amazonas, Áncash y Huancavelica mostraron los niveles más reducidos de riesgo cancerígeno.

Figura 38.

Valores medios y percentiles 5 y 95 del riesgo carcinogénico (CR) por región



Nota. Elaboración Propia

CAPÍTULO VI: DISCUSIÓN

6.1. Concentración de metales en el suelo

La distribución de metales en los suelos evaluados pone de manifiesto que los sistemas de producción de palta en el Perú están condicionados por la interacción de factores geológicos, agronómicos y antrópicos, lo que se traduce en una marcada heterogeneidad espacial de concentraciones. Este comportamiento es consistente con lo descrito para suelos agrícolas del país, donde la variabilidad en contenidos de metales responde tanto a la composición del material parental y a los procesos de meteorización como al historial de uso del suelo y a la intensidad del manejo productivo.

En el caso del arsénico (As), las concentraciones medias registradas en los suelos agrícolas variaron entre 34,014 mg/kg en Huancavelica y 76,174 mg/kg en Lima, mientras que regiones como Ayacucho (58,976 mg/kg), Cusco (52,674 mg/kg) y La Libertad (51,814 mg/kg) también presentaron valores relativamente elevados. Estos resultados se encuentran dentro de los rangos reportados para suelos agrícolas asociados al cultivo de palta en el Perú, donde se han documentado concentraciones desde valores inferiores al límite de detección hasta aproximadamente 246 mg/kg, con una media de 50,8 ± 58,13 mg/kg (Solórzano et al., 2025). La similitud entre los valores medios observados en el presente estudio y los reportados en la literatura respalda la elevada variabilidad espacial del As en suelos agrícolas y sugiere la influencia combinada de procesos geogénicos, asociados a la composición mineral del

suelo, y de aportes antrópicos derivados de prácticas agrícolas o deposición atmosférica.

Desde el punto de vista del manejo agronómico, la literatura documenta ampliamente que el uso de fertilizantes minerales y orgánicos, así como de plaguicidas (rodenticidas, fungicidas, insecticidas, herbicidas y nematicidas), constituye una vía relevante de ingreso de metales como Cd, Ni, Pb, As y Cr al suelo agrícola (Guadalupe et al., 2024). En este contexto, la coincidencia entre las regiones con mayores niveles de As y aquellas con agricultura más tecnificada sugiere que el manejo histórico de insumos podría haber contribuido a la acumulación de este elemento, sin excluir el control ejercido por la geología local.

La comparación con otros sistemas agrícolas del país refuerza esta interpretación. Valores de As similares han sido reportados en suelos cafetaleros de Amazonas, en suelos de papa en Moquegua y en suelos de quinua en Huánuco (Bedoya-Perales et al., 2023; Guadalupe et al., 2023; Rosales-Huamani et al., 2023). Aunque se trata de cultivos distintos, la recurrencia del As en diferentes contextos agroecológicos confirma su presencia generalizada en suelos agrícolas peruanos, caracterizada por una distribución heterogénea más que por focos puntuales de contaminación.

En relación con el cadmio (Cd), la detección por encima del límite analítico únicamente en determinadas regiones, como Amazonas (0,271 mg/kg), Ayacucho (0,339 mg/kg), Ica (0,384 mg/kg), La Libertad (0,479 mg/kg) y Lima (0,548 mg/kg), evidencia un patrón de distribución espacial heterogéneo en los suelos agrícolas evaluados, mientras que en regiones como Áncash,

Cusco y Huancavelica las concentraciones se situaron por debajo del límite de detección del método analítico. Aunque los valores medios observados se mantienen por debajo del Estándar de Calidad Ambiental para Suelo (ECA-Suelo) de 1,4 mg/kg, la presencia de Cd en varias regiones sugiere posibles aportes asociados al manejo agronómico y al uso histórico de fertilizantes fosfatados, reconocidos como una de las principales fuentes antropogénicas de este metal en sistemas agrícolas. Este comportamiento es consistente con lo reportado para suelos palteros del Perú, donde se han documentado concentraciones que varían desde valores inferiores al límite de detección hasta 11,980 mg/kg, con una media de 0,540 ± 1,000 mg/kg, confirmando nuevamente una elevada heterogeneidad espacial en la distribución de este metal (Solórzano et al., 2025).

Estudios previos en otros cultivos respaldan esta tendencia. En suelos cacaoteros se han reportado niveles relativamente bajos de Cd, mientras que en suelos cafetaleros se han documentado rangos más amplios, atribuidos principalmente al uso de fertilizantes fosfatados, reconocidos como una de las principales fuentes de Cd en agroecosistemas (Arévalo-Gardini et al., 2017; Guadalupe et al., 2024). En conjunto, estos antecedentes sugieren que los patrones de acumulación de Cd en suelos agrícolas peruanos responden tanto al tipo de insumo empleado como a la intensidad de uso del suelo.

El cromo (Cr) presentó concentraciones medias relativamente elevadas en los suelos analizados, observándose una tendencia a mayores valores en regiones de la costa peruana, particularmente en Ica (38,182 mg/kg), La Libertad (37,789 mg/kg) y Lima (35,612 mg/kg). Este patrón espacial sugiere

que los sistemas agrícolas ubicados en zonas de mayor intensificación productiva podrían estar sometidos a una mayor presión antrópica en comparación con regiones andinas o amazónicas. Diversos estudios han señalado que la presencia de Cr en suelos agrícolas puede estar asociada tanto a factores naturales, como la composición mineralógica del material parental, como a fuentes antropogénicas vinculadas a descargas industriales, deposición atmosférica, uso de aguas residuales para riego y aplicación de agroquímicos que incorporan compuestos de este metal en su formulación. En este sentido, las concentraciones medias observadas en el presente estudio son coherentes con las reportadas para suelos agrícolas asociados al cultivo de palta y otros sistemas productivos del Perú, lo que confirma que la distribución de Cr en suelos agrícolas está condicionada por la interacción entre procesos geoquímicos naturales y actividades productivas(Espinoza-Guillen et al., 2022; Guadalupe et al., 2024; Solórzano et al., 2025).

Respecto al mercurio (Hg), las concentraciones medias registradas en los suelos evaluados fueron generalmente bajas en la mayoría de regiones, observándose valores de 0,075 mg/kg en Amazonas, 0,048 mg/kg en Áncash, 0,161 mg/kg en Ayacucho, 0,045 mg/kg en Cusco, 0,088 mg/kg en Huancavelica y 0,140 mg/kg en Ica. Sin embargo, se identificaron concentraciones relativamente mayores en La Libertad (0,278 mg/kg) y Lima (0,367 mg/kg), lo que podría reflejar la influencia de actividades mineras históricas, considerando el uso del Hg en procesos de amalgamación de oro en diversas regiones del país. A pesar de estas diferencias espaciales, todas las concentraciones medias se mantuvieron muy por debajo del Estándar de Calidad Ambiental para Suelo (ECA-Suelo) de 6,6 mg/kg, lo que indica que,

desde el punto de vista normativo, no se configura un escenario de contaminación crítica. Estos resultados son consistentes con los reportes disponibles para suelos asociados al cultivo de palta en el Perú, donde el Hg suele presentarse en concentraciones relativamente bajas y con una marcada variabilidad espacial (Solórzano et al., 2025)

En el caso del níquel (Ni), las concentraciones medias observadas mostraron una variabilidad regional moderada, registrándose valores de 10,823 mg/kg en Lima y 9,789 mg/kg en Ayacucho, superiores a los observados en otras regiones como Amazonas (4,415 mg/kg), Cusco (4,250 mg/kg), Áncash (5,648 mg/kg), Huancavelica (5,261 mg/kg) e Ica (5,826 mg/kg). Esta distribución sugiere que la presencia de Ni en los suelos agrícolas evaluados podría estar asociada tanto a la composición mineralógica del material parental como a aportes antrópicos derivados del manejo agronómico. Diversos estudios han señalado que el uso continuo de fertilizantes minerales y enmiendas orgánicas puede incrementar progresivamente el contenido de Ni en suelos agrícolas, particularmente en sistemas con alta intensidad productiva(Rashid et al., 2023; Zhuang et al., 2020). Los valores obtenidos se encuentran dentro de los rangos reportados para otros cultivos peruanos, confirmando que el Ni presenta una distribución comparable entre distintos sistemas productivos.

Finalmente, en el caso del plomo (Pb), las concentraciones medias registradas evidenciaron una variabilidad regional moderada, observándose valores relativamente mayores en Lima (25,348 mg/kg) y Ayacucho (22,081 mg/kg), mientras que en otras regiones como Amazonas (9,049 mg/kg),

Áncash (8,124 mg/kg), Cusco (9,245 mg/kg), Huancavelica (8,064 mg/kg) e Ica (10,007 mg/kg) se registraron concentraciones menores. Este patrón espacial sugiere que la presencia de Pb en los suelos agrícolas evaluados podría estar asociada a diversas fuentes antrópicas, incluyendo emisiones vehiculares, combustión de combustibles fósiles, deposición atmosférica de residuos industriales y la influencia de actividades mineras en determinadas regiones. A pesar de estas diferencias regionales, todas las concentraciones medias se mantuvieron por debajo del Estándar de Calidad Ambiental para Suelo (ECA-Suelo) de 70 mg/kg, lo que indica que, desde el punto de vista normativo, no se configura un escenario de contaminación crítica. La distribución observada es consistente con lo descrito en estudios previos realizados en suelos agrícolas del Perú, donde se ha señalado que las regiones con mayor urbanización o intensidad de actividades productivas suelen presentar concentraciones relativamente superiores de Pb en comparación con zonas rurales menos intervenidas(Espinoza-Guillen et al., 2022; Guadalupe et al., 2024).

6.2. Concentración de metales pesados en frutos de palta

Al analizar la concentración de metales en los frutos de palta, los resultados evidencian que la transferencia suelo–fruto es limitada, lo que concuerda con lo descrito en la literatura para cultivos frutales perennes y, en particular, para la palta, caracterizada por una baja eficiencia de acumulación de metales en la parte comestible. Este comportamiento se explica por mecanismos fisiológicos de exclusión radicular, inmovilización en la rizósfera, complejación con compuestos orgánicos de la pared celular y retención

preferencial en tejidos no translocables, que restringen el movimiento de metales hacia el fruto (Chen et al., 2016; Gupta et al., 2019).

El arsénico (As) presentó concentraciones detectables únicamente en Ayacucho (0,154 mg/kg), La Libertad (0,125 mg/kg) y Lima (0,152 mg/kg), mientras que en las demás regiones las concentraciones se mantuvieron por debajo del límite de detección. Este patrón sugiere la presencia de una barrera fisiológica de translocación relativamente eficaz en el cultivo de palta, lo cual es coherente con el comportamiento descrito para este metaloide en diversas especies vegetales. El As presenta una elevada afinidad por los tejidos radiculares y tiende a quedar retenido en el apoplasto o inmovilizado mediante complejación con compuestos celulares como lignina, fitatos o moléculas ricas en azufre, lo que limita su transporte hacia órganos aéreos y estructuras de almacenamiento como el fruto. La comparación con estudios internacionales evidencia una marcada variabilidad en la acumulación de As en frutos de palta. Investigaciones realizadas en Colombia han reportado concentraciones bajas o incluso no detectables, mientras que estudios desarrollados en Nigeria y Arabia Saudita han documentado niveles más elevados, lo que evidencia que la acumulación de este metaloide depende en gran medida del contexto edáfico, la biodisponibilidad del elemento y las prácticas de manejo agrícola aplicadas en cada sistema productivo (AlJuhaimi et al., 2024; Castañeda et al., 2025; Mafulul et al., 2023).

En el caso del cadmio (Cd), las concentraciones detectables se registraron únicamente en Ayacucho (0,011 mg/kg), Ica (0,016 mg/kg), La Libertad (0,028 mg/kg) y Lima (0,033 mg/kg), mientras que en las demás

regiones se mantuvieron por debajo del límite de detección. Estos valores corresponden a concentraciones de nivel traza y coinciden con lo reportado en diversos programas de monitoreo ambiental y seguridad alimentaria a nivel internacional. Desde el punto de vista fisiológico, se ha documentado que el Cd tiende a permanecer retenido en las raíces o a ser inmovilizado mediante procesos de complejación con compuestos orgánicos y exudados radiculares, lo que reduce su transporte hacia los tejidos comestibles de la planta. La comparación con estudios realizados en sistemas agrícolas africanos, donde se han reportado concentraciones relativamente mayores de Cd en frutos de palta, respalda la hipótesis de que las diferencias observadas pueden estar asociadas a variaciones en las condiciones edáficas, el uso de fertilizantes fosfatados y la intensidad del manejo agrícola(Mafulul et al., 2023).

El cromo (Cr) no fue detectable en ninguna de las muestras de fruto analizadas, lo que coincide con lo descrito en la literatura sobre la dinámica de este metal en sistemas suelo-planta. Diversos estudios han señalado que el Cr presenta una movilidad extremadamente limitada dentro de la planta, debido a su fuerte adsorción en las raíces y a su escasa translocación a través del floema. Este comportamiento explica su ausencia en órganos reproductivos y frutos incluso cuando el suelo presenta concentraciones moderadas o elevadas, como se evidenció en los suelos evaluados en el apartado 6.1. En este sentido, la ausencia de Cr en los frutos analizados es consistente con los mecanismos fisiológicos de exclusión descritos para este metal en diversos cultivos agrícolas (Dong et al., 2023; Gupta et al., 2019)

Por su parte, el mercurio (Hg) fue detectable en todas las regiones evaluadas, aunque en concentraciones relativamente bajas, con valores que oscilaron entre 0,005 mg/kg en Cusco y 0,167 mg/kg en Lima, registrándose también concentraciones relativamente elevadas en La Libertad (0,142 mg/kg). Considerando que el Hg presenta una movilidad limitada dentro de las plantas, su presencia en tejidos comestibles podría estar asociada a rutas de incorporación no radiculares, como la deposición atmosférica de partículas contaminantes o la absorción foliar directa. Este fenómeno ha sido documentado en sistemas agrícolas ubicados en regiones con influencia minera o con presencia de emisiones atmosféricas que contienen compuestos de mercurio, lo que puede favorecer su deposición sobre la superficie de hojas y frutos(Castañeda et al., 2025)

En el caso del níquel (Ni), las concentraciones detectables se observaron principalmente en Ayacucho (0,134 mg/kg), La Libertad (0,108 mg/kg) y Lima (0,147 mg/kg), permaneciendo por debajo del límite de detección en las demás regiones evaluadas. Este comportamiento es coherente con el papel del Ni como micronutriente esencial para las plantas, aunque con una translocación limitada hacia los órganos reproductivos. Los valores obtenidos fueron inferiores a los reportados en estudios realizados en sistemas agrícolas de Etiopía, lo que sugiere que factores como el manejo de la fertilización, la composición mineralógica del suelo y la disponibilidad del metal en la rizosfera pueden influir significativamente en su biodisponibilidad y en su acumulación en frutos (Babuskin et al., 2022)

Finalmente, el plomo (Pb) fue uno de los metales detectados con mayor frecuencia en los frutos analizados, registrándose concentraciones de 0,220 mg/kg en Ayacucho, 0,231 mg/kg en La Libertad y 0,325 mg/kg en Lima, mientras que en las demás regiones se mantuvo por debajo del límite de detección. Este comportamiento ha sido asociado principalmente a procesos de deposición atmosférica y adsorción superficial en el pericarpio del fruto, más que a un proceso eficiente de absorción radicular y translocación interna dentro de la planta. Diversos estudios han señalado que la presencia de Pb en frutos agrícolas puede estar relacionada con la proximidad a corredores vehiculares, zonas urbanizadas o áreas con actividad minera, factores que contribuyen a la liberación de partículas contaminantes al ambiente (Singh & Kumar, 2017; Yu et al., 2017).

