

LA YUCA BAJO AMENAZA

METALES PESADOS EN EL SUELO
Y RIESGOS PARA LA SEGURIDAD
ALIMENTARIA EN LA AMAZONÍA PERUANA

Carlos Enrique Calloapaza Valladares
Luis Gabriel Godoy Perez
Luz Angélica Angulo Rios
Renzo Lopez Liñan
Segundo Leonardo Ramos Lalupú



La yuca bajo amenaza

Metales pesados en el suelo y riesgos
para la seguridad alimentaria en la
Amazonía peruana

Editor



Carlos Enrique Calloapaza Valladares

valladaresc@hotmail.com

 <https://orcid.org/0000-0002-2996-938X>

Universidad Nacional de la Amazonía Peruana, Facultad de Farmacia y
Bioquímica, Iquitos - Perú

Luis Gabriel Godoy Perez

luisgodoy228@hotmail.com

 <https://orcid.org/0000-0002-3973-8649>

Universidad Nacional de la Amazonía Peruana, Facultad de Medicina Humana,
Iquitos - Perú

Luz Angélica Angulo Rios

luz.angulo@unapiquitos.edu.pe

 <https://orcid.org/0000-0002-6752-6731>

Docente Asociada, Universidad Nacional de la Amazonía Peruana, Facultad de
Ciencias de la Educación y Humanidades, Iquitos - Perú

Renzo Lopez Liñan

renzolopez01@gmail.com

 <https://orcid.org/0000-0003-0253-6338>

Universidad Nacional de la Amazonía Peruana, Facultad de Medicina Humana,
Iquitos - Perú

Segundo Leonardo Ramos Lalupú

leoramos0107@gmail.com

 <https://orcid.org/0000-0001-5329-1620>

Universidad Naional Mayor de San Marcos, Lima - Perú

RESEÑA

La yuca bajo amenaza es una obra de investigación científica que examina la relación entre la concentración de metales presentes en los suelos agrícolas y su acumulación en *Manihot esculenta* (yuca), uno de los cultivos más importantes para la alimentación de las poblaciones amazónicas. A partir de un estudio desarrollado en las localidades de Puerto Almendra y Nina Rumi, en la región Loreto, el libro integra fundamentos de edafología, fisiología vegetal, química ambiental y seguridad alimentaria para ofrecer una visión integral de una problemática de creciente interés para la ciencia y la gestión ambiental.

La obra combina una sólida revisión teórica sobre la dinámica de los metales en el suelo, los procesos de absorción y bioacumulación en las plantas y el papel de la yuca dentro de los sistemas agrícolas tropicales, con un caso de estudio sustentado en análisis de laboratorio y procedimientos estadísticos. Este enfoque permite comprender cómo las características físico-químicas del suelo influyen en la transferencia de metales hacia los tejidos vegetales y cuáles son las implicancias de este fenómeno para la calidad de los alimentos y la salud de la población.

Más allá de la presentación de resultados, el libro propone una reflexión sobre la importancia de conservar la calidad de los suelos agrícolas como condición indispensable para garantizar una producción sostenible y alimentos inocuos. Asimismo, destaca la necesidad de fortalecer los programas de monitoreo ambiental, impulsar investigaciones sobre la dinámica de los metales en ecosistemas amazónicos y promover prácticas agrícolas que protejan simultáneamente los recursos naturales, la productividad del campo y la seguridad alimentaria.

Dirigida a investigadores, docentes, estudiantes de ciencias agrarias, ambientales y de la salud, así como a profesionales vinculados con la gestión del suelo, la agricultura y la conservación ambiental, esta obra constituye un aporte al conocimiento científico sobre los sistemas agrícolas de la Amazonía peruana. Su contenido proporciona evidencia útil para comprender la interacción entre el suelo y *Manihot esculenta*, y reafirma la necesidad de desarrollar una agricultura basada en principios de sostenibilidad, prevención ambiental y protección de la salud pública.

ÍNDICE

RESEÑA.....	3
INTRODUCCIÓN.....	7
CAPÍTULO I: METALES EN EL SUELO AGRÍCOLA	10
1.1. Referentes teóricos	12
1.1.1. Evolución de la investigación sobre metales pesados en suelos agrícolas	13
1.1.2. Estudios sobre contaminación de suelos y cultivos alimenticios.....	16
1.1.3. Investigaciones en ecosistemas amazónicos	19
1.1.4. Evidencia científica sobre la transferencia de metales suelo-planta	22
1.2. Fundamentos de los metales en el suelo	26
1.2.1. El suelo como sistema agrícola.....	28
1.2.2. Propiedades físicas y químicas del suelo	32
1.2.3. Metales pesados de importancia ambiental	36
1.2.4. Factores que influyen en la movilidad y disponibilidad de los metales.....	40
1.2.5. Contaminación del suelo y riesgos ambientales.....	44
1.2.6. Normativa y estándares de calidad ambiental para suelos agrícolas.....	48
CAPÍTULO II: METALES EN MANIHOT ESCULENTA (YUCA).....	54
2.1. Referentes teóricos.....	56
2.1.1. Investigaciones sobre metales en especies vegetales.....	59
2.1.2. Estudios sobre contaminación en Manihot esculenta	63
2.1.3. Bioacumulación y seguridad alimentaria	66
2.1.4. Aplicaciones de la yuca en estudios ambientales	71
2.2. Fundamentos de Manihot esculenta.....	75
2.2.1. Características botánicas y agronómicas	78
2.2.2. Crecimiento y desarrollo del cultivo	82
2.2.3. Absorción y transporte de metales en la planta.....	86
2.2.4. Bioacumulación y fitorremediación	90
2.2.5. Riesgos para la salud asociados al consumo de cultivos contaminados	95
2.2.6. Importancia económica y alimentaria de la yuca.....	99
CAPÍTULO III: CASO DE ESTUDIO: CONCENTRACIÓN DE METALES EN EL SUELO Y SU RELACIÓN CON EL CONTENIDO EN MANIHOT	

ESCULENTA CULTIVADA EN PUERTO ALMENDRA Y NINA RUMI, LORETO	106
3.1. Contexto del estudio.....	108
3.1.1. Área geográfica.....	110
3.1.2. Características ambientales de la zona de estudio	114
3.1.3. Características del sistema de cultivo.....	117
3.2. Metodología	122
3.2.1. Enfoque y diseño de investigación.....	123
3.2.2. Variables de estudio	127
3.2.3. Población y muestra	130
3.2.4. Técnicas e instrumentos	133
3.2.5. Procedimiento para la recolección y análisis de muestras	137
3.2.6. Procesamiento y análisis estadístico de los datos	140
3.3. Resultados.....	144
3.3.1. Concentración de los metales Fe, Cu, Mn, Zn, Cd, Pb y Cr sin tener en cuenta su estado de oxidación, en los suelos de cultivo de M. esculenta (yuca), en la zona de Puerto Almendra y Nina Rumi, Loreto.	145
3.3.1.1. Concentración de metales en el suelo de 0 a 20 cm de profundidad en cultivo de M. esculenta en Puerto Almendra y Nina Rumi.	147
3.3.1.2. Concentración de metales en el suelo de 20 a 40 cm de profundidad en cultivo de M. esculenta en Puerto Almendra y Nina Rumi	150
3.3.1.3. Pruebas de t en la concentración de metales en el suelo de cultivo de M. esculenta en Puerto Almendra y Nina Rumi	152
3.3.2. Concentración de los metales: Fe, Cu, Mn, Zn, Cd, Pb y Cr sin tener en cuenta su estado de oxidación, en la raíz y hojas de M. esculenta (yuca) cultivada en la zona de Puerto Almendra Nina Rumi	159
3.3.2.1. Concentración de metales en las hojas de M. esculenta	162
3.3.2.2. Concentración de metales en la raíz de M. esculenta	163
3.3.2.3. Pruebas de t en la concentración de metales en las hojas y raíz de M. esculenta en Puerto Almendra y Nina Rumi	165
3.3.3. Prueba de hipótesis de la relación entre los metales presentes en el suelo y su presencia en las hojas y la raíz de M. esculenta en Puerto Almendra y Nina Rumi	

3.3.3.1. Relación entre los metales presentes en el suelo y su presencia en las hojas de M. esculenta en Puerto Almendra y Nina Rumi.....	175
3.3.3.2. Relación entre los metales presentes en el suelo y su presencia en la raíz de M. esculenta en Puerto Almendra y Nina Rumi	180
3.3.4. Comparación con estándares ambientales	185
3.3.5. Discusión de los resultados	188
REFLEXIONES FINALES	195
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	200

INTRODUCCIÓN

La producción de alimentos enfrenta uno de los desafíos más complejos de las últimas décadas: garantizar cultivos suficientes y de calidad en un contexto marcado por la creciente presión sobre los recursos naturales. La expansión de las actividades agrícolas, el desarrollo urbano, la explotación de recursos minerales y el uso continuo de diversos insumos han transformado la dinámica de los suelos, modificando sus propiedades y favoreciendo la acumulación de sustancias que pueden comprometer tanto la productividad agrícola como la inocuidad de los alimentos destinados al consumo humano.

Dentro de este escenario, la presencia de metales pesados en los suelos agrícolas ha despertado un creciente interés científico debido a su persistencia en el ambiente y a su capacidad para incorporarse a los ciclos biológicos. A diferencia de otros contaminantes, estos elementos no se degradan con facilidad, permanecen durante largos periodos en el suelo y pueden ser absorbidos por las plantas, acumulándose en sus diferentes órganos. Este proceso representa un reto para la agricultura sostenible, ya que la calidad de los alimentos depende no solo de las prácticas de cultivo, sino también de las condiciones ambientales donde estos se desarrollan.

En la Amazonía peruana, los sistemas agrícolas poseen características particulares determinadas por la naturaleza de sus suelos, las condiciones climáticas y la estrecha relación que las comunidades mantienen con los recursos naturales. En esta región, numerosos cultivos constituyen la base de la alimentación y de la economía familiar, siendo la yuca (*Manihot esculenta*) una de las especies de mayor importancia. Su amplia adaptación a los suelos amazónicos, su elevado valor energético y su presencia cotidiana en la alimentación de la población la convierten en un cultivo estratégico para la seguridad alimentaria regional.

Sin embargo, precisamente por su amplia distribución y elevado consumo, la yuca también representa una especie de especial interés para evaluar la posible transferencia de metales desde el suelo hacia los alimentos. La capacidad de las plantas para absorber elementos minerales esenciales también puede favorecer la incorporación de metales potencialmente tóxicos cuando estos se encuentran disponibles en el medio

donde crecen. Esta situación adquiere especial relevancia cuando dichos cultivos forman parte de la dieta diaria de miles de personas, ya que la exposición continua, incluso a bajas concentraciones, puede constituir un factor de riesgo para la salud pública.

La evaluación de la relación existente entre la concentración de metales en los suelos agrícolas y su contenido en especies vegetales constituye, por tanto, una herramienta fundamental para comprender los procesos de transferencia suelo-planta y generar evidencia científica que contribuya a fortalecer las políticas de protección ambiental, vigilancia de la calidad de los alimentos y manejo sostenible de los sistemas agrícolas. Asimismo, permite identificar posibles escenarios de vulnerabilidad ambiental y orientar futuras investigaciones dirigidas a preservar tanto la productividad agrícola como el bienestar de las poblaciones que dependen directamente de estos recursos.

En este contexto surge la presente obra, cuyo propósito es analizar la concentración de metales pesados en suelos agrícolas y su relación con el contenido de dichos elementos en *Manihot esculenta* cultivada en la Amazonía peruana, tomando como caso de estudio las zonas de Puerto Almendra y Nina Rumi, en la región Loreto. A partir de este escenario se examinan los factores que intervienen en la dinámica de los metales dentro del sistema suelo-planta y se discuten sus posibles implicancias para la producción agrícola, la conservación ambiental y la seguridad alimentaria.

El libro se desarrolla desde una perspectiva integradora que combina los fundamentos científicos sobre contaminación de suelos, fisiología vegetal y bioacumulación con la evidencia obtenida en un estudio experimental realizado bajo condiciones propias de la Amazonía peruana. Esta articulación entre teoría y evidencia empírica permite ofrecer una visión amplia del fenómeno estudiado, facilitando la comprensión de los mecanismos involucrados y de su importancia para la gestión ambiental y agrícola.

La obra está organizada en tres capítulos. El primero aborda los principales fundamentos relacionados con la presencia y comportamiento de los metales pesados en los suelos agrícolas, así como los procesos que regulan su movilidad y disponibilidad

para las plantas. El segundo desarrolla los aspectos científicos relacionados con *Manihot esculenta*, su importancia agronómica, los mecanismos de absorción y acumulación de metales, y las implicancias de estos procesos para la seguridad alimentaria. Finalmente, el tercer capítulo presenta el caso de estudio desarrollado en Puerto Almendra y Nina Rumi, describiendo la metodología empleada, los resultados obtenidos y la discusión científica derivada de la relación entre la concentración de metales en el suelo y su contenido en la yuca.

Más allá de exponer los resultados de una investigación, este libro busca contribuir a la reflexión sobre la necesidad de fortalecer el monitoreo ambiental de los sistemas agrícolas amazónicos y promover estrategias de producción que garanticen alimentos seguros para las generaciones presentes y futuras. Comprender la interacción entre el suelo, las plantas y los elementos potencialmente contaminantes constituye un paso esencial para avanzar hacia una agricultura sostenible que armonice la productividad, la conservación de los ecosistemas y la protección de la salud humana.

CAPÍTULO I

METALES EN EL SUELO AGRÍCOLA

El suelo constituye uno de los recursos naturales más valiosos para la supervivencia de los ecosistemas y el desarrollo de la actividad agrícola. Sobre él se sustenta la producción de alimentos, el mantenimiento de la biodiversidad y numerosos procesos ecológicos que permiten el funcionamiento de los sistemas naturales y productivos. Más allá de ser un simple soporte físico para las plantas, el suelo es un sistema vivo y dinámico donde interactúan componentes minerales, materia orgánica, agua, aire y una amplia diversidad de organismos que participan activamente en el reciclaje de nutrientes y en la regulación de las condiciones necesarias para el crecimiento vegetal.

En las últimas décadas, el incremento de las actividades humanas ha modificado significativamente las características naturales de muchos suelos agrícolas. La expansión de la frontera agrícola, el desarrollo industrial, las actividades extractivas, el uso intensivo de fertilizantes y plaguicidas, así como diversas fuentes de contaminación ambiental, han favorecido la incorporación de elementos potencialmente tóxicos que alteran el equilibrio natural de estos ecosistemas. Entre ellos, los metales pesados representan una de las principales preocupaciones debido a su persistencia, estabilidad química y capacidad para permanecer en el ambiente durante largos periodos sin sufrir procesos de degradación.

La presencia de metales pesados en el suelo no implica necesariamente un riesgo inmediato; sin embargo, cuando sus concentraciones superan los niveles considerados naturales o cuando las condiciones físico-químicas del suelo favorecen su movilidad, estos elementos pueden incorporarse a los procesos biológicos y ser absorbidos por las plantas. Esta dinámica convierte al suelo en el punto de partida de una cadena de transferencia que puede extenderse hacia los cultivos, los animales y, finalmente, la población humana a través del consumo de alimentos contaminados.

El comportamiento de los metales en los suelos agrícolas depende de numerosos factores, entre ellos el pH, la textura, el contenido de materia orgánica, la capacidad de intercambio catiónico, la humedad y las condiciones climáticas. Estas variables determinan la disponibilidad de los metales para ser absorbidos por las raíces y condicionan su movilidad dentro del sistema suelo-planta. Comprender estos procesos resulta indispensable para interpretar los mecanismos que explican la acumulación de elementos metálicos en los cultivos y evaluar sus posibles implicancias ambientales y sanitarias.

En regiones tropicales como la Amazonía peruana, los suelos presentan características particulares que influyen directamente en la dinámica de los elementos químicos presentes en ellos. La elevada pluviosidad, la acidez natural de muchos suelos amazónicos y la intensa actividad biológica generan condiciones que pueden modificar la disponibilidad de ciertos metales y favorecer su incorporación a especies vegetales de importancia alimentaria. Estas particularidades hacen necesario estudiar el comportamiento de los suelos amazónicos desde una perspectiva científica que considere tanto sus propiedades naturales como las presiones derivadas de las actividades humanas.

El interés por conocer la calidad de los suelos agrícolas ha trascendido el ámbito estrictamente ambiental para convertirse en un componente esencial de la seguridad alimentaria y del desarrollo sostenible. La producción de alimentos seguros depende, en gran medida, de la conservación de la calidad del suelo y del control de aquellos factores que puedan comprometer la inocuidad de los cultivos. En consecuencia, el monitoreo de metales pesados se ha consolidado como una herramienta indispensable para la evaluación ambiental y la gestión responsable de los recursos agrícolas.

Este capítulo reúne los principales fundamentos científicos relacionados con los metales presentes en los suelos agrícolas. En primer lugar, se presentan los referentes teóricos que han contribuido al conocimiento de la contaminación por metales pesados y su impacto sobre los sistemas agrícolas. Posteriormente, se desarrollan los conceptos esenciales acerca de las propiedades del suelo, los principales metales de interés ambiental, los factores que regulan su movilidad y disponibilidad, así como los riesgos asociados a su acumulación y los estándares de calidad ambiental que orientan su

evaluación. Estos contenidos constituyen la base conceptual necesaria para comprender el caso de estudio que se desarrolla en los capítulos siguientes y para interpretar la relación existente entre la calidad del suelo y la seguridad alimentaria en la Amazonía peruana.

