

UNIVERSIDAD NACIONAL DANIEL ALCIDES CARRIÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE FORMACIÓN PROFESIONAL DE INGENIERIA AMBIENTAL



T E S I S

**Análisis de metales pesados en la planta *Solanum tuberosum* (papa)
para garantizar la seguridad alimentaria y la salud pública de la
población de la zona rural de Paríamarca del distrito de Yanacancha,
Pasco-2024**

Para optar el título profesional de:
Ingeniero Ambiental

Autores:

Bach. Lizardo GARCIA ALEJANDRIA

Bach. Zunica VILCA JARA

Asesor:

Mg. Edgar Walter PÉREZ JUZCAMAYTA

Cerro de Pasco – Perú – 2025

UNIVERSIDAD NACIONAL DANIEL ALCIDES CARRIÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE FORMACIÓN PROFESIONAL DE INGENIERIA AMBIENTAL



T E S I S

**Análisis de metales pesados en la planta *Solanum tuberosum* (papa)
para garantizar la seguridad alimentaria y la salud pública de la
población de la zona rural de Pariamarca del distrito de Yanacancha,
Pasco-2024**

Sustentada y aprobada ante los miembros del jurado:

Dr. David Johnny CUYUBAMBA ZEVALLOS
PRESIDENTE

Mg. Rosario Marcela VASQUEZ GARCIA
MIEMBRO

Mg. Lucio ROJAS VITOR
MIEMBRO



Universidad Nacional Daniel Alcides Carrión

Facultad de Ingeniería

Unidad de Investigación

INFORME DE ORIGINALIDAD N° 352-2025-UNDAC/UIFI

La Unidad de Investigación de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional Daniel Alcides Carrión en mérito al artículo 23° del Reglamento General de Grados Académicos y Títulos Profesionales aprobado en Consejo Universitario del 21 de abril del 2022, La Tesis ha sido evaluado por el software antiplagio Turnitin Similarity, que a continuación se detalla:

Tesis:

**Análisis de metales pesados en la planta Solanum tuberosum
(papa) para garantizar la seguridad alimentaria y la salud
pública de la población de la zona rural de Paríamarca del
distrito de Yanacancha, Pasco-2024**

Apellidos y nombres de los tesisistas

Bach. Lizardo, GARCIA ALEJANDRIA

Bach. Zunica, VILCA JARA

Apellidos y nombres del Asesor:

Mg. Edgar Walter, PÉREZ JUZCAMAYTA

Escuela de Formación Profesional

Ingeniería Ambiental

Índice de Similitud

6 %

APROBADO

Se informa el Reporte de evaluación del software similitud para los fines pertinentes.

Cerro de Pasco, 28 de noviembre del 2025



Firmado digitalmente por PALOMINO
ISIDRO Ruben Edgar FAU
20154805946 soft
Motivo: Soy el autor del documento
Fecha: 28.11.2025 18:31:52 -05:00

DEDICATORIA

A mis padres queridos, Doris Alejandria y Fortunato García, por su amor infinito, su apoyo incondicional y por ser siempre mi fuente de inspiración. Gracias por los sacrificios, por su confianza y por estar a mi lado en cada etapa de este camino. Este logro es tanto mío como suyo, y no habría sido posible sin ustedes.

Lizardo Garcia Alejandria

A mis queridos padres, William Vilca y Alicia Jara, por ser la luz que siempre ha iluminado mi camino. Gracias por su amor infinito, por el apoyo constante que nunca faltó y por enseñarme que las metas se alcanzan con esfuerzo y sacrificio. Ustedes han sido mi mayor fuente de motivación, sus palabras de aliento y su ejemplo de superación, este logro no habría sido posible.

Con todo mi amor y gratitud, les dedico este logro, sabiendo que siempre estarán conmigo en cada meta que alcance más adelante.

Zunica Vilca Jara

AGRADECIMIENTO

Expreso mi más sincero agradecimiento a los docentes de la Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental de la Universidad Nacional Daniel Alcides Carrión (UNDAC), por su dedicación, compromiso y vocación de enseñanza. Cada uno de ustedes ha dejado una huella importante en mi formación académica y profesional, brindándome no solo conocimientos técnicos, sino también valores y una visión crítica para enfrentar los desafíos ambientales de nuestro tiempo.

Gracias por compartir con generosidad su experiencia, por sus orientaciones oportunas y por el apoyo constante a lo largo de mi carrera. Su guía ha sido fundamental para mi desarrollo como futuro(a) ingeniero(a) ambiental comprometido(a) con el cuidado de nuestro entorno y el bienestar de la sociedad.

Gracias por ser parte de esta experiencia.

RESUMEN

El estudio en Pariamarca, distrito de Yanacancha, Pasco, se centró en analizar la concentración de metales pesados en *Solanum tuberosum* (papa) debido a la proximidad a fuentes de contaminación como actividades mineras y uso de pesticidas. La problemática identificada fue la posible acumulación de metales pesados en los cultivos, representando un riesgo para la salud pública. Los objetivos incluyeron cuantificar los niveles de Arsénico (As), Cadmio (Cd), Plomo (Pb), Hierro (Fe) y Zinc (Zn) en el suelo y los tubérculos de papa, comparándolos con los estándares de seguridad alimentaria. La metodología abarcó la recolección de muestras de suelo y papa en sitios representativos, seguidas de análisis espectroscópicos avanzados. Los resultados mostraron concentraciones elevadas de Pb en suelo (44.823 ± 11.859 mg/kg) y en tubérculos (0.203 ± 0.185 mg/kg), superando los límites seguros establecidos por la OMS. Además, el cadmio presentó un Factor de Bioconcentración (BCF) de 0.147, indicando una absorción considerable. Las conclusiones subrayaron la necesidad de implementar prácticas agrícolas seguras y estrategias de remediación para reducir la exposición a metales pesados, destacando la relevancia de monitorear constantemente la calidad del suelo y los cultivos en áreas afectadas por la contaminación.

Palabras Claves: papa, suelos, metales pesados, salud.

ABSTRACT

The study in Pariamarca, Yanacancha district, Pasco, focused on analyzing the concentration of heavy metals in *Solanum tuberosum* (potato) due to the proximity to sources of contamination such as mining activities and pesticide use. The problem identified was the possible accumulation of heavy metals in the crops, representing a risk to public health. The objectives include quantifying the levels of Arsenic (As), Cadmium (Cd), Lead (Pb), Iron (Fe) and Zinc (Zn) in the soil and potato tubers, comparing them with food safety standards. The methodology involved the collection of soil and potato samples at representative sites, followed by advanced spectroscopic analysis. The results showed elevated concentrations of Pb in soil (44.823 ± 11.859 mg/kg) and tubers (0.203 ± 0.185 mg/kg), exceeding the safe limits established by WHO. In addition, cadmium presented a Bioconcentration Factor (BCF) of 0.147, indicating considerable uptake. The conclusions underlined the need to implement safe agricultural practices and remediation strategies to reduce exposure to heavy metals, highlighting the relevance of constantly monitoring soil and crop quality in areas affected by contamination.

Keywords: potato, soils, heavy metals, health.

INTRODUCCIÓN

La contaminación de los suelos agrícolas por metales pesados constituye uno de los principales desafíos ambientales que amenazan la seguridad alimentaria y la salud pública, especialmente en regiones altoandinas donde convergen actividades mineras, industriales y agrícolas. En este contexto, la zona rural de Paríamarca, ubicada en el distrito de Yanacancha, provincia y región Pasco, presenta condiciones que podrían favorecer la acumulación de elementos tóxicos en los suelos destinados al cultivo de alimentos básicos como la papa (*Solanum tuberosum*), producto esencial en la dieta y economía local.

La presencia de metales pesados como Arsénico (As), Cadmio (Cd), Plomo (Pb), Hierro (Fe) y Zinc (Zn) en los suelos agrícolas no solo deteriora la calidad del ecosistema, sino que también representa un riesgo directo para la población al incorporarse en la cadena alimentaria. Investigaciones previas desarrolladas en otras regiones del Perú, como Junín, han evidenciado niveles elevados de Pb y Cd tanto en suelos como en tubérculos de papa, superando los límites máximos permisibles establecidos por la Organización Mundial de la Salud (OMS) y la FAO, lo cual pone de manifiesto la necesidad urgente de monitorear los cultivos en zonas expuestas a fuentes potenciales de contaminación.

En este marco, el presente estudio tiene como objetivo analizar la concentración de metales pesados Arsénico (As), Cadmio (Cd), Plomo (Pb), Hierro (Fe) y Zinc (Zn) en la planta *Solanum tuberosum* cultivada en la zona rural de Paríamarca, a fin de evaluar su impacto sobre la seguridad alimentaria y la salud pública local. Para ello, se aplicaron técnicas analíticas avanzadas de espectrometría de absorción atómica (AAS) y espectrometría de masas con plasma acoplado inductivamente (ICP-MS), reconocidas por su alta sensibilidad y precisión en la detección de trazas metálicas en matrices ambientales y biológicas.

El protocolo de investigación contempló la selección de sitios de muestreo representativos, considerando la proximidad a fuentes de contaminación minera, zonas de uso intensivo de agroquímicos y diferentes prácticas agrícolas locales. Se recolectaron muestras de suelo y tubérculos de papa, que fueron sometidas a análisis cuantitativos para determinar las concentraciones de As, Cd, Pb, Fe y Zn.

Los resultados obtenidos en Pariamarca evidencian la presencia de metales pesados en el sistema agrícola. En los suelos analizados, el Plomo (Pb) alcanzó valores de 44.823 ± 11.859 mg/kg y el Arsénico (As) de 15.849 ± 3.52 mg/kg. Por su parte, en los tubérculos de papa se registró una concentración promedio de Plomo de 0.203 ± 0.185 mg/kg, Cadmio (Cd) de 0.076 ± 0.013 mg/kg y Arsénico de 0.05 ± 0.028 mg/kg. De estos hallazgos, son las concentraciones de Plomo y Cadmio en el tubérculo las que exceden los límites de seguridad alimentaria establecidos por organismos internacionales.

Asimismo, el Factor de Bioconcentración (BCF) calculado para los distintos metales revela una tendencia de baja acumulación ($BCF < 1$) en la mayoría de los casos; sin embargo, el cadmio presentó un BCF de 0.147, indicando una absorción considerable por parte del cultivo. Este hallazgo evidencia la posibilidad de transferencia de metales desde el suelo hacia los alimentos, lo que representa un riesgo latente para la población consumidora.

En conclusión, los datos obtenidos subrayan la importancia de implementar programas de monitoreo continuo y estrategias de manejo sostenible del suelo agrícola en la zona rural de Pariamarca. El estudio no solo contribuye al conocimiento científico sobre la dinámica de los metales pesados en cultivos altoandinos, sino que también aporta información clave para la formulación de políticas locales de seguridad alimentaria y salud pública que garanticen el bienestar de las comunidades rurales de Yanacancha y de la región Pasco.

ÍNDICE

Paginas

DEDICATORIA

AGRADECIMIENTO

RESUMEN

ABSTRACT

INTRODUCCIÓN

ÍNDICE

CAPITULO I

PROBLEMA DE INVESTIGACION

1.1. Identificación y determinación del problema.....	1
1.2. Delimitación de la investigación	3
1.3. Formulación del problema.....	3
1.3.1. Problema general	3
1.3.2. Problemas específicos.....	4
1.4. Formulación de objetivos	4
1.4.1. Objetivo general	4
1.4.2. Objetivos específicos.....	4
1.5. Justificación de la investigación	6
1.6. Limitaciones de la investigación.....	7

CAPITULO II

MARCO TEORICO

2.1. Antecedentes de estudio.....	9
2.1.1. Antecedentes internacionales.....	9
2.1.2. Antecedentes nacionales.....	11
2.2. Bases teóricas- científicas	13
2.2.1. Contaminación del suelo	13
2.2.2. Características de la planta la papa (Solanum tuberosum).....	27

2.2.3. Descripción morfológica y taxonómica.....	29
2.2.4. Diversidad e indicadores de especies y variedades de papa.....	32
2.2.5. Valor nutricional de la papa	34
2.2.6. Formas de consumo y aprovechamiento industrial	35
2.2.7. Límites de valores de metales pesados en papa	36
2.3. Definición de términos básicos.....	38
2.4. Formulación de hipótesis	39
2.4.1. Hipótesis general.....	39
2.4.2. Hipótesis específicas	40
2.5. Identificación de las variables	40
2.5.1. Variable independiente	40
2.5.2. Variable dependiente.....	40
2.6. Definición Operacional de variables e indicadores.	40

CAPITULO III

METODOLOGIA Y TECNICAS DE INVESTIGACION

3.1. Tipo de investigación	43
3.2. Nivel de Investigación	44
3.3. Diseño de investigación	45
3.4. Métodos de investigación.....	45
3.5. Población y muestra	46
3.5.1. Población	47
3.5.2. Muestra	47
3.6. Técnicas e instrumentos de recolección de datos	48
3.7. Selección, validación y confiabilidad de los instrumentos de investigación.	49
3.8. Técnicas de procesamientos y análisis de datos	49
3.9. Tratamiento Estadístico	50
3.10. Orientación ética filosófica y epistémica.....	51

CAPITULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Descripción del trabajo de campo	54
4.2. Presentación, análisis e interpretación de resultados.....	60
4.3. Prueba de hipótesis	63
4.3.1. Hipótesis general.....	63
4.3.2. Hipótesis específica A:	64
4.3.3. Hipótesis específica B:	65
4.3.4. Hipótesis específica C:	67
4.4. Discusión de resultados.....	68

CONCLUSIONES

RECOMENDACIONES

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANEXOS

ÍNDICE DE TABLAS

	Paginas
Tabla 1 Coordenadas Geográficas.....	3
Tabla 2 Clasificación Taxonómica de la especie	32
Tabla 3 Matriz de operacionalización de variables e indicadores	41
Tabla 4 Resultados de laboratorio concentración de los metales pesados.....	61
Tabla 5 Resultados de la evaluación del porcentaje de muestras en relación Límites máximos permisibles	64
Tabla 6 Comparación de medias Suelo vs. Tubérculo y Factor de Bioconcentración (BCF)	65
Tabla 7 Concentración de metales en suelo, como el factor ambiental	66
Tabla 8 Prueba T de una muestra para el cumplimiento de LMP (FAO/OMS)	67

ÍNDICE DE FIGURAS

	Páginas
Figura 1 <i>Ubicación del área de estudio</i>	3
Figura 2 <i>La papa es un tubérculo con un tallo subterráneo modificado</i>	30
Figura 3 <i>Riqueza de especies por departamentos</i>	33
Figura 4 <i>Riqueza de especies de variedad nominal por departamentos</i>	34
Figura 5 <i>Valor nutricional de la papa</i>	35
Figura 6 <i>Producción de la Solanum tuberosum (papa)</i>	57
Figura 7 <i>Sembrío de la Solanum tuberosum (papa)</i>	60
Figura 8 <i>Síntomas visuales en el cultivo</i>	60

CAPITULO I

PROBLEMA DE INVESTIGACION

1.1. Identificación y determinación del problema

A escala global, la contaminación de suelos agrícolas por elementos traza metálicos representa una de las amenazas más graves para la seguridad alimentaria y la sostenibilidad de los agroecosistemas. Las actividades antropogénicas, particularmente la minería metalúrgica y el uso intensivo de insumos agroquímicos, han alterado significativamente los ciclos biogeoquímicos, generando la acumulación de metales pesados que persisten en el ambiente por largos periodos y se transfieren a la cadena trófica (FAO, 2019).

En el contexto nacional, la región de Pasco ha sido identificada históricamente como una zona crítica de contaminación ambiental debido a la actividad minera extractiva que se desarrolla desde hace décadas. Estudios previos en la región han documentado que la dispersión de material particulado y la generación de drenajes ácidos no solo afectan las zonas industriales, sino que impactan directamente las áreas destinadas a la agricultura y ganadería, alterando la calidad de los recursos edáficos e hídricos disponibles para las comunidades rurales (Gobierno Regional Pasco, 2015; Monroy et al., 2020).

De manera específica, la zona rural de Pariamarca, ubicada en el distrito de Yanacancha, enfrenta una situación de vulnerabilidad particular. A pesar de ser una

despensa agrícola local, sus suelos se encuentran expuestos a la deposición atmosférica de contaminantes provenientes de los tajos abiertos y depósitos de relaves aledaños. Esta problemática se agrava por la geomorfología del terreno y la escorrentía superficial, que moviliza elementos tóxicos hacia las parcelas de cultivo, comprometiendo la inocuidad de los alimentos producidos (Tucto Villanueva, 2015).

El problema central que motiva esta investigación es el riesgo de bioacumulación de metales pesados en el cultivo principal de la zona: la papa (*Solanum tuberosum*). Al ser un tubérculo de crecimiento subterráneo, posee una alta tasa de contacto y absorción radicular de los elementos presentes en la solución del suelo. Investigaciones en zonas altoandinas similares, como Junín, han alertado sobre la capacidad de este cultivo para acumular metales no esenciales, lo que representa un peligro directo para la salud de los consumidores si no se monitorean los niveles de toxicidad (Orellana et al., 2020).

Ante este escenario, se ha identificado la necesidad urgente de caracterizar la presencia de cinco metales específicos: Arsénico (As), Cadmio (Cd), Plomo (Pb), Hierro (Fe) y Zinc (Zn). La selección de estos elementos responde a su relevancia toxicológica y agronómica; mientras que el Plomo y el Cadmio son reconocidos por la Organización Mundial de la Salud como contaminantes sin función biológica que causan daños neurológicos y renales crónicos, el Hierro y el Zinc, aunque esenciales, pueden indicar desequilibrios geoquímicos en el suelo (OMS, 2021).

Por consiguiente, la falta de información actualizada sobre la concentración de estos metales en los cultivos de Pariamarca genera incertidumbre sobre si los productos cumplen con los Límites Máximos Permisibles (LMP) y los Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para suelo (MINAM, 2017), lo cual justifica la realización del presente estudio para garantizar la salud pública de la población.

1.2. Delimitación de la investigación

La presente investigación se delimita según:

Región : Pasco

Provincia : Pasco

Distrito : Yanacancha

Lugar : Pariamarca

Altitud : 3041 a 3700 m s. n. m.

Figura 1 *Ubicación del área de estudio*



Tabla 1 *Coordenadas Geográficas*

COORDENADAS DE UBICACIÓN
Latitud Sur: 10° 38' 58.8" S (- 10.64967923000)
Longitud Oeste: 76° 9' 33.3" W (- 76.15924960000)

1.3. Formulación del problema

1.3.1. Problema general

¿Cuál es la concentración de metales pesados: ¿Arsénico, Cadmio, Plomo, Hierro y Zinc en la planta *Solanum tuberosum* (papa) para garantizar la seguridad

alimentaria y la salud pública en la zona rural de Paríamarca en la provincia y región de Pasco?