Al integrar los resultados de concentración en suelo (apartado 6.1) con los obtenidos en fruto, se evidencia una desconexión parcial entre ambos compartimentos, lo cual es consistente con los factores de bioacumulación (BAF < 1) observados para todos los metales evaluados. Este hallazgo confirma que, bajo las condiciones agrícolas peruanas estudiadas, la palta presenta una bioacumulación limitada de metales en la parte comestible, aun en escenarios donde los suelos muestran variabilidad en sus contenidos, reforzando la necesidad de evaluar el riesgo de manera integrada y basada en la exposición real del consumidor.

6.3. Riesgo ecológico asociado a metales pesados en suelos agrícolas

6.3.1. Índice de geoacumulación (Igeo)

El análisis del índice de geoacumulación (Igeo) permite contextualizar los resultados de concentración de metales en suelo desde una perspectiva ecológica, diferenciando entre niveles asociados al fondo geogénico y aquellos atribuibles a procesos de enriquecimiento antrópico. En los sistemas agrícolas evaluados, el patrón general del Igeo confirma que la mayoría de los metales se encuentran en rangos compatibles con condiciones naturales, con excepciones localizadas para el arsénico (As) y el mercurio (Hg).

En el caso del arsénico (As), los valores de Igeo se situaron predominantemente en el rango de no contaminado a moderadamente contaminado ($0 \leq Igeo \leq 2$) en varias regiones. Este comportamiento es coherente con la literatura que identifica al As como uno de los principales elementos de preocupación en suelos agrícolas del Perú. Custodio et al., (2021)Custodio et al. (2021) reportaron niveles de contaminación por As entre moderada y alta ($2 < Igeo < 4$) en suelos de la sierra central, mientras que Orellana-Mendoza et al. (2022) informaron valores de Igeo de hasta 3,15, asociados claramente a fuentes antropogénicas. De manera complementaria, Santos-Francés et al. (2017)describieron rangos amplios de Igeo para As (−3,70 a 3,62), con los valores más elevados en zonas mineras de Huancavelica y Cajamarca, y Guadalupe et al. (2024)) reportaron valores $Igeo < 3$ en suelos agrícolas de Amazonas y San Martín.

Frente a estos antecedentes, los valores sierra central. De manera similar, Santos-Francés et al. (2017) informaron un rango amplio para Pb (−3,17 a 2,71), asociado a influencias industriales y mineras. En el contexto del presente estudio, la ausencia de incrementos significativos en el Igeo de Pb sugiere una baja contribución de fuentes antropogénicas recientes en los sistemas de producción de palta evaluados.

6.3.2. Índice de contaminación (PI)

La evaluación probabilística del Índice de Contaminación (PI) evidenció diferencias espaciales importantes entre los metales analizados y las regiones productoras de palta evaluadas. En general, los valores de PI para Pb, Cd, Cr y Ni se mantuvieron por debajo de 1 en la mayoría de regiones, lo que indica ausencia de contaminación o niveles bajos de contaminación individual según los criterios de clasificación establecidos para este índice. Este comportamiento coincide con lo reportado en estudios realizados en suelos agrícolas de América Latina y otros sistemas agrícolas tropicales, donde dichos metales suelen presentar niveles moderados asociados principalmente al material parental y a aportes antropogénicos de baja intensidad (Guadalupe et al., 2024; Kabata-Pendias, 2011).

En contraste, el arsénico (As) presentó los valores más elevados del PI y constituyó el principal elemento responsable de las diferencias regionales observadas. Regiones como Ayacucho y Cusco alcanzaron niveles compatibles con contaminación fuerte (PI > 3), mientras que Lima presentó los valores más críticos, con medias y percentiles altos

cercanos o superiores a 5, lo que corresponde a una categoría de contaminación alta. Este comportamiento es consistente con lo descrito en investigaciones previas realizadas en suelos agrícolas peruanos, donde el As suele representar el principal factor de presión geoquímica debido tanto a la composición natural de los suelos andinos como a la influencia de actividades mineras y agrícolas intensivas (Espinoza-Guillen et al., 2022; Solórzano et al., 2025a).

En el caso del mercurio (Hg), los valores de PI se mantuvieron bajos en la mayoría de regiones evaluadas; sin embargo, La Libertad y Lima mostraron incrementos importantes en el percentil 95, evidenciando una mayor variabilidad espacial y la posible existencia de puntos críticos o “hotspots” de contaminación. Este comportamiento sugiere que, aunque las concentraciones medias no indican un escenario generalizado de contaminación, existen áreas específicas donde el aporte de Hg podría estar asociado a actividades extractivas históricas, deposición atmosférica o procesos locales de acumulación. Estudios previos han documentado patrones similares en regiones con antecedentes de actividad minera aurífera, donde el Hg presenta una distribución heterogénea y altamente dependiente de factores locales (Castañeda et al., 2025).

La dispersión observada entre los percentiles P5 y P95 fue particularmente marcada en Lima y, en menor medida, en La Libertad, lo que evidencia una elevada heterogeneidad espacial de la contaminación en estas regiones. Este patrón podría estar relacionado

con diferencias en el uso histórico del suelo, intensidad del manejo agrícola, cercanía a zonas urbanas o industriales y variabilidad en las características geoquímicas de los suelos. La literatura señala que este tipo de comportamiento es característico de sistemas agrícolas sometidos a múltiples fuentes de contaminación difusa, donde la presencia de “hotspots” genera una distribución no homogénea de metales en el territorio (Rashid et al., 2023; Zhuang et al., 2020).

En conjunto, los resultados del PI indican que, aunque la mayoría de los metales evaluados presentan niveles bajos de contaminación individual, el As constituye el principal elemento de preocupación ambiental en los suelos agrícolas estudiados, particularmente en regiones como Lima, Ayacucho y Cusco. Asimismo, la variabilidad probabilística observada para Hg en determinadas regiones resalta la importancia de incorporar enfoques espaciales y probabilísticos en la evaluación de contaminación agrícola, ya que los valores promedio por sí solos podrían subestimar la presencia de zonas localizadas con mayor presión ambiental.

6.3.3. Riesgo ecológico (ER)

La comparación de los valores de riesgo ecológico potencial (ER) obtenidos en el presente estudio con aquellos reportados en la literatura indica que, en los sistemas de producción de palta evaluados, el riesgo ecológico asociado a los metales analizados es globalmente bajo. Este resultado es coherente con los valores del índice de geoacumulación (Igeo) discutidos en el apartado anterior, los cuales evidencian ausencia

de contaminación significativa para la mayoría de los metales, con enriquecimientos moderados puntuales para arsénico (As) y mercurio (Hg).

En contextos con mayor presión antrópica, particularmente en áreas con influencia minera o industrial, se han reportado escenarios de riesgo ecológico sustancialmente más elevados. Santos-Francés et al. (2017) documentaron valores de ER para As de hasta 184,10 y para Cd de 139,21, correspondientes a categorías de riesgo considerable y alto. De manera concordante, Custodio et al. (2021) encontraron que el As puede constituirse en el principal contribuyente al riesgo ecológico en suelos de la sierra central del Perú, con valores que oscilaron entre 70,63 y 192,19, reflejando un impacto ecológico relevante. Estas diferencias ponen de manifiesto la fuerte dependencia del riesgo ecológico respecto del contexto geográfico, el historial de uso del suelo y la intensidad de las actividades productivas.

Asimismo, Orellana-Mendoza et al. (2022) evidenciaron que, en áreas urbanas y periurbanas del Perú, los metales As, Cd y Pb pueden elevar el riesgo ecológico total a categorías de alto y muy alto, con implicancias directas tanto para los ecosistemas como para la salud humana. A partir de estos hallazgos, diversos autores han propuesto a As y Cd como metales prioritarios en la gestión de suelos agrícolas, dada su elevada toxicidad, persistencia ambiental y potencial de bioacumulación (Kumar et al., 2019; Zhang et al., 2024).

En contraste con estos escenarios, los resultados del presente estudio muestran que, aunque As y Hg requieren una atención específica en regiones como La Libertad y Lima, el riesgo ecológico global en los sistemas palteros evaluados es significativamente menor al descrito para zonas mineras o altamente impactadas. Esta diferencia refuerza la interpretación de que los sistemas agrícolas analizados operan en un contexto de presión antrópica moderada, donde los procesos de enriquecimiento no han alcanzado niveles críticos desde el punto de vista ecológico.

No obstante, la literatura coincide en señalar que el carácter persistente, bioacumulable y altamente tóxico de elementos como As, Cd y Hg justifica la adopción de un enfoque preventivo. En este sentido, los resultados respaldan la necesidad de implementar programas de monitoreo continuo, particularmente en áreas donde:

- Se ha identificado enriquecimiento moderado de As y Hg a partir del Igeo
- Existen fuentes potenciales de aporte (minería, industria, uso intensivo de fertilizantes y plaguicidas)
- Coexisten usos agrícolas y residenciales, lo que incrementa la probabilidad de exposición humana y ecológica

En conjunto, la evaluación del ER sugiere que la producción de palta en las regiones estudiadas se desarrolla en un escenario de riesgo ecológico bajo, aunque con sitios específicos que requieren gestión diferenciada, especialmente en lo relativo al control de As y Hg. Desde

una perspectiva de sostenibilidad, la identificación temprana de estos focos resulta clave para evitar procesos de acumulación progresiva y mitigar posibles impactos a largo plazo sobre los ecosistemas agrícolas y la salud humana, en concordancia con un enfoque de gestión integrada del riesgo.

6.3.4. Riesgo ecológico total (RI)

Los mayores valores de RI se registraron en Lima y La Libertad, principalmente por la contribución del Hg y su elevado coeficiente de respuesta tóxica. Esto demuestra que el riesgo acumulado puede estar dominado por un metal, aunque los demás presenten niveles bajos.

6.3. Bioacumulación de metales

6.3.1. Factor de bioacumulación (BAF)

Los valores del factor de bioacumulación (BAF) inferiores a la unidad (BAF < 1) para la mayoría de los metales analizados confirman que la palta presenta mecanismos de exclusión radicular altamente eficientes, lo que limita la transferencia de metales desde el suelo hacia el fruto. Este comportamiento es consistente con la literatura, que señala que la translocación de metales en plantas depende del tipo de tejido vegetal, de las propiedades fisicoquímicas del suelo y de la movilidad intrínseca del elemento (Buscaroli, 2017; Ur Rahman et al., 2024) En cultivos frutales perennes, como la palta, esta translocación se ve aún más restringida, ya que los metales tienden a quedar retenidos en raíces, tallos leñosos o en la rizósfera, reduciendo su acceso a los órganos comestibles.

La baja bioacumulación de cromo (Cr) y plomo (Pb) observada en este estudio concuerda con lo descrito para ambos elementos, caracterizados por una movilidad extremadamente limitada en plantas. La literatura atribuye este comportamiento a su fuerte afinidad por la pared celular, a procesos de complejación con peptidoglucanos y ligninas, y a su escasa redistribución a través del floema, lo que restringe su transporte hacia frutos (Buscaroli, 2017; Ur Rahman et al., 2024).Estos mecanismos explican la coherencia entre los bajos valores de BAF y las concentraciones reducidas de Cr y Pb detectadas en el fruto, discutidas previamente en el apartado 6.2.

De manera similar, aunque cadmio (Cd) y níquel (Ni) presentan mayor movilidad relativa en otros cultivos, en la palta permanecen por debajo del umbral de translocación eficiente. Este comportamiento confirma que, bajo las condiciones edáficas y agronómicas evaluadas, ambos metales quedan mayoritariamente inmovilizados en compartimentos no comestibles, lo que es consistente con los datos de concentración en fruto y con los valores de BAF obtenidos. La literatura ha señalado que este patrón es común en especies perennes, donde la estructura del sistema radical y la compartimentalización interna limitan el transporte hacia órganos de reserva (Buscaroli, 2017; Ur Rahman et al., 2024)

El comportamiento del mercurio (Hg) resulta particularmente relevante desde una perspectiva fisiológica y ambiental. Si bien los valores de BAF se mantuvieron por debajo de la unidad, indicando

ausencia de bioacumulación crítica, la mayor dispersión observada en regiones como Lima y Huancavelica sugiere la influencia de factores externos adicionales. Entre ellos se incluyen:

- La minería artesanal y pequeñas operaciones metalúrgicas, que pueden incrementar la deposición atmosférica de Hg,
- Las variaciones en el contenido de materia orgánica del suelo, que influyen en los procesos de metilación microbiana y, por tanto, en la biodisponibilidad del Hg,
- Y las características del sistema radical y del suelo, que modulan la absorción y el transporte interno del metal.

Estos hallazgos son coherentes con el patrón observado en el índice de geoacumulación (Igeo), donde el Hg mostró enriquecimiento localizado en determinadas regiones. Esta convergencia de resultados refuerza la interpretación de que, en contextos con mayor presión antrópica, pueden producirse cambios en la biodisponibilidad del Hg aun cuando las concentraciones absolutas no indiquen escenarios de contaminación severa.

La integración de los resultados de concentración en suelo (apartado 6.1), concentración en fruto (apartado 6.2) y BAF (presente apartado) confirma que la bioacumulación de metales en palta es limitada y que, bajo las condiciones evaluadas, no existe evidencia de riesgo inmediato para el consumo ni para la exportación. Sin embargo, la variabilidad regional observada pone de manifiesto la necesidad de mantener una vigilancia constante desde una perspectiva agronómica y

ambiental. Esto resulta particularmente relevante considerando que la producción y exportación de palta están sujetas a sistemas de control y vigilancia internacionales, como los implementados por SENASA, RASFF y el Codex Alimentarius, los cuales exigen consistencia y estabilidad en los niveles de contaminantes a lo largo del tiempo.