1.1. REFERENTES TEÓRICOS

El estudio de la contaminación por metales pesados en los suelos agrícolas ha experimentado un notable crecimiento durante las últimas décadas, impulsado por la necesidad de comprender los efectos que estos elementos ejercen sobre los ecosistemas, la producción de alimentos y la salud humana. La evidencia científica acumulada ha demostrado que los metales presentes en el suelo pueden modificar la calidad ambiental de los sistemas agrícolas y, bajo determinadas condiciones, incorporarse a los tejidos vegetales mediante procesos naturales de absorción y transporte, convirtiéndose en un potencial riesgo para la cadena alimentaria.

Las investigaciones desarrolladas en diferentes regiones del mundo han permitido ampliar el conocimiento sobre las principales fuentes de contaminación, los factores que condicionan la movilidad de los metales en el suelo y los mecanismos mediante los cuales estos son transferidos hacia los cultivos agrícolas. Asimismo, han contribuido al desarrollo de metodologías para evaluar la calidad de los suelos, establecer estándares ambientales y diseñar estrategias orientadas a la prevención, el monitoreo y la recuperación de áreas afectadas por procesos de contaminación.

En América Latina, el interés por esta problemática ha adquirido especial relevancia debido a la importancia económica y social de la actividad agrícola, así como a la diversidad de condiciones ambientales presentes en la región. Numerosos estudios han analizado la presencia de metales pesados en suelos destinados al cultivo de especies de consumo humano, evidenciando que factores como la composición natural del suelo, las actividades extractivas, el uso de agroquímicos y determinadas prácticas productivas pueden influir significativamente en la concentración y disponibilidad de estos elementos.

En el contexto peruano, las investigaciones sobre contaminación de suelos agrícolas han aumentado progresivamente, especialmente en zonas donde convergen

actividades agrícolas, mineras e industriales. Estos estudios han permitido identificar la presencia de diversos metales en suelos y cultivos, además de resaltar la necesidad de fortalecer los programas de monitoreo ambiental y de implementar medidas que garanticen la producción de alimentos inocuos y la conservación de los recursos naturales.

Particular interés reviste la Amazonía peruana, donde las características físico-químicas de los suelos, las condiciones climáticas y la importancia de cultivos tradicionales como *Manihot esculenta* hacen indispensable comprender la dinámica de los metales dentro del sistema suelo-planta. La evidencia científica disponible constituye un referente fundamental para interpretar los resultados obtenidos en investigaciones desarrolladas en esta región y para contextualizar los riesgos ambientales y alimentarios asociados a la acumulación de metales en especies vegetales de consumo frecuente.

En este apartado se presentan los principales referentes teóricos que sustentan la presente obra, organizados de manera cronológica y temática. La revisión de estas investigaciones permite identificar los avances alcanzados en el conocimiento sobre la contaminación por metales pesados en suelos agrícolas, reconocer las principales tendencias de investigación y establecer el marco científico que fundamenta el estudio de la relación entre la concentración de metales en el suelo y su contenido en *Manihot esculenta* cultivada en la Amazonía peruana.

1.1.1. Evolución de la investigación sobre metales pesados en suelos agrícolas

El interés científico por la presencia de metales pesados en los suelos agrícolas ha evolucionado de manera significativa durante las últimas décadas. Inicialmente, las investigaciones estuvieron orientadas a identificar las principales fuentes de contaminación y a cuantificar la concentración de estos elementos en el ambiente. Con el avance de las técnicas analíticas y el desarrollo de la ciencia ambiental, el enfoque se amplió hacia el estudio del comportamiento de los metales dentro del sistema suelo-planta, su movilidad, biodisponibilidad, bioacumulación y los riesgos asociados para los ecosistemas y la salud humana.

Actualmente, la investigación sobre metales pesados constituye una línea prioritaria dentro de las ciencias ambientales, debido a que estos elementos presentan una elevada persistencia, no son biodegradables y pueden permanecer durante largos periodos en el suelo, incorporándose progresivamente a las cadenas tróficas. Esta característica ha impulsado el desarrollo de numerosos estudios destinados a comprender los mecanismos que regulan su distribución, transformación y transferencia hacia especies vegetales destinadas al consumo humano.

La evolución del conocimiento científico ha permitido demostrar que la contaminación de los suelos agrícolas responde a múltiples factores, tanto naturales como antropogénicos. Entre los primeros se encuentran la composición geológica del terreno y los procesos naturales de meteorización de las rocas, mientras que entre los segundos destacan las actividades mineras, industriales, el uso intensivo de fertilizantes y plaguicidas, la disposición inadecuada de residuos y el crecimiento urbano. Como consecuencia, el suelo deja de ser considerado únicamente como un medio de soporte para los cultivos y pasa a ser reconocido como un componente estratégico cuya calidad condiciona directamente la inocuidad de los alimentos y la sostenibilidad de la producción agrícola.

En este contexto, diversas investigaciones han contribuido a consolidar el conocimiento sobre esta problemática. Uno de los antecedentes más relevantes corresponde a los estudios desarrollados en la Cuenca del río Moche, en la región La Libertad (Perú), donde se evaluó la evolución de la contaminación por metales pesados durante un periodo de treinta años. Los resultados evidenciaron concentraciones importantes de hierro, plomo, cadmio, cobre, zinc y arsénico tanto en aguas como en suelos agrícolas y cultivos, observándose además la presencia de hierro en *Manihot esculenta*, lo que permitió plantear la posibilidad de que esta especie participe en procesos naturales de fitorremediación. Este estudio constituyó uno de los primeros trabajos nacionales que relacionó simultáneamente la calidad del suelo con la respuesta de un cultivo agrícola frente a la presencia de metales pesados.

Posteriormente, el interés científico se orientó hacia la comprensión de los mecanismos mediante los cuales determinadas especies vegetales pueden remover o inmovilizar contaminantes presentes en el suelo. En este sentido, investigaciones

experimentales desarrolladas utilizando tubérculos como papa, camote, rábano y yuca demostraron que algunas especies poseen una notable capacidad para absorber metales como cromo, plomo y zinc, planteando su potencial utilización en programas de recuperación ambiental mediante técnicas de fitorremediación. Estos hallazgos ampliaron la visión tradicional de los cultivos, al reconocer que además de producir alimentos pueden desempeñar un papel importante en los procesos de descontaminación de los ecosistemas agrícolas.

Paralelamente, otros estudios comenzaron a evaluar los efectos de la contaminación sobre los alimentos destinados al consumo humano. Una investigación realizada en el distrito de San Martín de Pangoa, en Junín, determinó la concentración de plomo y cadmio en diferentes variedades de yuca comercializadas en mercados locales. Los resultados mostraron que la mayoría de las muestras superaban los límites permitidos para plomo establecidos por el Codex Alimentarius, mientras que los niveles de cadmio permanecían dentro de los rangos aceptables. Estos resultados reforzaron la necesidad de considerar el monitoreo de cultivos alimenticios como parte de las estrategias de vigilancia de la seguridad alimentaria, debido al riesgo potencial que representa la exposición prolongada a metales pesados a través de la dieta.

La investigación también ha avanzado hacia el estudio de alternativas para disminuir la presencia de metales en ambientes contaminados. Un ejemplo de ello corresponde al aprovechamiento de residuos agrícolas como materiales bioadsorbentes para remover plomo presente en aguas residuales. En este tipo de investigaciones se comprobó que la cáscara de yuca posee capacidad para adsorber metales pesados, demostrando que los subproductos agrícolas pueden convertirse en recursos de interés para procesos de biorremediación ambiental. Este tipo de aportes evidencia la evolución de la investigación desde una perspectiva exclusivamente diagnóstica hacia propuestas orientadas a la mitigación y recuperación ambiental.

La preocupación científica por los efectos de los metales pesados también se ha extendido al ámbito de la salud pública. Diversas revisiones han señalado que elementos como el mercurio, el plomo, el arsénico y el aluminio constituyen algunos de los contaminantes más relevantes por su capacidad para ingresar al organismo humano mediante el aire, el agua y los alimentos. Esta evidencia fortaleció el enfoque

interdisciplinario de las investigaciones, integrando conocimientos provenientes de la toxicología, la agronomía, la ecología y las ciencias de la salud para comprender de manera integral las consecuencias de la contaminación ambiental sobre las poblaciones humanas.

En los años más recientes, la investigación sobre metales pesados ha incorporado además el análisis de los ecosistemas amazónicos, caracterizados por presentar condiciones edáficas particulares, como elevada acidez, abundante materia orgánica y una intensa dinámica biogeoquímica. Estas características modifican la movilidad y disponibilidad de los metales, haciendo necesario desarrollar estudios específicos para comprender el comportamiento de estos elementos en cultivos de importancia regional. En este sentido, el monitoreo realizado por la Autoridad Nacional del Agua en cuerpos de agua de la cuenca del río Nanay evidenció concentraciones de mercurio, plomo y zinc superiores a los estándares ambientales establecidos para la conservación del ambiente acuático, lo que pone de manifiesto la necesidad de continuar investigando la posible transferencia de estos contaminantes hacia los sistemas agrícolas amazónicos.

La evolución de la investigación demuestra que el estudio de los metales pesados ha dejado de centrarse únicamente en la cuantificación de contaminantes para orientarse hacia la comprensión integral de los procesos ambientales que determinan su comportamiento dentro del sistema suelo-planta. Actualmente, las investigaciones buscan establecer relaciones entre las características físico-químicas del suelo, la capacidad de absorción de las especies vegetales, los riesgos para la seguridad alimentaria y las estrategias de manejo ambiental que permitan reducir la exposición de la población a estos contaminantes. Este cambio de enfoque constituye la base científica sobre la cual se desarrolla la presente investigación, orientada a comprender la relación entre la concentración de metales en el suelo agrícola y su contenido en *Manihot esculenta* cultivada en la Amazonía peruana.

1.1.2. Estudios sobre contaminación de suelos y cultivos alimenticios

La contaminación de los suelos agrícolas constituye una de las principales preocupaciones de la investigación ambiental contemporánea debido a su estrecha relación con la calidad de los alimentos y la salud pública. Los estudios desarrollados

durante las últimas décadas han demostrado que el suelo actúa como un reservorio natural de diversos elementos químicos, entre ellos los metales pesados, cuya acumulación puede alterar los procesos biológicos de las plantas y favorecer su incorporación a la cadena alimentaria. En consecuencia, la evaluación conjunta de los suelos y de los cultivos ha adquirido un papel fundamental para comprender la dinámica de estos contaminantes y estimar los riesgos asociados a su consumo.

Las primeras investigaciones estuvieron orientadas principalmente a determinar la presencia de metales en los suelos agrícolas y comparar sus concentraciones con los estándares ambientales establecidos por los organismos nacionales e internacionales. Sin embargo, el desarrollo de nuevas metodologías analíticas permitió ampliar el alcance de estos estudios, incorporando la evaluación simultánea de los cultivos producidos sobre dichos suelos. Esta perspectiva integradora hizo posible comprender que la contaminación del suelo no siempre implica una acumulación proporcional de metales en las plantas, ya que este proceso depende de múltiples factores relacionados con las propiedades físico-químicas del suelo, las características de cada especie vegetal y las condiciones ambientales donde se desarrolla el cultivo.

Uno de los estudios más representativos en este campo fue desarrollado en la Cuenca del río Moche, en la región La Libertad, donde se analizaron durante varias décadas las concentraciones de metales pesados presentes en aguas, suelos agrícolas y diferentes cultivos. Los resultados evidenciaron la presencia de hierro, plomo, cadmio, cobre, zinc y arsénico en distintos compartimentos del ecosistema agrícola, observándose además que *Manihot esculenta* presentaba concentraciones importantes de hierro en sus tejidos. Estos hallazgos permitieron plantear la posibilidad de que determinadas especies vegetales posean mecanismos naturales de absorción capaces de contribuir a procesos de fitorremediación, al mismo tiempo que evidenciaron la necesidad de monitorear permanentemente la calidad de los cultivos destinados al consumo humano.

La relación entre contaminación del suelo y calidad de los alimentos fue posteriormente fortalecida por investigaciones realizadas directamente sobre cultivos de importancia alimentaria. En este sentido, un estudio efectuado en el distrito de San Martín de Pangoa evaluó la concentración de plomo y cadmio en diez variedades de

yuca comercializadas en mercados locales. Los resultados mostraron que el 90 % de las muestras analizadas superaban los límites permisibles establecidos para plomo por el Codex Alimentarius, mientras que las concentraciones de cadmio permanecían dentro de los valores aceptables. Estas evidencias confirmaron que los cultivos pueden convertirse en una vía de exposición humana a los metales pesados cuando son producidos en ambientes contaminados, reforzando la importancia del control sanitario de los alimentos de origen agrícola.

De manera paralela, diversos estudios experimentales analizaron el comportamiento de los metales en diferentes especies vegetales cultivadas sobre suelos contaminados. Investigaciones desarrolladas con tubérculos como papa, camote, rábano, malanga y yuca demostraron que cada especie presenta capacidades diferenciadas para absorber y acumular metales como cromo, plomo y zinc. Los resultados permitieron identificar especies con mayor potencial para procesos de recuperación ambiental mediante fitorremediación, al tiempo que evidenciaron la necesidad de seleccionar cuidadosamente los cultivos destinados al consumo humano cuando existen antecedentes de contaminación del suelo.

El interés por comprender los mecanismos de interacción entre suelo y cultivo también impulsó investigaciones dirigidas a desarrollar alternativas para reducir la contaminación ambiental. En este contexto, estudios experimentales sobre el aprovechamiento de residuos agrícolas demostraron que la cáscara de yuca posee capacidad para adsorber plomo presente en aguas residuales, alcanzando niveles importantes de remoción del contaminante. Estos resultados ampliaron el conocimiento sobre el potencial ambiental de *Manihot esculenta*, no solo como cultivo alimenticio, sino también como un recurso biológico con aplicaciones en procesos de biorremediación y tratamiento de efluentes contaminados.

La preocupación científica por la contaminación de los cultivos alimenticios ha llevado también al desarrollo de investigaciones orientadas a evaluar las condiciones ambientales donde se producen estos alimentos. En este sentido, el monitoreo realizado por la Autoridad Nacional del Agua en cuerpos de agua asociados a sistemas agrícolas de la cuenca del río Nanay identificó concentraciones de mercurio, plomo y zinc que superaban los estándares de calidad ambiental para la conservación de los ecosistemas

acuáticos. Si bien el estudio estuvo centrado en la calidad del agua, sus resultados evidencian la existencia de fuentes potenciales de contaminación que podrían influir sobre los suelos agrícolas y, en consecuencia, sobre los cultivos establecidos en estas zonas.

Las investigaciones desarrolladas hasta la actualidad han permitido comprender que la contaminación de los suelos agrícolas constituye un fenómeno complejo en el que intervienen procesos físicos, químicos y biológicos estrechamente relacionados. La capacidad de un metal para ser absorbido por una planta depende no solo de su concentración total en el suelo, sino también de factores como el pH, la textura, la materia orgánica, la humedad, el potencial de oxidación-reducción y las características fisiológicas propias de cada especie vegetal. Esta complejidad explica por qué cultivos desarrollados en condiciones ambientales similares pueden presentar concentraciones diferentes de un mismo metal, aspecto que continúa siendo objeto de investigación en numerosos estudios alrededor del mundo.

En conjunto, la evidencia científica demuestra que la evaluación simultánea de los suelos agrícolas y de los cultivos constituye una estrategia indispensable para comprender la dinámica de los metales pesados dentro del sistema suelo-planta. Este enfoque permite identificar riesgos potenciales para la seguridad alimentaria, fortalecer los programas de vigilancia ambiental y generar información científica que contribuya a diseñar prácticas agrícolas más sostenibles. Bajo esta perspectiva se enmarca la presente investigación, cuyo propósito es analizar la relación entre la concentración de metales presentes en el suelo y su contenido en *Manihot esculenta* cultivada en la Amazonía peruana, aportando evidencia que contribuya al conocimiento de esta problemática en uno de los ecosistemas más importantes del país.

1.1.3. Investigaciones en ecosistemas amazónicos

Los ecosistemas amazónicos constituyen uno de los sistemas naturales más complejos y biodiversos del planeta. Su dinámica ecológica está determinada por la interacción entre factores climáticos, hidrológicos, geológicos y biológicos que condicionan las propiedades físicas y químicas de los suelos, así como el desarrollo de la vegetación. Estas características diferencian a la Amazonía de otros sistemas

agrícolas, haciendo necesario que las investigaciones sobre contaminación ambiental sean desarrolladas considerando las particularidades propias de esta región.