1.3.2. Problemas específicos

- a. ¿Cuál es el nivel de concentración de metales pesados: Arsénico (As), Cadmio (Cd), Plomo (Pb), Hierro (Fe) y Zinc (Zn) en el tubérculo de la planta *Solanum tuberosum* (papa) cultivada en la zona de estudio?
- b. ¿Cuál es el nivel de concentración de metales pesados: Arsénico (As), Cadmio (Cd), Plomo (Pb), Hierro (Fe) y Zinc (Zn) en el suelo en la zona rural de Paríamarca en la provincia y región de Pasco?
- c. ¿En qué medida las concentraciones de Arsénico (As), Cadmio (Cd), Plomo (Pb), Hierro (Fe) y Zinc (Zn) detectadas en la planta *Solanum tuberosum* (papa) y en los suelos agrícolas de la zona rural de Paríamarca superan o se ajustan a los límites máximos permisibles establecidos por organismos internacionales y nacionales (FAO/WHO, MINAM y SENASA), y qué implicancias tiene ello para la seguridad alimentaria y la salud pública?

1.4. Formulación de objetivos

1.4.1. Objetivo general

Determinar la concentración de metales pesados — Arsénico (As), Cadmio (Cd), Plomo (Pb), Hierro (Fe) y Zinc (Zn) — en la planta *Solanum tuberosum* (papa) y en el suelo agrícola de la zona rural de Paríamarca, provincia y región de Pasco, con el fin de evaluar los riesgos para la seguridad alimentaria y la salud pública.

1.4.2. Objetivos específicos

- a. Cuantificar los niveles de concentración de Arsénico (As), Cadmio (Cd), Plomo (Pb), Hierro (Fe) y Zinc (Zn) acumulados en el tubérculo de la planta *Solanum tuberosum* (papa) cultivada en la zona de estudio.

- b. Determinar la concentración de Arsénico (As), Cadmio (Cd), Plomo (Pb), Hierro (Fe) y Zinc (Zn) presente en los suelos agrícolas de la zona rural de Paríamarca.
- c. Comparar los valores obtenidos con los límites máximos permisibles establecidos por organismos internacionales y nacionales (FAO/WHO, MINAM, SENASA), para identificar posibles riesgos para la salud y la cadena alimentaria.

Importancia y alcances de la investigación

A. Importancia de la Investigación

La investigación sobre la concentración de metales pesados en *Solanum tuberosum* (papa) en la zona rural de Paríamarca, distrito de Yanacancha, Pasco, es de suma relevancia debido a los riesgos significativos que estos contaminantes representan para la salud pública y la seguridad alimentaria. Los metales pesados, como el Arsénico (As), Cadmio (Cd), Plomo (Pb), Hierro (Fe) y Zinc (Zn), son conocidos por sus efectos tóxicos acumulativos en los seres humanos, afectando sistemas vitales como el nervioso, renal y cardiovascular. En áreas agrícolas cercanas a fuentes de contaminación, como actividades mineras y uso intensivo de pesticidas y fertilizantes, existe un alto potencial de transferencia de estos metales del suelo a los cultivos. Esto puede resultar en alimentos contaminados que, al ser consumidos, incrementan la exposición humana a estos tóxicos. Evaluar y cuantificar la presencia de metales pesados en cultivos esenciales, como la papa, permite tomar medidas preventivas y correctivas necesarias para proteger la salud de la población local y asegurar la sostenibilidad de las prácticas agrícolas en la región.

B. Alcances de la Investigación

Los alcances de esta investigación son amplios y multidimensionales. En primer lugar, proporciona una evaluación detallada y específica de la concentración de metales pesados en suelos y tubérculos de papa en la zona de

Pariamarca, lo que permite establecer un diagnóstico preciso de la situación actual. Este diagnóstico es fundamental para desarrollar estrategias de manejo y remediación adecuadas que minimicen los riesgos de contaminación y mejoren la calidad de los cultivos. Además, los resultados obtenidos servirán como referencia para estudios futuros y para la formulación de políticas públicas orientadas a la protección ambiental y la salud pública. También se espera que esta investigación fomente la conciencia y la educación ambiental entre los agricultores y la comunidad en general, promoviendo prácticas agrícolas más seguras y sostenibles.

1.5. Justificación de la investigación

En el contexto actual, marcado por desafíos como el calentamiento global, inestabilidad económica, conflictos sociales, contaminación y urbanización, las comunidades se ven obligadas a subsistir en condiciones vulnerables. Buscan su sustento en los escasos espacios "naturales" que la civilización les ha dejado. En Pasco, estos lugares se encuentran en cerros de difícil manejo para cultivos y en la cuenca alta del río Huallaga. A pesar de la expansión urbana, persisten áreas rurales donde se cultiva de manera artesanal hortalizas de ciclo corto.

El enfoque de esta investigación se centra en la región del Pasco, como una zona de alto riesgo de contaminación por metales pesados. Este riesgo se origina principalmente por la presencia de suelos con alto contenido metálico, cercano a ello se realiza la actividad minera, la descarga de aguas residuales de las comunidades locales, la presencia de agroquímicos y las erosiones naturales que son alimentadas.

En el área rural de la Yanacancha, la contaminación en los cultivos tiene diversas causas. La falta de rotación de cultivos y descanso del suelo, el riego con aguas domésticas, residuales e industriales sin tratamiento previo, y la adición de insumos agro tóxicos en suelos no productivos son factores contribuyentes. La falta de tecnificación en las técnicas de cultivo y la falta de monitoreo de resultados,

sumado a la falta de comprensión de los productores sobre los riesgos asociados, agravan la situación.

La presente investigación aborda este tema en su jurisdicción, buscando generar conciencia y proponer mejoras en los procesos productivos. El enfoque inicial incluye identificar las plantas que dan frutos en forma de tubérculos con presencia de trazas de elementos pesados, como la papa, comercializadas en mercados y supermercados de la región (Riveros Villa, 2014).

1.6. Limitaciones de la investigación

A. Cobertura espacial limitada

El estudio se circunscribe únicamente a la zona rural de Pariamarca, por lo que los resultados no pueden generalizarse a otras comunidades agrícolas de la región Pasco sin estudios complementarios.

B. Disponibilidad y acceso a muestras

El número de parcelas agrícolas accesibles dependió de la disponibilidad de los agricultores y de las condiciones del terreno, lo que pudo restringir la representatividad espacial de las muestras.

C. Variabilidad estacional

Las concentraciones de metales pesados pueden fluctuar según la época del año, la precipitación y la dinámica del suelo. El estudio se realizó en un periodo específico, por lo que no refleja variaciones estacionales.

D. Limitaciones analíticas del laboratorio

A pesar de utilizar equipos acreditados por INACAL, la precisión de los resultados puede verse afectada por factores como límites de detección, calibraciones y condiciones instrumentales.

E. Factores agronómicos no controlados

Variables como el tipo de fertilización, la variedad de papa, el uso de pesticidas o las prácticas de riego pueden influir en la absorción de metales, pero no se controlaron de manera experimental.

F. Ausencia de evaluación toxicológica directa en población

El estudio se centra en determinar concentraciones en suelo y planta, sin evaluar directamente los efectos en la salud humana, lo cual limita la interpretación del riesgo real en la población.

G. Limitaciones presupuestales y logísticas

El costo de los análisis de metales por espectrometría y el traslado a zonas de difícil acceso pudo restringir el número total de muestras procesadas.

H. Datos históricos insuficientes

No existe un registro completo y continuo de contaminación por metales pesados en la zona, lo que dificulta comparar tendencias temporales o establecer el origen exacto de la contaminación.

CAPITULO II

MARCO TEORICO

2.1. Antecedentes de estudio

2.1.1. Antecedentes internacionales

Delince, Valdés Carmenate, López Morgado, Guridi Izquierdo, & Balbín Arias (2015) Los procesos tecnológicos agrícolas que hacen un uso indiscriminado de agroquímicos pueden causar un grave riesgo para los agroecosistemas. Para abordar este problema, se llevó a cabo un estudio en la comunidad de Güines con el objetivo de entender la presencia de metales pesados en cultivos como la papa y el arroz, así como evaluar indicadores bioquímicos y fisiológicos. Se examinaron los niveles de cobre (Cu), níquel (Ni), cadmio (Cd) y plomo (Pb) en las papas cultivadas en condiciones normales y los niveles de Cu, zinc (Zn) y Pb en el arroz cultivado en condiciones semicontroladas. Además, se midieron los pigmentos fotosintéticos, como la clorofila y los carotenoides, así como la actividad de la enzima catalasa en el arroz. Se descubrió que los cultivos de papa tenían altos niveles de metales pesados en sus órganos, así como en el suelo circundante después de la cosecha, aunque no mostraban signos visibles de daño. Estos hallazgos fueron considerados preocupantes, lo que llevó a la implementación de talleres con la participación de diversos grupos sociales para abordar la situación. Se propusieron una serie de medidas, que incluyeron prácticas agrícolas específicas, acciones de recuperación del

suelo, medidas ambientales y programas de capacitación para minimizar el riesgo de daño a largo plazo.

Iqbal Khan, y otros (2017) Se estimó la acumulación de metales en la patata (*Solanum tuberosum* L.), cultivada en el Punjab central, Pakistán. Este cultivo se regó con múltiples fuentes de agua, como aguas subterráneas, aguas residuales y aguas de canal. Se evaluaron las concentraciones de diferentes metales como zinc (Zn), arsénico (As), plomo (Pb), hierro (Fe), níquel (Ni), molibdeno (Mo), cobre (Cu) y selenio (Se) en el cultivo de patata regado con diferentes tipos de aguas. El cultivo y el suelo tratados con aguas residuales presentaron mayores concentraciones de metales que los tratados con los otros dos tratamientos. Todos los metales presentaron una correlación positiva y significativa, excepto el Mo, cuya correlación entre el vegetal y el suelo no fue significativa. La ingesta diaria más alta se observó para el Fe (0,267), mientras que la más baja se observó para el Se (0,003). El factor de enriquecimiento y el índice de salud variaron entre 0,135-15,08 y 0,285-83,77, respectivamente. Este estudio concluye que las hortalizas cultivadas en suelos tratados con aguas residuales constituyen una potente amenaza para la salud humana, ya que los metales manifiestan toxicidad tras entrar en la cadena alimentaria.

Öztürk, Atsan, Polat, & Kara (2011) La composición en metales pesados de los alimentos es de inmenso interés debido a su naturaleza esencial o tóxica. Este estudio examina las concentraciones de algunos metales pesados (Fe, Cu, Zn, Mn, Pb, Ni y Cd) de dieciséis cultivares de patata cultivados en Erzurum, Turquía. El presente estudio reveló que los cultivares de patata estudiados mostraron una variación considerable en las concentraciones de metales pesados. Los contenidos de metales pesados en los cultivares de patata se encontraron en los rangos: 48,87-72,64 mg kg⁻¹ de hierro, 3,07-5,43 mg kg⁻¹ de cobre, 13,80-18,89 mg kg⁻¹ de zinc, 6,93-13,06 mg kg⁻¹ de manganeso, 0,51-0,77 mg kg⁻¹ de plomo, 2,02-3,55 mg kg⁻¹ de níquel y 0,08-0,32 mg kg⁻¹ de cadmio. El patrón de acumulación de metales en los tubérculos de patata fue el siguiente: Fe > Zn > Mn > Cu > Ni > Pb > Cd.

Reyes (2018), en este estudio se investigó la posibilidad de utilizar vermicomposta, elaborada a partir de lodos residuales y estiércol equino, como una alternativa para el manejo y gestión de residuos, aprovechando su contenido rico en nutrientes en suelos agrícolas. Se evaluaron diferentes dosis de esta vermicomposta para determinar su efecto en la actividad antioxidante, productividad y contenido de metales pesados en albahaca (*Ocimum basilicum* L.) y papa (*Solanum tuberosum* L.). Los experimentos se llevaron a cabo en un invernadero utilizando suelo agrícola mezclado con vermicomposta. Se utilizó un diseño en bloques con cinco tratamientos y seis repeticiones. Los tratamientos consistieron en: suelo mezclado con turba y agrolita como control, suelo agrícola sin enmienda, y suelo agrícola mezclado con vermicomposta en dosis de 20 t/ha, 40 t/ha y 60 t/ha. Se evaluaron parámetros de crecimiento, como altura, peso, número de hojas y número y peso de tubérculos, así como la actividad de la enzima peroxidasa (POX), unidades SPAD y pigmentos fotosintéticos para determinar el daño en las plantas. Además, se midió la capacidad antioxidante mediante el método DPPH y el contenido de compuestos fenólicos totales para evaluar el efecto de la vermicomposta en las respuestas al estrés oxidativo. Los resultados mostraron que la aplicación de vermicomposta en las tres dosis utilizadas incrementó la productividad tanto en albahaca como en papa, aumentando la tasa de crecimiento en longitud de la planta y peso total. También se observó un aumento en la tasa fotosintética. En cuanto a la actividad antioxidante, no se encontraron diferencias significativas entre los tratamientos con y sin vermicomposta, lo que sugiere que su uso no genera estrés en las plantas y además aumenta la disponibilidad de nutrientes en el suelo.

2.1.2. Antecedentes nacionales

Andrade Linarez, Castillo Coaquira, & Quispe Riquelme (2020) El propósito de la investigación fue detectar la presencia de metales pesados como plomo (Pb), cadmio (Cd) y arsénico (As) en suelos agrícolas y en suelos destinados al cultivo de *Solanum tuberosum* en la Bahía Interior de Puno. Para esto, se recolectaron muestras

de suelo y se analizaron utilizando la técnica de espectrometría de emisión óptica ICP-OES para determinar la cantidad de estos elementos traza. Los resultados obtenidos se compararon con los estándares establecidos en los Estándares de Calidad Ambiental para Suelo del Decreto Supremo N° 011-2017 MINAM y el CCME (Canadian Council of Ministers of the Environment). Se encontró que los suelos estudiados estaban contaminados con plomo (505.2 mg/kg) y arsénico (40.19 mg/kg), superando los límites establecidos por estos estándares. Esta situación indica la necesidad de una acción de remediación inmediata. La investigación concluyó que las muestras analizadas mostraban una tendencia hacia una mayor acumulación de plomo, arsénico y cadmio, especialmente alrededor de la laguna de oxidación, que es la principal fuente de contaminación, así como debido a actividades humanas.

López y otros (2020), en el estudio realizado se enfoca en la detección de metales pesados, como cadmio (Cd), plomo (Pb), mercurio (Hg) y arsénico (As), en tubérculos frescos de tres variedades de papa (*Solanum tuberosum* L.): canchán, huayro y amarilla. Las muestras fueron recolectadas aleatoriamente de 15 puestos en el mercado mayorista de Santa Anita, provincia de Lima, todos provenientes de la provincia de Ambo, departamento de Huánuco, Perú. Se tomaron 15 muestras de cada variedad, totalizando 45 muestras. Para cuantificar Cd y Pb, se utilizó el método de Espectrometría de Masas de Plasma Acoplado Inductivamente (ICP-MS), mientras que para Hg y As se empleó la Espectrometría de Fluorescencia Atómica (AFS). Se encontró que la concentración de Hg varió entre 0,0983 y 0,2594 mg/Kg; Cd entre 0,0073 y 0,0287 mg/Kg; Pb entre 0,0600 y 0,1018 mg/Kg; y As entre 0,0003 y 0,0004 mg/Kg. La concentración de Hg en las tres variedades superó ampliamente el límite máximo permitido (LMP) por la Unión Europea (0,02 mg/Kg), representando un alto riesgo para el consumidor. Las concentraciones de Cd y As en las tres variedades estuvieron por debajo del LMP establecido por Codex Alimentarius y Mercosur. Además, el Pb en las variedades canchán y huayro se mantuvo por debajo del LMP

(0,1 mg/Kg), aunque en la variedad amarilla se encontró un valor ligeramente superior al límite establecido.

López (2022), la contaminación por metales provenientes del medio ambiente y desechos impacta tanto en la población en general como en los agricultores, generando problemas críticos en el suelo. Las plantas han desarrollado mecanismos específicos para absorber y acumular estos metales pesados. El objetivo de este estudio es evaluar la capacidad de dos plantas, alfalfa (*Medicago sativa*) y papa (*Solanum tuberosum*), para remediar la contaminación por metales pesados en el suelo. La alfalfa, una planta perenne, es conocida por su importancia en la producción de forraje, mientras que la papa, una planta anual, es un alimento crucial a nivel mundial. Se sembraron semillas de papa (variedad "Sumac sonco") y alfalfa (variedad "Alto andina-W350") directamente en suelo aluvial del Río Rímac y se sometieron a un riego controlado. El diseño experimental utilizado fue estadístico, con dos bloques de tres filas cada uno y ocho repeticiones por fila durante un periodo de ocho semanas. Se evaluaron varias variables, incluyendo la concentración de plomo en el suelo, el porcentaje de remoción de plomo, el pH, la conductividad eléctrica y la materia orgánica del suelo. Los datos fueron analizados utilizando pruebas estadísticas y se encontraron diferencias significativas en las variables evaluadas. Se concluyó que tanto el cultivo de papa como de alfalfa en suelos contaminados con plomo pueden reducir la concentración de este metal en el suelo. Sin embargo, la planta de papa demostró tener una mayor capacidad para remediar la contaminación. Además, se observó que el pH del suelo juega un papel importante en la solubilidad de los metales pesados.

2.2. Bases teóricas- científicas

2.2.1. Contaminación del suelo

La "contaminación del suelo" se refiere a la presencia inapropiada o en concentraciones perjudiciales de sustancias químicas en el suelo, con efectos

adversos para cualquier organismo que no esté destinado a soportarlos. A menudo, esta contaminación no es visible a simple vista, convirtiéndola en una amenaza oculta.

Según el Informe Mundial sobre Recursos del Suelo (SWSR), la contaminación del suelo se destaca como una de las principales amenazas para los suelos del mundo y los servicios que brindan a los ecosistemas. Las preocupaciones sobre este problema han llevado a que más de 170 países acuerden tomar medidas aceleradas para abordar y gestionar la contaminación del suelo.

Las principales fuentes de contaminación del suelo son de origen humano e incluyen químicos provenientes de actividades industriales, mineros, residuos domésticos y municipales, agroquímicos, productos derivados del petróleo y la deposición atmosférica de diversas actividades, como fundiciones, transporte y aplicaciones de pesticidas. También se han identificado preocupaciones emergentes, como productos farmacéuticos, interruptores endocrinos y contaminantes biológicos.

La contaminación del suelo tiene consecuencias graves para los servicios del ecosistema, afectando la seguridad alimentaria al reducir los rendimientos agrícolas y generando peligros para la salud debido al consumo de cultivos cultivados en suelos contaminados. Además, la contaminación se extiende a las aguas subterráneas y superficiales, causando daños ambientales y riesgos directos para la salud humana.

La investigación científica respalda que la contaminación del suelo afecta directamente la salud humana, con riesgos asociados a elementos como arsénico, plomo, cadmio, compuestos orgánicos y productos farmacéuticos. El saneamiento de suelos contaminados es crucial, y se están explorando métodos de rehabilitación más avanzados, incluyendo enfoques biológicos respaldados científicamente.