Finalmente, aunque el BAF se mantiene bajo para todos los metales evaluados, no puede descartarse un potencial de acumulación futura bajo escenarios de fertilización intensiva o enriquecimiento progresivo del suelo. En este sentido, los resultados del presente estudio respaldan la necesidad de integrar estrategias de manejo y monitoreo orientadas a: (i) la optimización de las prácticas de fertilización, (ii) el control de insumos agrícolas con trazas metálicas, (iii) el seguimiento temporal de metales traza en suelo y fruto, y (iv) la prevención de contaminación atmosférica y por deposición seca o húmeda en zonas próximas a actividades mineras o industriales.

En conjunto, la discusión del BAF refuerza el papel de la palta como un cultivo con baja eficiencia de transferencia de metales hacia la parte comestible, pero subraya la importancia de una gestión agronómica preventiva para garantizar la sostenibilidad productiva y la seguridad alimentaria a largo plazo.

6.4. Evaluación del riesgo a la salud humana

6.4.1. Ingesta diaria estimada (EDI)

Los valores de ingesta diaria estimada (EDI) calculados en el presente estudio confirman que el consumo de palta representa una vía de exposición poco significativa para los metales evaluados. Las magnitudes de exposición obtenidas, situadas en el orden de 10^{-6} a 10^{-5} mg/kg de peso corporal/día, son coherentes con los resultados previamente discutidos de baja bioacumulación (BAF < 1) y con las bajas concentraciones registradas en el fruto, lo que refuerza la interpretación de que la palta presenta barreras fisiológicas eficaces que limitan la transferencia de metales a lo largo de la cadena suelo–planta–consumidor.

La variabilidad regional observada en los valores de EDI refleja la interacción de múltiples factores que inciden directamente en la estimación de la exposición humana. Entre ellos se incluyen:

(i) las diferencias edáficas en concentración total y biodisponibilidad de los metales, (ii) las prácticas agrícolas diferenciadas (fertilización, riego y manejo de suelos), (iii) el depósito atmosférico, particularmente relevante en zonas urbanas o periurbanas, (iv) los patrones de consumo poblacionales, y (v) las diferencias en peso corporal empleadas en los escenarios de evaluación.

Este conjunto de variables explica por qué, aun con concentraciones bajas en fruto, se observan variaciones espaciales en la exposición estimada.

Las mayores exposiciones estimadas en Huancavelica, Ica, La Libertad y Lima resultan coherentes con los resultados del índice de geoacumulación (Igeo) y del riesgo ecológico (ER), donde se identificaron focos sitio-específicos de enriquecimiento, particularmente para Hg y As. En contraste, las menores exposiciones observadas en Amazonas y Ayacucho corresponden a regiones que presentaron menores concentraciones en fruto y valores de BAF más reducidos, lo que refleja una menor biodisponibilidad de metales en la cadena suelo–planta–consumidor.

Desde una perspectiva toxicológica, los valores de EDI obtenidos se sitúan por debajo de los niveles de ingesta tolerable establecidos por organismos internacionales de referencia, como la FAO/WHO, la Autoridad Europea de Seguridad Alimentaria (EFSA) y la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (US EPA). Este resultado sugiere que, bajo las condiciones actuales de producción y consumo consideradas en el estudio, la ingesta de palta no representa un riesgo significativo para la salud humana asociado a la exposición a metales. Esta interpretación será reforzada en las subsecciones posteriores correspondientes al cociente de peligro (HQ), índice de peligro (HI) y riesgo cancerígeno (CR).

El enfoque probabilístico aplicado en la estimación de la EDI permitió capturar la distribución de la exposición y evaluar percentiles representativos de la población, lo que constituye una ventaja frente a enfoques determinísticos tradicionales. No obstante, es importante señalar que las estimaciones presentadas representan una condición promedio de exposición, por lo que escenarios de consumo elevado o poblaciones susceptibles podrían requerir análisis complementarios para una caracterización más exhaustiva del riesgo.

En conjunto, la convergencia entre baja bioacumulación, bajas concentraciones en el fruto y valores reducidos de EDI valida la conclusión general de que la palta constituye un alimento seguro frente a la exposición a metales, con implicancias positivas tanto para la salud pública como para la inocuidad en el contexto agroexportador. Sin embargo, las diferencias regionales identificadas justifican la implementación de protocolos de monitoreo periódico, especialmente en aquellas zonas donde se ha registrado mayor variabilidad en los indicadores ambientales y de exposición.

6.4.2. Índice de peligro no carcinogénico (HI)

Los valores del índice de peligro (HI) inferiores a la unidad (HI < 1) obtenidos para todas las regiones y metales evaluados confirman que el consumo de palta no representa un riesgo no carcinogénico significativo para la población bajo las condiciones actuales de exposición. Este resultado es coherente con los factores de bioacumulación (BAF < 1) discutidos previamente, así como con las

bajas concentraciones de metales detectadas en el fruto, lo que respalda la interpretación de que la palta constituye un alimento seguro desde la perspectiva toxicológica en relación con metales como Cd, Cr y Ni.

La variabilidad regional observada en los valores de HQ e HI, con estimaciones relativamente más altas en Ica, La Libertad y Lima, coincide con los patrones identificados en las secciones precedentes correspondientes al índice de geoacumulación (Igeo), al riesgo ecológico (ER) y a la ingesta diaria estimada (EDI). Esta consistencia entre indicadores refuerza una narrativa integrada del riesgo, en la que las diferencias regionales en el riesgo no carcinogénico están determinadas principalmente por el nivel de exposición real, más que por variaciones en la toxicidad intrínseca de los metales evaluados.

Las comparaciones con estudios internacionales ponen de relieve que aquellos trabajos que reportan valores elevados de HQ o HI suelen basarse en tasas de ingesta diaria considerablemente superiores a las reportadas para el consumo real per cápita. En este sentido, estudios como los de Castañeda et al. (2025) y Mafulul et al. (2023)asumieron tasas de consumo de 0,200–0,345 kg/día, valores que superan ampliamente los patrones de consumo habituales en sus respectivos contextos y que también exceden las tasas empleadas en el presente estudio. Cuando las concentraciones en fruto y los pesos corporales son comparables, la ingesta diaria se constituye en el

principal determinante (driver) del HQ/HI, lo que explica las discrepancias observadas entre diferentes evaluaciones de riesgo.

Desde una perspectiva de gestión del riesgo, los valores de HQ/HI obtenidos sustentan que la palta presenta una baja capacidad de generar efectos tóxicos por exposición crónica no carcinogénica, lo cual resulta particularmente relevante tanto para la seguridad alimentaria nacional como para la inocuidad en el contexto agroexportador. Estos hallazgos son consistentes con los criterios y lineamientos establecidos por organismos internacionales de referencia, como el Codex Alimentarius, la Autoridad Europea de Seguridad Alimentaria (EFSA), la FAO/WHO y la Food and Drug Administration (FDA), que establecen umbrales conservadores para la protección de la salud humana.

No obstante, los resultados también sugieren la conveniencia de incorporar escenarios complementarios en futuras evaluaciones de riesgo, a fin de fortalecer la caracterización de la exposición en contextos específicos.

6.4.3. Riesgo carcinogénico (CR)

Los valores estimados de riesgo carcinogénico (CR) confirman que, bajo las condiciones actuales de exposición y consumo consideradas en el presente estudio, la palta no constituye una vía crítica de exposición cancerígena para los consumidores en relación con cadmio (Cd) y plomo (Pb). El hecho de que los valores de CR se sitúen en el rango de 10^{-8} a 10^{-5} respalda la clasificación del riesgo como bajo a aceptable, de acuerdo con los criterios empleados en evaluaciones de

riesgo sanitario y con lo reportado para otros alimentos de origen vegetal en contextos comparables.

La mayor contribución del Cd al CR total es consistente con su reconocida relevancia toxicológica en la vía oral. La literatura ha documentado ampliamente que la exposición crónica a Cd puede inducir daño en el ADN, estrés oxidativo, alteraciones epigenéticas y disrupción de rutas de señalización celular, mecanismos implicados en procesos carcinogénicos (Corguinha et al., 2015; Satarug et al., 2017; Wu et al., 2016; Yu et al., 2017).En comparación, si bien el Pb está clasificado como carcinógeno en humanos, su contribución relativa al CR en este estudio fue menor, lo que se explica por su limitada translocación al fruto y por las bajas concentraciones detectadas en las muestras analizadas, en coherencia con los valores de BAF < 1 y los resultados de concentración en fruto discutidos previamente.

La heterogeneidad espacial observada en los valores de CR refuerza los patrones documentados para la ingesta diaria estimada (EDI) y para el índice de peligro (HQ/HI), donde regiones como Ica, La Libertad y Lima concentraron los valores más elevados. Este comportamiento sugiere que el riesgo carcinogénico está impulsado fundamentalmente por el nivel de exposición, más que por diferencias intrínsecas en el potencial carcinogénico de los metales evaluados. Bajo escenarios de exposición máxima (percentil 95), los valores de CR pueden aproximarse al límite superior del rango aceptable, lo que justifica la adopción de estrategias de mitigación preventiva,

especialmente en contextos donde la actividad agrícola coexiste con minería, tráfico vehicular intenso o descargas industriales.

Asimismo, las diferencias entre los resultados del presente estudio y los valores más elevados reportados por Mafulul et al.(2023) y Castañeda et al. (2025) pueden explicarse principalmente por los supuestos de ingesta diaria utilizados en los modelos de exposición. Tal como se evidenció en el análisis de HQ/HI, el consumo constituye el principal determinante (driver) del riesgo carcinogénico, condicionando directamente los cálculos de CR cuando los demás parámetros del modelo (peso corporal, concentración en fruto y factores de carcinogenicidad) son comparables entre estudios.

Desde una perspectiva One Health, la caracterización integrada del riesgo carcinogénico, no carcinogénico y ecológico converge en una conclusión consistente: la producción de palta en las regiones evaluadas se desarrolla en un entorno de riesgo bajo, aunque con sitios geográficos puntuales que requieren una vigilancia más estrecha debido a la coexistencia de presiones ambientales y productivas. Esta integración refuerza la necesidad de evaluar el riesgo de manera sistémica, considerando simultáneamente la calidad del suelo, la respuesta fisiológica del cultivo y la exposición humana real.

Finalmente, aunque ninguno de los valores de CR supera el umbral crítico, el carácter persistente y potencialmente bioacumulable del Cd en matrices vegetales y suelos agrícolas justifica el establecimiento de programas de monitoreo sostenido, así como la

promoción de prácticas agronómicas orientadas a limitar su transferencia. Estas acciones resultan pertinentes no solo desde el punto de vista de la inocuidad agroexportadora, sino también como medida preventiva de salud pública, en línea con los principios de gestión del riesgo y sostenibilidad productiva.

CAPÍTULO VII: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

7.1. Conclusiones

- La evaluación integrada de As, Cd, Cr, Hg, Ni y Pb evidenció que la contaminación y los riesgos asociados no se distribuyeron uniformemente entre las regiones productoras. Lima presentó la mayor concentración media de As en suelo, con 76,174 mg/kg, mientras que La Libertad y Lima alcanzaron valores medios de RI de 182 y 169, correspondientes a riesgo ecológico potencial moderado. Sin embargo, el HI permaneció por debajo de 1 y el mayor CR en el percentil 95 fue de $2{,}58 \times 10^{-5}$, inferior al umbral de 1×10^{-4}. En consecuencia, se identificaron puntos prioritarios de control ecológico, pero no un riesgo sanitario apreciable bajo los escenarios modelados.
- En los suelos agrícolas, las concentraciones siguieron el orden As > Cr > Pb > Ni > Cd > Hg. Lima registró las mayores concentraciones medias de As, con 76,174 mg/kg, y Pb, con 25,348 mg/kg, mientras que Ica presentó la mayor concentración de Cr, con 38,182 mg/kg. Según las agrupaciones de Tukey reportadas, el Pb evidenció diferencias estadísticamente significativas entre regiones, con mayores valores en Lima y Ayacucho que en Áncash y Huancavelica; para los demás metales se observaron diferencias numéricas, pero no estadísticamente significativas.
- En la pulpa de palta, las concentraciones siguieron el orden Pb > Hg > As > Ni > Cd, mientras que el Cr permaneció por debajo del límite de detección de 0,003 mg/kg en todas las regiones. Lima presentó las mayores concentraciones medias de Pb, con 0,325 mg/kg, y Hg, con 0,167 mg/kg. Aunque se observaron variaciones numéricas y diferentes frecuencias de

detección, las agrupaciones de Tukey no evidenciaron diferencias estadísticamente significativas entre regiones para los metales cuantificados en el fruto.

- El As y el Hg fueron los metales de mayor relevancia ecológica. En Lima, el As alcanzó un Igeo medio de 1,73 y un PI medio de 5,01. Para Hg, el ER medio fue de 142 en La Libertad y 113 en Lima, y sus percentiles 95 alcanzaron 208 y 224, respectivamente. El RI fue bajo en seis regiones, con valores medios entre 37,3 y 62,9; en cambio, La Libertad y Lima registraron valores medios de 182 y 169 y percentiles 95 de 249 y 280, clasificándose como regiones de riesgo ecológico potencial moderado y de atención prioritaria.
- La transferencia suelo–fruto fue predominantemente limitada, debido a que los valores medios de BAF permanecieron por debajo de 1. Los mayores valores medios correspondieron al Hg en Lima, con 0,443, y Huancavelica, con 0,411. No obstante, sus percentiles 95 alcanzaron 1,21 y 1,06, respectivamente, evidenciando escenarios superiores de mayor transferencia relativa. Por ello, el BAF caracteriza la transferencia suelo–fruto, pero no constituye por sí solo un criterio de inocuidad alimentaria.
- La mayor exposición dietaria correspondió al Pb en Lima, con una EDI media de $9{,}36 \times 10^{-5}$ mg/kg de peso corporal/día y un percentil 95 de $2{,}88 \times 10^{-4}$. El mayor HQ se registró para Cd en La Libertad, con una media de 0,0211 y un percentil 95 de 0,0678; no obstante, los valores de HQ y HI permanecieron por debajo de 1. Asimismo, el mayor CR correspondió al Cd en La Libertad, con un percentil 95 de $2{,}58 \times 10^{-5}$, inferior al umbral de 1×10^{-4}. Por tanto, los riesgos sanitarios fueron bajos o tolerables bajo las condiciones de exposición evaluadas.