En los últimos años, la investigación científica en la Amazonía ha incrementado su interés por evaluar la calidad de los recursos naturales debido al crecimiento de las actividades agrícolas, forestales, urbanas y extractivas. Estas actividades han modificado progresivamente las condiciones naturales del ambiente, favoreciendo la incorporación de diversos contaminantes en los suelos y cuerpos de agua. Entre ellos, los metales pesados representan uno de los principales focos de atención, debido a su persistencia en el ambiente y a su capacidad para incorporarse a los ciclos biogeoquímicos que sostienen el funcionamiento de los ecosistemas amazónicos.

Los suelos amazónicos presentan condiciones particulares que influyen directamente en el comportamiento de los metales. En términos generales, predominan suelos con reacción ácida, elevada humedad, abundante materia orgánica y una intensa actividad microbiológica, factores que modifican la movilidad, disponibilidad y absorción de diversos elementos químicos por parte de las plantas. Estas condiciones hacen que los procesos de transferencia de metales entre el suelo y la vegetación difieran de aquellos observados en ecosistemas templados o semiáridos, razón por la cual los estudios desarrollados en la Amazonía poseen un alto valor científico para comprender esta problemática desde una perspectiva regional.

Uno de los antecedentes más importantes corresponde al monitoreo realizado por la Autoridad Nacional del Agua en cuerpos naturales de agua ubicados en la cuenca del río Nanay, en las instalaciones de la Agropecuaria La Chacra, en Iquitos. Esta investigación registró concentraciones de mercurio, plomo y zinc superiores a los Estándares de Calidad Ambiental establecidos para cuerpos de agua destinados a la conservación del ambiente acuático. Los investigadores señalaron que la presencia de mercurio estaría relacionada con su retención en materiales arcillosos y materia orgánica presentes en los sedimentos, mientras que el plomo mostró una estrecha asociación con partículas minerales y óxidos de hierro y manganeso suspendidos en el agua. Asimismo, se indicó que el zinc presenta una elevada afinidad por estos compuestos, favoreciendo su acumulación en el fondo de los cuerpos de agua. Estos

resultados evidencian la existencia de procesos naturales y antrópicos que favorecen la permanencia y movilidad de los metales en ecosistemas amazónicos.

Las investigaciones realizadas en la Amazonía también han resaltado la importancia de comprender la interacción existente entre las características del suelo y el comportamiento de las especies vegetales. La elevada acidez que caracteriza a muchos suelos amazónicos favorece la solubilidad de determinados metales, incrementando su disponibilidad para ser absorbidos por las raíces de las plantas. Este fenómeno adquiere especial relevancia cuando se trata de especies destinadas al consumo humano, ya que la absorción de elementos potencialmente tóxicos puede comprometer la calidad e inocuidad de los alimentos producidos en estas zonas.

Dentro de este contexto, *Manihot esculenta* ocupa un lugar estratégico debido a su importancia económica, social y alimentaria en la región amazónica. La yuca constituye uno de los cultivos más representativos de la Amazonía peruana por su elevada adaptación a suelos ácidos, su rápido crecimiento y su amplia aceptación en la alimentación cotidiana de las poblaciones locales. Precisamente estas características han motivado el desarrollo de investigaciones orientadas a conocer el comportamiento de esta especie frente a la presencia de metales pesados en el ambiente, considerando que sus raíces representan la parte comestible de la planta y, por tanto, la principal vía de exposición para la población. Los estudios realizados en la región amazónica también han puesto de manifiesto el potencial de determinadas especies vegetales para participar en procesos de recuperación ambiental. La literatura científica señala que algunas plantas poseen la capacidad de absorber concentraciones elevadas de metales sin comprometer significativamente su desarrollo, proceso conocido como hiperacumulación. Asimismo, se reconoce la existencia de diferentes mecanismos de fitorremediación, entre ellos la fitoextracción, la fitoestabilización, la fitovolatilización y la rizodegradación, los cuales contribuyen a disminuir progresivamente la carga contaminante presente en los suelos. Estas estrategias han despertado un creciente interés debido a que representan alternativas sostenibles para la rehabilitación de áreas degradadas, especialmente en regiones ecológicamente sensibles como la Amazonía. Otro aspecto destacado por las investigaciones amazónicas es la estrecha relación existente entre la calidad ambiental y la seguridad alimentaria. La dependencia de las

comunidades locales respecto a los recursos agrícolas hace que cualquier alteración en la calidad del suelo o del agua pueda repercutir directamente sobre la disponibilidad de alimentos seguros. En este sentido, diversos estudios han advertido la necesidad de fortalecer el monitoreo ambiental en cultivos tradicionales, especialmente aquellos que constituyen la base de la alimentación regional, con el propósito de prevenir riesgos asociados a la acumulación de metales pesados en los alimentos.

A pesar de los avances alcanzados, la producción científica sobre contaminación por metales pesados en ecosistemas amazónicos continúa siendo limitada en comparación con otras regiones del país y del mundo. La complejidad ambiental de la Amazonía, la gran diversidad de especies vegetales y las variaciones en las características de los suelos hacen necesario desarrollar investigaciones específicas que permitan comprender el comportamiento de los metales bajo condiciones propias de este ecosistema. En este escenario, estudios que relacionen la concentración de metales en el suelo con su contenido en cultivos alimenticios representan un aporte relevante para fortalecer el conocimiento científico y generar información útil para la gestión ambiental y la protección de la seguridad alimentaria.

En consecuencia, las investigaciones desarrolladas en ecosistemas amazónicos han evolucionado desde estudios descriptivos de la calidad ambiental hacia enfoques integrales que consideran la interacción entre suelo, agua, vegetación y salud humana. Esta perspectiva constituye el fundamento científico del presente libro, cuyo caso de estudio se desarrolla en la región Loreto, donde se analiza la relación entre la concentración de metales presentes en el suelo y su acumulación en *Manihot esculenta*, aportando evidencia para comprender uno de los principales desafíos ambientales que enfrenta actualmente la agricultura amazónica.

1.1.4. Evidencia científica sobre la transferencia de metales suelo-planta

La transferencia de metales desde el suelo hacia las plantas constituye uno de los procesos más estudiados dentro de las ciencias ambientales, debido a las implicancias que tiene sobre la calidad de los alimentos, la conservación de los ecosistemas y la salud pública. Este fenómeno representa el principal mecanismo mediante el cual los metales presentes en el suelo ingresan a la cadena trófica, iniciando un proceso de acumulación que puede extenderse desde los productores primarios hasta los consumidores finales.

Por esta razón, comprender la dinámica de la relación suelo-planta se ha convertido en un objetivo prioritario para la investigación científica contemporánea.

Durante muchos años se asumió que la presencia de metales en el suelo implicaba inevitablemente su incorporación a los cultivos. Sin embargo, las investigaciones desarrolladas posteriormente demostraron que este proceso es considerablemente más complejo. Actualmente se reconoce que la absorción de metales depende de la interacción entre múltiples factores, entre ellos la concentración del metal en el suelo, sus características físico-químicas, la disponibilidad del elemento, las propiedades fisiológicas de la especie vegetal y las condiciones ambientales en las que se desarrolla el cultivo. Como consecuencia, dos plantas cultivadas en suelos con concentraciones similares pueden presentar niveles de acumulación completamente diferentes.

La transferencia suelo-planta comienza cuando los metales presentes en la solución del suelo entran en contacto con el sistema radical. A partir de ese momento, la raíz actúa como la primera barrera fisiológica frente a estos elementos, regulando parcialmente su ingreso mediante diferentes mecanismos de absorción selectiva. Una vez incorporados, los metales pueden permanecer retenidos en las raíces o ser transportados hacia los órganos aéreos mediante el sistema vascular de la planta. Este comportamiento depende tanto de la naturaleza química del metal como de la capacidad fisiológica de cada especie vegetal para inmovilizar, transportar o acumular dichos elementos.

Los estudios desarrollados durante las últimas décadas han demostrado que algunos metales cumplen funciones esenciales para el metabolismo vegetal cuando se encuentran en concentraciones adecuadas. Elementos como hierro, cobre, manganeso y zinc participan activamente en procesos enzimáticos, fotosintéticos y respiratorios indispensables para el crecimiento de las plantas. Sin embargo, cuando sus concentraciones superan determinados umbrales fisiológicos, estos mismos elementos pueden generar alteraciones metabólicas, estrés oxidativo y disminución del desarrollo vegetal. A ellos se suman otros metales como el plomo, el cadmio y el mercurio, considerados altamente tóxicos debido a que no desempeñan funciones biológicas

conocidas y pueden afectar severamente el funcionamiento celular incluso en bajas concentraciones.

El interés científico por comprender estos procesos ha impulsado el desarrollo de numerosas investigaciones experimentales orientadas a evaluar la capacidad de diferentes especies vegetales para absorber metales presentes en el suelo. Uno de los estudios más representativos analizó el comportamiento de diversos tubérculos cultivados sobre suelos contaminados con cromo, zinc y plomo. Los resultados demostraron que especies como papa, rábano, camote, malanga y yuca presentaban diferentes niveles de absorción de estos elementos, identificándose incluso algunas con potencial para ser utilizadas en procesos de fitorremediación. Estos hallazgos permitieron comprender que la respuesta frente a la contaminación depende no solamente del suelo, sino también de las características fisiológicas propias de cada cultivo.

La evidencia científica también ha puesto de manifiesto que la transferencia de metales adquiere especial importancia cuando involucra cultivos destinados directamente al consumo humano. En este contexto, la investigación desarrollada en el distrito de San Martín de Pangoa representa un aporte significativo al evaluar la concentración de plomo y cadmio en diez variedades de *Manihot esculenta* comercializadas en mercados locales. Los resultados evidenciaron que el 90 % de las muestras superaban los límites permisibles para plomo establecidos por el Codex Alimentarius, mientras que las concentraciones de cadmio permanecían dentro de los rangos aceptables. Este estudio confirmó que la transferencia de metales desde el suelo hacia los órganos comestibles de la planta constituye una realidad ambiental con potenciales implicancias para la seguridad alimentaria y la salud de las poblaciones consumidoras.

Otra línea de investigación ha centrado su atención en el potencial de determinadas especies vegetales para remover metales del ambiente mediante procesos de fitorremediación. Diversos estudios han demostrado que algunas plantas poseen la capacidad de absorber concentraciones muy superiores a las normalmente encontradas en la mayoría de especies vegetales, fenómeno que ha dado origen al concepto de plantas hiperacumuladoras. Estas especies pueden captar cantidades de metales

superiores a cien veces las concentraciones habituales sin comprometer significativamente su desarrollo, gracias a mecanismos fisiológicos especializados que les permiten inmovilizar o detoxificar estos elementos. Entre los principales mecanismos descritos se encuentran la fitoextracción, la fitoestabilización, la fitovolatilización y la rizodegradación, procesos que han despertado un creciente interés por su potencial aplicación en programas de recuperación ambiental. La investigación sobre la transferencia suelo-planta también ha permitido comprender que las características del suelo desempeñan un papel determinante en la disponibilidad de los metales para las plantas. Factores como el pH, la textura, la materia orgánica, la humedad y la composición mineral modifican la solubilidad de los elementos químicos y, en consecuencia, su capacidad para ser absorbidos por las raíces. En suelos ácidos, por ejemplo, muchos metales incrementan su movilidad y biodisponibilidad, favoreciendo su incorporación a los tejidos vegetales. Esta condición resulta especialmente relevante en regiones amazónicas, donde predominan suelos naturalmente ácidos que pueden facilitar la absorción de determinados elementos por especies agrícolas ampliamente distribuidas en la región. Las investigaciones desarrolladas en la Amazonía peruana han reforzado esta hipótesis al señalar que *Manihot esculenta* constituye un cultivo particularmente importante para comprender la dinámica de transferencia de metales. Su elevada adaptación a suelos amazónicos, la importancia de sus raíces como alimento y la existencia de antecedentes que reportan concentraciones elevadas de metales en esta especie justifican la necesidad de continuar investigando el comportamiento de estos elementos dentro del sistema suelo-planta. Asimismo, se ha planteado que la propia fisiología de la yuca podría contribuir parcialmente a procesos de detoxificación del suelo, aspecto que continúa siendo objeto de investigación en diferentes regiones tropicales.

La evolución de la investigación también ha permitido desarrollar metodologías cada vez más precisas para cuantificar la transferencia de metales. La utilización de técnicas como la espectrometría de absorción atómica ha incrementado significativamente la exactitud en la determinación de concentraciones presentes tanto en el suelo como en los diferentes órganos de las plantas. Estos avances tecnológicos han facilitado el análisis simultáneo de raíces, hojas y tejidos comestibles, permitiendo

establecer relaciones cuantitativas entre las concentraciones presentes en el ambiente y aquellas acumuladas en los cultivos.

En conjunto, la evidencia científica disponible demuestra que la transferencia de metales entre el suelo y las plantas constituye un proceso dinámico, multifactorial y de enorme relevancia para la agricultura moderna. Los resultados obtenidos en diferentes investigaciones coinciden en señalar que la calidad del suelo condiciona directamente la calidad de los alimentos y que la acumulación de metales en los cultivos depende de la interacción entre factores ambientales y fisiológicos. Bajo esta perspectiva, el estudio de la relación suelo-planta deja de ser un tema exclusivamente agronómico para convertirse en un componente esencial de la gestión ambiental, la seguridad alimentaria y la protección de la salud pública. Este enfoque sustenta la presente investigación, en la que se analiza la relación existente entre la concentración de metales en el suelo agrícola y su contenido en *Manihot esculenta* cultivada en la Amazonía peruana, contribuyendo a fortalecer el conocimiento científico sobre uno de los procesos ambientales de mayor relevancia para la sostenibilidad de los sistemas agrícolas tropicales.

1.2. FUNDAMENTOS DE LOS METALES EN EL SUELO

El estudio de los metales presentes en el suelo constituye uno de los pilares fundamentales de las ciencias del suelo, la agronomía y la gestión ambiental. La comprensión de su origen, comportamiento y dinámica dentro de los sistemas agrícolas permite explicar numerosos procesos relacionados con la productividad de los cultivos, la conservación de los ecosistemas y la seguridad alimentaria. En la actualidad, el análisis de estos elementos ha adquirido una importancia creciente debido a que el suelo representa el principal reservorio de metales en el ambiente y actúa como el medio desde el cual estos pueden incorporarse a las plantas y, posteriormente, a la cadena alimentaria.

Desde una perspectiva ambiental, el suelo es mucho más que un soporte físico para el crecimiento de las especies vegetales. Se trata de un sistema natural complejo donde interactúan partículas minerales, materia orgánica, agua, aire y una gran diversidad de organismos vivos que participan activamente en procesos de transformación, reciclaje de nutrientes y regulación de las propiedades físico-químicas del ecosistema. Dentro de este sistema dinámico, los metales pueden encontrarse

formando parte de la composición natural del suelo o incorporarse como consecuencia de diversas actividades humanas, modificando el equilibrio químico y biológico del ambiente.

La presencia de metales en el suelo no debe interpretarse necesariamente como un indicador de contaminación. Muchos de ellos constituyen elementos esenciales para el crecimiento de las plantas y participan en importantes procesos fisiológicos relacionados con la fotosíntesis, la respiración celular, la síntesis enzimática y el metabolismo vegetal. No obstante, cuando sus concentraciones superan los niveles naturales o cuando predominan metales sin función biológica conocida, pueden producir alteraciones en la fertilidad del suelo, afectar el desarrollo de los cultivos y representar un riesgo para los organismos que dependen de ellos.

Uno de los aspectos que mayor interés ha despertado en la investigación científica es el comportamiento diferencial que presentan los distintos metales dentro del suelo. Su movilidad, disponibilidad y permanencia dependen de una compleja interacción entre factores físicos, químicos y biológicos, entre los que destacan el pH, la textura, el contenido de materia orgánica, la capacidad de intercambio catiónico, la humedad y las condiciones de oxidación-reducción. Estas variables determinan la facilidad con la que un metal puede permanecer inmovilizado en el suelo o incorporarse a la solución del mismo, donde queda disponible para ser absorbido por las raíces de las plantas.

En los sistemas agrícolas, esta dinámica adquiere una relevancia especial debido a que la calidad del suelo influye directamente sobre la calidad de los alimentos producidos. La acumulación de metales potencialmente tóxicos puede alterar los procesos fisiológicos de las plantas y favorecer su incorporación a raíces, tallos, hojas y frutos, dependiendo de la especie cultivada y de las condiciones ambientales presentes. Por ello, el estudio de los metales en el suelo constituye el punto de partida para comprender los mecanismos de transferencia suelo-planta que posteriormente serán abordados en el caso de estudio desarrollado en esta obra.

La creciente preocupación por los efectos ambientales derivados de la contaminación de los suelos ha impulsado el establecimiento de estándares nacionales e

internacionales destinados a regular las concentraciones máximas permitidas de diversos metales. Estas normas constituyen herramientas fundamentales para la evaluación de la calidad ambiental y permiten determinar si un suelo mantiene condiciones adecuadas para el desarrollo agrícola o si requiere medidas de control y recuperación. De esta manera, la caracterización química del suelo se ha convertido en un componente esencial de los programas de monitoreo ambiental y de las políticas orientadas a garantizar una producción agrícola segura y sostenible.