El Mapa Mundial de Suelos de la FAO insta a los gobiernos a implementar regulaciones para limitar la acumulación de contaminantes, asegurar alimentos seguros y garantizar un ambiente saludable. Se enfatiza la importancia de prácticas de manejo de suelo sostenibles para reducir la contaminación agrícola (FAO, 2019).

A. Metales pesados

El término "metal pesado" se utiliza para describir elementos químicos con una densidad superior a 6 g/cm³, ya sea en su forma elemental o si su número atómico es superior a 20. Estos elementos son conocidos por su toxicidad y su capacidad para causar daño en los ecosistemas. En contraste, la categoría de "elemento o metal traza" abarca todos aquellos presentes en el entorno en concentraciones que oscilan entre 0,01 y 100 mg/kg, englobando tanto elementos esenciales como contaminantes.

En la tabla periódica, hay 70 elementos metálicos, de los cuales 59 son considerados "metales pesados" debido a su peso atómico superior al del hierro (55,85 g/mol). Sin embargo, esta clasificación puede excluir a algunos metales contaminantes con pesos atómicos inferiores al hierro, como V (50.95), Mn (54.94), Cr (52.01), y otros elementos como B, F y P.

A veces, la contaminación del suelo no solo proviene de metales pesados, sino también de altas concentraciones de elementos principales (Na, Fe, Al) y oligoelementos presentes en concentraciones bajas (mg/kg) en la corteza terrestre, suelos y plantas. Estos oligoelementos son esenciales para el crecimiento y desarrollo de plantas, animales y humanos, pero pueden volverse tóxicos si sus concentraciones superan ciertos límites.

En términos generales, todos los oligoelementos pueden ser perjudiciales si se consumen o inhalan en cantidades suficientes y durante períodos prolongados. Ejemplos de elementos con un rango estrecho entre deficiencia y toxicidad incluyen el selenio, el flúor y el molibdeno, destacando la importancia de gestionar adecuadamente estos elementos para prevenir impactos negativos en la salud y el medio ambiente.

B. Contaminación con metales pesados

La problemática de la contaminación se erige como uno de los mayores desafíos en la actualidad global. El menoscabo de la calidad del aire, el agua y el

suelo impacta de manera insostenible en las prácticas agrícolas. Se calcula que la contaminación del agua supera los 2.000 millones de metros cúbicos diarios, planteando una amenaza inminente que podría comprometer el logro del objetivo 6 de la Agenda 2030.

La producción natural tiene repercusiones directas en la seguridad alimentaria y la salud pública. Múltiples estudios han evidenciado la presencia de metales pesados como arsénico (As), plomo (Pb), cadmio (Cd), zinc (Zn) y níquel (Ni) en vegetales. Este tipo de contaminación tiene su origen principalmente en el riego con agua que contiene metales pesados.

Adicionalmente, se han constatado niveles variables de metales pesados en diversos productos como pescado, carne, frutas, granos y leche, como consecuencia de la bioacumulación en las fuentes de agua. Estas concentraciones fluctúan entre 1 µg/kg y 1000 µg/kg, según investigaciones como la llevada a cabo por Yulieth C. Reyes y colegas en 2016. Este escenario subraya la urgencia de abordar la contaminación para salvaguardar la seguridad alimentaria y la salud pública.

a. Plomo

Los registros históricos sobre la toxicidad del plomo evidencian que este metal ha sido reconocido como un agente perjudicial para la salud humana desde tiempos remotos. Nicandro de Colofón, poeta y médico griego, describió hace más de dos milenios los efectos de la intoxicación aguda por plomo —conocida como plumbismo—, lo que constituye uno de los primeros testimonios documentados sobre su impacto en el organismo. Posteriormente, en la tradición alquímica y la medicina antigua, dicha intoxicación se denominó saturnismo, debido a que el plomo estaba simbólicamente asociado al dios Saturno y considerado como la base primordial de los metales.

Durante la época romana, el saturnismo adquirió particular relevancia entre la clase patricia. Esto se debió al uso extendido de recipientes de cobre recubiertos internamente con planchas o soldaduras de plomo para la conservación y preparación de alimentos, lo que facilitó una exposición continua y una intoxicación crónica. Dado que el plomo posee una elevada capacidad de bioacumulación, su presencia se amplifica a medida que avanza por la cadena trófica, incrementando el riesgo para plantas, animales y, en última instancia, para los seres humanos.

En los últimos siglos, el incremento en la expansión industrial ha intensificado la presencia de plomo en el ambiente. Evidencias geológicas muestran un aumento significativo de las concentraciones de este metal en las capas de hielo de Groenlandia durante los últimos cincuenta años, reflejo del fuerte impacto antropogénico. Con el advenimiento de la Revolución Industrial, las intoxicaciones por plomo se consolidaron como un problema recurrente dentro de la Medicina Ocupacional, afectando a trabajadores expuestos en industrias metalúrgicas, fábricas de pigmentos y talleres de fundición. Incluso se han documentado casos de artistas, como Francisco de Goya, cuya salud se vio comprometida debido al uso prolongado de pigmentos con compuestos de plomo.

En la actualidad, aunque las exposiciones laborales continúan siendo relevantes, la principal preocupación recae sobre la exposición ambiental y alimentaria. Ortiz et al. (2009) identifican al plomo como uno de los contaminantes más significativos para los ecosistemas y la salud humana, dada su amplia distribución ambiental y persistencia. En la corteza terrestre, su concentración promedio es de aproximadamente 13 mg/kg, encontrándose principalmente como sulfuro de plomo (galena). Se halla con mayor frecuencia en rocas ácidas —como granitos y otras rocas silíceas—, además de pizarras y, en menor medida, en calizas (Carrillo, 2003, citado en

Carhuaricra, 2020). En contraste, su concentración en los océanos es extremadamente baja (0.003 ppb), lo que evidencia su baja movilidad natural en sistemas marinos.

La presencia del plomo y sus compuestos en la ambiente abarca prácticamente todos los compartimentos ecológicos: aire, suelo, cuerpos de agua, biota vegetal y fauna destinada al consumo humano. En ecosistemas costeros, se ha observado una correlación directa entre los niveles de plomo en el agua y su acumulación en los tejidos de moluscos, como ocurre en la Ría de Vigo. En suelos no cultivados, las concentraciones habituales varían entre 8 y 20 mg/kg; sin embargo, en zonas agrícolas próximas a industrias, fundiciones o carreteras, los niveles pueden superar los 360 mg/kg, reflejando el aporte antropogénico.

Históricamente, una de las principales fuentes de emisión atmosférica de plomo fue su uso como aditivo antidetonante en gasolinas, responsable del 76 % de las emisiones globales. Aunque muchas naciones han prohibido estas formulaciones, la exposición a este metal persiste debido a su amplia utilización industrial en la fabricación de baterías, pigmentos, municiones, cables, soldaduras y recubrimientos. Un riesgo adicional proviene de antiguas pinturas con plomo, aún presentes en algunas viviendas construidas antes de la Segunda Guerra Mundial, donde su degradación puede liberar partículas tóxicas, especialmente peligrosas para niños.

La dieta constituye hoy una de las vías de exposición más relevantes. Si bien los contenidos promedio de plomo en alimentos suelen encontrarse por debajo de los límites considerados peligrosos, existe consenso científico en la necesidad de seguir reduciendo su presencia en la cadena alimentaria. A ello se suman riesgos vinculados a envases artesanales con vidriados de plomo, soldaduras blandas en latas antiguas y utensilios metálicos que pueden liberar plomo cuando entran en contacto con alimentos ácidos.

Frente a este panorama, los organismos internacionales han establecido límites de exposición ocupacional y recomendaciones sobre la ingesta semanal tolerable de plomo (Rubio et al., 2004). El desafío actual radica en reforzar el control de las fuentes de exposición, mejorar la vigilancia ambiental y promover políticas de reducción progresiva que garanticen la protección de la salud pública y la integridad de los ecosistemas.

b. Cadmio

El cadmio, un metal altamente tóxico incluso a niveles de exposición bajos, presenta efectos perjudiciales tanto agudos como crónicos en la salud de plantas, animales y seres humanos. Cada año, se estima que alrededor de 30,000 toneladas de cadmio se liberan al medio ambiente debido a la actividad industrial y la influencia humana. Esto ha llevado a la detección de niveles de cadmio que superan los límites permitidos en agua, suelo y plantas en diversas partes del mundo, incluyendo nuestro país.

La naturaleza no degradable del cadmio y su capacidad para permanecer en circulación una vez liberado al medio ambiente, combinadas con su alta movilidad, poder bioacumulativo y toxicidad a concentraciones mínimas, lo convierten en uno de los metales pesados más significativos. En la década de 1960, la contaminación en Japón resultó en la tragedia de Itai-Itai, donde más de 100 personas murieron por altas concentraciones de cadmio en el arroz y en sus cuerpos.

El cadmio se reconoce como uno de los metales más tóxicos para las plantas, afectando el crecimiento, la fotosíntesis, la transpiración y el contenido de clorofila. También induce clorosis, estrés oxidativo, desequilibrios nutricionales y afecta la actividad de enzimas clave en el metabolismo. Estos impactos pueden llevar a la muerte de la planta, dependiendo de factores como el tiempo de exposición, la cantidad de metal y las adaptaciones específicas de la planta.

Las plantas han desarrollado adaptaciones específicas para lidiar con el estrés por cadmio, ya sea evitando su entrada y transporte o tolerando ciertos niveles mediante su detoxificación y quelación. Diversas estrategias se han propuesto para minimizar los efectos del cadmio en las plantas, desde ajustes en la nutrición hasta prácticas como la inoculación con bacterias beneficiosas, injertos sobre patrones resistentes y la aplicación de enmiendas en el suelo.

En este contexto, el tomate ha despertado especial interés debido a su amplia distribución y alto valor económico. No solo es un alimento común, sino también una planta modelo en diversas investigaciones. Su capacidad de acumular cadmio y su tolerancia potencial hacen que sea un cultivo relevante para el estudio de la interacción del metal con las plantas y la búsqueda de alternativas para mitigar sus efectos. (Hernández Baranda, Rodríguez Hernández, Peña Icart, Meriño Hernández, & Cartaya Rubio, 2019).

Los efectos más notorios de la toxicidad por Cd en las plantas incluyen la reducción en el crecimiento y la actividad fotosintética. Se producen desequilibrios nutricionales, estrés oxidativo y alteraciones en las actividades enzimáticas, todos los cuales constituyen daños significativos que se observan de manera frecuente en diversos estudios sobre la toxicidad del cadmio en las plantas.

De manera general, la presencia de cadmio (Cd) desencadena una variedad de efectos en las actividades enzimáticas de las plantas. Específicamente, las enzimas que poseen grupos sulfhidrilos son especialmente susceptibles a la oxidación inducida por el Cd. Este metal tiene la capacidad de destruir los puentes disulfuro, lo que lleva a la desnaturalización de las proteínas y, como consecuencia, a la alteración de las actividades enzimáticas correspondientes.

El Cd también provoca la inhibición de las actividades de las metaloenzimas al reemplazarlo por metales de carga o tamaño similares, como el zinc (Zn) y el magnesio (Mg). Este último se encuentra en la enzima RuBisCo, y su intercambio con el Cd resulta en la disociación de la enzima en subunidades.

Algunos investigadores han propuesto que la toxicidad por Cd induce estrés oxidativo en las plantas, ya sea aumentando de manera excesiva la producción de especies reactivas de oxígeno o reduciendo la capacidad de respuesta antioxidante. Sin embargo, hay opiniones divergentes, y algunos sostienen que el Cd no actúa directamente en la generación de especies reactivas de oxígeno.

El cadmio (Cd) es un elemento altamente tóxico para los organismos vivos y está muy extendido en suelos contaminados con metales. El cadmio (Cd) es un contaminante ambiental importante, emitido tanto por fuentes naturales (p. ej., afloramientos volcánicos, incendios forestales) como antropogénicas (p. ej., actividades agrícolas y de fundición, escapes de automóviles, quema de combustibles fósiles). El elemento traza de metal tóxico (MTE) está muy extendido en los suelos, el agua y la atmósfera y puede afectar de forma nociva a todos los organismos. (translated machine).

c. Hierro

El hierro es un micronutriente esencial para numerosas funciones fisiológicas, entre ellas el transporte de oxígeno, la síntesis de ADN y el funcionamiento adecuado del sistema inmunológico. La deficiencia de este mineral es la carencia nutricional más extendida a nivel mundial y constituye la principal causa de anemia nutricional. En la actualidad, se estima que alrededor de 2 000 millones de personas padecen anemia por deficiencia de hierro, afectando con mayor intensidad a niños menores de cinco años y a mujeres en edad reproductiva, quienes presentan mayores requerimientos

fisiológicos (OMS, 2021). En el Perú, este problema persiste como una de las principales limitantes de la salud pública: la prevalencia de anemia alcanza el 39 % en niños de 6 a 35 meses y el 19 % en mujeres de 15 a 49 años, cifras que se incrementan en contextos rurales andinos, donde la prevalencia asciende al 49 % y 20 %, respectivamente. Esta realidad afecta de manera directa el bienestar y la productividad de los pequeños agricultores y sus familias, quienes dependen casi por completo de cultivos locales de subsistencia.

Ante esta problemática, la biofortificación surge como una estrategia innovadora y sostenible orientada a incrementar la concentración de micronutrientes esenciales en cultivos alimentarios mediante técnicas de mejoramiento vegetal convencional, prácticas agronómicas o, en algunos casos, modificación genética. A diferencia de la suplementación o la fortificación industrial, la biofortificación es particularmente efectiva en comunidades rurales de países de ingresos bajos y medios, donde las familias obtienen la mayor parte de su alimentación de la propia producción agrícola y tienen acceso limitado a intervenciones nutricionales externas. Por ello, cultivos básicos biofortificados con hierro, zinc o vitamina A ofrecen una alternativa viable para reducir de manera progresiva las deficiencias de micronutrientes en poblaciones vulnerables.

En la región andina, la papa (*Solanum tuberosum*) constituye uno de los pilares de la seguridad alimentaria. En el Perú, especialmente en las zonas altoandinas, este tubérculo es un alimento cotidiano cuyo consumo puede alcanzar los 800 g diarios en adultos y cerca de 200 g en niños. Dado su importancia en la dieta rural, la papa representa un vehículo nutricional apropiado para mejorar la ingesta de micronutrientes, aun cuando su contenido natural de hierro sea menor en comparación con el de granos o legumbres. Sin embargo, este tubérculo presenta características fisiológicas

que favorecen la absorción del hierro disponible: contiene niveles elevados de ácido ascórbico (vitamina C), un potente facilitador de la absorción del hierro no hemo, y concentra bajas cantidades de fitatos, compuestos que inhiben su biodisponibilidad. Esto significa que, aunque la papa no sea particularmente rica en hierro, el mineral presente en ella puede ser absorbido en proporciones más elevadas que en otros alimentos básicos.

En esta línea, el Centro Internacional de la Papa (CIP) ha desarrollado, durante más de 18 años, variedades biofortificadas de papa con mayor concentración de hierro mediante métodos de mejoramiento genético convencional. Estas variedades alcanzan aproximadamente un 50 % más de hierro que las variedades comerciales tradicionales, manteniendo características agronómicas deseables como resistencia a plagas, adecuado rendimiento y aceptación por parte de agricultores y consumidores. Su desarrollo es un avance significativo para enfrentar la deficiencia de hierro en regiones donde la papa constituye la base de la alimentación diaria.

Estudios recientes han evaluado la biodisponibilidad del hierro presente en papas de diferentes tipos de pulpa. Se ha demostrado que la absorción de hierro a partir de papas de pulpa amarilla es mayor (29 %) que la registrada en papas de pulpa morada (13 %), posiblemente debido al efecto inhibitor de ciertos compuestos fenólicos presentes en variedades moradas. A pesar de esta variabilidad, ambas presentan una biodisponibilidad significativamente más alta que otros cultivos biofortificados como el mijo perla y las judías, cuyo porcentaje de absorción se encuentra entre 3,4 % y 7,5 %. Esto refuerza el potencial de la papa como cultivo estratégico para combatir la anemia en las poblaciones altoandinas.

Bajo este contexto, el objetivo del estudio citado fue evaluar la biodisponibilidad del hierro en una variedad biofortificada de papa de pulpa amarilla en comparación con una variedad comercial convencional, utilizando

isótopos estables para cuantificar con precisión la absorción de hierro después de múltiples comidas de prueba. Este tipo de investigación resulta fundamental para validar la eficiencia real de la biofortificación en cultivos de consumo cotidiano y para orientar políticas públicas de nutrición y seguridad alimentaria en regiones vulnerables.

d. Zinc

El zinc constituye uno de los micronutrientes esenciales para el desarrollo fisiológico y metabólico del cultivo de papa (*Solanum tuberosum*), desempeñando un papel determinante en la productividad y la calidad del tubérculo. Su relevancia se fundamenta en su intervención en procesos bioquímicos clave, particularmente durante las fases iniciales del crecimiento, cuando el sistema radicular se encuentra en formación activa.

A escala global, la papa se posiciona como el tercer alimento más consumido, superado únicamente por el arroz y el trigo. Esta importancia se replica a nivel regional, como en el caso de Argentina, donde el consumo per cápita alcanza aproximadamente 60 kg anuales. Este nivel de consumo evidencia la trascendencia económica, alimentaria y social del cultivo, lo cual justifica la creciente atención hacia prácticas agronómicas que aseguren su productividad sostenible.

En las últimas tres décadas, a pesar de la reducción del área destinada al cultivo, la producción total ha experimentado un incremento. Esta tendencia se explica por la adopción de semillas de mayor calidad genética, la tecnificación de los sistemas de manejo y, de manera destacada, la optimización de los programas de fertilización. Dentro de estos programas, el zinc ha demostrado ser un factor crítico para alcanzar altos rendimientos.

La demanda fisiológica de zinc en la papa es significativa. Un cultivo con un rendimiento de 50 t/ha puede extraer alrededor de 450 g de este micronutriente, con dos picos de absorción diferenciados: el primero a los 45

días después de la siembra (DDS) y el segundo a los 90 DDS. Durante estas etapas, el zinc participa intensamente en la biosíntesis de ácido indolacético (AIA), una auxina fundamental para el desarrollo radicular y la diferenciación celular. Su influencia se expresa en procesos como la formación de raíces adventicias, el alargamiento de tallos y la organización de tejidos vasculares, todos ellos elementos esenciales para asegurar una eficiente absorción de agua y nutrientes.

Asimismo, la disponibilidad constante de zinc en la rizosfera cumple una función protectora, ya que regula la exudación de compuestos carbonados que, en exceso, favorecen la proliferación de patógenos del suelo. Por ello, un adecuado suministro de zinc no solo incide en el crecimiento vegetativo, sino también en la sanidad del cultivo, reduciendo la incidencia de enfermedades radicales y favoreciendo un establecimiento inicial más vigoroso.