7.2. Recomendaciones

- Implementar un programa de monitoreo periódico y georreferenciado de metales pesados en suelos agrícolas y pulpa de palta, priorizando las regiones de La Libertad y Lima por los niveles de riesgo ecológico identificados. El seguimiento deberá prestar especial atención al As y Hg, debido a su mayor contribución a los indicadores de contaminación y riesgo ecológico.
- Fortalecer el control de los recursos e insumos empleados en la producción, mediante el análisis del agua de riego, fertilizantes, enmiendas y otros productos agrícolas. Esta evaluación permitirá identificar posibles fuentes de incorporación de Cd y otros metales, sin atribuir su origen a un factor específico mientras no se disponga de evidencia analítica suficiente.
- Incorporar el monitoreo conjunto suelo–fruto y la trazabilidad de los lotes dentro de la gestión de calidad e inocuidad de la cadena agroexportadora. Los resultados probabilísticos, especialmente los escenarios superiores representados por el percentil 95, pueden utilizarse como criterios complementarios para priorizar zonas, metales y lotes que requieran mayor vigilancia preventiva.
- Profundizar el análisis de la transferencia de Hg desde el suelo hacia la pulpa de palta en Lima y Huancavelica, debido a que los valores del percentil 95 del BAF superaron la unidad. Para ello, se recomienda considerar las propiedades fisicoquímicas del suelo, las características del agua de riego y las condiciones de manejo agrícola que podrían favorecer su movilidad y absorción.
- Mantener la vigilancia sanitaria del Cd y Pb en la pulpa de palta, aun cuando los valores de HQ y HI se mantuvieron por debajo de 1 y el CR no superó 1×10^{-4}. El seguimiento debe priorizar el Cd por su mayor contribución a los

riesgos no carcinogénico y carcinogénico, así como el Pb en las regiones donde se registraron mayores niveles de exposición dietaria.

- Ampliar la cobertura geográfica, temporal y muestral en futuras investigaciones, incorporando otras zonas productoras y diferentes campañas agrícolas. Asimismo, se recomienda evaluar propiedades como el pH, la materia orgánica, la textura y la capacidad de intercambio catiónico, con el propósito de explicar mejor la variabilidad regional, la movilidad de los metales y su transferencia hacia la parte comestible del fruto.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Adamo, P., Iavazzo, P., Albanese, S., Agrelli, D., De Vivo, B., & Lima, A. (2014). Bioavailability and soil-to-plant transfer factors as indicators of potentially toxic element contamination in agricultural soils. *Science of The Total Environment*, *500–501*, 11–22. https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2014.08.085

Alcaraz, M. L., Thorp, T. G., & Hormaza, J. I. (2013). Phenological growth stages of avocado (Persea americana) according to the BBCH scale. *Scientia Horticulturae*, *164*, 434–439. https://doi.org/10.1016/J.SCIENTA.2013.09.051

Alexander, J., Benford, D., Boobis, A., Ceccatelli, S., Cravedi, J.-P., Di Domenico, A., Doerge, D., Dogliotti, E., Edler, L., Farmer, P., Filipič, M., Fink-Gremmels, J., Fürst, P., Guerin, T., Katrine Knutsen, H., Machala, M., Mutti, A., Schlatter, J., van Leeuwen, R., … Scaravelli, E. (2009). Scientific Opinion on Arsenic in Food. *EFSA Journal*, *7*(10), 1351. https://doi.org/10.2903/J.EFSA.2009.1351;JOURNAL:JOURNAL:18314732;WGROUP:STRING:PUBLICATION

Alexander, J., Benford, D., Boobis, A., Ceccatelli, S., Cravedi, J.-P., Di Domenico, A., Doerge, D., Dogliotti, E., Edler, L., Farmer, P., Filipič, M., Fink-Gremmels, J., Fürst, P., Guerin, T., Katrine Knutsen, H., Machala, M., Mutti, A., Schlatter, J., van, R., … Kass, G. (2010). Scientific Opinion on Lead in Food. *EFSA Journal*, *8*(4), 1570.

https://doi.org/10.2903/J.EFSA.2010.1570;PAGE:STRING:ARTICLE/CHAPTER

Alexander, J., Benford, D., Cockburn, A., Cravedi, J.-P., Dogliotti, E., Domenico, A. Di, Luisa Férnandez-Cruz, M., Fürst, P., Fink-Gremmels, J., Corrado, L., Galli, P., Grandjean, J., Gzyl, G., Heinemeyer, N., Johansson, A., Mutti, J., Schlatter, R., Van Leeuwen, C. Van, & Peteghem, P. V. (2009). Cadmium in food - Scientific opinion of the Panel on Contaminants in the Food Chain. *EFSA Journal*, *7*(3), 980. https://doi.org/10.2903/J.EFSA.2009.980;PAGE:STRING:ARTICLE/CHAPTER

AlJuhaimi, F., Kulluk, D. A., Yılmaz, F. G., Ahmed, I. A. M., Özcan, M. M., & Albakry, Z. (2024). Quantitative Determination of Minerals and Toxic Elements Content in Tropical and Subtropical Fruits by Microwave-Assisted Digestion and ICP-OES. *Biological Trace Element Research 2024 203:3*, *203*(3), 1676–1684. https://doi.org/10.1007/S12011-024-04265-7

Arévalo-Gardini, E., Arévalo-Hernández, C. O., Baligar, V. C., & He, Z. L. (2017). Heavy metal accumulation in leaves and beans of cacao (Theobroma cacao L.) in major cacao growing regions in Peru. *The Science of the Total Environment*, *605–606*, 792–800. https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2017.06.122

ATSDR. (2012). *Toxicological profile for chromium*.

ATSDR. (2016). *Chromium: Toxicological profile*. https://wwwn.cdc.gov/TSP/ToxProfiles/ToxProfiles.aspx?id=62&tid=17

Babuskin, S., Yessuf, A. M., & Hameed, O. Bin. (2022). Monitoring and assessment of the potential health risks associated with the toxic heavy metals content in selected fruits grown in Arba Minch region of Ethiopia. *International Journal of Environmental Analytical Chemistry*, 1–12. https://doi.org/10.1080/03067319.2020.1790547

Bedoya-Perales, N. S., Maus, D., Neimaier, A., Escobedo-Pacheco, E., & Pumi, G. (2023). Assessment of the variation of heavy metals and pesticide residues in native and modern potato (Solanum tuberosum L.) cultivars grown at different altitudes in a typical mining region in Peru. *Toxicology Reports*, *11*, 23–34. https://doi.org/10.1016/J.TOXREP.2023.06.005

Benford, D., Ceccatelli, S., Cottrill, B., DiNovi, M., Dogliotti, E., Edler, L., Farmer, P., Fürst, P., Hoogenboom, L., Katrine Knutsen, H., Lundebye, A.-K., Metzler, M., Mutti, A., Vleminckx, C., Wester, P., Di Domenico, A., Guérin, T., Rietjens, I., Arcella, D., … Roldán Torres, R. (2015). Scientific Opinion on the risks to public health related to the presence of nickel in food and drinking water. *EFSA Journal*, *13*(2), 4002. https://doi.org/10.2903/J.EFSA.2015.4002

Benford, D., Halldorsson, T., Jeger, M. J., Knutsen, K., More, S., Naegeli, H., Noteborn, H., Ockleford, C., Ricci, A., Rychen, G., Schlatter, J. R., Silano, V., Solecki, R., Turck, D., Younes, M., Craig, P., Hart, A., Von Goetz, N., Koutsoumanis, K., … Hardy, A. (2018). GUIDANCE DOCUMENT

Guidance on Uncertainty Analysis in Scientific Assessments Scientific Committee members. *EFSA Journal*, *16*(1), 5123. https://doi.org/10.2903/j.efsa.2018.5123

Boqvist, S., Söderqvist, K., & Vågsholm, I. (2018). Food safety challenges and One Health within Europe. *Acta Veterinaria Scandinavica 2018 60:1*, *60*(1), 1-. https://doi.org/10.1186/S13028-017-0355-3

Buscaroli, A. (2017). An overview of indexes to evaluate terrestrial plants for phytoremediation purposes (Review). *Ecological Indicators*, *82*, 367–380. https://doi.org/10.1016/J.ECOLIND.2017.07.003

Castañeda, M., Avila, B. S., Gallego Ríos, S. E., & Peñuela, G. A. (2025). Levels of heavy metals in tropical fruits and soils from agricultural crops in Antioquia, Colombia. A probabilistic assessment of health risk associated with their consumption. *Food and Humanity*, *4*, 100503. https://doi.org/10.1016/J.FOOHUM.2025.100503

Chen, H., Yuan, X., Li, T., Hu, S., Ji, J., & Wang, C. (2016). Characteristics of heavy metal transfer and their influencing factors in different soil–crop systems of the industrialization region, China. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, *126*, 193–201. https://doi.org/10.1016/J.ECOENV.2015.12.042

Codex Alimentarius Commission. (1995). *General standard for contaminants and toxins in food and feed*.

Codex Alimentarius Commission. (2026). *Definitions for the purposes of the Codex Alimentarius*. https://www.fao.org/fao-who-

codexalimentarius/codex-texts/procedural-manual/sections/section1/section1-4/en/

Cohen, J. T., Bellinger, D. C., & Shaywitz, B. A. (2005). A quantitative analysis of prenatal methyl mercury exposure and cognitive development. *American Journal of Preventive Medicine*, *29*(4). https://doi.org/10.1016/J.AMEPRE.2005.06.007

ComexPerú. (2024). *Agroexportaciones crecieron un 11.8% en primer semestre de 2024*. https://www.comexperu.org.pe/articulo/agroexportaciones-crecieron-un-118-en-primer-semestre-de-2024

Committee for Guides in Metrology. (2008). *Evaluation of measurement data—Supplement 1 to the "Guide to the expression of uncertainty in measurement"—Propagation of distributions using a Monte Carlo method*.

Corguinha, A. P. B., Souza, G. A. de, Gonçalves, V. C., Carvalho, C. de A., Lima, W. E. A. de, Martins, F. A. D., Yamanaka, C. H., Francisco, E. A. B., & Guilherme, L. R. G. (2015). Assessing arsenic, cadmium, and lead contents in major crops in Brazil for food safety purposes. *Journal of Food Composition and Analysis*, *37*, 143–150. https://doi.org/10.1016/J.JFCA.2014.08.004

Custodio, M., Fow, A., Chanamé, F., Orellana-Mendoza, E., Peñaloza, R., Alvarado, J. C., Cano, D., & Pizarro, S. (2021). Ecological risk due to heavy metal contamination in sediment and water of natural wetlands with tourist

influence in the central region of Peru. *Water (Switzerland)*, *13*(16), 2256. https://doi.org/10.3390/W13162256/S1

Defarge, N., Spiroux de Vendômois, J., & Séralini, G. E. (2018). Toxicity of formulants and heavy metals in glyphosate-based herbicides and other pesticides. *Toxicology Reports*, *5*, 156–163. https://doi.org/10.1016/J.TOXREP.2017.12.025

Deng, H., Tu, Y., Wang, H., Wang, Z., Li, Y., Chai, L., Zhang, W., & Lin, Z. (2022). Environmental behavior, human health effect, and pollution control of heavy metal(loid)s toward full life cycle processes. *Eco-Environment & Health*, *1*(4), 229–243. https://doi.org/10.1016/J.EEHL.2022.11.003

Dong, H., Gao, Z., Liu, J., & Jiang, B. (2023). Study on the Accumulation of Heavy Metals in Different Soil-Crop Systems and Ecological Risk Assessment: A Case Study of Jiao River Basin. *Agronomy 2023, Vol. 13, 13*(9). https://doi.org/10.3390/AGRONOMY13092238

Dreher, M. L., & Davenport, A. J. (2013). Hass avocado composition and potential health effects. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, *53*(7), 738–750. https://doi.org/10.1080/10408398.2011.556759

Duffus, J. H. (2002). “Heavy metals” a meaningless term? (IUPAC Technical Report). *Pure and Applied Chemistry*, *74*(5), 793–807. https://doi.org/10.1351/PAC200274050793

EFSA. (2012). Cadmium dietary exposure in the European population. *EFSA Journal*, *10*(1), 2551.

https://doi.org/10.2903/J.EFSA.2012.2551;WGROUP:STRING:PUBLICATION

Espinoza-Guillen, J. A., Alderete-Malpartida, M. B., Escobar-Mendoza, J. E., Navarro-Abarca, U. F., Silva-Castro, K. A., & Martinez-Mercado, P. L. (2022). Identifying contamination of heavy metals in soils of Peruvian Amazon plain: use of multivariate statistical techniques. *Environmental Monitoring and Assessment*, *194*(11). https://doi.org/10.1007/S10661-022-10494-X

European Commission. (2023). *Commission Regulation (EU) 2023/915 of 25 April 2023 on maximum levels for certain contaminants in food and repealing Regulation (EC) No 1881/2006*. https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2023/915/oj

European Commission. (2025). *Notification 2025.2457 Cadmium in avocado from Peru*. https://webgate.ec.europa.eu/rasff-window/screen/notification/755398?utm=

Fan, M., Margenot, A. J., Zhang, H., Lal, R., Wu, J., Wu, P., Chen, F., & Gao, C. (2020a). Distribution and source identification of potentially toxic elements in agricultural soils through high-resolution sampling☆. *Environmental Pollution*, *263*, 114527. https://doi.org/10.1016/J.ENVPOL.2020.114527

FAO. (2025). *Safeguarding our agrifood systems: A One Health approach to food safety*. https://www.fao.org/one-health/areas-of-work/food-safety/en?

FOA. (2026). *One Health*. https://www.fao.org/food-safety/one-health/en

FAO, U. W. W. (2022). One Health Joint Plan of Action 2022–2026. In *One Health Joint Plan of Action, 2022–2026*. FAO; UNEP; WHO; World Organization for Animal Health (WOAH) (founded as OIE); https://doi.org/10.4060/CC2289EN

Firestone, M., Fenner-Crisp, P., Barry, T., Bennett, D., Chang, S., Callahan, M., Burke, A., Barnes, D., Wood, W. P., & Knott, S. M. (1997). *Guiding Principles for Monte Carlo Analysis Technical Panel Office of Prevention, Pesticides, and Toxic Substances Risk Assessment Forum Staff*.