En el caso de la Amazonía peruana, el análisis de los metales adquiere una importancia aún mayor debido a las características particulares de sus suelos. La elevada acidez, la intensa actividad biológica, el alto contenido de materia orgánica y las condiciones climáticas propias de la región modifican significativamente la disponibilidad de diversos elementos químicos, influyendo en su movilidad y en la capacidad de absorción por parte de las especies vegetales. Estas condiciones hacen indispensable comprender los fundamentos que regulan el comportamiento de los metales antes de analizar su relación con los cultivos de importancia alimentaria.

En este apartado se desarrollan los principales fundamentos científicos relacionados con los metales presentes en el suelo agrícola. Se analizan las características del suelo como sistema natural, las propiedades físicas y químicas que condicionan la dinámica de los elementos metálicos, los principales metales de interés ambiental, los factores que regulan su movilidad y biodisponibilidad, así como los riesgos asociados a su acumulación y los estándares de calidad ambiental utilizados para su evaluación. El conocimiento de estos aspectos proporciona el soporte conceptual necesario para comprender la interacción entre el suelo y *Manihot esculenta*, así como interpretar los resultados obtenidos en el caso de estudio presentado en los capítulos posteriores.

1.2.1. El suelo como sistema agrícola

El suelo constituye uno de los recursos naturales más importantes para el desarrollo de la vida y el funcionamiento de los ecosistemas terrestres. Desde el punto de vista agrícola, representa el medio donde se desarrollan las raíces de las plantas, se almacenan el agua y los nutrientes esenciales y tienen lugar numerosos procesos físicos, químicos y biológicos que condicionan el crecimiento y la productividad de los cultivos.

Su importancia trasciende la función de soporte mecánico, ya que participa activamente en el mantenimiento de la fertilidad, la regulación del ciclo hidrológico, el reciclaje de la materia orgánica y el equilibrio de los ecosistemas agrícolas.

En términos científicos, el suelo puede definirse como un material natural no consolidado constituido por partículas minerales, materia orgánica, agua, aire y una gran diversidad de organismos vivos que interactúan continuamente mediante procesos físicos, químicos y biológicos. Estos componentes conforman un sistema dinámico cuya estructura y funcionamiento dependen de la influencia conjunta del clima, el material parental, la topografía, los organismos y el tiempo de formación. Esta compleja interacción determina las propiedades del suelo y su capacidad para sostener la producción agrícola.

Desde una perspectiva agronómica, el suelo agrícola corresponde a aquellas superficies con aptitud para el establecimiento de cultivos y el desarrollo de actividades pecuarias. Su importancia no se limita únicamente a la producción de alimentos, sino que también constituye el hábitat de una amplia diversidad de organismos que participan en la descomposición de la materia orgánica, el reciclaje de nutrientes y la conservación de la biodiversidad. Incluso en áreas destinadas a la producción agrícola, el suelo mantiene funciones ecológicas fundamentales al servir como refugio para especies de flora y fauna nativas, contribuyendo al equilibrio ambiental de los agroecosistemas.

Los sistemas agrícolas modernos dependen directamente de la calidad del suelo para garantizar una producción sostenible. La capacidad productiva de un suelo está determinada por sus propiedades físicas, químicas y biológicas, las cuales regulan la disponibilidad de agua, oxígeno y nutrientes para las plantas. Cuando estas propiedades se conservan en equilibrio, el suelo proporciona condiciones favorables para el crecimiento vegetal y el desarrollo de cultivos de alto rendimiento. Sin embargo, las alteraciones ocasionadas por procesos de degradación, erosión, contaminación o manejo inadecuado pueden afectar significativamente su productividad y comprometer la calidad de los alimentos obtenidos.

La investigación científica ha demostrado que el suelo debe entenderse como un sistema abierto, en permanente intercambio de materia y energía con el ambiente. Esta condición resulta especialmente evidente en los agroecosistemas, donde la intervención humana modifica continuamente los procesos naturales mediante actividades como la preparación del terreno, el riego, la fertilización, el control de plagas y la cosecha. Cada una de estas prácticas altera el equilibrio natural del sistema y modifica la dinámica de los nutrientes, del agua y de los elementos químicos presentes en el suelo.

Precisamente, uno de los conceptos más importantes desarrollados en la literatura científica corresponde al de **agroecosistema**, entendido como un ecosistema transformado por la actividad humana con el propósito de producir alimentos. A diferencia de los ecosistemas naturales, donde existe una elevada diversidad biológica y una autorregulación permanente, los agroecosistemas presentan menor diversidad de especies, cadenas tróficas más simples y una mayor dependencia del manejo realizado por el agricultor. La productividad agrícola exige favorecer determinadas especies vegetales sobre otras, controlar organismos considerados plagas e incorporar insumos externos que permitan mantener la fertilidad del suelo y garantizar la producción. Estas intervenciones modifican sustancialmente la dinámica ecológica del sistema agrícola.

Los agroecosistemas también se caracterizan por presentar un flujo constante de entrada y salida de materiales. La cosecha representa una extracción continua de biomasa y nutrientes del sistema, mientras que la aplicación de fertilizantes y otros insumos constituye una incorporación artificial de elementos destinados a mantener la productividad del suelo. Como consecuencia, estos sistemas presentan un comportamiento diferente al de los ecosistemas naturales, donde los procesos de reciclaje de nutrientes ocurren de manera más equilibrada y con menor intervención externa. La necesidad permanente de incorporar nutrientes convierte al suelo agrícola en un sistema altamente dinámico y susceptible a cambios en su composición química.

La fertilización constituye una práctica indispensable para sostener la productividad agrícola; sin embargo, cuando no se realiza bajo criterios técnicos adecuados puede favorecer procesos de lixiviación, alterar el equilibrio químico del suelo e incrementar la movilidad de diversos elementos presentes en él. Estas modificaciones pueden afectar la disponibilidad de nutrientes esenciales, favorecer la

acumulación de sustancias potencialmente tóxicas y modificar las condiciones bajo las cuales los metales permanecen retenidos o son absorbidos por las plantas. En consecuencia, la sostenibilidad de un agroecosistema depende de la capacidad para mantener un equilibrio entre productividad, conservación del suelo y protección del ambiente.

Otro aspecto fundamental del suelo como sistema agrícola es su función como reservorio natural de elementos químicos. En él se encuentran presentes macro y micronutrientes indispensables para el crecimiento vegetal, pero también diversos metales cuya concentración depende tanto de la composición geológica del terreno como de las actividades desarrolladas por el ser humano. Mientras algunos metales forman parte de los ciclos biogeoquímicos normales del suelo y son requeridos por las plantas en pequeñas cantidades, otros pueden acumularse progresivamente hasta alcanzar concentraciones que representan riesgos para el funcionamiento del ecosistema agrícola y la seguridad alimentaria.

La capacidad del suelo para retener o liberar estos elementos está estrechamente relacionada con sus propiedades físico-químicas. Factores como la textura, la estructura, la materia orgánica, el contenido de arcillas, la humedad y, especialmente, el pH, determinan la movilidad de los metales y condicionan su disponibilidad para las raíces. En regiones tropicales como la Amazonía peruana, donde predominan suelos naturalmente ácidos, estos procesos adquieren especial relevancia debido a que la acidez incrementa la solubilidad de varios metales, favoreciendo su absorción por parte de los cultivos. Esta condición explica la importancia de estudiar las características del suelo antes de analizar la concentración de metales presentes en las especies vegetales. En el Perú, la calidad de los suelos agrícolas es evaluada mediante los Estándares de Calidad Ambiental (ECA), los cuales establecen valores de referencia para diferentes metales de importancia ambiental, entre ellos cadmio, cromo y plomo. Estos estándares constituyen instrumentos fundamentales para determinar el estado de conservación de los suelos, identificar posibles procesos de contaminación y orientar la implementación de medidas destinadas a proteger tanto la productividad agrícola como la salud de la población.

En síntesis, el suelo agrícola debe entenderse como un sistema vivo, dinámico y altamente complejo, donde interactúan continuamente procesos físicos, químicos, biológicos y antrópicos. Su estado de conservación condiciona directamente la productividad de los cultivos, la calidad de los alimentos y la estabilidad de los ecosistemas. Comprender su funcionamiento resulta indispensable para interpretar la dinámica de los metales pesados y explicar los mecanismos mediante los cuales estos pueden incorporarse a especies de importancia alimentaria como *Manihot esculenta*. Desde esta perspectiva, el estudio del suelo constituye el punto de partida para comprender la relación existente entre contaminación ambiental, producción agrícola y seguridad alimentaria, eje central de la presente obra.

1.2.2. Propiedades físicas y químicas del suelo

El comportamiento de los metales presentes en un suelo agrícola está determinado, en gran medida, por las propiedades físicas y químicas que caracterizan este recurso natural. Dichas propiedades no solo condicionan la fertilidad del suelo y su capacidad para sustentar el crecimiento de las plantas, sino que también regulan la movilidad, disponibilidad y permanencia de los elementos químicos presentes en él. En consecuencia, comprender estas características resulta indispensable para interpretar los procesos de absorción de metales por los cultivos y evaluar los posibles riesgos ambientales y alimentarios asociados a su acumulación.

Las propiedades físicas del suelo hacen referencia a las características relacionadas con su composición, organización estructural y comportamiento frente al agua y al aire. Entre ellas destacan la textura, la estructura, la porosidad, la densidad aparente, la permeabilidad y la capacidad de retención de humedad. Estas propiedades determinan el movimiento del agua dentro del perfil del suelo, la aireación del sistema radical y la facilidad con la que los nutrientes y los metales pueden desplazarse hacia las raíces de las plantas.

La textura constituye una de las propiedades físicas más importantes del suelo, ya que depende de la proporción relativa de arena, limo y arcilla presente en cada horizonte. Los suelos con mayor contenido de arcilla poseen una elevada superficie específica y una mayor capacidad para adsorber iones metálicos, mientras que los suelos arenosos presentan menor capacidad de retención, favoreciendo el desplazamiento de

diversos elementos por lixiviación. Esta característica influye directamente sobre la disponibilidad de los metales para las plantas y sobre la permanencia de los contaminantes dentro del sistema agrícola.

La estructura del suelo también desempeña un papel fundamental al determinar la forma en que las partículas minerales se agrupan para formar agregados. Una estructura estable favorece la circulación del agua, el intercambio gaseoso y el crecimiento de las raíces, mientras que una estructura degradada puede limitar el desarrollo vegetal y modificar la distribución de los elementos químicos. La presencia de materia orgánica y la actividad biológica contribuyen significativamente a la estabilidad estructural del suelo, favoreciendo la conservación de sus funciones ecológicas.

Otra propiedad física de gran importancia es la porosidad, entendida como el volumen de espacios vacíos existentes entre las partículas sólidas. Los poros permiten la circulación del agua y del aire, facilitando el transporte de nutrientes y otros compuestos químicos hacia el sistema radical. Cuando la porosidad disminuye debido a procesos de compactación, el intercambio de gases y la infiltración del agua se ven afectados, alterando las condiciones necesarias para el crecimiento de las plantas y modificando la movilidad de los metales presentes en el suelo.

La humedad constituye igualmente un factor determinante en la dinámica de los elementos químicos. El agua del suelo actúa como medio de transporte para los nutrientes y los metales disueltos, permitiendo que estos entren en contacto con las raíces. Variaciones en el contenido de humedad modifican la concentración de la solución del suelo y, por tanto, la disponibilidad de los elementos para ser absorbidos por las plantas. En regiones tropicales como la Amazonía, donde las precipitaciones son abundantes durante gran parte del año, la humedad adquiere un papel especialmente importante en la movilización de los metales presentes en el perfil del suelo.

Desde el punto de vista químico, las propiedades del suelo ejercen una influencia aún más directa sobre el comportamiento de los metales pesados. Entre ellas, el pH constituye probablemente el factor de mayor importancia debido a que controla la solubilidad, movilidad y biodisponibilidad de numerosos elementos químicos. Diversas

investigaciones han demostrado que la absorción de metales por las plantas se ve favorecida en condiciones de acidez, donde muchos elementos permanecen en formas químicas más solubles y fácilmente disponibles para el sistema radical. Precisamente, el documento base de esta investigación señala que la sensibilidad de las especies vegetales frente a los metales varía considerablemente y que los procesos de absorción se encuentran favorecidos por el pH ácido y por determinadas características texturales del suelo.

La importancia del pH adquiere una dimensión particular en los ecosistemas amazónicos. Los suelos de esta región presentan, en términos generales, una reacción naturalmente ácida como consecuencia de las condiciones climáticas y de los procesos de formación propios del bosque tropical. Esta característica modifica el equilibrio químico del suelo y favorece la disponibilidad de diversos metales, razón por la cual la evaluación de la acidez constituye un aspecto indispensable en investigaciones relacionadas con la contaminación ambiental y la seguridad alimentaria. En la introducción de la investigación que da origen a esta obra se destaca precisamente que *Manihot esculenta* se desarrolla sobre suelos amazónicos cuyas características de pH, textura arcillosa y contenido de sales podrían representar un riesgo potencial para la salud humana cuando favorecen la presencia de metales en los cultivos.

Otra propiedad química fundamental corresponde al contenido de materia orgánica. Esta fracción del suelo desempeña múltiples funciones ambientales, entre ellas el almacenamiento de nutrientes, el incremento de la capacidad de intercambio catiónico y la formación de complejos estables con diversos metales. Dependiendo de las condiciones del medio, la materia orgánica puede inmovilizar determinados elementos o, por el contrario, favorecer su movilización mediante procesos de complejación, modificando así la cantidad de metales disponible para las plantas.

La capacidad de intercambio catiónico representa otra propiedad esencial para comprender el comportamiento de los metales en el suelo. Esta propiedad expresa la capacidad que poseen las partículas del suelo, especialmente las arcillas y la materia orgánica, para retener e intercambiar cationes presentes en la solución del suelo. Cuanto mayor es esta capacidad, mayor es la posibilidad de retener nutrientes esenciales y ciertos metales, reduciendo parcialmente su movilidad. Sin embargo, variaciones en el

pH, la humedad o la concentración de otros iones pueden modificar este equilibrio y favorecer la liberación de los metales retenidos.

Las condiciones de oxidación y reducción constituyen igualmente un factor determinante, especialmente en ecosistemas tropicales donde la humedad del suelo puede variar considerablemente durante el año. Estos procesos modifican el estado químico de algunos metales y alteran su solubilidad, influyendo directamente sobre su disponibilidad para las plantas. De esta manera, el comportamiento de un mismo metal puede variar significativamente dependiendo de las condiciones ambientales predominantes en cada momento.

Las investigaciones desarrolladas en ecosistemas amazónicos han demostrado que muchas de estas propiedades actúan de forma conjunta. El monitoreo realizado por la Autoridad Nacional del Agua en la cuenca del río Nanay señaló, por ejemplo, que el mercurio presenta afinidad por los materiales arcillosos y la materia húmica presente en los sedimentos, mientras que el plomo suele asociarse a la materia orgánica y a partículas minerales como los óxidos de hierro y manganeso. Asimismo, el zinc muestra una fuerte afinidad por estos compuestos, favoreciendo su acumulación en determinados ambientes. Estos resultados ponen de manifiesto la estrecha relación existente entre las propiedades del suelo y el comportamiento ambiental de los metales pesados.

La comprensión de las propiedades físicas y químicas del suelo resulta indispensable para interpretar los procesos de transferencia de metales hacia las plantas. La concentración total de un elemento en el suelo no constituye, por sí sola, un indicador suficiente para estimar el riesgo de contaminación, ya que su disponibilidad depende del conjunto de condiciones físicas y químicas que regulan su comportamiento. En consecuencia, la evaluación integral del suelo representa el primer paso para comprender la dinámica de los metales dentro del sistema suelo-planta y establecer estrategias orientadas a proteger la calidad de los cultivos y la seguridad alimentaria.

En síntesis, las propiedades físicas y químicas del suelo determinan la capacidad de este recurso para sostener la producción agrícola y controlar el comportamiento de los elementos metálicos presentes en él. Su estudio constituye un componente esencial de la investigación ambiental moderna y proporciona las bases científicas necesarias

para comprender la relación entre la contaminación del suelo, la absorción de metales por las plantas y los riesgos asociados al consumo de alimentos producidos en ecosistemas agrícolas como los de la Amazonía peruana.

1.2.3. Metales pesados de importancia ambiental

Los metales pesados constituyen uno de los grupos de contaminantes de mayor interés dentro de las ciencias ambientales debido a su elevada persistencia, estabilidad química y capacidad para acumularse en los diferentes componentes de los ecosistemas. A diferencia de otros contaminantes orgánicos que pueden degradarse con el tiempo, los metales permanecen durante largos periodos en el ambiente, circulando entre el suelo, el agua, los organismos vivos y la atmósfera mediante procesos naturales y antrópicos. Esta característica ha motivado el desarrollo de numerosas investigaciones destinadas a comprender su comportamiento, sus efectos ecológicos y los riesgos que representan para la producción agrícola y la salud humana.

El interés científico por estos elementos ha aumentado considerablemente durante las últimas décadas como consecuencia del incremento de las actividades industriales, agrícolas, urbanas y extractivas, las cuales han favorecido su incorporación a los ecosistemas. En los sistemas agrícolas, el suelo constituye el principal reservorio de metales pesados, desde donde pueden ser absorbidos por las raíces de las plantas e incorporarse progresivamente a la cadena alimentaria. Por ello, la evaluación de estos elementos se ha convertido en una prioridad dentro de los programas de monitoreo ambiental y de seguridad alimentaria.