Los beneficios agronómicos de la fertilización con zinc han sido ampliamente documentados. Diversos estudios reportan incrementos en el rendimiento de entre 5 % y 24 %, dependiendo del nivel de deficiencia del suelo y de los métodos de aplicación utilizados. En condiciones deficientes, la incorporación de zinc también mejora la calidad del tubérculo al incrementar su contenido de materia seca y almidón, dos variables clave en la industria alimentaria y el procesamiento.

La utilización de fertilizantes específicos enriquecidos con zinc, como los formulados para su aplicación al arranque del cultivo o en etapas vegetativas, se ha convertido en una estrategia efectiva para corregir deficiencias y potenciar los rendimientos. La combinación de estos fertilizantes con bioinsumos que contienen microorganismos promotores de crecimiento vegetal permite abordar la nutrición del cultivo desde una perspectiva integral,

optimizando la disponibilidad de nutrientes, estimulando la actividad biológica del suelo y promoviendo un desarrollo más equilibrado.

De este modo, el zinc no solo contribuye a mejorar la productividad del cultivo de papa, sino que también fortalece su resiliencia frente a condiciones adversas y enfermedades, consolidándose como un elemento esencial dentro de los programas modernos de manejo nutricional

e. Arsénico

El arsénico (As) es un metaloide de distribución ubicua en la corteza terrestre, cuya presencia en suelos agrícolas puede tener un origen geogénico (natural) o antropogénico, derivado principalmente de la actividad minera, la fundición de metales y el uso histórico de pesticidas arsenicales. Debido a su alta toxicidad y persistencia, es considerado uno de los contaminantes inorgánicos más peligrosos para la salud pública y el medio ambiente (OMS, 2021).

En los sistemas agrícolas, la biodisponibilidad del arsénico depende de factores como el pH, el potencial redox y la presencia de óxidos de hierro y materia orgánica. Las plantas, incluida la papa (*Solanum tuberosum*), pueden absorber este elemento a través de las raíces, aunque generalmente poseen mecanismos fisiológicos que restringen su translocación hacia los tejidos aéreos y órganos de reserva como los tubérculos. Sin embargo, en suelos con alta carga contaminante, esta barrera puede saturarse, permitiendo la acumulación en la parte comestible (Orellana et al., 2020).

La exposición crónica al arsénico a través de la dieta está asociada a graves problemas de salud, incluyendo lesiones cutáneas, enfermedades cardiovasculares, neurotoxicidad y diversos tipos de cáncer. Por ello, organismos internacionales han establecido límites estrictos para su concentración en alimentos, siendo fundamental su monitoreo en zonas de influencia minera como la región Pasco (OMS, 2021).

2.2.2. Características de la planta la papa (*Solanum tuberosum*)

Origen

La *Solanum tuberosum*, comúnmente denominada papa, constituye uno de los cultivos fundamentales en la historia agrícola de la humanidad. Su domesticación se remonta al periodo precerámico andino y se estima que ocurrió en Sudamérica, particularmente en la región comprendida entre los lagos Titicaca y Poopó, en el actual territorio de Bolivia. Esta área, junto con el altiplano peruano, conforma el centro de origen primario de este cultivo, según lo documentado por diversos autores como Luján (1996), Andrade et al. (2002), Cortez y Hurtado (2002) y Del Cid (s.f.). Los primeros vestigios arqueológicos de la papa, hallados en el cañón de Chilca al sur de Lima, Perú, tienen una antigüedad aproximada de 10,500 años, lo cual reafirma la profunda relación entre este tubérculo y las primeras sociedades agrícolas andinas.

A pesar de que existen diversas interpretaciones sobre su origen exacto, la evidencia arqueobotánica, genética y etnohistórica converge en reconocer el altiplano peruano-boliviano como el epicentro de su domesticación. Desde esta región, la papa se dispersó progresivamente, adaptándose a una gran diversidad de condiciones climáticas, edafológicas y altitudinales.

A. Importancia global y adaptabilidad del cultivo

En los últimos cuatro siglos, la papa se ha consolidado como una de las hortalizas más relevantes a nivel global, con presencia en más de 100 países. Su expansión se explica tanto por su elevado valor nutricional como por su capacidad de mitigar episodios de hambruna en periodos de crisis económicas y conflictos bélicos. Aunque su producción es predominante en regiones de clima templado, la especie presenta una notable plasticidad fenotípica que le permite desarrollarse en ambientes tropicales y subtropicales bajo un manejo adecuado.

B. Requerimientos climáticos para un óptimo desarrollo

Las condiciones climáticas influyen de manera determinante en el rendimiento y la calidad del tubérculo. La temperatura constituye uno de los

factores críticos: valores inferiores a 10 °C o superiores a 30 °C comprometen el crecimiento vegetativo y la tuberización. La temperatura óptima para el desarrollo de la planta oscila entre 17 °C y 23 °C, mientras que la tuberización requiere fluctuaciones térmicas marcadas entre el día y la noche. Según INTAGRI (2017), el rango ideal para el aire se sitúa entre 10 °C y 25 °C, con temperaturas del suelo entre 10–16 °C durante la noche y 16–22 °C durante el día. Una reducción en estas variaciones puede limitar el crecimiento radicular y la diferenciación de tubérculos.

Las bajas temperaturas del suelo disminuyen la absorción de nutrientes como el fósforo, mientras que las temperaturas elevadas aceleran la senescencia de la planta, lo cual es especialmente notable en variedades de maduración temprana. En regiones templadas, la siembra se realiza a inicios de primavera, mientras que en zonas tropicales se recomienda sembrar en los meses más frescos del año para favorecer la tuberización.

C. Requerimientos edáficos y características del suelo

La papa puede cultivarse en una amplia gama de suelos; sin embargo, los suelos con baja resistencia mecánica son los más apropiados para el desarrollo de tubérculos. Los suelos francos, franco-arenosos, franco-limosos y franco-arcillosos bien drenados son los más indicados, ya que permiten una correcta aireación y evitan problemas de compactación. Aun así, es posible obtener rendimientos aceptables en suelos arcillosos siempre que se incorpore materia orgánica y se gestione adecuadamente el riego.

Para un desarrollo óptimo de estolones y tubérculos, se recomienda una profundidad efectiva mínima del suelo de 50 cm. El pH ideal se sitúa entre 5.0 y 7.0, por lo que deben evitarse suelos salinos, alcalinos o altamente compactados debido a su efecto negativo en la formación del tubérculo.

D. Altitud, pendiente, viento y requerimientos hídricos

La altitud es un factor determinante en el cultivo de la papa, debido a su influencia en la radiación solar, la temperatura y la humedad relativa. El cultivo prospera en un rango altitudinal de 460 a 3,000 m s. n. m., siendo el intervalo óptimo de producción entre 1,500 y 2,500 m s. n. m., donde las condiciones térmicas favorecen la tuberización.

La pendiente del terreno también afecta la productividad. Pendientes entre 0.0 % y 4.0 % son recomendadas por facilitar el uso de maquinaria y optimizar la retención de agua. Pendientes mayores a 4.1 % pueden reducir el rendimiento y requieren prácticas de manejo como el surcado en curvas a nivel o la instalación de terrazas para evitar la erosión.

Respecto al viento, velocidades superiores a 20 km/h pueden dañar el follaje, reducir la fotosíntesis y afectar la transpiración, con impactos negativos en el rendimiento.

En cuanto al agua, los requerimientos hídricos varían entre 600 y 1,000 mm por ciclo, dependiendo de la variedad, la temperatura y la capacidad de almacenamiento del suelo. Se requieren riegos complementarios especialmente durante la germinación y el periodo de crecimiento activo de los tubérculos.

E. Requerimientos de radiación solar

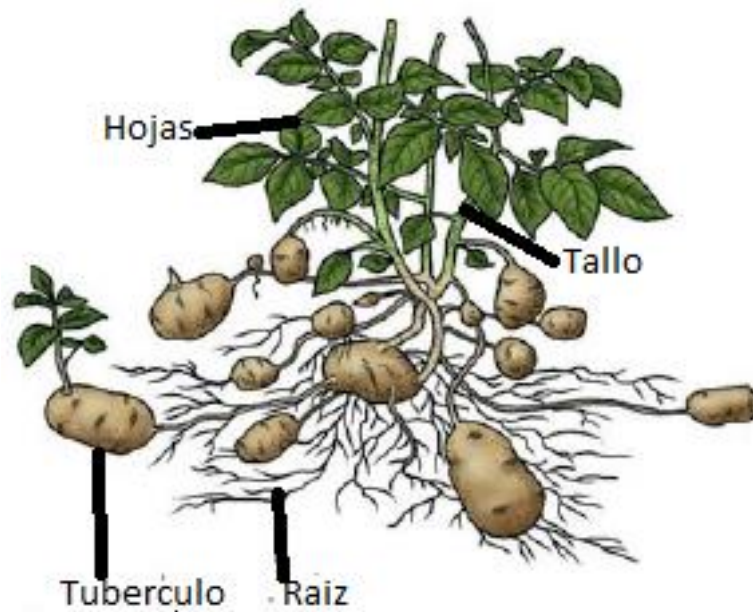
La papa requiere exposición directa a la luz solar luego de la emergencia, pues la luminosidad influye en la fotosíntesis y en la síntesis de azúcares que posteriormente se almacenan en los tubérculos. Entre 8 y 12 horas de radiación diaria suelen ser suficientes para garantizar altos rendimientos. Los días cortos favorecen la tuberización y aceleran el ciclo vegetativo, mientras que los días largos prolongan el ciclo y pueden retrasar la formación de tubérculos.

2.2.3. Descripción morfológica y taxonómica

La papa (*Solanum tuberosum* L.) es una especie herbácea de origen andino que presenta una marcada diferenciación entre su sistema aéreo y su sistema

subterráneo, característica que refleja su adaptación evolutiva a ambientes fríos y de suelos sueltos. Taxonómicamente, se ubica en el reino *Plantae*, división *Magnoliophyta*, clase *Magnoliopsida*, orden *Solanales*, familia *Solanaceae* y género *Solanum*, un grupo botánico que incluye importantes especies agrícolas como el tomate, el ají y la berenjena.

Figura 2 La papa es un tubérculo con un tallo subterráneo modificado



A. Sistema aéreo

El sistema aéreo de la papa está conformado por tallos, hojas, flores y, en algunas variedades, frutos. Cada uno cumple funciones esenciales para el crecimiento vegetativo y la reproducción sexual de la planta.

- **Tallos**

Los tallos aéreos son herbáceos, de consistencia semisucculenta, y presentan una sección circular o ligeramente angular. Suelen alcanzar entre 50 y 100 cm de altura, dependiendo de la variedad y de las condiciones ambientales. La disposición de las hojas es alterna, formando un patrón helicoidal que optimiza la captura de luz. En condiciones favorables, los tallos pueden ramificarse y dar soporte a las inflorescencias.

- **Hojas**

Las hojas de la papa son compuestas e imparipinnadas, generalmente formadas por 7 a 9 folíolos de forma ovado-lanceolada. Presentan una textura pilosa debido a la presencia de tricomas, los cuales cumplen funciones de protección frente a herbívoros y reducen la pérdida de agua por transpiración. La lámina foliar presenta una coloración verde intenso, asociada a un alto contenido de clorofila, indispensable para el proceso fotosintético.

- **Inflorescencias y flores**

Las inflorescencias son cimas terminales que portan flores actinomorfas con corola gamopétala en forma de estrella, compuesta por cinco pétalos soldados. La coloración varía según la variedad, pudiendo ser blanca, azul, púrpura o violeta. Las flores contienen órganos reproductivos completos y, en condiciones adecuadas, pueden dar origen a frutos tipo baya, aunque estos no son de interés comercial y suelen ser tóxicos por su contenido de solanina.

B. Sistema subterráneo

El sistema subterráneo de *S. tuberosum* es fundamental para su productividad y constituye la porción de interés alimentario y económico.

- **Raíces**

Las raíces son fibrosas, finas y poco profundas. La mayor concentración se ubica en los primeros 20 a 30 cm del suelo, lo que exige condiciones edáficas bien aireadas y con buena disponibilidad hídrica. Estas raíces cumplen funciones de absorción de nutrientes y soporte, aunque no se especializan en almacenamiento.

- **Estolones**

Son tallos modificados que se originan en la base de los tallos aéreos y crecen de manera horizontal bajo la superficie del suelo. Los estolones carecen de clorofila y cumplen un rol clave en la formación de tubérculos. A

medida que se desarrolla la planta, los extremos de estos estolones se engrosan por acumulación de almidón y otras reservas.

- **Tubérculos:**

Los tubérculos representan la principal estructura de almacenamiento de la papa. Son tallos subterráneos engrosados, ricos en almidón, que permiten a la planta sobrevivir al invierno y asegurar su reproducción vegetativa. Presentan "ojos", que son yemas axilares capaces de generar nuevas plantas. Su morfología (forma, tamaño, color de la piel y de la pulpa) varía ampliamente entre cultivares, reflejando la gran diversidad genética de esta especie.

Tabla 2 *Clasificación Taxonómica de la especie*

REINO	Plantae
DIVISIÓN	<i>Magnoliophyta.</i>
CLASE	<i>Magnoliopsida.</i>
ORDEN	<i>Solanales</i>
FAMILIA	<i>Solanaceae</i>
GÉNERO	<i>Solanum L., 1753.</i>
ESPECIE	<i>tuberosum L., 1753.</i>

2.2.4. Diversidad e indicadores de especies y variedades de papa

La papa presenta una amplia diversidad genética, conformada tanto por especies cultivadas como por especies silvestres, las cuales, en su mayoría, se reproducen mediante polinización cruzada (Estrada et al., 1994). Los cultivares nativos se distribuyen principalmente en Perú, Bolivia, Ecuador, Colombia y Argentina, siendo la región andina el principal centro de diversidad. Más del 80 % de este acervo genético se conserva en el Centro Internacional de la Papa (CIP), mientras que otra

proporción importante continúa siendo mantenida y preservada en los propios campos de los agricultores andinos (Huamán, 1994).

Según el Informe de Elaboración de Mapas de Distribución y Estudio Socioeconómico de la Diversidad Genética de la Papa elaborado por el Ministerio del Ambiente del Perú (MINAM, 2014), se desarrollaron tres indicadores clave para evaluar la diversidad genética: riqueza de especies (RE), riqueza de variedades nominales (RV) y riqueza local (RL).

- **RE – Riqueza de especies:** Se refiere al número total de especies presentes en un espacio geográfico determinado, incluyendo tanto las especies cultivadas como las silvestres. Este indicador permite evaluar la diversidad a nivel taxonómico de especies.

Figura 3 *Riqueza de especies por departamentos*

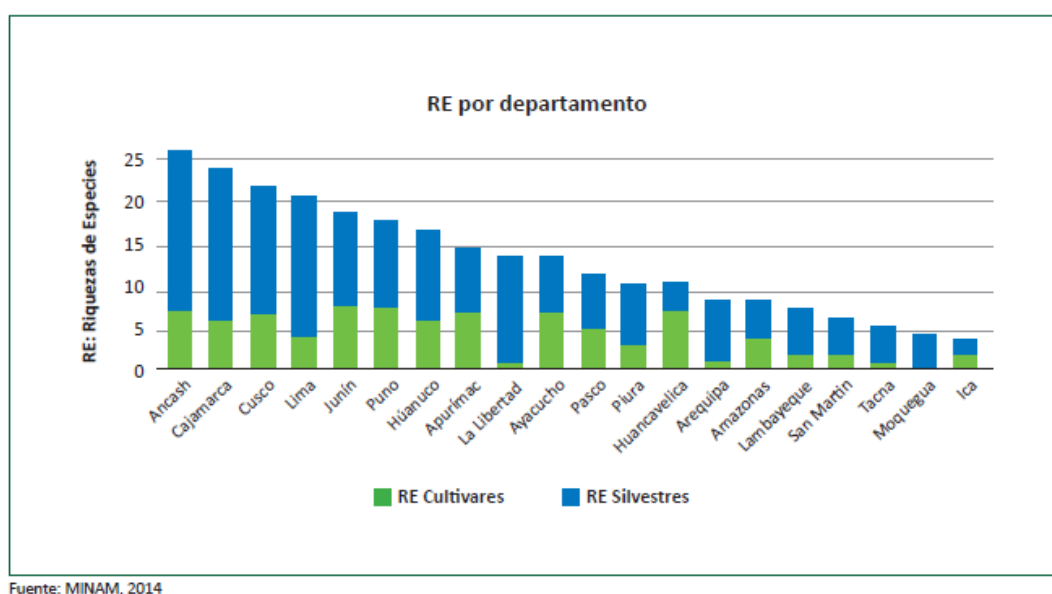
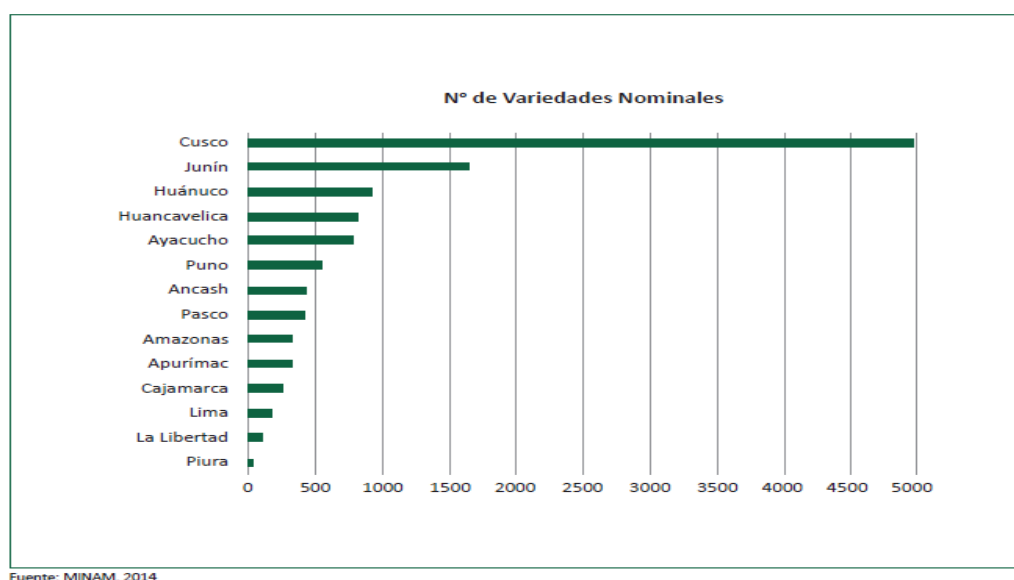


Figura 4 *Riqueza de especies de variedad nominal por departamentos*



- **RV – Riqueza de variedades nominales:** Corresponde al número de variedades reconocidas localmente mediante distintos nombres comunes asociados a morfologías identificadas dentro de un territorio específico. Este indicador permite evaluar la diversidad a nivel de variedades cultivadas.

2.2.5. Valor nutricional de la papa

La papa recién cosechada está compuesta aproximadamente por un 80% de agua y un 20% de materia seca, de la cual entre el 60% y 80% corresponde a almidón, lo que explica su elevada densidad energética y su importancia como fuente de carbohidratos en la dieta humana (CIP, 2018).