Fisher, J., Varenne, B., Narvaez, D., & Vickers, C. (2018). The minamata convention and the phase down of dental amalgam. *Bulletin of the World Health Organization*, *96*(6), 436–438. https://doi.org/10.2471/BLT.17.203141

FOA, & WAH. (2003). Important food issues. In *Assuring food safety and quality: Guidelines for strengthening national food control systems*. https://www.fao.org/4/y8705e/y8705e03.htm

Food, E., & Authority, S. (2012). Cadmium dietary exposure in the European population. *EFSA Journal*, *10*(1), 2551. https://doi.org/10.2903/J.EFSA.2012.2551;WGROUP:STRING:PUBLICATION

FOOD, & WHO. (2007). *Principios prácticos sobre el análisis de riesgos para la inocuidad de los alimentos aplicables por los gobiernos*. https://www.fao.org/4/a1550t/a1550t00.pdf

Ford, N. A., Spagnuolo, P., Kraft, J., & Bauer, E. (2023). Nutritional Composition of Hass Avocado Pulp. *Foods*, *12*(13), 2516. https://doi.org/10.3390/FOODS12132516

Galagarza, O. A., Ramirez-Hernandez, A., Oliver, H. F., Álvarez Rodríguez, M. V., Valdez Ortiz, M. D. C., Pachari Vera, E., Cereceda, Y., Diaz-Valencia, Y. K., & Deering, A. J. (2021). Occurrence of Chemical Contaminants in Peruvian Produce: A Food-Safety Perspective. *Foods 2021, Vol. 10, 10*(7). https://doi.org/10.3390/FOODS10071461

Guadalupe, G. A., Chavez, S. G., Arellanos, E., & Doménech, E. (2023). Probabilistic Risk Characterization of Heavy Metals in Peruvian Coffee: Implications of Variety, Region and Processing. *Foods 2023, Vol. 12, Page 3254*, *12*(17), 3254. https://doi.org/10.3390/FOODS12173254

Guadalupe, G. A., García, L., Chavez, S. G., & Doménech, E. (2024). Ecological and Health Risk Assessment of Metals in Organic and Conventional Peruvian Coffee from a Probabilistic Approach. *Agronomy 2024, Vol. 14, 14*(12). https://doi.org/10.3390/AGRONOMY14122817

Gupta, N., Yadav, K. K., Kumar, V., Kumar, S., Chadd, R. P., & Kumar, A. (2019). Trace elements in soil-vegetables interface: Translocation, bioaccumulation, toxicity and amelioration - A review. *Science of The Total Environment*, *651*, 2927–2942. https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2018.10.047

He, J., Yang, K., Wang, S., Li, Y., Bao, L., & Zhang, N. (2025). Research progress on the uptake and transport of antimony and arsenic in the soil-

crop system. *Frontiers in Plant Science*, *16*, 1610041. https://doi.org/10.3389/FPLS.2025.1610041/FULL

Huang, S., Yamaji, N., & Feng Ma, J. (2026). Metal Transport Systems in Plants. *Annual Review of Plant Biology Downloaded from Www.Annualreviews.Org. Guest*, *58*, 58. https://doi.org/10.1146/annurev-arplant-062923

ISO. (2018). *ISO 22000:2018 Food safety management systems—Requirements for any organization in the food chain*. https://www.iso.org/standard/65464.html

Jimenez, P., Garcia, P., Quitral, V., Vasquez, K., Parra-Ruiz, C., Reyes-Farias, M., Garcia-Diaz, D. F., Robert, P., Encina, C., & Soto-Covasich, J. (2021). Pulp, Leaf, Peel and Seed of Avocado Fruit: A Review of Bioactive Compounds and Healthy Benefits. *Food Reviews International*, *37*(6), 619–655. https://doi.org/10.1080/87559129.2020.1717520;WGROUP:STRING:PUBLICATION

Jin, L., Ni, Y., Liu, X., Li, Z., Xu, X., Li, Q., Yang, Z., Luo, L., & Xie, X. (2026). Sources, flux, and potential risks of heavy metals in soils around the smelting and mining area. *Journal of Environmental Sciences*, *162*, 343–354. https://doi.org/10.1016/J.JES.2025.04.077

Koutsoumanis, K. P., & Aspridou, Z. (2016). Moving towards a risk-based food safety management. *Current Opinion in Food Science*, *12*, 36–41. https://doi.org/10.1016/J.COFS.2016.06.008

Li, Q., Wang, Y., Li, Y., Li, L., Tang, M., Hu, W., Chen, L., & Ai, S. (2022). Speciation of heavy metals in soils and their immobilization at micro-scale interfaces among diverse soil components. *Science of The Total Environment*, *825*, 153862. https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2022.153862

Mafulul, S. G., Joel, E. B., & Gushit, J. (2023). Health risk assessment of potentially toxic elements (PTEs) concentrations in soil and fruits of selected perennial economic trees growing naturally in the vicinity of the abandoned mining ponds in Kuba, Bokkos Local Government Area (LGA) Plateau State, …. *Environmental Geochemistry and Health 2023 45:8*, *45*(8), 5893–5914. https://doi.org/10.1007/S10653-023-01600-0

Mahmassani, H. A., Avendano, E. E., Raman, G., & Johnson, E. J. (2018). Avocado consumption and risk factors for heart disease: a systematic review and meta-analysis. *The American Journal of Clinical Nutrition*, *107*(4), 523–536. https://doi.org/10.1093/AJCN/NQX078

Mendoza-Cózatl, D. G., Jobe, T. O., Hauser, F., & Schroeder, J. I. (2011). Long-distance transport, vacuolar sequestration, tolerance, and transcriptional responses induced by cadmium and arsenic. *Current Opinion in Plant Biology*, *14*(5), 554–562. https://doi.org/10.1016/j.pbi.2011.07.004

MINAM. (2017). *Decreto Supremo N.° 011-2017-MINAM: Aprueban Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para Suelo*. https://www.minam.gob.pe/wp-content/uploads/2017/12/DS_011-2017-MINAM.pdf

Niebles-Nuñez, W., Rojas-Martínez, C., Pacheco-Ruiz, C., & Hernández-Palma, H. G. (2022). Descripción del manejo de tecnologías información y comunicación en las cadenas de suministros en medianas empresas. *Información Tecnológica*, *33*(5), 165–176. https://doi.org/10.4067/s0718-07642022000500165

Nieder, R., & Benbi, D. K. (2023). Potentially toxic elements in the environment - a review of sources, sinks, pathways and mitigation measures. *Reviews on Environmental Health*, *39*(3), 561–575. https://doi.org/10.1515/REVEH-2022-0161

Orellana Mendoza, E., Cuadrado, W., Yallico, L., Zárate, R., Quispe-Melgar, H. R., Limaymanta, C. H., Sarapura, V., & Bao-Cóndor, D. (2021). Heavy metals in soils and edible tissues of Lepidium meyenii (maca) and health risk assessment in areas influenced by mining activity in the Central region of Peru. *Toxicology Reports*, *8*, 1461–1470. https://doi.org/10.1016/J.TOXREP.2021.07.016

Orellana-Mendoza, E., Acevedo, R. R., Huamán, C. H., Zamora, Y. M., Bastos, M. C., & Loardo-Tovar, H. (2022). Ecological Risk Assessment for Heavy Metals in Agricultural Soils Surrounding Dumps, Huancayo Province, Peru. *Journal of Ecological Engineering*, *23*(6), 75–89. https://doi.org/10.12911/22998993/147809

Pei, L., Wang, L., Lu, S., Cacciuttolo, C., Cano, D., & Custodio, M. (2023). Socio-Environmental Risks Linked with Mine Tailings Chemical Composition: Promoting Responsible and Safe Mine Tailings Management

Considering Copper and Gold Mining Experiences from Chile and Peru. *Toxics 2023, Vol. 11, Page 462*, *11*(5), 462. https://doi.org/10.3390/TOXICS11050462

Peng, H., Chen, Y., Weng, L., Ma, J., Ma, Y., Li, Y., & Islam, M. S. (2019). Comparisons of heavy metal input inventory in agricultural soils in North and South China: A review. *Science of The Total Environment*, *660*, 776–786. https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2019.01.066

PROMPERÚ. (2026). *Información de aguacates (paltas), frescas o secas (0804400000)*. https://exportemos.pe/descubre-oportunidades-de-exportacion/producto/0804400000/pdf

Rashid, A., Schutte, B. J., Ulery, A., Deyholos, M. K., Sanogo, S., Lehnhoff, E. A., & Beck, L. (2023). Heavy Metal Contamination in Agricultural Soil: Environmental Pollutants Affecting Crop Health. *Agronomy 2023, Vol. 13, 13*(6). https://doi.org/10.3390/AGRONOMY13061521

Reddy, M., Moodley, R., & Jonnalagadda, S. B. (2014). Elemental uptake and distribution of nutrients in avocado mesocarp and the impact of soil quality. *Environmental Monitoring and Assessment*, *186*(7), 4519–4529. https://doi.org/10.1007/S10661-014-3716-7

Riyazuddin, R., Nisha, N., Ejaz, B., Khan, M. I. R., Kumar, M., Ramteke, P. W., & Gupta, R. (2021). A Comprehensive Review on the Heavy Metal Toxicity and Sequestration in Plants. *Biomolecules*, *12*(1), 43. https://doi.org/10.3390/BIOM12010043

Rosales-Huamani, J., Breña-Ore, J., Landauro-Abanto, A., Ñiquin, J. A., Centeno-Rojas, L., Otiniano-Zavala, A., Andrade-Choque, J., & Medina-Collana, J. (2023). Determination of Potentially Toxic Elements in Quinoa Crops Located in the Huacaybamba–Huanuco-Peru Area. *International Journal of Membrane Science and Technology*, *10*(2), 206–219. https://doi.org/10.15379/IJMST.V10I2.1181

Santos-Francés, F., Martínez-Graña, A., Rojo, P. A., & Sánchez, A. G. (2017). Geochemical Background and Baseline Values Determination and Spatial Distribution of Heavy Metal Pollution in Soils of the Andes Mountain Range (Cajamarca-Huancavelica, Peru). *International Journal of Environmental Research and Public Health 2017, Vol. 14, Page 859*, *14*(8), 859. https://doi.org/10.3390/IJERPH14080859

Satarug, S., Vesey, D. A., & Gobe, G. C. (2017). Current health risk assessment practice for dietary cadmium: Data from different countries. *Food and Chemical Toxicology*, *106*, 430–445. https://doi.org/10.1016/J.FCT.2017.06.013

Singh, U. K., & Kumar, B. (2017). Pathways of heavy metals contamination and associated human health risk in Ajay River basin, India. *Chemosphere*, *174*, 183–199. https://doi.org/10.1016/J.CHEMOSPHERE.2017.01.103

Solórzano, R., Llerena, R., Mejía, S., Cruz, J., & Quispe, K. (2025a). Spatial Distribution of Cadmium in Avocado-Cultivated Soils of Peru: Influence of Parent Material, Exchangeable Cations, and Trace Elements. *Agriculture (Switzerland)*, *15*(13). https://doi.org/10.3390/agriculture15131413

Soni, S., Jha, A. B., Dubey, R. S., & Sharma, P. (2024). Mitigating cadmium accumulation and toxicity in plants: The promising role of nanoparticles. *Science of The Total Environment*, *912*, 168826. https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2023.168826

Sterckeman, T. (2025). Soil to plant transfer of cadmium. *OCL*, *32*, 14. https://doi.org/10.1051/OCL/2025015

Templeton, D. M., Ariese, F., Cornelis, R., Danielsson, L. G., Muntau, H., Van Leeuwen, H. P., & Łobiński, R. (2000). Guidelines for terms related to chemical speciation and fractionation of elements. Definitions, structural aspects and methodological approaches. *Pure and Applied Chemistry*, *72*(8), 1453–1470. https://doi.org/10.1351/PAC200072081453

Ur Rahman, S., Qin, A., Zain, M., Mushtaq, Z., Mehmood, F., Riaz, L., Naveed, S., Ansari, M. J., Saeed, M., Ahmad, I., & Shehzad, M. (2024). Pb uptake, accumulation, and translocation in plants: Plant physiological, biochemical, and molecular response: A review. *Heliyon*, *10*(6), e27724. https://doi.org/10.1016/J.HELIYON.2024.E27724

U.S. EPA. (2026). *IRIS glossary*. https://www.epa.gov/iris/iris-glossary?utm

WHO. (2019). *Exposure to cadmium: A major public health concern*. https://www.who.int/publications/i/item/WHO-CED-PHE-EPE-19-4-3?

WHO. (2021). *Tripartite and UNEP support OHHLEP's definition of "One Health."* https://www.who.int/news/item/01-12-2021-tripartite-and-unep-support-ohhlep-s-definition-of-one-health

WHO. (2022). *Arsenic*. https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/arsenic

WHO. (2023a). *Towards stronger food safety systems and global cooperation*. 1–86. https://www.who.int/publications/i/item/9789240057685

WHO. (2024). *Lead poisoning*. https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/lead-poisoning-and-health?

WHO, & FAO. (2023b). *General principles of food hygiene*. https://doi.org/10.4060/CC6125EN

Wu, H., Liao, Q., Chillrud, S. N., Yang, Q., Huang, L., Bi, J., & Yan, B. (2016). Environmental Exposure to Cadmium: Health Risk Assessment and its Associations with Hypertension and Impaired Kidney Function. *Scientific Reports 2016 6:1*, *6*(1), 29989-. https://doi.org/10.1038/srep29989

Wu, Y., Zeng, Z., Teng, R., Yu, J., Guo, G., Huang, P., Huang, Z., & Deng, S. (2026). pH-dependent overestimation of heavy metals mobility risk in soils: Implications for soil quality assessment. *Journal of Hazardous Materials*, *501*. https://doi.org/10.1016/J.JHAZMAT.2025.140792

Yu, G., Dai, F., Wang, W., Zheng, W., Zhang, Z., Yuan, Y., & Wang, Q. (2017a). Health risk assessment of Chinese consumers to lead via diet. *Human and Ecological Risk Assessment*, *23*(8), 1928–1940. https://doi.org/10.1080/10807039.2017.1338934;SUBPAGE:STRING:ACCESS

Yu, G., Dai, F., Wang, W., Zheng, W., Zhang, Z., Yuan, Y., & Wang, Q. (2017b). Health risk assessment of Chinese consumers to lead via diet. *Human and Ecological Risk Assessment*, *23*(8), 1928–1940. https://doi.org/10.1080/10807039.2017.1338934;SUBPAGE:STRING:ACCESS

Zhuang, Z., Mu, H. yu, Fu, P. nan, Wan, Y. nan, Yu, Y., Wang, Q., & Li, H. fen. (2020). Accumulation of potentially toxic elements in agricultural soil and scenario analysis of cadmium inputs by fertilization: A case study in Quzhou county. *Journal of Environmental Management*, *269*, 110797. https://doi.org/10.1016/J.JENVMAN.2020.110797

ANEXOS

Anexo 1.