Desde el punto de vista químico, los metales pesados comprenden un conjunto de elementos que presentan características físicas particulares, principalmente una elevada densidad y un comportamiento químico que favorece su permanencia en el ambiente. De acuerdo con la literatura especializada, se consideran metales pesados aquellos elementos cuya densidad es igual o superior a 5 g/cm³ en estado elemental o cuyo número atómico es superior a 20, excluyendo a los metales alcalinos y alcalinotérreos. Aunque su presencia en la corteza terrestre representa una proporción relativamente pequeña, su importancia ambiental radica en la facilidad con la que pueden incorporarse a los sistemas biológicos y producir efectos tóxicos cuando alcanzan concentraciones elevadas.

No todos los metales presentes en el ambiente poseen el mismo comportamiento biológico. Algunos de ellos son considerados micronutrientes esenciales porque participan en procesos metabólicos indispensables para el desarrollo de los organismos vivos. Entre estos se encuentran el hierro, el cobre, el manganeso y el zinc, elementos que intervienen como cofactores enzimáticos, participan en reacciones de oxidación-reducción y contribuyen al funcionamiento normal de numerosos procesos fisiológicos. Sin embargo, la misma literatura señala que estos oligoelementos solo resultan beneficiosos cuando se encuentran dentro de determinados rangos de concentración; una vez superados estos límites, pueden adquirir un comportamiento tóxico y alterar el metabolismo celular.

En contraste, existen otros metales cuya función biológica no ha sido demostrada y que son considerados altamente tóxicos para los organismos vivos. Entre ellos destacan el cadmio, el mercurio, el plomo, el antimonio y el bismuto, elementos capaces de alterar procesos metabólicos esenciales, afectar la fisiología de diferentes órganos y comprometer el funcionamiento de diversos sistemas biológicos. Debido a estas características, la presencia de estos metales en los suelos agrícolas constituye un motivo de especial preocupación, ya que pueden ser absorbidos por los cultivos y representar un riesgo potencial para la salud humana mediante el consumo de alimentos contaminados.

Uno de los aspectos más importantes relacionados con los metales pesados es su capacidad para incorporarse a los ciclos biogeoquímicos. Una vez depositados en el suelo, estos elementos pueden permanecer inmovilizados durante largos periodos o movilizarse dependiendo de las condiciones físico-químicas del medio. Factores como el pH, la textura, la materia orgánica, la humedad y el potencial de oxidación-reducción modifican su disponibilidad para las plantas, favoreciendo o limitando su absorción. Esta dinámica explica por qué un mismo metal puede presentar comportamientos diferentes según las características del ecosistema donde se encuentra.

La investigación científica también ha demostrado que el origen de los metales presentes en el suelo puede ser tanto natural como antropogénico. Entre las fuentes naturales destacan la meteorización de las rocas, la actividad volcánica y diversos procesos geoquímicos que liberan elementos minerales al ambiente. Sin embargo, en las

últimas décadas las actividades humanas se han convertido en la principal fuente de incorporación de metales a los ecosistemas agrícolas. La minería, la industria, el uso de fertilizantes fosfatados, ciertos plaguicidas, la disposición inadecuada de residuos y las emisiones atmosféricas representan algunos de los principales mecanismos mediante los cuales estos elementos alcanzan los suelos destinados a la producción de alimentos.

La evidencia obtenida en la Amazonía peruana confirma la importancia ambiental de estos elementos. El monitoreo realizado por la Autoridad Nacional del Agua en cuerpos de agua de la cuenca del río Nanay registró concentraciones de mercurio, plomo y zinc superiores a los Estándares de Calidad Ambiental establecidos para ecosistemas acuáticos. El estudio señaló que el mercurio presenta una marcada afinidad por los materiales arcillosos y la materia orgánica presente en los sedimentos, mientras que el plomo se asocia principalmente a partículas minerales y materia orgánica suspendida. Asimismo, el zinc mostró una elevada afinidad por los óxidos de hierro y manganeso, favoreciendo su acumulación en determinados ambientes. Estos resultados evidencian la importancia de comprender el comportamiento ambiental de cada metal para interpretar su movilidad dentro del sistema suelo-planta.

Diversas investigaciones desarrolladas en el Perú también han confirmado la presencia de metales pesados en suelos agrícolas y cultivos alimenticios. Los estudios realizados en la Cuenca del río Moche identificaron concentraciones importantes de hierro, plomo, cadmio, cobre, zinc y arsénico tanto en aguas como en suelos agrícolas, además de detectar la presencia de hierro en cultivos de *Manihot esculenta*. Estos hallazgos demostraron que los metales presentes en el ambiente pueden incorporarse a las especies vegetales y resaltaron la necesidad de fortalecer el monitoreo ambiental de las zonas destinadas a la producción de alimentos.

La importancia ambiental de estos elementos también se refleja en los estudios realizados sobre cultivos destinados al consumo humano. La investigación desarrollada en el distrito de San Martín de Pangoa determinó concentraciones de plomo superiores a los límites permitidos en la mayoría de las muestras de yuca evaluadas, lo que puso de manifiesto el riesgo potencial que representa la transferencia de metales desde el suelo hacia los alimentos. Los autores concluyeron que la presencia de plomo en *Manihot esculenta* puede constituir un problema relevante para la salud del consumidor,

reforzando la necesidad de controlar permanentemente la calidad de los cultivos agrícolas.

En el presente estudio se consideran siete metales de especial interés ambiental: hierro (Fe), cobre (Cu), cromo (Cr), manganeso (Mn), zinc (Zn), cadmio (Cd) y plomo (Pb). La selección de estos elementos responde tanto a su importancia ecológica como a su relevancia para la seguridad alimentaria. Mientras que hierro, cobre, manganeso y zinc desempeñan funciones biológicas esenciales cuando se encuentran en concentraciones adecuadas, el cadmio y el plomo son reconocidos por su elevada toxicidad, incluso en bajas concentraciones. El cromo, por su parte, presenta un comportamiento particular debido a que su toxicidad depende del estado de oxidación en que se encuentre, razón por la cual constituye uno de los elementos de mayor interés dentro de las evaluaciones ambientales.

La creciente preocupación por los efectos de estos metales ha motivado el establecimiento de Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para suelos agrícolas. En el Perú, dichos estándares fijan valores de referencia para elementos como cadmio, cromo y plomo, proporcionando criterios técnicos para evaluar la calidad del suelo y determinar la necesidad de implementar medidas de prevención o remediación ambiental. Estos instrumentos constituyen una base fundamental para la gestión sostenible de los recursos agrícolas y para la protección de la salud de la población.

En síntesis, los metales pesados representan un grupo de elementos de gran relevancia ambiental debido a su persistencia, movilidad y capacidad para incorporarse a los sistemas biológicos. La evidencia científica demuestra que su comportamiento depende de la interacción entre las propiedades del suelo, las características de las especies vegetales y las condiciones ambientales presentes en cada ecosistema. Comprender estas características constituye un requisito indispensable para interpretar los procesos de transferencia suelo-planta y evaluar los riesgos asociados a la producción de alimentos en regiones de alta importancia agrícola como la Amazonía peruana.

1.2.4. Factores que influyen en la movilidad y disponibilidad de los metales

La presencia de metales pesados en un suelo agrícola no constituye, por sí sola, un indicador suficiente para determinar el riesgo de contaminación de los cultivos. Más importante que la concentración total de un metal es la fracción que permanece disponible para ser absorbida por las raíces de las plantas. Esta condición depende de un conjunto de procesos físicos, químicos y biológicos que regulan la movilidad de los elementos dentro del suelo y determinan su incorporación al sistema suelo-planta. Por esta razón, el estudio de la movilidad y la biodisponibilidad de los metales se ha convertido en uno de los principales campos de investigación dentro de las ciencias ambientales y agronómicas.

La movilidad puede definirse como la capacidad que posee un metal para desplazarse dentro del perfil del suelo, ya sea disuelto en la solución del suelo o asociado a partículas minerales y materia orgánica. Por su parte, la disponibilidad hace referencia a la fracción del metal que puede ser absorbida por el sistema radical de las plantas y participar posteriormente en los procesos fisiológicos del cultivo. Ambos procesos están estrechamente relacionados y dependen de múltiples factores ambientales que actúan de manera simultánea.

Entre todos ellos, el **pH del suelo** es considerado el factor de mayor influencia sobre la movilidad de los metales. La acidez o alcalinidad modifica la forma química en que estos elementos se encuentran presentes y determina su grado de solubilidad. En términos generales, los suelos con reacción ácida favorecen la liberación de numerosos metales hacia la solución del suelo, incrementando su disponibilidad para las plantas. Por el contrario, cuando el pH aumenta, muchos metales precipitan o quedan adsorbidos sobre las partículas minerales, disminuyendo su movilidad. El documento base de esta investigación señala expresamente que el proceso de absorción de metales por las plantas se ve favorecido por el **pH ácido**, condición característica de numerosos suelos amazónicos.

Esta condición adquiere especial importancia en la Amazonía peruana, donde predominan suelos naturalmente ácidos. En estos ecosistemas, la elevada pluviosidad favorece el lavado de bases intercambiables y contribuye al mantenimiento de condiciones de acidez que modifican el comportamiento de numerosos elementos

químicos. Como consecuencia, algunos metales incrementan su solubilidad y pueden incorporarse con mayor facilidad al sistema radical de especies agrícolas ampliamente distribuidas en la región, como *Manihot esculenta*. Precisamente, la investigación señala que la yuca se desarrolla en suelos amazónicos cuyas características de pH, textura arcillosa y contenido de sales pueden representar un riesgo potencial para la salud humana cuando favorecen la presencia de metales en el cultivo.

Otro factor determinante corresponde a la **textura del suelo**, definida por la proporción relativa de arena, limo y arcilla. Los suelos con elevado contenido de arcillas poseen una mayor superficie específica y una mayor capacidad para retener cationes metálicos mediante procesos de adsorción. En consecuencia, los metales permanecen con menor movilidad y su disponibilidad para las plantas puede disminuir. En contraste, los suelos arenosos presentan menor capacidad de retención, favoreciendo el desplazamiento de los metales mediante procesos de lixiviación. El documento base destaca que la textura constituye uno de los factores que favorecen la absorción de metales por las plantas cuando interactúa con condiciones de acidez del suelo.

La **materia orgánica** representa otro componente fundamental dentro de la dinámica de los metales. Los compuestos orgánicos poseen numerosos sitios activos capaces de formar complejos con diferentes elementos químicos. Dependiendo de las condiciones ambientales, estos complejos pueden inmovilizar temporalmente los metales o facilitar su transporte dentro del perfil del suelo. En consecuencia, la materia orgánica puede actuar tanto como un mecanismo de protección frente a la contaminación como un factor que incrementa la movilidad de determinados elementos.

La importancia de la materia orgánica fue evidenciada en el monitoreo realizado por la Autoridad Nacional del Agua en la cuenca del río Nanay. Los resultados indicaron que el mercurio presenta afinidad por los materiales arcillosos y por la materia húmica presente en los sedimentos, mientras que el plomo se asocia principalmente a la materia orgánica y a partículas minerales suspendidas. Asimismo, el zinc mostró una elevada afinidad por los óxidos de hierro y manganeso presentes en el ambiente acuático. Estas observaciones permiten comprender que la movilidad de los metales depende en gran medida de las interacciones químicas que establecen con los componentes del suelo.

Otro aspecto relevante corresponde a la **capacidad de intercambio catiónico**, propiedad que expresa la habilidad del suelo para retener e intercambiar iones positivos. Los suelos con alta capacidad de intercambio presentan una mayor cantidad de sitios de adsorción donde los metales pueden permanecer retenidos temporalmente. Sin embargo, cambios en el pH o en la composición química de la solución del suelo pueden liberar estos elementos nuevamente, incrementando su disponibilidad para las plantas.

La **humedad del suelo** constituye igualmente un factor decisivo en la movilidad de los metales. El agua actúa como el principal medio de transporte para los elementos disueltos y permite su desplazamiento hacia las raíces mediante procesos de difusión y flujo de masas. En regiones tropicales, donde las precipitaciones son elevadas, las variaciones en la humedad modifican continuamente la concentración de la solución del suelo, favoreciendo tanto la redistribución de nutrientes como el transporte de metales dentro del perfil edáfico.

Asociado a este proceso se encuentra la **lixiviación**, fenómeno mediante el cual el agua arrastra sustancias solubles desde los horizontes superficiales hacia capas más profundas del suelo. En agroecosistemas sometidos a fertilización intensiva, la lixiviación puede alterar significativamente el equilibrio químico del suelo y modificar la distribución de los metales presentes. La literatura utilizada en esta investigación señala que la fertilización favorece la lixiviación, rompe el equilibrio natural del agroecosistema y puede afectar la estabilidad del sistema agrícola cuando no es manejada adecuadamente.

Las **condiciones de oxidación y reducción** también modifican el comportamiento de numerosos metales. En ambientes donde predominan condiciones reductoras, como ocurre frecuentemente en suelos saturados de agua, algunos elementos cambian su estado de oxidación y alteran significativamente su solubilidad. Estas transformaciones químicas pueden incrementar o disminuir la disponibilidad de determinados metales dependiendo del elemento considerado y de las condiciones ambientales predominantes.

Las **características fisiológicas de las especies vegetales** representan otro componente esencial dentro del proceso de movilidad y disponibilidad. No todas las

plantas responden de la misma manera frente a la presencia de metales en el suelo. Algunas especies desarrollan mecanismos fisiológicos que limitan la absorción de determinados elementos, mientras que otras presentan una elevada capacidad para incorporarlos y acumularlos en diferentes órganos. El documento base destaca que la sensibilidad frente a los metales varía según la especie vegetal y señala que las plantas vasculares figuran entre las más tolerantes, lo que explica las diferencias observadas en la acumulación de metales entre distintos cultivos agrícolas.

En este contexto, *Manihot esculenta* constituye una especie de particular interés científico debido a su adaptación a los suelos amazónicos y a la importancia alimentaria de sus raíces. Diversos estudios citados en la investigación han demostrado que esta especie puede contener concentraciones elevadas de determinados metales, situación que ha motivado el desarrollo de investigaciones orientadas a comprender los mecanismos de absorción y acumulación bajo diferentes condiciones ambientales. Finalmente, la **actividad humana** constituye uno de los factores externos que mayor influencia ejerce sobre la movilidad de los metales. Las labores agrícolas, la aplicación de fertilizantes, el uso de plaguicidas, la irrigación, el manejo del suelo y otras prácticas productivas modifican continuamente las condiciones físico-químicas del agroecosistema. Estas intervenciones pueden alterar el equilibrio natural del suelo, favorecer la incorporación de nuevos metales y modificar la disponibilidad de aquellos que ya se encuentran presentes en el ambiente.

En síntesis, la movilidad y la disponibilidad de los metales en el suelo son el resultado de la interacción permanente entre las propiedades del suelo, las condiciones ambientales y las características fisiológicas de las especies vegetales. Factores como el pH, la textura, la materia orgánica, la humedad, la capacidad de intercambio catiónico, la lixiviación y la actividad biológica determinan el comportamiento de estos elementos y condicionan su incorporación a los cultivos. Comprender esta dinámica constituye un aspecto fundamental para interpretar los procesos de transferencia suelo-planta y evaluar los riesgos asociados a la producción de alimentos en los ecosistemas agrícolas de la Amazonía peruana.

1.2.5. Contaminación del suelo y riesgos ambientales

La contaminación del suelo representa uno de los principales desafíos ambientales del siglo XXI debido a sus efectos sobre la productividad agrícola, la conservación de los ecosistemas y la salud humana. A diferencia de otros componentes ambientales, el suelo posee una limitada capacidad de recuperación frente a la acumulación de contaminantes, por lo que los procesos de degradación suelen manifestarse de forma lenta y persistente. Esta característica convierte a los suelos agrícolas en sistemas especialmente vulnerables cuando son expuestos de manera continua a sustancias potencialmente tóxicas, entre ellas los metales pesados.

Desde una perspectiva ambiental, la contaminación del suelo puede definirse como la alteración de sus propiedades físicas, químicas o biológicas ocasionada por la incorporación de sustancias capaces de modificar su funcionamiento natural. Cuando esta alteración compromete la fertilidad del suelo, afecta la biodiversidad o favorece la transferencia de contaminantes hacia los organismos vivos, el problema deja de ser exclusivamente agronómico para convertirse en una amenaza para la sostenibilidad de los ecosistemas y la seguridad alimentaria.

En los sistemas agrícolas, la contaminación del suelo posee una importancia particular debido a que constituye el punto de partida de numerosos procesos ecológicos. El suelo funciona como reservorio de agua, nutrientes y elementos minerales indispensables para el crecimiento vegetal; sin embargo, también puede almacenar contaminantes que permanecen activos durante largos periodos. Entre ellos, los metales pesados ocupan un lugar prioritario debido a que no experimentan procesos de degradación biológica y pueden acumularse progresivamente conforme aumenta la presión de las actividades humanas sobre el ambiente.