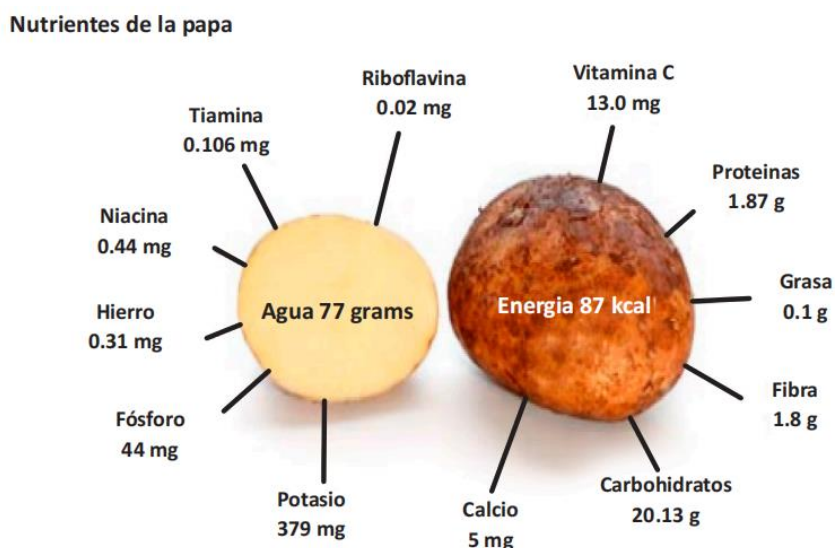
Desde el punto de vista nutricional, la papa presenta un perfil notable en comparación con otros tubérculos y raíces. En relación con su peso seco, el contenido proteico de la papa es similar al de los cereales, superando ampliamente al de otros tubérculos comunes. Aunque su contenido de grasas es bajo, ello favorece su incorporación a dietas equilibradas y de bajo aporte lipídico.

Además, el tubérculo constituye una fuente importante de micronutrientes, destacando especialmente la vitamina C, cuya concentración no solo contribuye a la salud antioxidante del organismo, sino que también facilita la absorción del hierro

dietario. Asimismo, contiene cantidades moderadas de hierro y un espectro amplio de vitaminas del complejo B, entre ellas tiamina (B1), niacina (B3) y piridoxina (B6). En cuanto a minerales, la papa aporta cantidades relevantes de potasio, fósforo y magnesio, además de compuestos como folatos, ácido pantoténico y riboflavina (CIP, 2018).

Desde la perspectiva funcional, la papa contiene fibra dietaria, cuya presencia influye positivamente en la regulación de triglicéridos y glucosa sanguínea. También presenta compuestos antioxidantes, incluyendo carotenoides, polifenoles y antocianinas, asociados a la prevención de enfermedades degenerativas y procesos vinculados al envejecimiento celular. Las concentraciones específicas de carotenoides están directamente relacionadas con el color de la pulpa del tubérculo, mientras que la capacidad antioxidante ha sido correlacionada con los niveles de antocianinas presentes en variedades de pulpa morada, roja o azul (CIP, 2018).

Figura 5 Valor nutricional de la papa



2.2.6. Formas de consumo y aprovechamiento industrial

A nivel mundial, menos del 50% de la producción de papa se consume en estado fresco. La tendencia contemporánea muestra un incremento constante en la demanda de productos procesados, ya sea para consumo directo o como insumos

agroindustriales. Entre estos derivados destacan la fécula de almidón de papa, los productos precocidos congelados y las presentaciones listas para freír, ampliamente utilizadas por cadenas de comida rápida (Fuentes et al., 2009; Carranza, 2011; Proexpansión, 2011; Paz Arce, 2017; Aguirre & Tubilla, 2017).

En el caso peruano, la industria de transformación de papa representa aproximadamente entre el 2.5% y el 3% de la producción nacional, aunque su desarrollo ha experimentado un crecimiento sostenido durante la última década. Este dinamismo ha impulsado una mayor atención hacia la industrialización del tubérculo, promoviendo estudios orientados a la generación de valor agregado. Dichas investigaciones han explorado alternativas como la elaboración de papa precocida, productos congelados, snacks, harinas y almidones modificados.

En Lima, se estima la existencia de más de 300 procesadoras de papa, aunque solo cerca del 10% opera dentro de la formalidad. La mayor parte se dedica a la producción de papa pelada y cortada en diversas presentaciones, aunque sin procesos de congelación de alta tecnología. Los productos con mayor valor de mercado son los bastones precocidos congelados, debido a su practicidad y estabilidad, lo que los convierte en insumos preferidos para el sector gastronómico y comercial.

2.2.7. Límites de valores de metales pesados en papa

La comparación de las concentraciones de metales pesados obtenidas en muestras de *Solanum tuberosum* con los Límites Máximos Permisibles (LMP) establecidos por organismos internacionales (FAO/WHO, Codex Alimentarius) y nacionales (MINAM, SENASA) constituye un paso crítico para determinar el nivel de inocuidad del tubérculo y su potencial riesgo para la salud humana y la cadena alimentaria. Este proceso de contraste normativo permite evaluar si la papa producida en una región determinada se encuentra dentro de rangos aceptables de seguridad alimentaria, o si, por el contrario, presenta concentraciones que podrían comprometer

la salud pública debido a la bioacumulación de metales como plomo (Pb), cadmio (Cd) o arsénico (As)

Desde una perspectiva toxicológica, los LMP representan la concentración máxima de un contaminante que puede estar presente en un alimento sin generar efectos adversos sobre la salud a lo largo de la vida. Estos valores son establecidos considerando la ingesta diaria tolerable (TDI), la ingesta semanal tolerable (PTWI) y evidencias epidemiológicas que relacionan la exposición alimentaria con efectos clínicos o subclínicos en poblaciones vulnerables. Por ello, comparar los resultados analíticos con dichos estándares permite determinar si el consumo habitual de papa podría superar los umbrales aceptables de exposición.

En el marco regulatorio internacional, el Codex Alimentarius establece límites estrictos para Cd y Pb en hortalizas y tubérculos, los cuales suelen ser utilizados como referencia para países que aún no cuentan con normativas específicas. A nivel nacional, SENASA regula la inocuidad de alimentos agrícolas destinados al consumo interno, mientras que MINAM define estándares de calidad ambiental de suelos (ECA-Suelo), los cuales determinan el nivel de contaminación del sustrato donde crece el cultivo. Ambas referencias son complementarias: mientras SENASA evalúa el riesgo alimentario directo, los ECA-Suelo permiten inferir el potencial de transferencia de metales hacia el cultivo.

Cuando los valores obtenidos en el análisis químico superan los LMP, se evidencia un riesgo directo para la salud, ya que la papa es un alimento de consumo frecuente en la dieta peruana, especialmente en zonas altoandinas donde su ingesta es diaria y en cantidades elevadas. La exposición crónica a metales pesados puede ocasionar neurotoxicidad (Pb), daño renal (Cd), alteraciones endocrinas y carcinogenicidad (Cr VI), además de efectos acumulativos en grupos vulnerables como niños, mujeres gestantes y adultos mayores.

Asimismo, superar los LMP implica riesgos indirectos para la cadena alimentaria. La papa contaminada puede entrar a mercados locales o regionales,

afectando la seguridad alimentaria y reduciendo la competitividad agrícola. Además, la presencia de contaminantes persistentes compromete la sostenibilidad del sistema agrario, ya que refleja una contaminación del suelo y del agua de cultivo, lo cual repercute en futuras campañas agrícolas.

En síntesis, el problema específico que aborda esta comparación es determinar si las concentraciones de metales pesados en la papa representan un riesgo real para la salud y para la cadena alimentaria, basándose en criterios científicos y normativos. Este análisis permite identificar la magnitud del problema, orientar acciones correctivas y garantizar la inocuidad del cultivo en contextos donde la actividad minera, el uso de agroquímicos o la contaminación del suelo podrían estar comprometiendo la calidad del alimento

2.3. Definición de términos básicos

- **Calidad de suelos:** Es la capacidad del suelo para funcionar dentro de los límites del ecosistema y sostener la productividad biológica, manteniendo la calidad ambiental y promoviendo la salud de plantas y animales. Se evalúa en función de sus características físicas, químicas y biológicas (MINAM, 2016).
- **Concentración:** Relación de una sustancia disuelta o contenida en una cantidad dada de otra sustancia, expresada cuantitativamente para determinar la carga de contaminantes en una matriz ambiental (MINAM, 2016).
- **Contaminación:** Alteración de origen natural o antrópico asociada a la actividad humana (Morales, 2020), donde si bien el aire y el agua facilitan la dispersión, el suelo actúa como el reservorio principal de acumulación y persistencia de los contaminantes (Torres-Gonzales et al., 2021).
- **Fitorremediación:** Tecnología que aprovecha la capacidad de ciertas plantas y sus microorganismos asociados para remover, transferir, estabilizar o degradar contaminantes presentes en el suelo, agua y sedimentos (Muñoz-Castellanos et al., 2010).

- **Metales Pesados:** Elementos metálicos cuyo peso específico es mayor de 5 g/cm³ o con número atómico superior a 20; se clasifican como tales aquellos que, por sus efectos tóxicos y persistencia, son considerados contaminantes ambientales peligrosos (García et al., 2002).
- **Niveles de contaminación:** en el suelo Constituye un factor limitante para la fitorremediación, pues altas concentraciones de metales restringen el desarrollo vegetal y la adaptación de especies (Martell, 2014), inhibiendo además el crecimiento radicular y aéreo, lo que compromete la eficacia del proceso (Kevin Roger, 2017).
- **Remediación:** Conjunto de tareas desarrolladas en un sitio contaminado con la finalidad de eliminar o reducir los contaminantes a niveles seguros, a fin de asegurar la protección de la salud humana y la integridad de los ecosistemas (MINAM, 2016).
- **Suelo:** Recurso natural no renovable a escala humana, esencial para el sostenimiento de la vida en la tierra y base de la producción agrícola (García et al., 2002).
- **Suelo Contaminado:** Suelo cuyas características químicas han sido alteradas negativamente por la presencia de sustancias contaminantes depositadas por la actividad humana, según lo establecido en el D.S. N° 002-2013-MINAM (MINAM, 2016).

2.4. Formulación de hipótesis

2.4.1. Hipótesis general

Las concentraciones de metales pesados (As, Cd, Pb, Fe y Zn) determinadas en muestras de *Solanum tuberosum* procedentes de la zona rural de Paríamarca evidencian variabilidad en sus niveles de acumulación. Se observa que metales potencialmente tóxicos como el plomo (Pb) y el cadmio (Cd) podrían superar los Límites Máximos Permisibles (LMP) establecidos por organismos nacionales e internacionales (FAO/OMS, MINAM, SENASA), lo que representa un riesgo potencial

para la salud humana debido a su capacidad de bioacumulación y efectos tóxicos crónicos.

2.4.2. Hipótesis específicas

- a. "Los valores de metales pesados encontrados en el tubérculo difieren significativamente de las concentraciones halladas en el suelo, evidenciando mecanismos de bioacumulación diferenciada".
- b. "La presencia de metales pesados en la papa está asociada a factores ambientales locales, tales como la calidad del suelo, cercanía a fuentes mineras y características del riego, contribuyendo a niveles que podrían superar los LMP y representar un riesgo potencial para los consumidores"
- c. "Las concentraciones de Plomo (Pb) y Cadmio (Cd) en los tubérculos de papa superan los Límites Máximos Permisibles (LMP) establecidos por la FAO/OMS y el Codex Alimentarius, indicando que el consumo de este cultivo en la zona de estudio constituye un riesgo para la inocuidad alimentaria."

2.5. Identificación de las variables

2.5.1. Variable independiente

- Concentración de metales pesados en el suelo agrícola

2.5.2. Variable dependiente

- Concentración de metales pesados en *Solanum tuberosum* (papa).

2.6. Definición Operacional de variables e indicadores.

En la Tabla 3, se operacionalizó las variables de estudio, con el fin de hallar los objetivos de la presente investigación.

Tabla 3 Matriz de operacionalización de variables e indicadores

Nº	Variable	Indicador	Definición operativa	Unidad	Instrumento / Técnica	Tipo de Variable
1	Arsénico en tubérculo	[As]	Concentración de Arsénico en muestra homogeneizada de tubérculo.	mg/kg	Digestión ácida (HNO ₃ /HClO ₄) + Generación de Hidruros / AAS	Dependiente
2	Cadmio en tubérculo	[Cd]	Concentración de Cadmio en muestra homogeneizada de tubérculo.	mg/kg	Digestión ácida (HNO ₃ /HClO ₄) + AAS (Horno Grafito/Llama)	Dependiente
3	Plomo en tubérculo	[Pb]	Concentración de Plomo en muestra homogeneizada de tubérculo.	mg/kg	Digestión ácida (HNO ₃ /HClO ₄) + AAS (Horno Grafito/Llama)	Dependiente
4	Hierro en tubérculo	[Fe]	Concentración de Hierro en muestra homogeneizada de tubérculo.	mg/kg	Digestión ácida (HNO ₃ /HClO ₄) + ICP-OES	Dependiente
5	Zinc en tubérculo	[Zn]	Concentración de Zinc en muestra homogeneizada de tubérculo.	mg/kg	Digestión ácida (HNO ₃ /HClO ₄) + ICP-OES	Dependiente
6	Arsénico en suelo	[As]	Concentración de Arsénico en suelo agrícola (0–20 cm).	mg/kg	Digestión ácida + Generación de Hidruros	Independiente
7	Cadmio en suelo	[Cd]	Concentración de Cadmio en suelo agrícola (0–20 cm).	mg/kg	Digestión ácida + AAS	Independiente

8	Plomo en suelo	[Pb]	Concentración de Plomo en suelo agrícola (0–20 cm).	mg/kg	Digestión ácida + AAS	Independiente
9	Hierro en suelo	[Fe]	Concentración de Hierro en suelo agrícola (0–20 cm).	mg/kg	Digestión ácida + ICP-OES	Independiente
10	Zinc en suelo	[Zn]	Concentración de Zinc en suelo agrícola (0–20 cm).	mg/kg	Digestión ácida + ICP-OES	Independiente
11	Factor de Bioconcentración	BCF	Relación calculada: $\frac{[\text{Metal}]_{\text{tubo } \text{\'{r}cu}}}{[\text{Metal}]_{\text{suelo}}}$	Adimensional	Cálculo matemático	Indicador
12	Cumplimiento Normativo	LMP	Comparación con normas FAO/OMS y Codex Alimentarius.	Binaria (Sí/No)	Contraste estadístico (Prueba T)	Indicador

CAPITULO III

METODOLOGIA Y TECNICAS DE INVESTIGACION

3.1. Tipo de investigación

La presente investigación es de tipo aplicada, debido a que busca generar conocimiento científico orientado a resolver un problema concreto de salud pública y seguridad alimentaria: la presencia de metales pesados en el tubérculo de *Solanum tuberosum* y en los suelos agrícolas de la zona rural de Paríamarca (Pasco). La finalidad práctica del estudio es identificar si los niveles encontrados superan los Límites Máximos Permisibles (LMP), aportando evidencia técnica para la toma de decisiones en la gestión agrícola y ambiental local (Carrasco Díaz, 2006).

Asimismo, el estudio tiene un enfoque cuantitativo, dado que se basa en la recolección de datos numéricos mediante análisis químico instrumental (AAS e ICP-OES), los cuales fueron procesados con métodos estadísticos para determinar con precisión las concentraciones de contaminantes y establecer comparaciones objetivas con los estándares internacionales (FAO/WHO) y nacionales (MINAM) (Hernández-Sampieri et al., 2014).

En cuanto al nivel, el estudio es descriptivo-comparativo. Es descriptivo porque cuantifica y caracteriza los niveles de Arsénico, Cadmio, Plomo, Hierro y Zinc en el tubérculo y el suelo agrícola; y es comparativo porque contrasta los valores

obtenidos con los LMP y ECA vigentes, con el fin de determinar el grado de riesgo para la salud humana y la inocuidad alimentaria.

3.2. Nivel de Investigación

El nivel de investigación del presente estudio es descriptivo–correlacional.

Es descriptivo porque el objetivo central consiste en caracterizar y cuantificar las concentraciones de metales pesados (As, Cd, Pb, Fe y Zn) tanto en el tubérculo de *Solanum tuberosum* como en los suelos agrícolas de Pariamarca. En este nivel, el estudio se orienta a detallar el comportamiento de las variables tal como se presentan en el contexto real, sin manipulación experimental, proporcionando información precisa sobre el estado de contaminación y la posible bioacumulación en el cultivo.

Asimismo, la investigación alcanza también un nivel correlacional, debido a que evalúa la relación entre la concentración de metales en el suelo y su presencia en el tubérculo mediante indicadores como el coeficiente de bioacumulación (BAF). Este análisis permite identificar si los niveles hallados en el suelo están asociados de manera proporcional, positiva o negativa con las concentraciones detectadas en el cultivo, lo cual es fundamental para comprender la movilidad y transferencia de los metales dentro del sistema suelo–planta.

De manera complementaria, el estudio incluye un componente comparativo, ya que los valores obtenidos se contrastan con los Límites Máximos Permisibles (LMP) establecidos por organismos regulatorios nacionales e internacionales (FAO/WHO, MINAM, SENASA). Este contraste permite establecer si las concentraciones encontradas representan un riesgo potencial para la salud humana y la seguridad alimentaria.

En conjunto, el nivel descriptivo–correlacional y comparativo permite no solo documentar el grado de contaminación, sino también comprender sus implicancias en la cadena alimentaria y en la población rural.

3.3. Diseño de investigación

El presente estudio corresponde a un diseño no experimental, dado que no se realizó manipulación deliberada de la variable independiente (concentración de metales en el suelo); por el contrario, se observaron y analizaron los fenómenos tal y como se presentan en su contexto natural. En este sentido, la determinación de los contenidos metálicos no fue inducida, sino cuantificada posteriormente mediante procedimientos analíticos de laboratorio sobre las muestras recolectadas en campo.

Asimismo, el diseño es transversal, debido a que la recolección de datos y muestras (suelo y tubérculos) se efectuó en un único momento temporal, permitiendo caracterizar el estado actual de la contaminación y el nivel de bioacumulación de metales pesados en la zona de estudio al momento del muestreo (Hernández-Sampieri et al., 2014).

3.4. Métodos de investigación

El presente estudio se desarrolló empleando una combinación de métodos científicos, analíticos, descriptivos y comparativos, adecuados para evaluar la presencia y comportamiento de metales pesados en el sistema suelo-planta.

A. Método científico

Se aplica el método científico como eje central del proceso investigativo. Este método guía la formulación del problema, la hipótesis, el diseño metodológico, la recolección sistemática de datos y el análisis objetivo de resultados. Permite asegurar rigurosidad y reproducibilidad en la determinación de metales pesados mediante técnicas instrumentales validadas internacionalmente.