Parámetros de validación del procedimiento analítico.

Parámetros Validados	Metales pesados					
	Cd	Pb	Cr	Ni	As	Hg
LOD* (mg/Kg)	0.005	0.005	0.003	0.005	0.003	0.005
LOQ** (mg/Kg)	0.015	0.015	0.010	0.015	0.010	0.015
Linearity	0.9998	0.9998	0.9994	0.9996	0.9962	0.9835
Working range (mg/Kg)	0-4	0-4	0-4	0-4	0-4	0-5
Recovery (%)	101	99	98	99	99	101

Nota. Elaboración Propia * LOD: Detection limit , ** LOQ: Quantification limit

Anexo 2.

Caracterización de la bioacumulación y del riesgo ecológico

Metrics	Region	Metal	Min.	Max.	Mean	S.D.	5th	95th
BAF	Amazonas	As	3,05E-05	5,34E-05	3,81E-05	4,49E-06	3,22E-05	4,70E-05
BAF	Amazonas	Cd	4,05E-03	6,80E-01	1,16E-02	1,31E-02	4,86E-03	2,68E-02
BAF	Amazonas	Cr	8,33E-05	8,38E-03	2,39E-04	2,38E-04	1,00E-04	5,54E-04
BAF	Amazonas	Hg	2,81E-02	2,60E+00	1,26E-01	1,04E-01	5,36E-02	2,85E-01
BAF	Amazonas	Ni	4,32E-04	1,00E-03	6,08E-04	1,06E-04	4,71E-04	8,19E-04
BAF	Amazonas	Pb	1,99E-04	3,93E-04	2,73E-04	3,82E-05	2,17E-04	3,44E-04
BAF	Ancash	As	2,86E-05	4,72E-05	3,51E-05	3,66E-06	3,02E-05	4,23E-05
BAF	Ancash	Cd	4,00E-04	4,00E-04	4,00E-04	0,00E+00	4,00E-04	4,00E-04
BAF	Ancash	Cr	6,62E-05	5,73E-04	1,27E-04	5,80E-05	7,51E-05	2,44E-04
BAF	Ancash	Hg	3,30E-02	3,20E+00	1,88E-01	1,50E-01	7,30E-02	4,32E-01
BAF	Ancash	Ni	3,55E-04	7,19E-04	4,73E-04	6,93E-05	3,82E-04	6,11E-04
BAF	Ancash	Pb	2,52E-04	3,08E-04	2,87E-04	1,35E-05	2,63E-04	3,06E-04
BAF	Ayacucho	As	2,65E-05	3,74E-03	1,94E-03	7,05E-04	6,54E-04	2,96E-03
BAF	Ayacucho	Cd	6,97E-03	1,12E+01	1,29E-01	1,74E-01	2,71E-02	3,29E-01
BAF	Ayacucho	Cr	5,50E-05	2,32E-04	9,98E-05	2,96E-05	6,33E-05	1,59E-04
BAF	Ayacucho	Hg	1,48E-02	7,96E+00	1,94E-01	1,99E-01	5,90E-02	4,56E-01
BAF	Ayacucho	Ni	2,89E-04	2,14E-02	9,92E-03	3,69E-03	3,41E-03	1,56E-02
BAF	Ayacucho	Pb	1,03E-04	1,57E-02	6,81E-03	2,68E-03	2,25E-03	1,11E-02
BAF	Cusco	As	2,16E-05	3,00E-05	2,63E-05	1,92E-06	2,30E-05	2,91E-05
BAF	Cusco	Cd	4,00E-04	4,00E-04	4,00E-04	0,00E+00	4,00E-04	4,00E-04
BAF	Cusco	Cr	5,08E-05	2,72E-04	9,62E-05	3,33E-05	5,86E-05	1,65E-04
BAF	Cusco	Hg	2,64E-02	2,03E+00	1,26E-01	1,01E-01	5,06E-02	2,90E-01
BAF	Cusco	Ni	3,33E-04	8,39E-04	5,28E-04	1,03E-04	3,76E-04	7,12E-04
BAF	Cusco	Pb	2,04E-04	3,78E-04	2,71E-04	3,42E-05	2,21E-04	3,35E-04
BAF	Huancavelica	As	3,32E-05	5,34E-05	4,24E-05	4,18E-06	3,56E-05	4,95E-05

BAF	Huancavelica	Cd	4,00E-04	4,00E-04	4,00E-04	0,00E+00	4,00E-04	4,00E-04
BAF	Huancavelica	Cr	5,61E-05	6,84E-03	1,54E-04	1,59E-04	6,69E-05	3,53E-04
BAF	Huancavelica	Hg	2,27E-02	1,38E+01	4,11E-01	4,40E-01	8,91E-02	1,06E+00
BAF	Huancavelica	Ni	3,48E-04	8,89E-04	5,09E-04	9,86E-05	3,82E-04	7,07E-04
BAF	Huancavelica	Pb	2,58E-04	3,48E-04	3,02E-04	1,86E-05	2,71E-04	3,32E-04
BAF	Ica	As	3,05E-05	5,34E-05	3,81E-05	4,49E-06	3,22E-05	4,70E-05
BAF	Ica	Cd	2,56E-03	1,14E+01	8,36E-02	1,24E-01	1,58E-02	2,23E-01
BAF	Ica	Cr	2,25E-05	7,40E-05	3,80E-05	9,34E-06	2,56E-05	5,63E-05
BAF	Ica	Hg	1,57E-02	9,10E+00	2,45E-01	2,56E-01	6,82E-02	5,92E-01
BAF	Ica	Ni	3,32E-04	6,80E-04	4,50E-04	6,63E-05	3,59E-04	5,79E-04
BAF	Ica	Pb	1,82E-04	3,58E-04	2,49E-04	3,45E-05	1,98E-04	3,13E-04
BAF	La Libertad	As	3,22E-05	4,63E-03	1,86E-03	7,35E-04	6,19E-04	3,06E-03
BAF	La Libertad	Cd	3,93E-03	1,53E+01	1,16E-01	1,82E-01	2,14E-02	3,08E-01
BAF	La Libertad	Cr	2,32E-05	6,39E-05	3,73E-05	7,81E-06	2,62E-05	5,19E-05
BAF	La Libertad	Hg	2,95E-03	2,00E+01	1,49E-01	2,16E-01	3,72E-02	3,55E-01
BAF	La Libertad	Ni	2,76E-04	2,10E-02	9,55E-03	3,57E-03	3,31E-03	1,51E-02
BAF	La Libertad	Pb	1,15E-04	1,54E-02	7,60E-03	2,80E-03	2,57E-03	1,18E-02
BAF	Lima	As	2,29E-05	3,49E-03	1,53E-03	5,86E-04	5,06E-04	2,45E-03
BAF	Lima	Cd	3,85E-03	1,73E+01	8,38E-02	1,31E-01	1,78E-02	2,20E-01
BAF	Lima	Cr	2,39E-05	5,65E-05	3,72E-05	6,80E-06	2,69E-05	4,91E-05
BAF	Lima	Hg	3,61E-03	5,31E+01	4,43E-01	7,13E-01	7,70E-02	1,21E+00
BAF	Lima	Ni	2,73E-04	2,29E-02	1,06E-02	3,92E-03	3,63E-03	1,65E-02
BAF	Lima	Pb	1,27E-04	2,00E-02	9,55E-03	3,56E-03	3,21E-03	1,49E-02
Igeo	Amazonas	As	3,20E-01	1,13E+00	8,17E-01	1,65E-01	5,06E-01	1,05E+00
Igeo	Amazonas	Cd	-1,20E+01	-4,60E+00	-5,83E+00	7,82E-01	-7,33E+00	-4,87E+00
Igeo	Amazonas	Cr	-9,56E+00	-2,91E+00	-4,15E+00	7,78E-01	-5,64E+00	-3,17E+00
Igeo	Amazonas	Hg	-7,16E+00	-1,97E+00	-2,82E+00	6,63E-01	-4,16E+00	-2,12E+00
Igeo	Amazonas	Ni	-4,17E+00	-2,96E+00	-3,43E+00	2,40E-01	-3,88E+00	-3,08E+00
Igeo	Amazonas	Pb	-4,05E+00	-3,06E+00	-3,51E+00	1,99E-01	-3,85E+00	-3,19E+00
Igeo	Ancash	As	4,99E-01	1,22E+00	9,31E-01	1,47E-01	6,58E-01	1,14E+00
Igeo	Ancash	Cd	-1,26E+01	-1,26E+01	-1,26E+01	0,00E+00	-1,26E+01	-1,26E+01
Igeo	Ancash	Cr	-5,69E+00	-2,58E+00	-3,40E+00	5,23E-01	-4,46E+00	-2,76E+00
Igeo	Ancash	Hg	-7,14E+00	-2,11E+00	-3,17E+00	6,83E-01	-4,52E+00	-2,34E+00
Igeo	Ancash	Ni	-3,69E+00	-2,68E+00	-3,08E+00	2,04E-01	-3,46E+00	-2,78E+00
Igeo	Ancash	Pb	-3,69E+00	-3,41E+00	-3,59E+00	6,86E-02	-3,68E+00	-3,47E+00
Igeo	Ayacucho	As	1,15E+00	1,67E+00	1,42E+00	1,07E-01	1,24E+00	1,59E+00
Igeo	Ayacucho	Cd	-1,23E+01	-5,18E+00	-6,03E+00	7,09E-01	-7,45E+00	-5,32E+00
Igeo	Ayacucho	Cr	-4,39E+00	-2,31E+00	-3,11E+00	4,00E-01	-3,84E+00	-2,51E+00
Igeo	Ayacucho	Hg	-7,05E+00	-9,30E-01	-1,77E+00	6,92E-01	-3,17E+00	-1,07E+00
Igeo	Ayacucho	Ni	-2,77E+00	-1,84E+00	-2,23E+00	1,87E-01	-2,57E+00	-1,95E+00
Igeo	Ayacucho	Pb	-2,67E+00	-1,55E+00	-2,10E+00	2,36E-01	-2,48E+00	-1,70E+00
Igeo	Cusco	As	1,15E+00	1,62E+00	1,35E+00	1,07E-01	1,20E+00	1,54E+00
Igeo	Cusco	Cd	-1,26E+01	-1,26E+01	-1,26E+01	0,00E+00	-1,26E+01	-1,26E+01
Igeo	Cusco	Cr	-4,61E+00	-2,19E+00	-3,04E+00	4,48E-01	-3,89E+00	-2,40E+00

Igeo	Cusco	Hg	-7,14E+00	-1,88E+00	-3,06E+00	7,22E-01	-4,46E+00	-2,14E+00
Igeo	Cusco	Ni	-3,92E+00	-2,58E+00	-3,22E+00	2,80E-01	-3,68E+00	-2,76E+00
Igeo	Cusco	Pb	-3,99E+00	-3,10E+00	-3,50E+00	1,80E-01	-3,81E+00	-3,21E+00
Igeo	Huancavelica	As	3,19E-01	1,01E+00	6,61E-01	1,43E-01	4,30E-01	9,04E-01
Igeo	Huancavelica	Cd	-1,26E+01	-1,26E+01	-1,26E+01	0,00E+00	-1,26E+01	-1,26E+01
Igeo	Huancavelica	Cr	-9,27E+00	-2,34E+00	-3,52E+00	7,61E-01	-4,99E+00	-2,59E+00
Igeo	Huancavelica	Hg	-7,08E+00	-1,44E+00	-2,43E+00	6,94E-01	-3,82E+00	-1,65E+00
Igeo	Huancavelica	Ni	-4,00E+00	-2,65E+00	-3,17E+00	2,66E-01	-3,67E+00	-2,78E+00
Igeo	Huancavelica	Pb	-3,87E+00	-3,44E+00	-3,66E+00	8,90E-02	-3,80E+00	-3,51E+00
Igeo	Ica	As	3,20E-01	1,13E+00	8,17E-01	1,65E-01	5,06E-01	1,05E+00
Igeo	Ica	Cd	-1,22E+01	-3,67E+00	-5,05E+00	8,43E-01	-6,62E+00	-3,96E+00
Igeo	Ica	Cr	-2,74E+00	-1,02E+00	-1,73E+00	3,41E-01	-2,34E+00	-1,20E+00
Igeo	Ica	Hg	-7,03E+00	-9,75E-01	-1,89E+00	6,96E-01	-3,28E+00	-1,15E+00
Igeo	Ica	Ni	-3,61E+00	-2,58E+00	-3,00E+00	2,06E-01	-3,38E+00	-2,69E+00
Igeo	Ica	Pb	-3,91E+00	-2,93E+00	-3,37E+00	1,97E-01	-3,72E+00	-3,06E+00
Igeo	La Libertad	As	5,44E-01	1,69E+00	1,20E+00	2,29E-01	7,91E-01	1,56E+00
Igeo	La Libertad	Cd	-1,20E+01	-3,25E+00	-4,66E+00	8,59E-01	-6,26E+00	-3,55E+00
Igeo	La Libertad	Cr	-2,52E+00	-1,06E+00	-1,71E+00	2,97E-01	-2,22E+00	-1,24E+00
Igeo	La Libertad	Hg	-6,32E+00	1,89E+00	1,11E+00	7,17E-01	-3,24E-01	1,79E+00
Igeo	La Libertad	Ni	-2,91E+00	-2,00E+00	-2,40E+00	1,84E-01	-2,72E+00	-2,11E+00
Igeo	La Libertad	Pb	-2,56E+00	-1,87E+00	-2,21E+00	1,42E-01	-2,44E+00	-1,97E+00
Igeo	Lima	As	1,16E+00	2,14E+00	1,73E+00	1,96E-01	1,37E+00	2,02E+00
Igeo	Lima	Cd	-1,20E+01	-3,01E+00	-4,43E+00	8,67E-01	-6,04E+00	-3,31E+00
Igeo	Lima	Cr	-2,35E+00	-1,10E+00	-1,72E+00	2,65E-01	-2,14E+00	-1,27E+00
Igeo	Lima	Hg	-6,55E+00	2,22E+00	6,57E-01	9,39E-01	-1,05E+00	1,90E+00
Igeo	Lima	Ni	-2,64E+00	-1,82E+00	-2,14E+00	1,67E-01	-2,45E+00	-1,90E+00
Igeo	Lima	Pb	-2,46E+00	-1,71E+00	-2,05E+00	1,53E-01	-2,31E+00	-1,80E+00
PI	Amazonas	As	1,87E+00	3,28E+00	2,66E+00	2,94E-01	2,13E+00	3,10E+00
PI	Amazonas	Cd	3,68E-04	6,17E-02	2,97E-02	1,26E-02	9,34E-03	5,15E-02
PI	Amazonas	Cr	1,99E-03	2,00E-01	9,50E-02	4,08E-02	3,01E-02	1,66E-01
PI	Amazonas	Hg	1,05E-02	3,83E-01	2,31E-01	8,01E-02	8,36E-02	3,44E-01
PI	Amazonas	Ni	8,31E-02	1,93E-01	1,41E-01	2,26E-02	1,02E-01	1,77E-01
PI	Amazonas	Pb	9,08E-02	1,79E-01	1,33E-01	1,82E-02	1,04E-01	1,65E-01
PI	Ancash	As	2,12E+00	3,50E+00	2,87E+00	2,85E-01	2,37E+00	3,31E+00
PI	Ancash	Cd	2,50E-04	2,50E-04	2,50E-04	0,00E+00	2,50E-04	2,50E-04
PI	Ancash	Cr	2,91E-02	2,52E-01	1,50E-01	4,62E-02	6,83E-02	2,22E-01
PI	Ancash	Hg	1,06E-02	3,47E-01	1,83E-01	6,91E-02	6,55E-02	2,97E-01
PI	Ancash	Ni	1,16E-01	2,35E-01	1,80E-01	2,45E-02	1,36E-01	2,18E-01
PI	Ancash	Pb	1,16E-01	1,41E-01	1,25E-01	5,99E-03	1,17E-01	1,36E-01
PI	Ayacucho	As	3,33E+00	4,77E+00	4,01E+00	2,97E-01	3,54E+00	4,53E+00
PI	Ayacucho	Cd	3,03E-04	4,14E-02	2,52E-02	8,95E-03	8,57E-03	3,75E-02
PI	Ayacucho	Cr	7,17E-02	3,03E-01	1,80E-01	4,76E-02	1,05E-01	2,63E-01
PI	Ayacucho	Hg	1,13E-02	7,87E-01	4,81E-01	1,69E-01	1,67E-01	7,13E-01
PI	Ayacucho	Ni	2,20E-01	4,19E-01	3,22E-01	4,07E-02	2,52E-01	3,89E-01