La investigación que sustenta esta obra señala que la tecnología moderna y las actividades desarrolladas por el ser humano representan una fuente importante de contaminación de los suelos mediante la incorporación de metales pesados. Estos elementos permanecen disponibles en el ambiente y son posteriormente absorbidos por las plantas, iniciando un proceso de transferencia hacia las cadenas tróficas. Este fenómeno adquiere especial relevancia en los sistemas agrícolas, donde los cultivos constituyen el principal vínculo entre el suelo y la alimentación humana.

Uno de los aspectos más preocupantes de la contaminación por metales es su capacidad para permanecer durante largos periodos en el suelo. A diferencia de otros contaminantes orgánicos, estos elementos no desaparecen por acción de microorganismos ni mediante procesos naturales de degradación. Por el contrario, pueden permanecer retenidos en partículas minerales, materia orgánica o sedimentos durante décadas, movilizándose únicamente cuando cambian las condiciones físico-químicas del medio. Esta persistencia explica por qué la contaminación del suelo constituye un problema acumulativo cuyos efectos pueden manifestarse muchos años después de haberse producido la incorporación inicial de los contaminantes.

Las fuentes de contaminación son diversas y responden tanto a procesos naturales como a actividades antropogénicas. Entre estas últimas destacan la minería, la industria, la expansión urbana, la disposición inadecuada de residuos, la aplicación intensiva de fertilizantes y plaguicidas, así como determinadas prácticas agrícolas que modifican el equilibrio químico del suelo. Estas actividades incrementan progresivamente la concentración de metales pesados en el ambiente y alteran la dinámica natural de los agroecosistemas, favoreciendo su incorporación a los cultivos.

La literatura revisada también destaca que la sostenibilidad de los sistemas agrícolas depende de conservar el equilibrio ecológico del suelo. Desde la perspectiva de la ecoagronomía, el manejo agrícola debe procurar minimizar los impactos sobre la fertilidad del suelo y preservar sus funciones ecológicas, considerando que la producción de alimentos posee una dimensión no solo económica, sino también ambiental y social. La conservación del suelo constituye, por tanto, un requisito indispensable para garantizar la sostenibilidad de los sistemas productivos y proteger la calidad de vida de las poblaciones que dependen directamente de ellos.

Los riesgos derivados de la contaminación del suelo no se limitan exclusivamente a la pérdida de productividad agrícola. La acumulación de metales puede alterar profundamente la estructura y el funcionamiento de los ecosistemas. Diversos estudios han demostrado que el desarrollo de determinadas especies vegetales modifica las condiciones del suelo donde coexisten múltiples organismos, generando cambios en las interacciones ecológicas que regulan la estabilidad y productividad del sistema. Cuando los contaminantes alteran estas relaciones, disminuye la capacidad del

ecosistema para mantener su equilibrio natural y aumentan las posibilidades de degradación ambiental.

En los agroecosistemas, estos efectos se intensifican debido a la intervención permanente del ser humano. La producción agrícola exige favorecer determinadas especies vegetales, reducir la diversidad biológica y aplicar prácticas de manejo que modifican continuamente las condiciones naturales del suelo. Como consecuencia, los agroecosistemas presentan menor estabilidad ecológica que los ecosistemas naturales y dependen en mayor medida de las decisiones adoptadas durante su manejo. La literatura señala que la fertilización favorece procesos de lixiviación, rompe el equilibrio natural del sistema y hace que la sostenibilidad del agroecosistema dependa de la capacidad para mantener la resistencia frente a perturbaciones, la estabilidad ecológica, la productividad y el balance de nutrientes.

Uno de los principales riesgos ambientales derivados de la contaminación por metales es su incorporación a la cadena alimentaria. Cuando estos elementos alcanzan concentraciones biodisponibles, pueden ser absorbidos por las raíces y acumularse en diferentes órganos de las plantas. La investigación base destaca que actualmente no existe un control sistemático de fitocontaminantes en numerosos alimentos de origen agrícola y señala que diferentes estudios han encontrado concentraciones elevadas de metales en *Manihot esculenta*. Esta situación representa un motivo de preocupación debido a que la yuca constituye uno de los principales alimentos de consumo en la Amazonía peruana.

El riesgo ambiental adquiere una dimensión aún mayor cuando se consideran las características propias de los ecosistemas amazónicos. La investigación señala que *Manihot esculenta* se desarrolla en suelos cuyos valores de pH, textura arcillosa y contenido de sales pueden favorecer la presencia de metales potencialmente peligrosos para la salud humana. Asimismo, advierte que elementos como plomo, mercurio y arsénico pueden incorporarse a los alimentos producidos en estos sistemas agrícolas, convirtiéndose en una fuente continua de exposición para la población que los consume.

La evidencia científica también ha documentado riesgos ambientales asociados a la contaminación de cuerpos de agua vinculados a los sistemas agrícolas. El monitoreo

realizado por la Autoridad Nacional del Agua en la cuenca del río Nanay registró concentraciones de mercurio, plomo y zinc superiores a los Estándares de Calidad Ambiental para la conservación del ambiente acuático. Los investigadores señalaron que estos metales presentan afinidad por sedimentos, materia orgánica y partículas minerales, favoreciendo su permanencia en el ambiente y aumentando la probabilidad de incorporarse posteriormente a los sistemas agrícolas circundantes.

Las investigaciones desarrolladas sobre cultivos alimenticios también han puesto de manifiesto las implicancias sanitarias derivadas de la contaminación del suelo. En el estudio realizado sobre diez variedades de yuca comercializadas en el distrito de San Martín de Pangoa se determinó que el 90 % de las muestras superaban el límite permisible para plomo establecido por el Codex Alimentarius. Los autores concluyeron que la presencia de este metal en la yuca puede repercutir directamente sobre la salud del consumidor, reforzando la necesidad de implementar programas permanentes de monitoreo ambiental en las zonas agrícolas.

Frente a esta problemática, la comunidad científica ha promovido el desarrollo de tecnologías orientadas a reducir la contaminación del suelo y restaurar los ecosistemas degradados. Entre ellas destaca la **fitorremediación**, considerada una técnica limpia, sostenible y de bajo costo que utiliza determinadas especies vegetales para eliminar, inmovilizar o disminuir la toxicidad de los contaminantes presentes en el suelo. Asimismo, la existencia de plantas hiperacumuladoras capaces de absorber grandes cantidades de metales sin comprometer su desarrollo abre nuevas perspectivas para la recuperación ambiental de áreas contaminadas. Con el propósito de prevenir estos riesgos, el Estado peruano ha establecido Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para suelos agrícolas, definiendo valores de referencia para elementos como cadmio, cromo y plomo. Estos estándares constituyen herramientas fundamentales para evaluar el estado de conservación del suelo, identificar procesos de contaminación y orientar las acciones de gestión ambiental necesarias para proteger la producción agrícola y la salud pública.

En síntesis, la contaminación del suelo representa un problema ambiental de gran complejidad debido a la persistencia de los metales pesados, su capacidad para movilizarse dentro del ecosistema y su potencial incorporación a la cadena alimentaria.

La evidencia científica demuestra que los riesgos ambientales asociados trascienden la pérdida de fertilidad del suelo e incluyen alteraciones en los ecosistemas, afectaciones a la biodiversidad, disminución de la calidad de los alimentos y posibles consecuencias para la salud humana. En este contexto, la evaluación de la contaminación del suelo constituye un componente esencial para comprender la dinámica de los metales en los sistemas agrícolas amazónicos y desarrollar estrategias que favorezcan una agricultura sostenible y una adecuada protección de la seguridad alimentaria.

1.2.6. Normativa y estándares de calidad ambiental para suelos agrícolas

La protección de los suelos agrícolas constituye uno de los principales desafíos de la gestión ambiental contemporánea. La creciente presión ejercida por las actividades agrícolas, industriales, mineras y urbanas ha incrementado la necesidad de establecer instrumentos técnicos y normativos que permitan evaluar el estado de conservación de los suelos y prevenir los efectos derivados de la acumulación de sustancias potencialmente tóxicas. En este contexto, los estándares de calidad ambiental representan una herramienta fundamental para determinar cuándo la presencia de determinados elementos químicos puede comprometer la productividad agrícola, el equilibrio de los ecosistemas y la seguridad alimentaria.

Los Estándares de Calidad Ambiental (ECA) constituyen valores de referencia establecidos sobre bases científicas que permiten evaluar la calidad de un componente ambiental mediante la comparación entre las concentraciones observadas y los niveles considerados aceptables para proteger la salud humana y el ambiente. En el caso de los suelos agrícolas, estos estándares facilitan la identificación de procesos de contaminación, orientan la toma de decisiones en materia de gestión ambiental y sirven como referencia para el diseño de programas de monitoreo y remediación.

El establecimiento de estos estándares responde al reconocimiento de que el suelo es un recurso natural estratégico para el desarrollo sostenible. Además de sustentar la producción agrícola, el suelo participa en procesos ecológicos esenciales como el reciclaje de nutrientes, la regulación del ciclo hidrológico, el almacenamiento de carbono y el mantenimiento de la biodiversidad. Cuando estos procesos son alterados por la acumulación de metales pesados u otros contaminantes, pueden producirse

efectos negativos que trascienden el ámbito agrícola y afectan directamente la salud de los ecosistemas y de las poblaciones humanas.

En el Perú, los Estándares de Calidad Ambiental para suelo fueron establecidos con el propósito de preservar la calidad de este recurso y garantizar que su utilización no represente riesgos para la salud ni para el ambiente. Estos estándares consideran diferentes usos del suelo, entre ellos el uso agrícola, reconociendo que los niveles aceptables de determinados contaminantes pueden variar dependiendo de la finalidad para la cual el suelo es utilizado.

El documento base de esta investigación presenta los valores de referencia establecidos para algunos de los principales metales de importancia ambiental en suelos agrícolas. De acuerdo con el Decreto Supremo N.º 012-2017-MINAM, los parámetros considerados incluyen cadmio, cromo y plomo, estableciendo límites específicos para cada uno de ellos. En el caso del cadmio, el estándar corresponde a 1,4 mg/kg; para el plomo se establece un valor de 70 mg/kg; mientras que para el cromo total se indica que este parámetro no resulta aplicable en la categoría de uso agrícola considerada por la norma, manteniéndose únicamente el valor correspondiente al cromo hexavalente cuando su evaluación resulta necesaria. Estos valores constituyen referencias técnicas para determinar el estado ambiental de los suelos destinados a la producción agrícola.

La existencia de estándares ambientales responde a la necesidad de prevenir la incorporación de contaminantes a la cadena alimentaria. Cuando un suelo presenta concentraciones de metales superiores a los valores establecidos, aumenta la probabilidad de que estos elementos se encuentren disponibles para ser absorbidos por las plantas, especialmente cuando predominan condiciones ambientales que favorecen su movilidad. Sin embargo, es importante señalar que el simple hecho de superar un estándar no implica necesariamente que exista una afectación inmediata sobre los cultivos, ya que la absorción depende también de factores como el pH, la textura, la materia orgánica y las características fisiológicas de cada especie vegetal.

La normativa ambiental peruana también reconoce la estrecha relación existente entre la calidad del suelo y la calidad del agua utilizada en las actividades agrícolas. Por esta razón, los Estándares de Calidad Ambiental para agua establecen parámetros

específicos para el riego de vegetales, diferenciando entre aguas destinadas al riego restringido y aquellas utilizadas en riego no restringido. Esta clasificación considera el tipo de cultivo, la forma de consumo de los alimentos y el grado de contacto que el agua mantiene con las partes comestibles de las plantas.

Para las aguas destinadas al riego de vegetales, la normativa peruana establece valores máximos para diversos metales de importancia ambiental. Entre ellos se encuentran el cadmio (0,01 mg/L), cobre (0,2 mg/L), cromo total (0,1 mg/L), hierro (5 mg/L), manganeso (0,2 mg/L), plomo (0,05 mg/L) y zinc (2 mg/L). Estos parámetros buscan reducir la posibilidad de que los metales presentes en el agua de riego sean incorporados progresivamente al suelo y posteriormente absorbidos por los cultivos agrícolas.

De igual manera, la legislación nacional contempla estándares específicos para la conservación del ambiente acuático, particularmente en ecosistemas sensibles como lagos, lagunas y ríos amazónicos. Para estos cuerpos de agua se establecen límites mucho más estrictos para elementos como cadmio, cobre, cromo, plomo y zinc, debido a la importancia ecológica de estos ecosistemas y a la necesidad de preservar la biodiversidad que albergan. Esta diferenciación evidencia que la gestión ambiental debe considerar las particularidades de cada ecosistema y el uso específico de los recursos naturales.

La importancia de estos estándares quedó reflejada en el monitoreo realizado por la Autoridad Nacional del Agua en la cuenca del río Nanay. En dicho estudio se registraron concentraciones de mercurio, plomo y zinc superiores a los Estándares de Calidad Ambiental para cuerpos de agua destinados a la conservación del ambiente acuático. Los investigadores señalaron que estas concentraciones podrían estar asociadas a procesos naturales de interacción entre sedimentos, materia orgánica y partículas minerales, así como a diversas actividades desarrolladas en la zona de estudio. Este antecedente evidencia la utilidad de los estándares ambientales como herramientas para identificar situaciones que requieren atención y monitoreo permanente.

Más allá de establecer límites numéricos, la normativa ambiental constituye un instrumento para orientar la gestión sostenible de los recursos naturales. Los Estándares de Calidad Ambiental facilitan la evaluación periódica de los suelos agrícolas, permiten comparar resultados obtenidos en diferentes investigaciones y proporcionan criterios objetivos para determinar la necesidad de implementar medidas de prevención, mitigación o remediación cuando se detectan niveles elevados de contaminación.

En investigaciones relacionadas con la seguridad alimentaria, como la que da origen a la presente obra, los estándares ambientales adquieren una importancia estratégica. La comparación entre las concentraciones de metales determinadas en el suelo y los valores establecidos por la normativa permite interpretar adecuadamente los resultados obtenidos y valorar el grado de riesgo asociado a la producción agrícola. Asimismo, constituyen un punto de referencia indispensable para analizar la posible transferencia de metales hacia especies de importancia alimentaria como *Manihot esculenta* y para establecer recomendaciones orientadas a proteger tanto la calidad de los cultivos como la salud de las poblaciones consumidoras.

En síntesis, la normativa y los Estándares de Calidad Ambiental representan el marco técnico y legal que sustenta la evaluación de los suelos agrícolas. Su aplicación permite proteger un recurso esencial para la producción de alimentos, fortalecer los programas de vigilancia ambiental y promover prácticas agrícolas sostenibles. En el contexto de la Amazonía peruana, donde las características naturales del suelo y la creciente presión sobre los recursos hacen indispensable un monitoreo permanente, estos instrumentos adquieren una relevancia aún mayor al proporcionar las bases para una gestión ambiental basada en evidencia científica y orientada a garantizar la seguridad alimentaria y la conservación de los ecosistemas.

El análisis desarrollado a lo largo de este capítulo permite comprender que el suelo agrícola constituye mucho más que el espacio físico donde se establecen los cultivos. Se trata de un sistema dinámico en el que interactúan procesos físicos, químicos y biológicos que determinan la disponibilidad de nutrientes, la movilidad de los elementos químicos y, en consecuencia, la calidad ambiental de los sistemas productivos. La conservación de este recurso resulta indispensable para garantizar una

agricultura sostenible, preservar el equilibrio de los ecosistemas y asegurar la producción de alimentos inocuos para la población.

La revisión de la evidencia científica demuestra que los metales pesados representan uno de los principales desafíos ambientales de la agricultura moderna. Su persistencia en el suelo, la capacidad para movilizarse bajo determinadas condiciones y su potencial incorporación a la cadena alimentaria han convertido a estos elementos en objeto de permanente investigación. Asimismo, los estudios analizados evidencian que la presencia de metales en el suelo no depende únicamente de fuentes de contaminación antrópica, sino también de las características naturales de cada ecosistema, razón por la cual su comportamiento debe interpretarse considerando las propiedades físicas y químicas propias del suelo y las condiciones ambientales donde se desarrollan los cultivos.

De igual manera, quedó establecido que factores como el pH, la textura, la materia orgánica, la humedad y la capacidad de intercambio catiónico desempeñan un papel determinante en la movilidad y biodisponibilidad de los metales. Estas propiedades regulan la fracción de los elementos que permanece disponible para ser absorbida por las plantas y explican por qué especies cultivadas bajo condiciones aparentemente similares pueden presentar niveles diferentes de acumulación. En consecuencia, la evaluación integral del suelo constituye un requisito indispensable para comprender los procesos de transferencia de metales hacia los organismos vegetales y valorar adecuadamente los riesgos asociados a la producción agrícola.

Otro aspecto relevante abordado en este capítulo corresponde al papel de la normativa ambiental como instrumento de gestión y prevención. Los Estándares de Calidad Ambiental proporcionan criterios técnicos para evaluar el estado de los suelos agrícolas y constituyen una referencia indispensable para interpretar los resultados obtenidos en investigaciones relacionadas con contaminación ambiental y seguridad alimentaria. Su aplicación permite identificar posibles escenarios de riesgo, fortalecer los programas de monitoreo y promover estrategias orientadas a la conservación de los recursos naturales y la protección de la salud pública.