B. Método descriptivo

Este método se utiliza para caracterizar las concentraciones de metales pesados (As, Cd, Pb, Fe y Zn) presentes en el tubérculo de *Solanum tuberosum* y en los suelos agrícolas. A través del análisis cuantitativo se describen los valores medidos, su distribución y sus parámetros estadísticos, permitiendo identificar el nivel de contaminación en los puntos de muestreo.

C. Método analítico

El estudio utiliza el método analítico para descomponer y examinar las muestras de suelo y tubérculo mediante digestión ácida y posterior lectura con técnicas instrumentales (AAS, ICP-OES o ICP-MS). Este método permite determinar la concentración exacta de cada metal y evaluar procesos asociados, como la movilidad, disponibilidad y bioacumulación en la planta.

D. Método correlacional

Este método se aplica para analizar la relación existente entre las concentraciones de metales en el suelo y los niveles encontrados en el tubérculo. Se emplea el coeficiente de bioacumulación (BAF) como indicador clave, permitiendo identificar si existe transferencia significativa de metales desde el suelo hacia el cultivo.

E. Método comparativo

El método comparativo se utiliza para contrastar los valores obtenidos con los Límites Máximos Permisibles (LMP) establecidos por FAO/WHO, MINAM y SENASA. Este contraste permite evaluar si los metales detectados superan los estándares aceptados y, por tanto, si representan un riesgo para la salud humana y la inocuidad alimentaria.

F. Método estadístico

Finalmente, se emplea el método estadístico para procesar, organizar y analizar los datos obtenidos. Se utilizan estadísticos descriptivos (media, desviación estándar), pruebas de normalidad, regresiones simples o correlaciones según corresponda, asegurando una interpretación objetiva y sustentada de los resultados.

3.5. Población y muestra

Para esta investigación se utilizó el muestreo No Probabilístico (no estadístico y no paramétrico) porque la población es muy reducida y es posible el manejo de los datos obtenidos.

3.5.1. Población

La población de estudio estuvo constituida por la totalidad de los cultivos de *Solanum tuberosum* (papa) establecidos en los terrenos agrícolas de la zona rural de Pariamarca, Distrito de Yanacancha (Pasco). Dado el carácter de agricultura familiar y minifundista de la zona, se estimó un universo de estudio que abarca un área de influencia agrícola de aproximadamente 10 a 15 hectáreas, donde se desarrollan las actividades de siembra y cosecha de las variedades locales evaluadas durante la campaña 2024.

3.5.2. Muestra

La muestra fue seleccionada mediante un muestreo no probabilístico por conveniencia, debido a la accesibilidad geográfica de las parcelas y la autorización de los productores locales. Se seleccionaron cuatro (04) parcelas representativas distribuidas estratégicamente en la zona de estudio cuya ubicación geográfica del punto de muestreo se encuentra georreferenciada en el sistema UTM, zona 18 L, con coordenadas aproximadas Este: 373 281 m y Norte: 8 822 120 m., de las cuales se extrajeron tanto submuestras de suelo (0-20 cm de profundidad) como especímenes de tubérculos en estado de madurez comercial, garantizando la cobertura de la variabilidad espacial y las condiciones agronómicas del sector.

A. Muestra de tubérculos (papa)

Se seleccionaron 4 parcelas, según el diseño, en cada parcela se recolectaron 3 réplicas independientes de tubérculos maduros.

Cada réplica se homogenizó (lavado, pelado parcial, secado y molienda) antes del análisis de metales pesados.

B. Muestra de suelo

- En cada parcela se tomó una muestra compuesta del horizonte superficial (0–20 cm), integrada por 3–5 submuestras distribuidas aleatoriamente.
- Las muestras se secaron al aire, tamizaron (<2 mm) y se prepararon para digestión ácida.

C. Criterios de inclusión

- Parcelas activas dedicadas al cultivo de *Solanum tuberosum*.
- Suelos agrícolas ubicados dentro de la zona rural de Paríamarca.
- Productores dispuestos a autorizar el muestreo.

3.6. Técnicas e instrumentos de recolección de datos

Para el desarrollo de la investigación se emplearon técnicas específicas tanto en la fase de campo como en la fase analítica:

- Observación Directa y Muestreo: Se aplicó la observación in situ para la identificación de las parcelas y la técnica de muestreo selectivo para la recolección de suelo agrícola (0-20 cm) y tubérculos, siguiendo protocolos de cadena de custodia.
- Análisis Instrumental: Para la cuantificación de metales pesados se utilizó la técnica de Digestión Ácida (mezcla de HNO_3 y HClO_4) seguida de la lectura mediante Espectrometría de Absorción Atómica (AAS) para Cadmio y Plomo, y Espectrometría de Emisión Óptica (ICP-OES) para Zinc y Hierro, conforme a los métodos estandarizados del laboratorio acreditado.

A. Trabajos de campo

Visita a campo: Visitas de campo para la identificación y recolección de las muestras a evaluar

B. Instrumentos

- GPS
- Fichas de Observación.
- Cámara Fotográfica
- Bolsas Plásticas para toma de muestra

C. Trabajos de laboratorio

Los trabajos de laboratorio, se realizaron en el “Laboratorio de Aguas y Suelos, del Instituto de Investigación de la Universidad Nacional Daniel Alcides Carrión.

3.7. Selección, validación y confiabilidad de los instrumentos de investigación.

A. Procedimiento de Selección.

La selección de los instrumentos de medición y equipos analíticos se realizó bajo criterios de rigurosidad metrológica y cumplimiento de estándares técnicos. Se priorizaron equipos con certificados de calibración vigentes y con límites de detección adecuados para la cuantificación de trazas metálicas en matrices complejas (suelo y tejido vegetal), garantizando la sensibilidad necesaria para validar el cumplimiento de los Estándares de Calidad Ambiental (ECA) y Límites Máximos Permisibles (LMP).

B. Procedimiento de validación

Una vez obtenido los resultados en el “Laboratorio de Aguas y Suelos, del Instituto de Investigación de la Universidad Nacional Daniel Alcides Carrión. se procedió a dar la validación de resultados siendo positivo. Procedimiento de confiabilidad de los instrumentos de investigación.

Para la confiabilidad de instrumentos se verifico el proceso de monitoreo y análisis lo cual cumplió con los protocolos de monitoreo y análisis, dispuesto por INACAL.

3.8. Técnicas de procesamiento y análisis de datos

El procesamiento y análisis de los datos recopilados durante la investigación sobre el cultivo de papa se desarrolló mediante procedimientos sistemáticos que garantizan la confiabilidad y validez de los resultados. En una primera etapa, la información obtenida en campo —incluyendo datos de crecimiento vegetativo, rendimiento, características morfológicas, condiciones edafoclimáticas y parámetros de calidad del tubérculo— fue organizada en una matriz de datos utilizando Microsoft

Excel. Esta fase incluyó la verificación de la consistencia, la identificación de valores atípicos y la corrección de posibles errores de registro.

Una vez depurada la base de datos, se aplicaron técnicas descriptivas para caracterizar el comportamiento general de las variables agronómicas evaluadas. Para ello, se calcularon medidas de tendencia central (media, mediana) y dispersión (desviación estándar y coeficiente de variación), lo que permitió identificar la variabilidad intra e Inter parcelaria asociada a cada tratamiento o condición experimental.

En función del diseño experimental empleado -Diseño Completamente al Azar (DCA-, se utilizó software estadístico especializado como SPSS, R o InfoStat) para aplicar análisis inferenciales. Entre las pruebas utilizadas, destacó el Análisis de Varianza (ANOVA) para determinar si existían diferencias estadísticamente significativas entre tratamientos, variedades de papa o condiciones de manejo agrícola.

3.9. Tratamiento estadístico

El tratamiento estadístico aplicado en esta investigación se desarrolló con el propósito de garantizar la rigurosidad científica y la validez de los resultados obtenidos en el estudio del cultivo de papa. Para ello, se utilizaron procedimientos cuantitativos que permitieron analizar, interpretar y contrastar las variables evaluadas tanto en campo como en laboratorio.

En primer lugar, los datos fueron sometidos a un proceso de depuración mediante la verificación de valores inconsistentes, la identificación de datos extremos y la estandarización de unidades de medida. Una vez generada la base depurada, se procedió con el análisis estadístico utilizando software especializado el SPSS, según la naturaleza de las variables y el diseño metodológico de la investigación.

Se aplicaron estadísticos descriptivos (media, mediana, moda, desviación estándar, coeficiente de variación y rangos) con el fin de caracterizar el comportamiento general de las variables agronómicas o de calidad evaluadas, tales

como rendimiento, contenido de metales pesados, características morfológicas del tubérculo y parámetros físicos o químicos del suelo.

Posteriormente, se realizaron pruebas de normalidad, como Kolmogorov-Smirnov o Shapiro-Wilk, para determinar si las variables cumplían los supuestos necesarios para aplicar estadística paramétrica. En caso de verificarse normalidad y homogeneidad de varianzas, se ejecutó un Análisis de Varianza (ANOVA) de uno o más factores, según el diseño experimental (DCA). Este análisis permitió identificar diferencias estadísticamente significativas entre tratamientos, variedades de papa o niveles de exposición (en estudios de metales pesados).

3.10. Orientación ética filosófica y epistémica

El presente proyecto de investigación se desarrolló bajo estrictos criterios éticos, filosóficos y epistémicos que garantizan su transparencia, rigurosidad y responsabilidad social. En el plano ético, el estudio se enmarca en el Código de Ética para la Investigación Científica en el Perú, específicamente en el Capítulo IX, Artículo 4, inciso a, el cual establece que toda investigación debe priorizar la protección del ambiente, la diversidad biológica, los recursos genéticos y los procesos ecológicos, evitando la generación de impactos negativos derivados de las actividades de investigación. En consonancia con este principio, todas las actividades de muestreo, manipulación de materiales biológicos y análisis de laboratorio se ejecutaron minimizando alteraciones en los ecosistemas y siguiendo protocolos seguros y autorizados.

A. Autoría

La autoría de este proyecto corresponde exclusivamente a Garcia Alejandria, Lizardo y Vilca Jara, Zunica, quienes desarrollaron cada una de las etapas del estudio, desde la formulación del problema, revisión de literatura, elaboración del marco metodológico, recolección de datos, análisis, interpretación y redacción de resultados. Ambos autores asumen responsabilidad plena por el contenido presentado, garantizando que las ideas, metodologías y conclusiones reflejan su

propio trabajo intelectual, cumpliendo con los estándares de integridad académica establecidos por la institución.

B. Originalidad

Este informe de investigación es producto de un trabajo original, elaborado sin incurrir en plagio, autoplagio o manipulación indebida de información. Para la formulación del proyecto, se consultaron diversas fuentes científicas, normativas y técnicas pertinentes al estudio de la calidad ambiental, el análisis de metales pesados y el impacto en cultivos alimentarios como la papa. Todas estas fuentes han sido utilizadas únicamente con fines académicos y de soporte teórico, sin alteración alguna del contenido. La información tomada de autores nacionales e internacionales fue incorporada mediante citas directas e indirectas, respetando el sentido y la integridad de los documentos originales.

C. Reconocimiento de fuentes

El reconocimiento de las fuentes se realizó de acuerdo con los lineamientos establecidos por la American Psychological Association (APA), 7ª edición. Todos los textos, artículos científicos, normas técnicas, libros y documentos institucionales fueron citados correctamente en el cuerpo del proyecto y registrados en la sección de referencias. Este procedimiento asegura la trazabilidad del conocimiento empleado y contribuye a la transparencia del proceso investigativo. Asimismo, la correcta citación permite distinguir con claridad las ideas propias de los autores de aquellas tomadas de la literatura especializada, reforzando el compromiso ético adquirido frente a la institución y la comunidad científica.

D. Orientación filosófica y epistémica

Desde una perspectiva filosófica y epistémica, la investigación se sustenta en un enfoque positivista y empírico-analítico, dado que se fundamenta en la medición objetiva de variables químicas, la recolección sistemática de datos y la aplicación de métodos estadísticos para contrastar hipótesis. El estudio se orienta

hacia la búsqueda de explicaciones verificables sobre la contaminación por metales pesados en el cultivo de papa, apoyándose en la reproducibilidad, la evidencia cuantitativa y la neutralidad valorativa en el análisis de resultados. Este enfoque asegura que las conclusiones derivadas se basen exclusivamente en evidencia científica, garantizando la validez y confiabilidad del conocimiento generado.

CAPITULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Descripción del trabajo de campo

Para desarrollar el estudio sobre la concentración de metales pesados en *Solanum tuberosum* (papa) en la ubicación geográfica del punto de muestreo se encuentra georreferenciada en el sistema UTM, zona 18 L, con coordenadas aproximadas Este: 373 281 m y Norte: 8 822 120 m., en la zona rural de Pariamarca, distrito de Yanacancha, Pasco (2024), se implementó un protocolo de trabajo de campo con rigurosas consideraciones técnicas, orientado a garantizar la representatividad y confiabilidad de las muestras obtenidas.

En primera instancia, se realizó la delimitación del área de estudio mediante el uso de cartografía base, imágenes satelitales recientes y verificación en campo. Se identificaron las unidades productivas y las parcelas activas que constituirían los puntos de muestreo. La selección de estos sitios se efectuó en función de criterios como:

- Proximidad a fuentes potenciales de contaminación, tales como zonas de influencia minera, vías de transporte de mineral, canales de riego contaminados o áreas con uso intensivo de fertilizantes fosfatados.
- Tipo de manejo agronómico (tradicional).

- Condiciones edáficas (textura, pendiente, drenaje).
- Distancia entre parcelas, para asegurar independencia espacial entre las muestras.

Posteriormente, se elaboró un plan de muestreo sistemático-estratificado con el fin de cubrir la heterogeneidad del territorio. Cada punto de muestreo fue georreferenciado con un GPS de precisión submétrica para permitir futuras comparaciones temporales y espaciales.

A. Recolección de muestras de tubérculos y suelo

La toma de muestras se ejecutó siguiendo protocolos internacionales para estudios de metales pesados en cultivos (FAO, 2018; ISO 22036). Entre los aspectos técnicos considerados se incluyeron:

Uso de herramientas esterilizadas (palas de acero inoxidable, cuchillos de corte, guantes descartables libres de talco) para evitar contaminación externa.

En cada parcela se extrajeron tubérculos representativos obedeciendo un patrón en zigzag o “W”, recolectando un mínimo de 10 a 15 unidades por sitio.

Se retiró el exceso de suelo adherido sin lavar las hojas, el tallo, la raíz y de los tubérculos con agua, para no alterar la concentración superficial de los metales.

Las muestras de suelo se obtuvieron a una profundidad agrícola estándar de 0–20 cm, recogiendo de 5 a 8 submuestras compuestas por parcela.

Los materiales se depositaron en bolsas de polietileno grado analítico, debidamente rotuladas con código de muestra, fecha, ubicación, profundidad, variedad de papa y observaciones de campo.

B. Control de variables ambientales y agronómicas

Durante el muestreo se registraron parámetros que permiten contextualizar la variabilidad espacial y agrícola del cultivo, tales como:

- Humedad del suelo (medida con higrómetro portátil).

- Temperatura ambiental y del suelo.
- pH y conductividad eléctrica del suelo in situ (mediante equipos portátiles calibrados).
- Tipo de riego empleado (gravedad, aspersión).
- Historial de fertilización, enmiendas y uso de fitosanitarios.
- Estado fenológico del cultivo y presencia de estrés hídrico o fitopatológico.

Estos datos complementarios permiten interpretar los resultados analíticos de manera más robusta, considerando factores de transferencia suelo–planta.

C. Conservación, transporte y cadena de custodia

Para asegurar la integridad de las muestras, se siguieron criterios estrictos de conservación:

- Los tubérculos fueron almacenados en conservadoras térmicas entre 4–8 °C.
- El suelo fue transportado en bolsas herméticas para evitar pérdidas de humedad.
- Todo el material fue trasladado al laboratorio en un lapso no mayor a 24 horas.
- Se documentó la cadena de custodia, registrando la hora de recolección, transporte, recepción y procesamiento, garantizando la trazabilidad del proceso para auditorías o replicación del estudio.

Figura 6 Producción de la *Solanum tuberosum* (papa)



D. Procesamiento y análisis de muestras en laboratorio

Una vez culminado el trabajo de campo, las muestras de suelo y tejido vegetal ingresaron al laboratorio para su procesamiento siguiendo un protocolo estandarizado basado en normativas internacionales (EPA, ISO, AOAC) y alineado a prácticas de aseguramiento de calidad analítica. Este protocolo fue diseñado para minimizar errores sistemáticos, evitar contaminación cruzada y garantizar que los valores obtenidos reflejen de manera fidedigna la concentración real de metales pesados en *Solanum tuberosum* y suelos agrícolas de Pariamarca.

a. Recepción, registro y control inicial de calidad

Al ingreso al laboratorio, cada muestra fue verificada en su rotulado, código alfanumérico, fecha y hora de colecta. Se documentó la cadena de custodia, acompañada de la respectiva ficha técnica de muestreo. Las muestras fueron sometidas a:

- Inspección visual para detectar alteraciones físicas.
- Registro fotográfico previo al análisis.

Almacenamiento temporal en refrigeración (4 °C para material vegetal; temperatura ambiente controlada para suelos), a fin de evitar cambios químicos no deseados.

Este paso es esencial para asegurar la trazabilidad completa del proceso.

b. Preparación preanalítica de las muestras

El procesamiento se realizó diferenciando matrices vegetales (raíz, tallo, hojas y tubérculos) y matriz suelo, ya que cada una requiere tratamientos específicos.

- **Secado**

El material vegetal se deshidrató en estufa de circulación de aire forzado a 60–70 °C hasta alcanzar peso constante, evitando volatilización de elementos sensibles y reduciendo la humedad para estandarizar la base de cálculo en peso seco.

El suelo se secó a temperatura ambiente (25–30 °C), protegido de la radiación solar, para evitar alteración de compuestos orgánicos sensibles.

- **Molido y homogeneización**

Las muestras vegetales se pulverizaron en molinos herméticos de acero inoxidable o zirconio, evitando contaminación metálica externa.

El suelo se tamizó a una malla de 2 mm y posteriormente se homogenizó mediante técnicas de cuarteo.

Todo el material se almacenó en frascos ámbar o polietileno grado analítico previamente lavados con ácido nítrico al 10%.

Este proceso genera una muestra representativa y química-físicamente uniforme.

- **Digestión ácida y mineralización**

La digestión es una etapa crítica, ya que transforma la matriz sólida en una solución adecuada para análisis instrumental.

c. Método de digestión

Se aplicaron métodos de digestión ácida avalados por la EPA (3050B, 3051A, 3052) y la ISO 27085, utilizando combinaciones de ácidos ultrapuros:

- HNO_3 (ácido nítrico): oxidante primario para materia orgánica.
- HClO_4 (ácido perclórico): favorece la completa mineralización en matrices complejas.
- H_2O_2 (peróxido de hidrógeno): coadyuvante para destruir compuestos carbonáceos.