PI	Ayacucho	Pb	2,37E-01	5,14E-01	3,55E-01	5,84E-02	2,69E-01	4,61E-01
PI	Cusco	As	3,33E+00	4,62E+00	3,82E+00	2,86E-01	3,44E+00	4,36E+00
PI	Cusco	Cd	2,50E-04	2,50E-04	2,50E-04	0,00E+00	2,50E-04	2,50E-04
PI	Cusco	Cr	6,13E-02	3,28E-01	1,91E-01	5,47E-02	1,01E-01	2,84E-01
PI	Cusco	Hg	1,06E-02	4,07E-01	1,99E-01	8,15E-02	6,82E-02	3,41E-01
PI	Cusco	Ni	9,93E-02	2,50E-01	1,64E-01	3,19E-02	1,17E-01	2,22E-01
PI	Cusco	Pb	9,44E-02	1,75E-01	1,34E-01	1,65E-02	1,07E-01	1,62E-01
PI	Huancavelica	As	1,87E+00	3,01E+00	2,38E+00	2,37E-01	2,02E+00	2,81E+00
PI	Huancavelica	Cd	2,50E-04	2,50E-04	2,50E-04	0,00E+00	2,50E-04	2,50E-04
PI	Huancavelica	Cr	2,44E-03	2,97E-01	1,47E-01	6,03E-02	4,72E-02	2,49E-01
PI	Huancavelica	Hg	1,11E-02	5,52E-01	3,05E-01	1,12E-01	1,06E-01	4,78E-01
PI	Huancavelica	Ni	9,37E-02	2,39E-01	1,69E-01	2,99E-02	1,18E-01	2,18E-01
PI	Huancavelica	Pb	1,03E-01	1,38E-01	1,19E-01	7,36E-03	1,07E-01	1,32E-01
PI	Ica	As	1,87E+00	3,28E+00	2,66E+00	2,94E-01	2,13E+00	3,10E+00
PI	Ica	Cd	3,12E-04	1,18E-01	5,22E-02	2,45E-02	1,52E-02	9,62E-02
PI	Ica	Cr	2,25E-01	7,41E-01	4,64E-01	1,07E-01	2,96E-01	6,51E-01
PI	Ica	Hg	1,15E-02	7,63E-01	4,45E-01	1,59E-01	1,54E-01	6,76E-01
PI	Ica	Ni	1,23E-01	2,51E-01	1,89E-01	2,63E-02	1,44E-01	2,32E-01
PI	Ica	Pb	9,98E-02	1,96E-01	1,46E-01	1,98E-02	1,14E-01	1,80E-01
PI	La Libertad	As	2,19E+00	4,84E+00	3,49E+00	5,43E-01	2,60E+00	4,41E+00
PI	La Libertad	Cd	3,70E-04	1,58E-01	6,86E-02	3,30E-02	1,96E-02	1,28E-01
PI	La Libertad	Cr	2,61E-01	7,19E-01	4,67E-01	9,52E-02	3,21E-01	6,37E-01
PI	La Libertad	Hg	1,88E-02	5,54E+00	3,56E+00	1,26E+00	1,20E+00	5,20E+00
PI	La Libertad	Ni	2,00E-01	3,76E-01	2,87E-01	3,60E-02	2,27E-01	3,48E-01
PI	La Libertad	Pb	2,53E-01	4,10E-01	3,27E-01	3,22E-02	2,76E-01	3,83E-01
PI	Lima	As	3,34E+00	6,59E+00	5,01E+00	6,66E-01	3,87E+00	6,10E+00
PI	Lima	Cd	3,64E-04	1,86E-01	8,05E-02	3,91E-02	2,28E-02	1,51E-01
PI	Lima	Cr	2,95E-01	6,98E-01	4,63E-01	8,59E-02	3,40E-01	6,21E-01
PI	Lima	Hg	1,60E-02	6,98E+00	2,82E+00	1,50E+00	7,23E-01	5,59E+00
PI	Lima	Ni	2,41E-01	4,26E-01	3,42E-01	3,85E-02	2,74E-01	4,02E-01
PI	Lima	Pb	2,73E-01	4,60E-01	3,65E-01	3,83E-02	3,01E-01	4,30E-01
ER	Amazonas	As	1,87E+01	3,28E+01	2,66E+01	2,94E+00	2,13E+01	3,10E+01
ER	Amazonas	Cd	1,10E-02	1,85E+00	8,92E-01	3,78E-01	2,80E-01	1,54E+00
ER	Amazonas	Cr	3,98E-03	4,00E-01	1,90E-01	8,16E-02	6,01E-02	3,33E-01
ER	Amazonas	Hg	4,19E-01	1,53E+01	9,25E+00	3,20E+00	3,35E+00	1,38E+01
ER	Amazonas	Ni	1,66E-01	3,86E-01	2,82E-01	4,51E-02	2,03E-01	3,54E-01
ER	Amazonas	Pb	4,54E-01	8,97E-01	6,66E-01	9,11E-02	5,19E-01	8,24E-01
ER	Ancash	As	2,12E+01	3,50E+01	2,87E+01	2,85E+00	2,37E+01	3,31E+01
ER	Ancash	Cd	7,50E-03	7,50E-03	7,50E-03	0,00E+00	7,50E-03	7,50E-03
ER	Ancash	Cr	5,82E-02	5,03E-01	3,00E-01	9,23E-02	1,37E-01	4,44E-01
ER	Ancash	Hg	4,25E-01	1,39E+01	7,33E+00	2,76E+00	2,62E+00	1,19E+01
ER	Ancash	Ni	2,32E-01	4,70E-01	3,59E-01	4,91E-02	2,73E-01	4,37E-01
ER	Ancash	Pb	5,80E-01	7,07E-01	6,23E-01	3,00E-02	5,84E-01	6,79E-01
ER	Ayacucho	As	3,33E+01	4,77E+01	4,01E+01	2,97E+00	3,54E+01	4,53E+01

ER	Ayacucho	Cd	9,08E-03	1,24E+00	7,55E-01	2,68E-01	2,57E-01	1,12E+00
ER	Ayacucho	Cr	1,43E-01	6,06E-01	3,61E-01	9,52E-02	2,09E-01	5,27E-01
ER	Ayacucho	Hg	4,53E-01	3,15E+01	1,92E+01	6,76E+00	6,68E+00	2,85E+01
ER	Ayacucho	Ni	4,40E-01	8,37E-01	6,43E-01	8,15E-02	5,04E-01	7,77E-01
ER	Ayacucho	Pb	1,18E+00	2,57E+00	1,78E+00	2,92E-01	1,35E+00	2,31E+00
ER	Cusco	As	3,33E+01	4,62E+01	3,82E+01	2,86E+00	3,44E+01	4,36E+01
ER	Cusco	Cd	7,50E-03	7,50E-03	7,50E-03	0,00E+00	7,50E-03	7,50E-03
ER	Cusco	Cr	1,23E-01	6,56E-01	3,81E-01	1,09E-01	2,03E-01	5,69E-01
ER	Cusco	Hg	4,26E-01	1,63E+01	7,97E+00	3,26E+00	2,73E+00	1,36E+01
ER	Cusco	Ni	1,99E-01	5,01E-01	3,28E-01	6,38E-02	2,34E-01	4,44E-01
ER	Cusco	Pb	4,72E-01	8,74E-01	6,69E-01	8,23E-02	5,33E-01	8,09E-01
ER	Huancavelica	As	1,87E+01	3,01E+01	2,38E+01	2,37E+00	2,02E+01	2,81E+01
ER	Huancavelica	Cd	7,50E-03	7,50E-03	7,50E-03	0,00E+00	7,50E-03	7,50E-03
ER	Huancavelica	Cr	4,87E-03	5,94E-01	2,93E-01	1,21E-01	9,44E-02	4,98E-01
ER	Huancavelica	Hg	4,44E-01	2,21E+01	1,22E+01	4,48E+00	4,25E+00	1,91E+01
ER	Huancavelica	Ni	1,87E-01	4,79E-01	3,39E-01	5,98E-02	2,36E-01	4,36E-01
ER	Huancavelica	Pb	5,14E-01	6,91E-01	5,94E-01	3,68E-02	5,37E-01	6,59E-01
ER	Ica	As	1,87E+01	3,28E+01	2,66E+01	2,94E+00	2,13E+01	3,10E+01
ER	Ica	Cd	9,35E-03	3,53E+00	1,56E+00	7,34E-01	4,57E-01	2,89E+00
ER	Ica	Cr	4,51E-01	1,48E+00	9,27E-01	2,13E-01	5,92E-01	1,30E+00
ER	Ica	Hg	4,60E-01	3,05E+01	1,78E+01	6,37E+00	6,16E+00	2,71E+01
ER	Ica	Ni	2,45E-01	5,01E-01	3,78E-01	5,26E-02	2,88E-01	4,64E-01
ER	Ica	Pb	4,99E-01	9,81E-01	7,32E-01	9,89E-02	5,71E-01	9,01E-01
ER	La Libertad	As	2,19E+01	4,84E+01	3,49E+01	5,43E+00	2,60E+01	4,41E+01
ER	La Libertad	Cd	1,11E-02	4,73E+00	2,06E+00	9,90E-01	5,89E-01	3,85E+00
ER	La Libertad	Cr	5,22E-01	1,44E+00	9,34E-01	1,90E-01	6,42E-01	1,27E+00
ER	La Libertad	Hg	7,53E-01	2,22E+02	1,42E+02	5,03E+01	4,79E+01	2,08E+02
ER	La Libertad	Ni	4,00E-01	7,51E-01	5,74E-01	7,20E-02	4,54E-01	6,95E-01
ER	La Libertad	Pb	1,27E+00	2,05E+00	1,63E+00	1,61E-01	1,38E+00	1,91E+00
ER	Lima	As	3,34E+01	6,59E+01	5,01E+01	6,66E+00	3,87E+01	6,10E+01
ER	Lima	Cd	1,09E-02	5,59E+00	2,41E+00	1,17E+00	6,83E-01	4,54E+00
ER	Lima	Cr	5,90E-01	1,40E+00	9,26E-01	1,72E-01	6,79E-01	1,24E+00
ER	Lima	Hg	6,40E-01	2,79E+02	1,13E+02	6,00E+01	2,89E+01	2,24E+02
ER	Lima	Ni	4,81E-01	8,52E-01	6,85E-01	7,69E-02	5,48E-01	8,03E-01
ER	Lima	Pb	1,36E+00	2,30E+00	1,82E+00	1,92E-01	1,51E+00	2,15E+00
RI	Amazonas	All	2,20E+01	5,00E+01	3,79E+01	4,37E+00	3,02E+01	4,46E+01
RI	Ancash	All	2,36E+01	4,95E+01	3,74E+01	3,98E+00	3,06E+01	4,38E+01
RI	Ayacucho	All	3,80E+01	8,23E+01	6,29E+01	7,39E+00	4,96E+01	7,38E+01
RI	Cusco	All	3,58E+01	6,28E+01	4,76E+01	4,35E+00	4,07E+01	5,50E+01
RI	Huancavelica	All	2,13E+01	5,27E+01	3,73E+01	5,06E+00	2,85E+01	4,53E+01
RI	Ica	All	2,36E+01	6,66E+01	4,80E+01	7,06E+00	3,55E+01	5,87E+01
RI	La Libertad	All	3,45E+01	2,73E+02	1,82E+02	5,06E+01	8,76E+01	2,49E+02
RI	Lima	All	4,20E+01	3,47E+02	1,69E+02	6,04E+01	8,39E+01	2,80E+02

Nota. Elaboración Propia

Anexo 3.