En conjunto, los contenidos desarrollados proporcionan el soporte conceptual necesario para comprender la dinámica de los metales dentro del sistema suelo-planta y constituyen la base científica sobre la cual se desarrolla el caso de estudio presentado en esta obra. El conocimiento de las características del suelo y de los factores que regulan el comportamiento de los metales permite interpretar con mayor precisión los procesos de absorción y acumulación en los cultivos, facilitando una comprensión integral de la problemática ambiental abordada.

Sobre estos fundamentos se construye el siguiente capítulo, dedicado al estudio de *Manihot esculenta* (yuca) como especie de interés agrícola y alimentario. En él se analizan las características biológicas y agronómicas del cultivo, los mecanismos de absorción y transporte de metales, así como la evidencia científica relacionada con la bioacumulación y sus implicancias para la seguridad alimentaria. De esta manera, se completa el marco teórico necesario para comprender la relación entre la calidad del suelo y la presencia de metales en uno de los cultivos más representativos de la Amazonía peruana.

CAPÍTULO II

METALES EN MANIHOT ESCULENTA (YUCA)

La producción agrícola no solo depende de la calidad del suelo, sino también de la capacidad que poseen las especies vegetales para absorber, transformar y almacenar los elementos presentes en el ambiente donde se desarrollan. Esta interacción entre el suelo y la planta constituye uno de los procesos más importantes dentro de la agricultura y la ecología, ya que determina tanto el estado nutricional de los cultivos como la posible incorporación de sustancias potencialmente tóxicas a la cadena alimentaria. En este contexto, el estudio de la acumulación de metales en especies de consumo humano ha adquirido una relevancia creciente debido a sus implicancias para la seguridad alimentaria, la salud pública y la sostenibilidad de los sistemas agrícolas.

Entre los cultivos de mayor importancia para la región amazónica destaca *Manihot esculenta* Crantz, conocida comúnmente como yuca, una especie ampliamente distribuida en las zonas tropicales del mundo y considerada uno de los principales alimentos energéticos para millones de personas. Su elevada capacidad de adaptación a diferentes condiciones edafoclimáticas, especialmente a suelos de baja fertilidad y elevada acidez, ha permitido que este cultivo ocupe un lugar estratégico dentro de la agricultura familiar y de los sistemas productivos de la Amazonía peruana.

La importancia de la yuca trasciende su valor nutricional. En numerosas comunidades amazónicas constituye un elemento esencial de la identidad cultural, de la economía rural y de la seguridad alimentaria. Sus raíces tuberosas representan una fuente importante de carbohidratos, mientras que sus hojas son utilizadas en algunas regiones como complemento alimenticio y fuente de nutrientes. Esta amplia utilización convierte a *Manihot esculenta* en una de las especies agrícolas cuya calidad sanitaria resulta prioritaria para la protección de la salud de las poblaciones que dependen de ella como alimento cotidiano.

Sin embargo, la misma capacidad fisiológica que permite a la yuca absorber agua y nutrientes indispensables para su crecimiento también favorece la incorporación de otros elementos presentes en el suelo, entre ellos diversos metales. Dependiendo de las características del ambiente, estos elementos pueden permanecer retenidos en el sistema radical o ser transportados hacia los órganos aéreos y las raíces tuberosas, que constituyen la parte comestible de la planta. Esta condición convierte a la yuca en una especie de especial interés para evaluar los procesos de transferencia de metales desde el suelo hacia los alimentos y comprender los factores que condicionan su acumulación en los tejidos vegetales.

La investigación científica ha demostrado que la respuesta de las plantas frente a la presencia de metales es altamente variable. Algunas especies desarrollan mecanismos fisiológicos capaces de restringir la absorción o inmovilizar determinados elementos, mientras que otras presentan una elevada capacidad para acumularlos en concentraciones superiores a las observadas en el ambiente. Estas diferencias responden a factores genéticos, anatómicos y fisiológicos propios de cada especie, así como a las condiciones físico-químicas del suelo donde se desarrollan los cultivos.

En el caso de *Manihot esculenta*, diversos estudios han señalado que esta especie posee características que justifican su análisis desde una perspectiva ambiental. Su sistema radical, responsable de la formación de las raíces tuberosas, mantiene un contacto permanente con el suelo y participa activamente en la absorción de agua y minerales. En consecuencia, cualquier variación en la composición química del suelo puede reflejarse en el contenido de elementos presentes en los tejidos vegetales, especialmente cuando se trata de metales cuya disponibilidad aumenta bajo determinadas condiciones ambientales.

El documento que da origen a esta obra destaca precisamente que la yuca constituye un cultivo de gran importancia para la Amazonía peruana por su amplia demanda alimentaria y por su capacidad de desarrollarse en suelos donde previamente se ha reportado la presencia de metales. Asimismo, plantea la necesidad de conocer el comportamiento de esta especie frente a dichos elementos, considerando que sus raíces representan la parte destinada al consumo humano y que investigaciones anteriores han reportado concentraciones elevadas de algunos metales en este cultivo.

En los últimos años, el estudio de *Manihot esculenta* ha trascendido el ámbito estrictamente agrícola para integrarse a investigaciones relacionadas con la contaminación ambiental, la bioacumulación y la fitorremediación. La capacidad que posee esta especie para interactuar con los elementos presentes en el suelo ha despertado el interés de investigadores dedicados a comprender tanto los riesgos asociados al consumo de alimentos contaminados como las posibles aplicaciones ambientales de este cultivo en procesos de recuperación de suelos.

En este contexto, el presente capítulo desarrolla los principales fundamentos científicos relacionados con *Manihot esculenta* y su interacción con los metales presentes en el ambiente. En primer lugar, se revisan los antecedentes científicos más relevantes sobre la presencia de metales en especies vegetales y, particularmente, en la yuca. Posteriormente, se analizan las características botánicas y agronómicas de la especie, los mecanismos fisiológicos de absorción, transporte y acumulación de metales, así como los procesos de bioacumulación y fitorremediación descritos en la literatura especializada. Finalmente, se examinan las implicancias que estos procesos tienen para la seguridad alimentaria, la salud pública y la producción agrícola sostenible en la Amazonía peruana.

Los contenidos desarrollados en este capítulo complementan los fundamentos expuestos anteriormente sobre la dinámica de los metales en el suelo y proporcionan el soporte conceptual necesario para comprender el caso de estudio presentado en el capítulo siguiente. De esta manera, se establece el vínculo científico entre las características del suelo agrícola y la respuesta fisiológica de *Manihot esculenta*, permitiendo interpretar de forma integral la relación existente entre la calidad ambiental del suelo y la inocuidad de uno de los cultivos más representativos de la Amazonía peruana.

2.1. REFERENTES TEÓRICOS

El estudio de la interacción entre las especies vegetales y los metales presentes en el ambiente ha adquirido una importancia creciente dentro de las ciencias agrícolas, ambientales y alimentarias. Durante las últimas décadas, la investigación científica ha demostrado que las plantas no solo cumplen la función de transformar la energía solar en biomasa mediante la fotosíntesis, sino que también participan activamente en los

ciclos biogeoquímicos al absorber, transportar y acumular diversos elementos químicos presentes en el suelo. Esta capacidad fisiológica resulta indispensable para el crecimiento vegetal; sin embargo, también representa una vía potencial para la incorporación de sustancias tóxicas a la cadena alimentaria cuando los cultivos se desarrollan en ambientes contaminados.

Dentro de este contexto, *Manihot esculenta* (yuca) ha despertado un notable interés científico debido a su importancia económica, nutricional y social en las regiones tropicales y subtropicales del mundo. Su amplia distribución geográfica, su elevada capacidad de adaptación a diferentes condiciones edáficas y climáticas y su papel como alimento básico para millones de personas han motivado el desarrollo de numerosas investigaciones orientadas a comprender su comportamiento fisiológico frente a la presencia de metales pesados en el ambiente.

Las primeras investigaciones relacionadas con esta especie estuvieron orientadas principalmente al mejoramiento agronómico del cultivo, la productividad, la resistencia a plagas y enfermedades, así como al estudio de sus características botánicas y nutricionales. Sin embargo, el incremento de la contaminación ambiental y el creciente interés por la seguridad alimentaria ampliaron progresivamente el enfoque de estas investigaciones, incorporando el análisis de la calidad del suelo, la absorción de metales y la posible acumulación de estos elementos en las raíces destinadas al consumo humano.

La evidencia científica generada hasta la actualidad ha permitido demostrar que la respuesta de *Manihot esculenta* frente a los metales depende de múltiples factores, entre ellos la concentración de los elementos presentes en el suelo, las propiedades físico-químicas del ambiente, la disponibilidad de los metales y las características fisiológicas propias de la planta. Estas investigaciones han contribuido significativamente a comprender los mecanismos mediante los cuales determinados elementos pueden permanecer retenidos en el sistema radical o ser transportados hacia diferentes órganos vegetales, generando implicancias tanto para la productividad agrícola como para la inocuidad de los alimentos.

Paralelamente, diversos estudios han analizado el potencial de la yuca en procesos de bioacumulación y fitorremediación. Los resultados obtenidos indican que esta especie presenta características fisiológicas que le permiten interactuar activamente con los elementos presentes en el suelo, razón por la cual ha sido considerada tanto como un cultivo de interés para la evaluación de riesgos alimentarios como una posible alternativa biológica para procesos de recuperación ambiental. Estos avances han ampliado considerablemente el campo de investigación sobre *Manihot esculenta*, integrando conocimientos provenientes de la agronomía, la fisiología vegetal, la química ambiental y la ecotoxicología.

En el caso de la Amazonía peruana, la importancia de estos estudios resulta aún mayor debido a que la yuca constituye uno de los principales alimentos de la población y uno de los cultivos de mayor representatividad dentro de los sistemas agrícolas tradicionales. Las condiciones particulares de los suelos amazónicos, caracterizados por su elevada acidez y dinámica biogeoquímica, hacen indispensable comprender el comportamiento de esta especie frente a la presencia de metales y evaluar las posibles implicancias para la seguridad alimentaria de las comunidades que dependen de este cultivo.

La investigación que da origen a esta obra parte precisamente de esta necesidad científica. El documento base señala que, si bien existían estudios sobre la presencia de metales en diferentes especies vegetales de la zona de estudio, aún se desconocía el comportamiento de una especie agrícola de amplia demanda alimentaria como *Manihot esculenta*. Asimismo, destaca la importancia de conocer la capacidad de esta planta para absorber metales en suelos amazónicos donde previamente se habían reportado concentraciones elevadas de estos elementos, considerando que la raíz constituye la parte destinada al consumo humano.

En este apartado se presentan los principales referentes teóricos que sustentan el estudio de los metales en *Manihot esculenta*. La revisión de la literatura científica permite identificar la evolución del conocimiento sobre la interacción entre esta especie y los metales pesados, analizar los principales hallazgos obtenidos en investigaciones nacionales e internacionales y establecer el marco conceptual necesario para comprender el caso de estudio desarrollado en la presente obra. De esta manera, los

antecedentes aquí revisados constituyen la base científica que permitirá interpretar posteriormente la relación entre la concentración de metales en el suelo agrícola y su contenido en uno de los cultivos más importantes de la Amazonía peruana.

2.1.1. Investigaciones sobre metales en especies vegetales

El estudio de los metales pesados en especies vegetales constituye una de las principales líneas de investigación dentro de las ciencias ambientales y agronómicas. Su importancia radica en que las plantas representan el principal vínculo entre el suelo y la cadena alimentaria, actuando como organismos capaces de absorber, transformar y acumular diversos elementos presentes en el ambiente. Como consecuencia, la evaluación de la concentración de metales en los tejidos vegetales se ha convertido en un indicador ampliamente utilizado para estimar la calidad ambiental de los suelos agrícolas y los posibles riesgos asociados al consumo de alimentos de origen vegetal.

Las primeras investigaciones sobre esta temática estuvieron orientadas a determinar la capacidad de las plantas para absorber nutrientes esenciales desde el suelo. Sin embargo, el incremento de la contaminación ambiental durante las últimas décadas permitió evidenciar que los mismos mecanismos fisiológicos responsables de la absorción de minerales también favorecen la incorporación de metales potencialmente tóxicos. Este descubrimiento marcó un cambio importante en la investigación científica, ampliando el interés desde la nutrición vegetal hacia el estudio de la bioacumulación, la toxicidad ambiental y la seguridad alimentaria.

La evidencia científica ha demostrado que la respuesta de las especies vegetales frente a la presencia de metales pesados no es uniforme. Cada especie posee características fisiológicas propias que determinan su capacidad para absorber, transportar, inmovilizar o acumular determinados elementos. Algunas plantas desarrollan mecanismos que restringen el ingreso de metales hacia los tejidos comestibles, mientras que otras presentan una elevada eficiencia para absorberlos y almacenarlos en raíces, tallos, hojas o frutos. Estas diferencias fisiológicas explican por qué especies cultivadas bajo condiciones ambientales similares pueden presentar concentraciones muy distintas de un mismo metal.

La literatura especializada también reconoce la existencia de especies vegetales con elevada tolerancia frente a ambientes contaminados. Estas plantas poseen mecanismos bioquímicos que les permiten sobrevivir en suelos con concentraciones elevadas de metales mediante procesos de inmovilización, quelación o compartimentalización celular. Gracias a estas características, algunas especies han sido clasificadas como hiperacumuladoras y actualmente constituyen una de las principales alternativas biológicas para el desarrollo de programas de recuperación ambiental mediante técnicas de fitorremediación.

El documento base de la presente investigación señala que las plantas vasculares figuran entre los organismos con mayor tolerancia frente a la presencia de metales pesados, debido a que han desarrollado mecanismos fisiológicos que les permiten absorber, acumular e incluso inmovilizar determinados elementos sin comprometer significativamente su crecimiento. Asimismo, destaca que la sensibilidad frente a estos contaminantes varía considerablemente entre especies y depende, además, de factores ambientales como el pH del suelo, la textura y la disponibilidad de los elementos químicos.

El interés por comprender estas diferencias fisiológicas impulsó el desarrollo de investigaciones experimentales orientadas a comparar el comportamiento de diversas especies vegetales cultivadas en ambientes contaminados. Uno de los estudios citados en el documento base corresponde a la investigación realizada por Torres (2019), quien evaluó la capacidad de diferentes tubérculos para absorber cromo, plomo y zinc presentes en el suelo. En este estudio se analizaron especies como papa (*Solanum tuberosum*), rábano (*Raphanus sativus*), camote (*Ipomoea batatas*), malanga (*Colocasia esculenta*) y yuca (*Manihot esculenta*), encontrándose que todas presentaban capacidad para absorber metales, aunque con niveles de acumulación diferentes según la especie evaluada. A partir de estos resultados, el autor propuso el potencial uso de estos cultivos en programas de fitorremediación de suelos contaminados, resaltando especialmente la capacidad de algunas especies para extraer metales del ambiente.

Los resultados obtenidos por Torres representan uno de los antecedentes más relevantes para comprender que la absorción de metales constituye una característica fisiológica ampliamente distribuida entre las especies vegetales. Asimismo, ponen de

manifiesto que el comportamiento de una planta frente a un contaminante no depende únicamente de la concentración presente en el suelo, sino también de las características anatómicas y fisiológicas propias de cada cultivo. Esta evidencia ha servido como fundamento para el desarrollo de investigaciones orientadas a identificar especies bioindicadoras de contaminación ambiental y plantas con potencial para procesos de recuperación ecológica.

Otro aporte importante citado en la investigación corresponde al estudio desarrollado por Quinteros et al. (2017), quienes analizaron la evolución de la contaminación por metales pesados durante un periodo de treinta años en la Cuenca del río Moche, en la región La Libertad. Los investigadores evaluaron simultáneamente la presencia de hierro, plomo, cadmio, cobre, zinc y arsénico en aguas, suelos agrícolas y diversos cultivos, encontrando que *Manihot esculenta* presentaba concentraciones importantes de hierro en sus tejidos. A partir de estos resultados, los autores plantearon la posibilidad de que esta especie pueda participar en procesos de fitorremediación, además de resaltar la necesidad de evaluar continuamente la calidad de los cultivos desarrollados en ambientes potencialmente contaminados.

La investigación sobre especies vegetales también ha permitido ampliar el conocimiento acerca de los mecanismos de bioacumulación. Actualmente se reconoce que los metales pueden permanecer retenidos en el sistema radical o ser transportados hacia órganos aéreos mediante el xilema y el floema, dependiendo del tipo de elemento, de la especie vegetal y de las condiciones ambientales. Esta capacidad de redistribución explica por qué algunos cultivos concentran los metales principalmente en las raíces, mientras que otros presentan mayores concentraciones en hojas, tallos o frutos.

La importancia de estos procesos resulta especialmente relevante cuando las partes comestibles corresponden precisamente a los órganos donde ocurre la acumulación. En especies como la yuca, cuyo principal producto de consumo son las raíces tuberosas, la evaluación del contenido de metales adquiere una importancia sanitaria considerable, ya que cualquier incremento en la concentración de estos elementos puede traducirse en una mayor exposición de la población a través de la dieta.