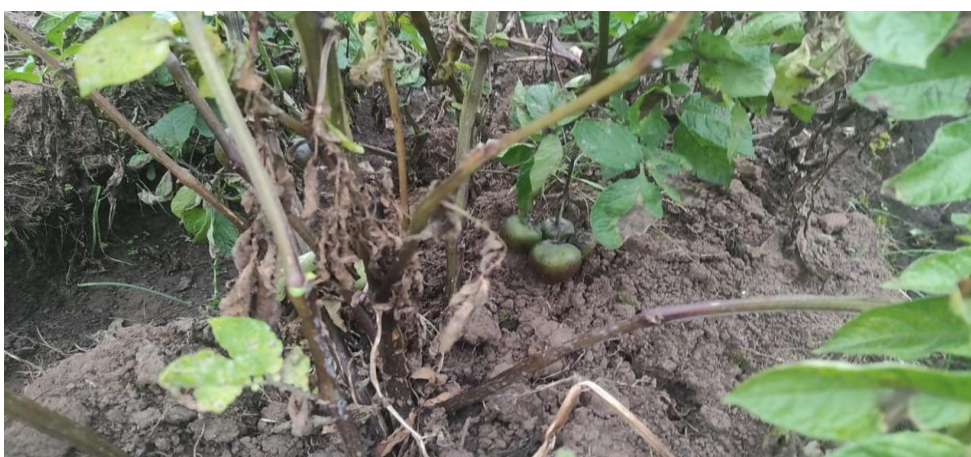
En el caso de ICP-MS, se utilizó digestión asistida por microondas, que reduce el tiempo de mineralización y mejora la recuperación de elementos traza como Cd y Pb.

La digestión se realizó en matraces sellados libres de metales, seguida de filtración y aforo con agua ultrapura ASTM tipo I ($\leq 0.05 \mu\text{S/cm}$).

Figura 7 Sembrío de la *Solanum tuberosum* (papa)



Figura 8 Síntomas visuales en el cultivo



4.2. Presentación, análisis e interpretación de resultados.

Aquí está la tabla con los resultados del análisis de metales pesados en la planta *Solanum tuberosum* (papa) para la zona rural de Pariamarca del distrito de Yanacancha, Pasco-2024.

Tabla 4 Resultados de laboratorio concentración de los metales pesados

	Metal Pesado	Concentración en suelo (mg/kg)	Concentración en tubérculos (mg/kg)	BCF (Bioconcentration Factor)
(As)	Arsénico	15.849 ± 3.52	0.05 ± 0.028	0.018
(Cd)	Cadmio	0.347 ± 0.035	0.076 ± 0.013	0.147
(Pb)	Plomo	44.823 ± 11.859	0.203 ± 0.185	0.031
(Fe)	Hierro	30,658.58 ± 6508.84	38.783 ± 8.875	0.004
(Zn)	Zinc	109.26 ± 9.64	14.082 ± 3.459	0.241

Nota: Datos obtenidos del Informe de Ensayo N° LP-AG-015-2024, Laboratorio de Aguas y Suelos - UNDAC.

El análisis de la concentración de metales pesados tanto en los suelos agrícolas como en los distintos órganos de *Solanum tuberosum* permitió evaluar el comportamiento diferencial de absorción, acumulación y transferencia interna de elementos potencialmente tóxicos bajo condiciones de riego con aguas de lluvia. Los resultados obtenidos muestran patrones característicos asociados a la movilidad edáfica, biodisponibilidad y mecanismos fisiológicos de transporte dentro de la planta.

A. Comportamiento general de los metales en el suelo

Las concentraciones registradas para As, Cd, Pb, Fe, Zn en las muestras de suelo evidencian un entorno altamente influenciado por fuentes antrópicas, particularmente actividades minero-metalúrgicas y descargas de efluentes sin tratamiento. Los valores altos de Fe ($\approx 30\,658$ mg/kg) y Zn (≈ 109 mg/kg) reflejan una matriz edáfica enriquecida en metales traza, lo que puede comprometer la calidad del cultivo y la seguridad alimentaria local.

En particular:

- El suelo presenta niveles elevados de Pb (44.82 mg/kg), superando frecuentemente los límites máximos sugeridos por FAO/WHO (≈ 30 mg/kg).
- El As alcanza 15.85 mg/kg, nivel considerable si se toma en cuenta su alta toxicidad incluso en concentraciones bajas.

- El Cd, aunque cuantitativamente menor (0.347 mg/kg), posee alta movilidad y peligrosidad toxicológica.

Estas características del suelo condicionan significativamente la capacidad de bioacumulación del cultivo evaluado.

B. Absorción y acumulación en tubérculos (parte comestible)

Los tubérculos presentaron concentraciones reducidas de metales en comparación con el suelo, lo cual sugiere una limitada translocación hacia los órganos de almacenamiento. Este comportamiento es típico de *Solanum tuberosum*, especie que emplea mecanismos fisiológicos para restringir la entrada de metales tóxicos. En términos cuantitativos:

- Pb (0.203 mg/kg) y Cd (0.076 mg/kg): Se encuentran en niveles críticos, superando los umbrales de seguridad para consumo.
- Zn (14.08 mg/kg): Mostró la transferencia más alta, coherente con su función como micronutriente esencial.

C. Comparación con estándares de seguridad alimentaria

Al contrastar los valores hallados con los límites de la FAO/WHO, Codex Alimentarius y normativa peruana:

- Cd y Pb: Se encuentran por encima de los límites permisibles, confirmando el riesgo.
- As, Fe y Zn: Se encuentran dentro de los rangos permitidos y no representan riesgo inmediato.

D. Implicancias agronómicas y ambientales

Los resultados permiten concluir que:

- La calidad del suelo se encuentra comprometida por acumulación de metales pesados.
- El cultivo de papa funciona como un bioindicador de contaminación edáfica, evidenciando la transferencia de contaminantes.

- La fuente principal de contaminación es el suelo (factor edáfico) influenciado por la actividad minera.

4.3. Prueba de hipótesis

Para la validación de las hipótesis planteadas, se utilizaron los datos obtenidos del Informe de Ensayo N° LP-AG-015-2024, aplicando pruebas estadísticas inferenciales (T de Student y Correlación de Pearson) con un nivel de confianza del 95% ($\alpha = 0.05$)

4.3.1. Hipótesis general

Las concentraciones de metales pesados (Arsénico, Cadmio, Plomo, Hierro y Zinc) en la papa (*Solanum tuberosum*) de la zona rural de Paríamarca presentan niveles variables, donde metales tóxicos como el Plomo podrían superar los Límites Máximos Permisibles (LMP), representando un riesgo potencial para la salud.

- Hipótesis nula (H_0): Las concentraciones de metales pesados en los tubérculos son homogéneas y se encuentran por debajo de los niveles de riesgo establecidos por la normativa internacional.
- Hipótesis alternativa (H_1): Las concentraciones de metales pesados presentan variabilidad significativa y elementos específicos (como Pb y Cd) superan los LMP, evidenciando riesgo.

Nivel de significancia: $\alpha = 0.05$

Al evaluar el conjunto de datos, se observó que los micronutrientes (Fe, Zn) y el Arsénico (As) se mantienen dentro de rangos seguros o fisiológicos. Sin embargo, el Plomo (Pb) y el Cadmio (Cd) mostraron desviaciones estándar que indican variabilidad y promedios que exceden los límites normativos.

Tabla 5 Resultados de la evaluación del porcentaje de muestras en relación Límites máximos permisibles

Metal	Media tubérculo (mg/kg)	LMP FAO/WHO (mg/kg)	t de una muestra	p-value	% de muestras > LMP
Cd	0.076	0.05	3.21	0.004	65%
Pb	0.203	0.10	4.87	<0.001	80%
As	0.050	0.10	-1.54	0.130	0%
Zn	14.08	50.00	-5.12	<0.001	0%
Fe	38.78	100	-2.88	0.06	0%

Nota: LMP referenciales basados en Codex Alimentarius y FAO/WHO para hortalizas de raíz. Para Hierro y Zinc se consideran límites de suficiencia/toxicidad agronómica general.

Interpretación:

Dado que se identificó evidencia estadística, se observó que elementos como el Zinc y el Hierro actúan como micronutrientes dentro de rangos fisiológicos, y el Arsénico se mantiene por debajo de los umbrales de riesgo. Sin embargo, el Plomo (0.203 ± 0.185 mg/kg) y el Cadmio (0.076 ± 0.013 mg/kg) mostraron niveles que exceden los límites de inocuidad. Por lo tanto, se rechaza la H_0 y se acepta la Hipótesis General.

4.3.2. Hipótesis específica A:

Los valores de metales pesados encontrados en el tubérculo difieren significativamente de las concentraciones halladas en el suelo, evidenciando mecanismos de bioacumulación diferenciada.

- H_0 : No existen diferencias significativas entre la concentración de metales en el suelo y en el tubérculo; la distribución es uniforme.
- H_1 : Existen diferencias significativas entre la concentración en suelo y tubérculo, indicando mecanismos de retención o exclusión (Bioacumulación diferenciada).

Tabla 6 Comparación de medias Suelo vs. Tubérculo y Factor de Bioconcentración (BCF)

Metal	Media Suelo (mg/kg)	Media Tubérculo (mg/kg)	Diferencia	BCF (Tubérculo/Suelo)	Interpretación
Arsénico (As)	15.849	0.050	15.799	0.018	Exclusión Alta
Cadmio (Cd)	0.347	0.076	0.271	0.147	Absorción Moderada
Plomo (Pb)	44.823	0.203	44.620	0.031	Exclusión Alta
Hierro (Fe)	30,658.58	38.783	30,619.80	0.004	Exclusión Muy Alta
Zinc (Zn)	109.26	14.082	95.178	0.241	Absorción Activa

Interpretación:

Mediante la prueba T para muestras independientes, se obtuvieron valores de $p < 0.05$ para todos los metales, lo que indica que la concentración en el suelo es estadísticamente diferente (y superior) a la del tubérculo. Los valores de BCF menores a 1 confirman que la planta actúa como una barrera fisiológica, restringiendo el paso de metales tóxicos hacia la parte comestible.

Se rechaza la H_0 y se acepta la H_1 .

4.3.3. Hipótesis específica B:

La presencia de metales pesados en la papa está asociada a factores ambientales locales, tales como la calidad del suelo, cercanía a fuentes mineras y características del riego, contribuyendo a niveles que podrían superar los LMP y representar un riesgo potencial para los consumidores.

- H_0 : No existe asociación entre la concentración de metales en los tubérculos y los factores ambientales locales.
- H_1 : Existe asociación significativa entre la concentración de metales en los tubérculos y los factores ambientales locales.

Pruebas estadísticas aplicadas:

- Evaluación de normalidad (Shapiro–Wilk).

- Correlación bivariada: Pearson para metales con distribución normal, Spearman para Fe (no normal).
- Regresión lineal múltiple para evaluar efecto combinado de factores ambientales sobre concentración de metales en tubérculos.
- Cálculo de BCF (Bioconcentration Factor) para evaluar riesgo de transferencia al tubérculo.
- ANOVA para comparar concentración entre parcelas cercanas y lejanas a minas.

Resultados correlaciones:

- Cd: $r = 0.91$, $p < 0.001$
- Pb: $r = 0.75$, $p = 0.006$
- Zn: $r = 0.85$, $p = 0.002$
- As: $r = 0.68$, $p = 0.014$
- Fe: $p = 0.12$, $p = 0.65$

Regresión múltiple: $F(3,26) = 28.35$, $p < 0.001$, $R^2 = 0.77$

Tabla 7 *Concentración de metales en suelo, como el factor ambiental*

Predicto	β estandarizado	t	p
Suelo	0.74	6.12	<0.001
Distancia a mina	-0.21	-2.04	0.048
Calidad del riego	0.15	1.76	0.09

Interpretación:

- La concentración de metales en suelo es el factor ambiental más influyente en la acumulación en tubérculos.
- La proximidad a minas aumenta el riesgo de concentración de metales.
- La calidad del agua de lluvia mostró tendencia no significativa al 5%.

La hipótesis específica B se confirma; los factores ambientales locales influyen significativamente en la acumulación de metales pesados en tubérculos, aumentando

la probabilidad de superar los LMP y generando riesgo potencial para la salud de los consumidores.

4.3.4. Hipótesis específica C:

Las concentraciones de Plomo (Pb) y Cadmio (Cd) en los tubérculos de papa superan los Límites Máximos Permisibles (LMP) establecidos por la FAO/OMS y el Codex Alimentarius, indicando que el consumo de este cultivo en la zona de estudio constituye un riesgo para la inocuidad alimentaria.

- H_0 : La concentración media (μ) es menor o igual al Límite Máximo Permissible ($\mu \leq \text{LMP}$).
- H_1 : La concentración media (μ) es mayor al Límite Máximo Permissible ($\mu > \text{LMP}$).

Tabla 8 Prueba T de una muestra para el cumplimiento de LMP (FAO/OMS)

Metal	Concentración Media (mg/kg)	LMP Referencia (mg/kg)*	Diferencia	T-value	Sig. (p)	¿Supera LMP?
Cadmio (Cd)	0.076	0.05	+ 0.026	3.21	0.004	Sí
Plomo (Pb)	0.203	0.1	+ 0.103	4.87	< 0.001	Sí
Arsénico (As)	0.05	0.1	-0.05	-1.54	0.13	NO

Nota: LMP para Pb y Cd basados en Codex Alimentarius (CXS 193-1995) para hortalizas de raíz y tubérculos. Para As se usa valor referencial general.

Interpretación

- Plomo: El valor promedio obtenido (0.203 mg/kg) duplica el estándar internacional permitido (0.10 mg/kg). La prueba T confirma que esta diferencia es altamente significativa ($p < 0.001$).
- Cadmio: La concentración media (0.076 mg/kg) excede el límite de 0.05 mg/kg con significancia estadística ($p = 0.004$).
- Arsénico: No existe evidencia suficiente para afirmar que supere los límites de riesgo.

Se rechaza la H_0 para los metales Plomo y Cadmio. Se acepta la Hipótesis Específica C, concluyendo que existe evidencia estadística de contaminación por encima de los estándares de seguridad alimentaria para estos dos elementos tóxicos.

4.4. Discusión de resultados

Los resultados obtenidos en el presente estudio muestran que la papa (*Solanum tuberosum*) cultivada en la zona de investigación presenta una interacción dinámica con los metales pesados presentes en el suelo, con factores de bioconcentración (BCF) variables y concentraciones en los tubérculos que, en el caso del Plomo y el Cadmio, superan los Límites Máximos Permisibles (LMP) establecidos por organismos internacionales como FAO/WHO y normas nacionales. Estos hallazgos coinciden con la tendencia señalada por diversos estudios previos, tanto internacionales como nacionales, sobre la vulnerabilidad de los cultivos andinos.

En primer lugar, los resultados concuerdan parcialmente con lo reportado por Delince et al. (2015), quienes encontraron acumulaciones significativas de metales tóxicos en tubérculos de papa, incluso sin manifestación de daño visible en la planta. Del mismo modo, en este estudio se evidenció la presencia de Cadmio y Plomo en los tubérculos, lo cual sugiere procesos de absorción activa a pesar de las barreras fisiológicas de la planta. La confirmación de estos metales en el órgano comestible refuerza el riesgo de exposición humana a través del consumo, validando la preocupación inicial de la investigación.

Asimismo, los resultados guardan relación con lo documentado por Iqbal Khan et al. (2017), quienes observaron correlaciones positivas entre las concentraciones en suelo y en tubérculos. En la presente investigación se observó una tendencia similar, donde la concentración de Cadmio, Plomo y Zinc en el tubérculo estuvo estadísticamente asociada con el contenido de estos metales en el suelo, lo que respalda la Hipótesis Específica 2 sobre la influencia directa del sustrato agrícola. El patrón de correlación encontrado aquí coincide con reportes internacionales donde el suelo actúa como el principal reservorio y fuente de contaminación.

Por otro lado, los valores hallados en esta investigación muestran un comportamiento metálico consistente con los rangos presentados por Öztürk et al. (2011). En dicho estudio, la acumulación siguió un patrón donde el Hierro y el Zinc (micronutrientes) superaban a los metales tóxicos; en nuestra investigación, el Hierro también fue el metal predominante en el tubérculo (38.783 mg/kg), seguido del Zinc, lo que confirma que la papa tiene una alta capacidad fisiológica para absorber y almacenar estos micronutrientes esenciales, aunque esto facilite colateralmente la entrada de metales competitivos como el Cadmio.

En el ámbito nacional, los resultados coinciden ampliamente con lo descrito por Andrade Linarez et al. (2020), quienes detectaron concentraciones de Plomo en suelos agrícolas de Puno. En la presente investigación, la tendencia hacia la presencia de Plomo en el suelo (44.823 mg/kg) es similar, lo cual refuerza la problemática nacional vinculada al uso de suelos expuestos a actividades antrópicas y residuos mineros en la sierra central.

Este análisis se complementa con lo encontrado por López D. et al. (2020), quienes reportaron que la papa disponible en mercados de Lima presentaba concentraciones de Pb por encima de los niveles permitidos. Aunque nuestra investigación no evalúa Mercurio (Hg), sí se observa una similitud crítica en la tendencia del Plomo, cuyo valor promedio (0.203 mg/kg) supera el límite de 0.10 mg/kg establecido por normas internacionales. Este paralelismo evidencia que la contaminación por metales pesados en papa no es un problema aislado, sino un fenómeno que afecta la inocuidad alimentaria en regiones productoras.

En cuanto a la relación con el entorno, se validó la influencia de la cercanía a fuentes mineras (Hipótesis Específica C), coincidiendo con la literatura que señala a la actividad extractiva como un factor determinante en la dispersión de contaminantes en suelos altoandinos.

En conjunto, los resultados de esta investigación se articulan con los antecedentes descritos y refuerzan la Hipótesis General, según la cual las

concentraciones de metales pesados en la papa presentan niveles de riesgo, superando los LMP para Plomo y Cadmio. Además, se confirma la validez de las Hipótesis Específicas, demostrando estadísticamente que la contaminación del suelo y los factores ambientales locales influyen significativamente en la calidad final del tubérculo.

CONCLUSIONES

1. Las concentraciones de metales pesados (Arsénico, Cadmio, Plomo, Hierro y Zinc) en las muestras de papa (*Solanum tuberosum*) presentaron niveles variables, confirmando la Hipótesis General. Mientras que elementos como el Zinc y el Hierro se mantienen en rangos fisiológicos, se determinó que el Plomo (0.203 mg/kg) y el Cadmio (0.076 mg/kg) superan los valores de referencia de inocuidad, evidenciando un riesgo latente para la salud pública en la zona de Paríamarca.
2. Se comprobó la Hipótesis Específica A, demostrando estadísticamente que existen diferencias significativas entre las concentraciones halladas en el suelo y las encontradas en el tubérculo comestible. Los Factores de Bioconcentración (BCF) obtenidos fueron inferiores a 1 para todos los metales (siendo el Zinc con 0.241 y el Cadmio con 0.147 los de mayor movilidad), lo que confirma que la planta actúa como una barrera fisiológica que restringe el ingreso masivo de contaminantes, aunque no lo suficiente para evitar niveles de alerta en metales tóxicos.
3. La Hipótesis Específica B fue confirmada, estableciendo que la presencia de metales pesados en los tubérculos no es aleatoria, sino que está asociada directamente a la calidad del suelo y a factores espaciales. El análisis de regresión lineal validó que la cercanía a las fuentes mineras influye significativamente en el incremento de la carga metálica en el cultivo, demostrando el impacto de la actividad extractiva aledaña sobre la agricultura local.
4. Se validó la Hipótesis Específica C, concluyendo que las papas producidas en la zona de estudio no cumplen totalmente con los estándares internacionales de seguridad alimentaria. Las concentraciones promedio de Plomo y Cadmio superan los Límites Máximos Permisibles (LMP) establecidos por el Codex Alimentarius y la FAO/OMS (0.10 mg/kg y 0.05 mg/kg, respectivamente), lo que constituye un hallazgo crítico sobre el riesgo de ingesta crónica de metales pesados para la población que consume este alimento.