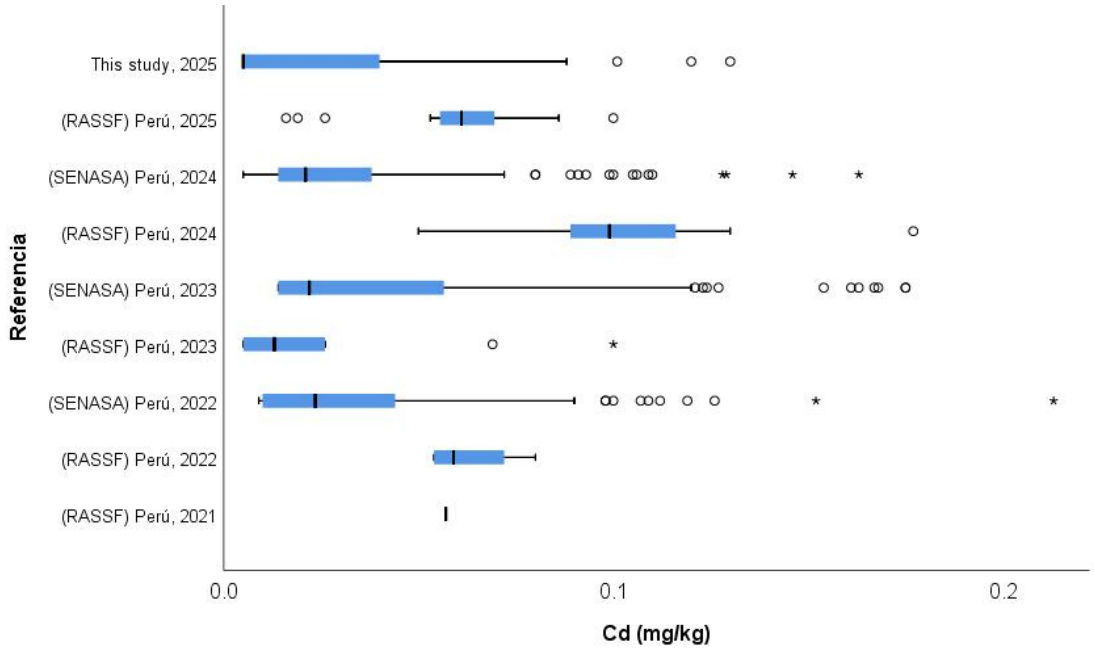
Caracterización del riesgo para la salud.

Metrics	Region	Metal	Min.	Max.	Mean	S.D.	5th	95th
EDI	Amazonas	As	8,19E-09	2,39E-05	5,83E-07	6,35E-07	9,17E-08	1,70E-06
EDI	Amazonas	Cd	2,28E-08	8,40E-05	2,27E-06	2,55E-06	3,31E-07	6,75E-06
EDI	Amazonas	Cr	1,37E-08	3,98E-05	9,72E-07	1,06E-06	1,53E-07	2,83E-06
EDI	Amazonas	Hg	1,37E-08	3,98E-05	9,72E-07	1,06E-06	1,53E-07	2,83E-06
EDI	Amazonas	Ni	8,19E-09	2,39E-05	5,83E-07	6,35E-07	9,17E-08	1,70E-06
EDI	Amazonas	Pb	3,29E-08	7,60E-05	2,65E-06	2,99E-06	3,80E-07	7,91E-06
EDI	Ancash	As	1,37E-08	3,98E-05	9,72E-07	1,06E-06	1,53E-07	2,83E-06
EDI	Ancash	Cd	8,19E-09	2,39E-05	5,83E-07	6,35E-07	9,17E-08	1,70E-06
EDI	Ancash	Cr	2,56E-08	3,32E-04	7,05E-06	8,32E-06	8,93E-07	2,13E-05
EDI	Ancash	Hg	2,53E-07	2,02E-03	3,65E-05	4,39E-05	4,19E-06	1,12E-04
EDI	Ancash	Ni	8,19E-09	2,39E-05	5,83E-07	6,35E-07	9,17E-08	1,70E-06
EDI	Ancash	Pb	1,37E-08	3,98E-05	9,72E-07	1,06E-06	1,53E-07	2,83E-06
EDI	Ayacucho	As	8,19E-09	2,39E-05	5,83E-07	6,35E-07	9,17E-08	1,70E-06
EDI	Ayacucho	Cd	2,50E-08	9,51E-05	1,88E-06	2,12E-06	2,78E-07	5,57E-06
EDI	Ayacucho	Cr	1,37E-08	3,98E-05	9,72E-07	1,06E-06	1,53E-07	2,83E-06
EDI	Ayacucho	Hg	1,37E-08	3,98E-05	9,72E-07	1,06E-06	1,53E-07	2,83E-06
EDI	Ayacucho	Ni	8,19E-09	2,39E-05	5,83E-07	6,35E-07	9,17E-08	1,70E-06
EDI	Ayacucho	Pb	3,13E-08	3,65E-04	9,56E-06	1,29E-05	9,44E-07	3,07E-05
EDI	Cusco	As	1,37E-08	3,98E-05	9,72E-07	1,06E-06	1,53E-07	2,83E-06
EDI	Cusco	Cd	8,19E-09	2,39E-05	5,83E-07	6,35E-07	9,17E-08	1,70E-06
EDI	Cusco	Cr	5,74E-08	6,16E-04	1,17E-05	1,56E-05	1,18E-06	3,73E-05
EDI	Cusco	Hg	8,19E-09	2,39E-05	5,83E-07	6,35E-07	9,17E-08	1,70E-06
EDI	Cusco	Ni	5,38E-08	2,40E-04	8,22E-06	9,93E-06	9,84E-07	2,53E-05
EDI	Cusco	Pb	1,37E-08	3,98E-05	9,72E-07	1,06E-06	1,53E-07	2,83E-06
EDI	Huancavelica	As	8,19E-09	2,39E-05	5,83E-07	6,35E-07	9,17E-08	1,70E-06
EDI	Huancavelica	Cd	1,84E-07	1,63E-03	3,91E-05	4,69E-05	4,39E-06	1,20E-04
EDI	Huancavelica	Cr	8,26E-08	1,42E-03	4,36E-05	5,23E-05	4,94E-06	1,34E-04
EDI	Huancavelica	Hg	1,31E-07	6,84E-04	1,78E-05	2,25E-05	1,99E-06	5,57E-05
EDI	Huancavelica	Ni	8,19E-09	2,39E-05	5,83E-07	6,35E-07	9,17E-08	1,70E-06
EDI	Huancavelica	Pb	2,05E-07	2,70E-03	7,72E-05	9,77E-05	8,00E-06	2,43E-04
EDI	Ica	As	8,19E-09	2,39E-05	5,83E-07	6,35E-07	9,17E-08	1,70E-06
EDI	Ica	Cd	1,37E-08	3,98E-05	9,72E-07	1,06E-06	1,53E-07	2,83E-06
EDI	Ica	Cr	1,37E-08	3,98E-05	9,72E-07	1,06E-06	1,53E-07	2,83E-06
EDI	Ica	Hg	8,19E-09	2,39E-05	5,83E-07	6,35E-07	9,17E-08	1,70E-06
EDI	Ica	Ni	1,37E-08	3,98E-05	9,72E-07	1,06E-06	1,53E-07	2,83E-06
EDI	Ica	Pb	1,19E-07	1,41E-03	4,50E-05	5,42E-05	5,03E-06	1,38E-04
EDI	La Libertad	As	5,81E-08	7,81E-04	9,67E-06	1,31E-05	9,46E-07	3,14E-05
EDI	La Libertad	Cd	2,19E-07	3,20E-03	6,41E-05	7,78E-05	7,14E-06	1,97E-04
EDI	La Libertad	Cr	1,37E-08	3,98E-05	9,72E-07	1,06E-06	1,53E-07	2,83E-06
EDI	La Libertad	Hg	8,19E-09	2,39E-05	5,83E-07	6,35E-07	9,17E-08	1,70E-06
EDI	La Libertad	Ni	1,37E-08	3,98E-05	9,72E-07	1,06E-06	1,53E-07	2,83E-06
EDI	La Libertad	Pb	1,37E-08	3,98E-05	9,72E-07	1,06E-06	1,53E-07	2,83E-06
EDI	Lima	As	1,16E-07	1,79E-03	3,70E-05	4,49E-05	4,14E-06	1,14E-04

EDI	Lima	Cd	6,48E-08	9,22E-04	2,11E-05	2,76E-05	2,14E-06	6,78E-05
EDI	Lima	Cr	1,04E-07	1,38E-03	3,14E-05	3,78E-05	3,61E-06	9,64E-05
EDI	Lima	Hg	2,65E-07	4,12E-03	6,70E-05	8,21E-05	7,53E-06	2,06E-04
EDI	Lima	Ni	8,11E-08	1,86E-03	4,17E-05	5,00E-05	4,72E-06	1,29E-04
EDI	Lima	Pb	1,53E-07	2,89E-03	9,36E-05	1,12E-04	1,06E-05	2,88E-04
HQ	Amazonas	Cd	1,37E-05	3,98E-02	9,72E-04	1,06E-03	1,53E-04	2,83E-03
HQ	Amazonas	Cr	5,46E-09	1,59E-05	3,89E-07	4,23E-07	6,11E-08	1,13E-06
HQ	Amazonas	Ni	6,83E-07	1,99E-03	4,86E-05	5,29E-05	7,64E-06	1,41E-04
HQ	Ancash	Cd	1,37E-05	3,98E-02	9,72E-04	1,06E-03	1,53E-04	2,83E-03
HQ	Ancash	Cr	5,46E-09	1,59E-05	3,89E-07	4,23E-07	6,11E-08	1,13E-06
HQ	Ancash	Ni	6,83E-07	1,99E-03	4,86E-05	5,29E-05	7,64E-06	1,41E-04
HQ	Ayacucho	Cd	5,81E-05	7,81E-01	9,67E-03	1,31E-02	9,46E-04	3,14E-02
HQ	Ayacucho	Cr	5,46E-09	1,59E-05	3,89E-07	4,23E-07	6,11E-08	1,13E-06
HQ	Ayacucho	Ni	1,26E-05	1,01E-01	1,83E-03	2,20E-03	2,09E-04	5,59E-03
HQ	Cusco	Cd	1,37E-05	3,98E-02	9,72E-04	1,06E-03	1,53E-04	2,83E-03
HQ	Cusco	Cr	5,46E-09	1,59E-05	3,89E-07	4,23E-07	6,11E-08	1,13E-06
HQ	Cusco	Ni	6,83E-07	1,99E-03	4,86E-05	5,29E-05	7,64E-06	1,41E-04
HQ	Huancavelica	Cd	1,37E-05	3,98E-02	9,72E-04	1,06E-03	1,53E-04	2,83E-03
HQ	Huancavelica	Cr	5,46E-09	1,59E-05	3,89E-07	4,23E-07	6,11E-08	1,13E-06
HQ	Huancavelica	Ni	6,83E-07	1,99E-03	4,86E-05	5,29E-05	7,64E-06	1,41E-04
HQ	Ica	Cd	5,74E-05	6,16E-01	1,17E-02	1,56E-02	1,18E-03	3,73E-02
HQ	Ica	Cr	5,46E-09	1,59E-05	3,89E-07	4,23E-07	6,11E-08	1,13E-06
HQ	Ica	Ni	6,83E-07	1,99E-03	4,86E-05	5,29E-05	7,64E-06	1,41E-04
HQ	La Libertad	Cd	6,48E-05	9,22E-01	2,11E-02	2,76E-02	2,14E-03	6,78E-02
HQ	La Libertad	Cr	5,46E-09	1,59E-05	3,89E-07	4,23E-07	6,11E-08	1,13E-06
HQ	La Libertad	Ni	5,21E-06	6,92E-02	1,57E-03	1,89E-03	1,81E-04	4,82E-03
HQ	Lima	Cd	1,31E-04	6,84E-01	1,78E-02	2,25E-02	1,99E-03	5,57E-02
HQ	Lima	Cr	5,46E-09	1,59E-05	3,89E-07	4,23E-07	6,11E-08	1,13E-06
HQ	Lima	Ni	4,05E-06	9,28E-02	2,08E-03	2,50E-03	2,36E-04	6,43E-03
CR	Amazonas	Cd	5,19E-09	1,51E-05	3,69E-07	4,02E-07	5,81E-08	1,08E-06
CR	Amazonas	Pb	1,16E-10	3,38E-07	8,26E-09	8,99E-09	1,30E-09	2,41E-08
CR	Ancash	Cd	5,19E-09	1,51E-05	3,69E-07	4,02E-07	5,81E-08	1,08E-06
CR	Ancash	Pb	1,16E-10	3,38E-07	8,26E-09	8,99E-09	1,30E-09	2,41E-08
CR	Ayacucho	Cd	2,21E-08	2,97E-04	3,67E-06	4,98E-06	3,59E-07	1,19E-05
CR	Ayacucho	Pb	1,86E-09	2,72E-05	5,45E-07	6,61E-07	6,07E-08	1,67E-06
CR	Cusco	Cd	5,19E-09	1,51E-05	3,69E-07	4,02E-07	5,81E-08	1,08E-06
CR	Cusco	Pb	1,16E-10	3,38E-07	8,26E-09	8,99E-09	1,30E-09	2,41E-08
CR	Huancavelica	Cd	5,19E-09	1,51E-05	3,69E-07	4,02E-07	5,81E-08	1,08E-06
CR	Huancavelica	Pb	1,16E-10	3,38E-07	8,26E-09	8,99E-09	1,30E-09	2,41E-08
CR	Ica	Cd	2,18E-08	2,34E-04	4,46E-06	5,92E-06	4,47E-07	1,42E-05
CR	Ica	Pb	1,16E-10	3,38E-07	8,26E-09	8,99E-09	1,30E-09	2,41E-08
CR	La Libertad	Cd	2,46E-08	3,50E-04	8,02E-06	1,05E-05	8,13E-07	2,58E-05
CR	La Libertad	Pb	2,26E-09	3,50E-05	5,69E-07	6,98E-07	6,40E-08	1,76E-06
CR	Lima	Cd	4,98E-08	2,60E-04	6,75E-06	8,57E-06	7,58E-07	2,12E-05
CR	Lima	Pb	1,30E-09	2,45E-05	7,95E-07	9,52E-07	8,98E-08	2,45E-06

Anexo 4.

Comparación de las concentraciones de Cd (mg/kg) en paltas peruanas



Anexo 5.

Muestras pareadas de suelo y palta



Nota. Muestras emparejadas de suelo y palta para análisis comparativo.

Anexo 6.

Registro fotográfico del acondicionamiento de muestras de palta



Nota. (a) Retiro manual de la cáscara de los frutos. (b) Colocación de rodajas de pulpa en estufa de secado a 70 °C por 24 h).

Anexo 7.

Registro fotográfico del acondicionamiento inicial de muestras



Nota. (a–b) Clasificación y preparación visual de muestras de suelo y frutos de palta para análisis posterior

Anexo 8.

Trituración de muestras de suelo para acondicionamiento previo al análisis



Nota. (a–b) Uso del molino de anillos para homogeneizar las muestras secas de suelo antes de su tamizado.

Anexo 9.

Proceso de digestión y filtrado de muestras MCP-AES



Nota. (a) Campana extractora para digestión ácida en condiciones seguras. (b–c) Filtrado y recolección de digestados líquidos en tubos para análisis

Anexo 10.

Lectura instrumental de muestras en espectrofotómetro MP-AES



Nota. Equipo utilizado para la cuantificación de metales pesados en muestras digestadas mediante espectrometría de emisión óptica con plasma acoplado inductivamente.