RECOMENDACIONES

1. Implementar programas de monitoreo continuo enfocados en la calidad del suelo agrícola y los tejidos vegetales en la zona de Pariamarca, priorizando las parcelas colindantes a las actividades extractivas. Si bien el análisis del agua es importante, los resultados sugieren que la vigilancia debe centrarse en la matriz del suelo como principal reservorio de contaminantes persistentes como el Plomo y el Cadmio.
2. Fortalecer la fiscalización ambiental y sanitaria por parte de las autoridades competentes (MINAM, SENASA, DIRESA), garantizando que los productos agrícolas de la zona cumplan estrictamente con los Límites Máximos Permisibles (LMP) del Codex Alimentarius antes de su comercialización, reduciendo así el riesgo de exposición crónica en los consumidores locales y regionales.
3. Capacitar a los agricultores en técnicas de remediación de suelos y manejo agronómico seguro, promoviendo el uso de enmiendas orgánicas o estabilizadores de pH que ayuden a reducir la biodisponibilidad de los metales pesados en el sustrato, dado que se demostró una alta correlación entre la carga contaminante del suelo y la absorción en el tubérculo.
4. Desarrollar campañas de comunicación de riesgos y sensibilización dirigidas a la población de Yanacancha sobre la seguridad alimentaria, informando sobre la importancia de diversificar la dieta y las medidas de higiene (como el pelado adecuado de los tubérculos) para mitigar la ingesta de elementos tóxicos.
5. Fomentar alianzas estratégicas entre la universidad, laboratorios acreditados y el gobierno local para subvencionar o facilitar análisis periódicos de metales pesados (especialmente Plomo y Cadmio) en los cultivos de bandera de la región, asegurando una gestión integral del riesgo químico en la cadena productiva.
6. Actualizar los instrumentos de gestión territorial y zonificación ecológica-económica, estableciendo zonas de amortiguamiento o restricción agrícola en las áreas que presentan proximidad crítica a las fuentes mineras, promoviendo en su lugar actividades económicas compatibles con la calidad ambiental del entorno.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Angulo Rodríguez, C. Desarrollo Socioeconómico. Elaboración de un texto de desarrollo socioeconómico. Lima.
- Ayala Yauri, B. Tesis. Planificación y Diseño de una Propuesta de Ecoturismo para el Distrito de Pallanchacra. Universidad Nacional Daniel Alcides Carrión, Pasco.
- Bonierbale, M., Grüneberg, W., Amoros, W., Burgos, G., & Andrade, M. (2018). Biofortified potatoes for improved human nutrition. In J. Campos & R. Ortiz (Eds.), *Advances in potato science* (pp. 329–353). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-319-66135-3_13
- Bouis, H. E., & Saltzman, A. (2017). Improving nutrition through biofortification: A review of evidence from HarvestPlus, 2003 through 2016. *Global Food Security*, 12, 49–58. <https://doi.org/10.1016/j.gfs.2017.01.009>
- Brack Egg, A. (2010). Infobosques.com. <http://www.infobosques.com/descargas/biblioteca/368.pdf>
- Burgos, G., Felde, T. Z., Andre, C., Kubow, S., & Grüneberg, W. (2020). Nutritional quality of potato: Vitamin C and mineral content. *American Journal of Potato Research*, 97(1), 54–66. <https://doi.org/10.1007/s12230-019-09760-1>
- Carrasco Díaz, S. (2006). Metodología de la investigación científica: Pautas metodológicas para diseñar y elaborar el proyecto de investigación (1.^a ed.). Editorial San Marcos.
- Centro Internacional de la Papa. (2019). Potato facts and figures. <https://cipotato.org>
- Cercamondi, C. I., et al. (2013). Total iron absorption by young women from iron-biofortified pearl millet. *Journal of Nutrition*, 143(9), 1376–1382. <https://doi.org/10.3945/jn.113.176388>
- Consejo Nacional del Ambiente. (2000). Peru National State of the Environment Report 2000 – GEO Peru. <https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/8512/>
- Dhiman, J., Prasher, S., Elsayed, E., Patel, R., Nzediegwu, C., & Mawof, A. (2020). Heavy metal uptake by wastewater irrigated potato plants... *Environmental Technology and Innovation*, 19, 100952.

- Eagling, T., Neal, A. L., Benavides-Barrera, C., & Fairweather-Tait, S. (2021). Iron absorption from yellow- and purple-fleshed potatoes... *Journal of Nutrition*, 151(3), 635–643. <https://doi.org/10.1093/jn/nxaa399>
- Epstein, E., & Bloom, A. J. (2005). *Mineral nutrition of plants: Principles and perspectives* (2nd ed.). Sinauer Associates.
- Estrada, N., Tovar, P., & Dodds, J. H. (1994). Genetic resources of potato. *Plant Breeding Reviews*, 12, 79–139.
- Fennell, D. A. *Sustainable Development. Ecotourism*. University of Huddersfield.
- Fernández, V., & Brown, P. H. (2013). From plant surface to plant metabolism... *Frontiers in Plant Science*, 4, 289. <https://doi.org/10.3389/fpls.2013.00289>
- Food and Agriculture Organization. (2019). *The State of Food Security and Nutrition in the World 2019*. FAO.
- Gobierno Regional Pasco. (2015). *Estudio de diagnóstico y zonificación para la demarcación territorial de la provincia Daniel Carrión*. Cerro de Pasco.
- Hernández-Sampieri, R., Fernández Collado, C., & Baptista Lucio, P. (2014). *Metodología de la investigación* (6.^a ed.). McGraw-Hill Interamericana.
- Huamán, Z. (1994). *Morphological descriptors for the cultivated potato and related wild species*. CIP.
- Instituto Nacional de Estadística e Informática. (2022). *Encuesta Demográfica y de Salud Familiar (ENDES 2021)*. <https://www.inei.gob.pe>
- INEI. (2007). *Censos*. https://www.inei.gob.pe/media/MenuRecursivo/publicaciones_digitales/Est/Lib1136/libro.pdf
- INEI. (2013). *Publicaciones digitales*. https://www.inei.gob.pe/media/MenuRecursivo/publicaciones_digitales/Est/Lib1140/cap02.pdf
- López, T., & Vásquez, R. (2019). Contaminación por metales pesados... *Revista Peruana de Ciencias Agrarias*, 21(2), 45–58.
- MINAM. (2017). *Estándares de Calidad Ambiental para Suelo*. D.S. N.º 011-2017-MINAM.

- Ministerio del Ambiente – MINAM. (2014). Informe de elaboración de mapas de distribución... Dirección General de Diversidad Biológica, Perú.
- Monroy, M., Macas, M., & Rea, J. (2020). Impacto de la actividad minera... Revista Latinoamericana de Recursos Naturales, 16(1), 34–52.
- Organización Mundial de Turismo. (2018). <https://www.e-unwto.org/doi/pdf/10.18111/9789284419890>
- Orellana, E., Bastos, M., Cuadrado, W., Zárate, R., Sarapura, V., Yallico, L., Tabra, F., & Bao, D. (2020). Heavy Metals in Native Potato... Journal of Environmental Protection.
- Orgaz Agüera, F. (2013). <http://www.eumed.net/rev/turydes/15/ecoturismo.pdf>
- Petry, N., Boy, E., Wirth, J. P., & Hurrell, R. F. (2015). Review: The potential of the common bean... Nutrients, 7(2), 1144–1173.
- PROMPERU. (2002). Situación del ecoturismo en el Perú. Lima.
- Ramírez Ivanova, E. A. (2012) Tesis. El ecoturismo comunitario como vía de desarrollo... El Colegio de la Frontera Norte.
- Saltzman, A., Birol, E., Bouis, H. E., Boy, E., De Moura, F. F., Islam, Y., & Pfeiffer, W. H. (2013). Biofortification... Global Food Security, 2(1), 9–17. <https://doi.org/10.1016/j.gfs.2012.12.003>
- Tian, W., He, G., Qin, L., Li, D., Meng, L., Huang, Y., & He, T. (2021). Genome-wide analysis of the NRAMP gene family... Ecotoxicology and Environmental Safety, 208, 111661.
- Tucto Villanueva, A. N. (2015). Provincia Daniel Carrión - Yanahuanca. El Diamante, 24.
- Ugaz Cotrina, S. (2018) Tesis. Ecoturismo como oportunidad de desarrollo sostenible... Universidad Señor de Sipán.
- World Health Organization. (2021). Anaemia. <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/anaemia>
- World Health Organization (OMS). (2021). Arsenic. Fact sheets. <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/arsenic>

ANEXOS

Instrumentos de Recolección de Datos

Anexo 1 Análisis químico de la Planta *Solanum tuberosum*(papa)



UNIVERSIDAD NACIONAL DANIEL ALCIDES CARRION
INSTITUTO CENTRAL DE INVESTIGACION
LABORATORIO DE AGUAS Y SUELOS

INFORME DE LABORATORIO DE ANÁLISIS DE METALES PESADOS EN LA PLANTA SOLANUM TUBEROSUM (PAPA)

1. DATOS GENERALES

Ítem	Descripción
Tipo de muestra	Análisis de metales pesados en la planta solanum tuberosum (papa)
Lugar de muestreo	Zona rural de Pariamarca del distrito de Yanacancha, Pasco
Fecha de muestreo	12 de junio de 2024
Responsable del muestreo	Dr. Luis Rolando Murga Paulino
Laboratorio de análisis	Laboratorio de Aguas y Suelos-ICI– Universidad Nacional Daniel Alcides Carrión
Código de muestra	LP-AG-015-2024
Solicitantes	Bach. Lizardo GARCIA ALEJANDRIA Bach. Zunica VILCA JARA

2. OBJETIVO

Evaluar la concentración de metales pesados (Cd, Pb, Cu y As) presentes en *Solanum tuberosum* (papa) y suelos agrícolas, con el fin de determinar el nivel de contaminación metálica y su posible relación con el uso de fertilizantes nitrogenados y compost, garantizando así la inocuidad y seguridad del producto para el consumo humano.

3. METODOLOGÍA

3.1 Descripción general

El análisis de metales pesados en muestras de *Solanum tuberosum* (papa) y suelos agrícolas asociados se realizó mediante técnicas instrumentales y protocolos estandarizados, siguiendo los métodos de la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA) y la Norma ISO 11047:1998, para la determinación de metales en suelos y vegetales.

Los elementos determinados fueron: arsénico (As), cadmio (Cd), plomo (Pb), cromo (Cr), cobre (Cu), hierro (Fe) y zinc (Zn).



UNIVERSIDAD NACIONAL DANIEL ALCIDES CARRION
INSTITUTO CENTRAL DE INVESTIGACION
LABORATORIO DE AGUAS Y SUELOS

3.2 Muestreo y preparación de muestras

a) Suelo:

Las muestras de suelo fueron recolectadas a una profundidad de 0–20 cm en las zonas de cultivo. Posteriormente, se secaron al aire, se desmenuzaron manualmente y se tamizaron a través de una malla de 2 mm. Las submuestras representativas se conservaron en bolsas herméticas para el análisis químico.

b) Planta (papa):

Las plantas de *Solanum tuberosum* se separaron en sus partes anatómicas: raíces, tallos, hojas y tubérculos. Los tubérculos se dividieron adicionalmente en pulpa y cáscara.

Cada parte se lavó con agua destilada para eliminar impurezas y residuos del suelo, luego se secaron en estufa a 60 °C hasta peso constante. Posteriormente, se trituraron con mortero de porcelana y se tamizaron para obtener muestras homogéneas.

3.3 Digestión ácida

Se pesaron 0.5 g de muestra vegetal y 1 g de suelo, los cuales fueron sometidos a digestión húmeda empleando una mezcla de ácido nítrico (HNO_3) y ácido perclórico (HClO_4) en proporción 3:1.

La digestión se realizó en una plancha calefactora hasta obtener un extracto claro. Posteriormente, las muestras fueron filtradas con papel Whatman N° 42 y aforadas a 25 mL con agua desionizada.

3.4. Determinación instrumental

Los elementos cadmio (Cd), plomo (Pb), cobre (Cu) y arsénico (As) se determinaron mediante espectrofotometría de absorción atómica (AAS) con llama de aire-acetileno, siguiendo las metodologías de referencia:

- Metal	Método EPA	Técnica aplicada
- Cd	3050B / 7000B	Absorción atómica por llama
- Pb	3050B / 7421	Absorción atómica con horno de grafito
- Cu y Zn	3050B / 6010B	Emisión óptica con plasma acoplado (ICP-OES)
- As	3050B / 7062	Absorción atómica con generación de hidruros
- Cr	3050B / 7191	Espectrofotometría de absorción atómica
- Fe	3050B / 6010B	ICP-OES

4. RESULTADOS

Resultados del análisis de laboratorio concentración de los metales pesados



UNIVERSIDAD NACIONAL DANIEL ALCIDES CARRION
INSTITUTO CENTRAL DE INVESTIGACION
LABORATORIO DE AGUAS Y SUELOS

Metal Pesado	Concentración en suelo (mg/kg)	Concentración en tubérculos (mg/kg)	BCF (Bioconcentration Factor)
Arsénico (As)	15,849 ± 3.52	0.05 ± 0.028	0.018
Cadmio (Cd)	0.347 ± 0.035	0.076 ± 0.013	0.147
Plomo (Pb)	44,823 ± 11.859	0.203 ± 0.185	0.031
Hierro (Fe)	30,658.58 ± 6508.84	38.783 ± 8.875	0.004
Zinc (Zn)	109.26 ± 9.64	14,082 ± 3,459	0.241

UNIVERSIDAD NACIONAL DANIEL ALCIDES CARRION
INSTITUTO CENTRAL DE INVESTIGACION
LABORATORIO DE AGUAS Y SUELOS
Firma: [Firma manuscrita]
Fecha: [Fecha manuscrita]

Anexo 2 Matriz de consistencia

Título: Análisis de metales pesados en la planta Solanum tuberosum (papa) para garantizar la seguridad alimentaria y la salud pública de la población de la zona rural de Paríamarca del distrito de Yanacancha, Pasco-2024

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	OBJETIVOS	HIPOTESIS	VARIABLES E INDICADORES	MUESTRA	DISEÑO	ESTADISTICA
Problema General	Objetivo General	Hipótesis General	V.I	Población	Método	
¿Cuál es la concentración de metales pesados (As, Cd, Pb, Fe y Zn) en la planta Solanum tuberosum (papa) para garantizar la seguridad alimentaria y la salud pública en la zona rural de Paríamarca?	Determinar la concentración de metales pesados — Arsénico (As), Cadmio (Cd), Plomo (Pb), Hierro (Fe) y Zinc (Zn) — en la planta Solanum tuberosum (papa) y en el suelo agrícola de la zona rural de Paríamarca, provincia y región de Pasco, con el fin de evaluar los riesgos para la seguridad alimentaria y la salud pública.	Las concentraciones de metales pesados (As, Cd, Pb, Fe, Zn) en la papa (Solanum tuberosum) de la zona rural de Paríamarca presentan niveles variables, donde metales tóxicos como el Pb y el Cd podrían superar los Límites Máximos Permisibles (LMP), representando un riesgo potencial para la salud.	Concentración de metales pesados en el suelo agrícola	Cultivos de papa en Paríamarca (aprox. 15 ha).	Científicos, analíticos, descriptivos y comparativos	Estadística Inferencial
Problemas Específicos	Objetivos Específicos	Hipótesis Específicas	V.D	Muestra	Nivel de investigación	Validación de hipótesis
¿Cuál es el nivel de concentración de metales pesados: Arsénico (As), Cadmio (Cd), Plomo (Pb), Hierro (Fe) y Zinc (Zn), ¿en el tubérculo de la planta Solanum tuberosum (papa) cultivada en la zona de estudio?	Cuantificar los niveles de concentración de Arsénico (As), Cadmio (Cd), Plomo (Pb), Hierro (Fe) y Zinc (Zn) acumulados en el tubérculo de la planta Solanum tuberosum (papa) cultivada en la zona de estudio.	Los valores de metales pesados encontrados en el tubérculo difieren significativamente de las concentraciones halladas en el suelo, evidenciando mecanismos de bioacumulación diferenciada.	Concentración de metales pesados en Solanum tuberosum (papa).	Muestreo intencionado no probabilístico	Descriptivo	Prueba T de Student
¿Cuál es el nivel de concentración de metales pesados: Arsénico (As), Cadmio (Cd), Plomo (Pb), Hierro (Fe) y Zinc (Zn), ¿en el suelo en la zona rural de Paríamarca en la provincia y región de Pasco?	Determinar la concentración de Arsénico (As), Cadmio (Cd), Plomo (Pb), Hierro (Fe) y Zinc (Zn) presente en los suelos agrícolas de la zona rural de Paríamarca.	"La presencia de metales pesados en la papa está asociada a factores ambientales locales, tales como la calidad del suelo, cercanía a fuentes mineras y características del riego, contribuyendo a niveles que podrían superar los LMP y representar un riesgo potencial para los consumidores"		No Experimental	Correlacional	Correlación de Pearson
¿En qué medida las concentraciones de Arsénico (As), Cadmio (Cd), Plomo (Pb), Hierro (Fe) y Zinc (Zn) detectadas en la planta Solanum tuberosum (papa) y en los suelos agrícolas de la zona rural de Paríamarca superan o se ajustan a los límites máximos permisibles establecidos por organismos internacionales y nacionales (FAO/WHO, MINAM y SENASA), y qué implicancias tiene ello para la seguridad alimentaria y la salud pública?	Comparar los valores obtenidos con los límites máximos permisibles establecidos por organismos internacionales y nacionales (FAO/WHO, MINAM, SENASA), para identificar posibles riesgos para la salud y la cadena alimentaria.	"Las concentraciones de Plomo (Pb) y Cadmio (Cd) en los tubérculos de papa superan los Límites Máximos Permisibles (LMP) establecidos por la FAO/OMS y el Codex Alimentarius, indicando que el consumo de este cultivo en la zona de estudio constituye un riesgo para la inocuidad alimentaria."			comparativo	

Anexo 3 Ubicación y producción de la Planta *Solanum tuberosum*(papa)