Otro aspecto abordado por la literatura corresponde al aprovechamiento de especies vegetales y de sus residuos para procesos de descontaminación ambiental. En este sentido, el estudio realizado por Linares (2019) demostró que la cáscara de yuca presenta una elevada capacidad para adsorber plomo presente en aguas residuales, alcanzando porcentajes importantes de remoción del contaminante. Este hallazgo amplía la perspectiva tradicional sobre las especies vegetales, mostrando que no solo las plantas vivas pueden participar en procesos de recuperación ambiental, sino también los residuos generados durante su aprovechamiento agrícola.

Los avances científicos alcanzados durante los últimos años han permitido comprender que las especies vegetales cumplen una doble función dentro de los ecosistemas agrícolas. Por un lado, representan el principal mecanismo mediante el cual los nutrientes esenciales son incorporados a la biomasa vegetal y puestos a disposición de los organismos consumidores. Por otro, constituyen la principal vía de transferencia de metales pesados desde el suelo hacia la cadena alimentaria cuando estos elementos se encuentran biodisponibles. Esta dualidad explica el creciente interés por estudiar la fisiología vegetal desde una perspectiva ambiental y alimentaria.

En el contexto de la Amazonía peruana, estas investigaciones adquieren una relevancia aún mayor debido a la importancia de especies como *Manihot esculenta* dentro de la alimentación regional. Las características propias de los suelos amazónicos, sumadas a la elevada dependencia de las comunidades respecto a este cultivo, hacen indispensable comprender los mecanismos mediante los cuales la planta interactúa con los metales presentes en el ambiente. La información generada por investigaciones previas constituye, por tanto, una base científica esencial para interpretar los procesos de absorción y acumulación que posteriormente serán analizados en el caso de estudio desarrollado en la presente obra.

En síntesis, la evidencia científica demuestra que las especies vegetales desempeñan un papel determinante en la dinámica ambiental de los metales pesados. Su capacidad para absorber, transportar y acumular estos elementos ha permitido utilizarlas como bioindicadores de contaminación, herramientas para procesos de fitorremediación y objetos de estudio para la evaluación de la seguridad alimentaria. Los antecedentes revisados ponen de manifiesto que comprender la interacción entre las plantas y los

metales constituye un requisito indispensable para interpretar los procesos de transferencia suelo-planta y valorar adecuadamente los riesgos asociados a la producción agrícola en ecosistemas como la Amazonía peruana.

2.1.2. Estudios sobre contaminación en *Manihot esculenta*

El interés científico por la contaminación en *Manihot esculenta* ha aumentado de manera considerable durante las últimas décadas, principalmente debido a la importancia que este cultivo posee para la seguridad alimentaria de millones de personas en regiones tropicales y subtropicales. La yuca constituye una de las principales fuentes de carbohidratos para amplios sectores de la población y representa un componente esencial de la agricultura familiar en numerosos países de América Latina, África y Asia. En consecuencia, cualquier alteración en la calidad ambiental de los suelos donde se desarrolla este cultivo puede repercutir directamente en la inocuidad de los alimentos y en la salud de las poblaciones consumidoras.

Inicialmente, las investigaciones sobre *Manihot esculenta* estuvieron orientadas al mejoramiento genético, la productividad agrícola, la resistencia a plagas y enfermedades y el incremento del rendimiento de las raíces tuberosas. Sin embargo, el crecimiento de la contaminación ambiental y la necesidad de garantizar alimentos seguros impulsaron una nueva línea de investigación centrada en la capacidad de esta especie para absorber y acumular metales pesados presentes en el suelo. A partir de este cambio de enfoque, la yuca comenzó a ser estudiada no solo como un cultivo alimenticio, sino también como un organismo bioindicador de la calidad ambiental y como una especie de interés para comprender la dinámica de transferencia de contaminantes dentro del sistema suelo-planta.

La literatura científica coincide en señalar que *Manihot esculenta* posee una elevada capacidad de adaptación a diferentes tipos de suelos, incluyendo aquellos caracterizados por baja fertilidad y elevada acidez. Esta característica ha favorecido su expansión hacia regiones donde otros cultivos presentan limitaciones productivas. Sin embargo, esta misma adaptación implica que el sistema radical permanezca en contacto permanente con ambientes donde pueden encontrarse metales pesados en diferentes concentraciones, aumentando la posibilidad de absorción de estos elementos cuando las condiciones del suelo favorecen su disponibilidad.

Uno de los antecedentes más importantes citados en el documento base corresponde a la investigación desarrollada por Landeo (2018), quien evaluó la concentración de plomo y cadmio en diez variedades de *Manihot esculenta* comercializadas en el distrito de San Martín de Pangoa, región Junín. El estudio tuvo como propósito determinar si las raíces destinadas al consumo humano cumplían con los límites establecidos por el Codex Alimentarius para estos metales. Los resultados evidenciaron que el 90 % de las muestras presentaban concentraciones de plomo superiores a los valores permitidos, mientras que las concentraciones de cadmio permanecían dentro de los límites aceptables. Estos hallazgos constituyen una de las primeras evidencias nacionales que demuestran la presencia de metales pesados en raíces de yuca destinadas al consumo humano, resaltando la necesidad de fortalecer los programas de vigilancia sobre la calidad sanitaria de este cultivo.

La importancia de esta investigación radica en que pone de manifiesto la relación existente entre la calidad del ambiente donde se desarrolla el cultivo y la inocuidad del producto cosechado. Asimismo, evidencia que la evaluación de los suelos resulta insuficiente cuando no se complementa con el análisis directo de los tejidos vegetales, ya que la seguridad alimentaria depende finalmente de la concentración de contaminantes presentes en las partes destinadas al consumo humano.

Otro aporte relevante corresponde a la investigación desarrollada por Quinteros et al. (2017), quienes realizaron un análisis de la evolución de la contaminación por metales pesados durante treinta años en la Cuenca del río Moche. Este estudio evaluó simultáneamente aguas, suelos agrícolas y diferentes especies vegetales, encontrando concentraciones importantes de hierro, plomo, cadmio, cobre, zinc y arsénico. En el caso específico de *Manihot esculenta*, los autores identificaron concentraciones elevadas de hierro, planteando la posibilidad de que esta especie pueda participar en procesos naturales de fitorremediación debido a su capacidad para absorber determinados elementos presentes en el suelo. Este trabajo amplió el conocimiento sobre el comportamiento fisiológico de la yuca y abrió nuevas perspectivas para futuras investigaciones relacionadas con la gestión ambiental.

La investigación sobre contaminación en *Manihot esculenta* también ha evolucionado hacia el estudio de sus aplicaciones ambientales. En este sentido, Torres

(2019) evaluó la capacidad de diferentes tubérculos para absorber cromo, plomo y zinc presentes en suelos contaminados, incluyendo a la yuca entre las especies analizadas. Los resultados demostraron que *Manihot esculenta* posee capacidad para incorporar estos metales, aunque con niveles de acumulación diferentes respecto a otras especies como papa, camote, rábano y malanga. A partir de esta evidencia, el autor propuso el potencial empleo de estos cultivos en programas de fitorremediación, destacando la importancia de comprender los mecanismos fisiológicos responsables de la absorción y acumulación de metales.

Otro aspecto abordado por la investigación científica corresponde al aprovechamiento de los residuos derivados del cultivo de la yuca. Linares (2019) demostró que la cáscara de *Manihot esculenta* presenta una elevada capacidad para adsorber plomo presente en aguas residuales, alcanzando porcentajes significativos de remoción del contaminante. Este estudio representa un avance importante dentro de la investigación ambiental, ya que demuestra que los residuos agrícolas pueden convertirse en materiales de bajo costo con potencial aplicación en procesos de tratamiento de aguas contaminadas. De esta manera, la yuca deja de ser considerada únicamente como un cultivo alimenticio para adquirir también un valor estratégico dentro de las tecnologías de descontaminación ambiental.

La evidencia científica también ha permitido comprender que la acumulación de metales en *Manihot esculenta* depende de numerosos factores ambientales. Entre ellos destacan la concentración del metal en el suelo, el pH, la textura, el contenido de materia orgánica, la humedad y la disponibilidad química de los elementos. A estos factores se suman las características fisiológicas propias de la especie, que regulan los procesos de absorción radicular, transporte vascular y almacenamiento de los metales en los diferentes órganos de la planta. Esta interacción explica por qué investigaciones desarrolladas en diferentes regiones pueden reportar resultados variables aun cuando evalúan el mismo cultivo.

En el caso de la Amazonía peruana, el interés por estudiar *Manihot esculenta* adquiere una importancia particular debido a que este cultivo constituye uno de los principales alimentos de la población. La investigación que da origen al presente libro señala que, pese a la existencia de estudios sobre la presencia de metales en diferentes

componentes ambientales de la región, persistía la necesidad de conocer el comportamiento de una especie de amplio consumo como la yuca frente a estos contaminantes. Los autores destacan que la elevada demanda alimentaria de este cultivo y las características físico-químicas de los suelos amazónicos justifican plenamente el desarrollo de investigaciones orientadas a evaluar la relación entre la concentración de metales en el suelo y su contenido en la planta. Las investigaciones desarrolladas hasta la actualidad permiten afirmar que *Manihot esculenta* constituye una especie de gran interés para la evaluación de la contaminación ambiental. Su amplia distribución geográfica, su importancia alimentaria y su capacidad para interactuar con los elementos presentes en el suelo la convierten en un modelo adecuado para estudiar los procesos de transferencia de metales dentro de los sistemas agrícolas tropicales. Asimismo, los resultados obtenidos evidencian la necesidad de fortalecer los programas de monitoreo ambiental en zonas donde este cultivo representa un componente esencial de la dieta de la población.

En conjunto, la evidencia científica demuestra que los estudios sobre contaminación en *Manihot esculenta* han evolucionado desde evaluaciones centradas exclusivamente en la productividad agrícola hacia investigaciones integrales que relacionan la calidad del suelo, la fisiología vegetal, la bioacumulación de metales y la seguridad alimentaria. Este enfoque multidisciplinario constituye el fundamento científico de la presente obra, ya que permite comprender cómo las condiciones ambientales influyen sobre la calidad del cultivo y proporciona las bases conceptuales para interpretar los resultados obtenidos en el caso de estudio desarrollado en la Amazonía peruana.

2.1.3. Bioacumulación y seguridad alimentaria

La bioacumulación constituye uno de los procesos de mayor relevancia dentro de las ciencias ambientales debido a su estrecha relación con la contaminación de los ecosistemas y la seguridad alimentaria. Este fenómeno describe la capacidad que poseen los organismos vivos para absorber y almacenar sustancias químicas presentes en el ambiente a una velocidad superior a la de su eliminación. En el caso de las especies vegetales, la bioacumulación representa el mecanismo mediante el cual diversos elementos presentes en el suelo, entre ellos los metales pesados, son incorporados a los

tejidos de la planta y pueden, posteriormente, ingresar a la cadena alimentaria a través del consumo humano o animal.

El interés científico por este proceso ha aumentado significativamente durante las últimas décadas como consecuencia del incremento de las actividades industriales, agrícolas y extractivas, las cuales han favorecido la liberación de metales pesados al ambiente. A diferencia de otros contaminantes, estos elementos presentan una elevada persistencia y no son biodegradables, por lo que pueden permanecer durante largos periodos en el suelo y ser absorbidos progresivamente por las plantas. Esta característica convierte a la bioacumulación en uno de los principales mecanismos de transferencia de contaminantes desde los ecosistemas terrestres hacia los organismos vivos.

La bioacumulación comienza cuando los metales presentes en la solución del suelo entran en contacto con el sistema radical de las plantas. Durante este proceso, las raíces absorben agua y nutrientes esenciales para el crecimiento vegetal; sin embargo, los mismos mecanismos fisiológicos responsables de la incorporación de elementos indispensables también permiten el ingreso de metales potencialmente tóxicos cuando estos se encuentran biodisponibles. Una vez absorbidos, los metales pueden permanecer retenidos en las raíces o ser transportados mediante el sistema vascular hacia tallos, hojas, frutos o semillas, dependiendo de las características fisiológicas de cada especie y de las propiedades químicas de cada elemento.

La investigación científica ha demostrado que la capacidad de bioacumulación varía considerablemente entre especies vegetales. Algunas plantas desarrollan mecanismos fisiológicos que limitan la absorción o restringen el transporte de determinados metales hacia los órganos comestibles, mientras que otras presentan una elevada eficiencia para incorporarlos y almacenarlos en diferentes tejidos. Estas diferencias explican por qué cultivos desarrollados sobre suelos con concentraciones similares de metales pueden presentar niveles muy distintos de acumulación.

El documento base de esta investigación señala que las plantas vasculares poseen una notable tolerancia frente a los metales pesados y que su sensibilidad depende tanto de las características fisiológicas propias de cada especie como de factores ambientales relacionados con el suelo. Asimismo, indica que el pH, la textura y

otras propiedades físico-químicas condicionan significativamente la absorción de estos elementos, favoreciendo los procesos de bioacumulación cuando existen condiciones adecuadas para su movilidad.

La literatura especializada también reconoce que la bioacumulación no debe interpretarse exclusivamente como un fenómeno perjudicial. Desde el punto de vista ecológico, este proceso forma parte del funcionamiento normal de los ecosistemas, ya que permite la incorporación de micronutrientes esenciales como hierro, cobre, manganeso y zinc, indispensables para el desarrollo de las plantas. El problema surge cuando las concentraciones de estos elementos superan los niveles fisiológicamente requeridos o cuando la planta incorpora metales sin función biológica conocida, como el plomo y el cadmio, los cuales pueden producir efectos tóxicos tanto en los organismos vegetales como en quienes consumen dichos cultivos. El documento base distingue claramente entre los oligoelementos esenciales y aquellos metales considerados altamente tóxicos, resaltando que estos últimos representan un riesgo potencial para la salud humana debido a su capacidad de acumulación en los tejidos biológicos.

En el caso específico de *Manihot esculenta*, la bioacumulación adquiere una importancia especial debido a que la raíz constituye el principal órgano de consumo humano. Cualquier metal absorbido por el sistema radical tiene la posibilidad de permanecer almacenado en los tejidos tuberosos que posteriormente forman parte de la alimentación cotidiana de la población. Esta característica convierte a la yuca en una especie de gran interés para evaluar los riesgos asociados a la contaminación de los suelos agrícolas.

Uno de los estudios más relevantes citados en el documento corresponde a la investigación desarrollada por Landeo (2018), quien evaluó la concentración de plomo y cadmio en diez variedades de yuca comercializadas en el distrito de San Martín de Pangoa. Los resultados demostraron que el 90 % de las muestras presentaban concentraciones de plomo superiores a los límites máximos establecidos por el Codex Alimentarius, mientras que los niveles de cadmio permanecían dentro de los valores permitidos. Esta evidencia constituye una demostración clara del proceso de bioacumulación y pone de manifiesto que la presencia de metales en los alimentos

representa un problema real para la seguridad alimentaria cuando los cultivos provienen de ambientes contaminados.

La investigación realizada por Quinteros et al. (2017) aporta igualmente evidencia sobre este fenómeno. Al evaluar la evolución de la contaminación por metales pesados en la Cuenca del río Moche, los autores identificaron concentraciones importantes de hierro en *Manihot esculenta*, además de detectar la presencia de diversos metales en aguas y suelos agrícolas. Estos resultados permitieron establecer una relación entre la composición química del ambiente y la capacidad de la planta para incorporar determinados elementos, fortaleciendo el conocimiento sobre los mecanismos de transferencia suelo-planta y sobre el comportamiento fisiológico de la especie frente a ambientes contaminados.

Las investigaciones experimentales también han demostrado que la bioacumulación depende de las características propias de cada cultivo. Torres (2019) comparó la capacidad de diferentes tubérculos para absorber cromo, plomo y zinc, encontrando diferencias significativas entre especies como papa, camote, rábano, malanga y yuca. Los resultados evidenciaron que cada planta presenta mecanismos fisiológicos particulares para absorber y acumular metales, lo que confirma que la bioacumulación constituye un proceso altamente específico y condicionado tanto por factores genéticos como ambientales.

La bioacumulación posee una estrecha relación con el concepto de **seguridad alimentaria**, entendido como la condición mediante la cual todas las personas tienen acceso permanente a alimentos suficientes, inocuos y nutritivos que satisfacen sus necesidades alimenticias y contribuyen a una vida saludable. Este concepto trasciende la simple disponibilidad de alimentos y considera también su calidad sanitaria, aspecto fundamental cuando se evalúan cultivos desarrollados sobre suelos potencialmente contaminados.

En este contexto, la inocuidad alimentaria constituye uno de los pilares de la seguridad alimentaria. Un alimento puede presentar excelentes características nutricionales y, sin embargo, representar un riesgo para la salud cuando contiene concentraciones elevadas de contaminantes químicos. Los metales pesados figuran entre

los principales contaminantes de preocupación mundial debido a que pueden acumularse progresivamente en el organismo humano tras exposiciones prolongadas, incluso cuando las concentraciones individuales de cada alimento no resultan extremadamente elevadas.

La preocupación por esta problemática ha impulsado el establecimiento de límites máximos permisibles para diferentes metales en alimentos de consumo humano. El estudio citado en esta investigación utiliza como referencia los valores establecidos por el Codex Alimentarius para interpretar las concentraciones de plomo y cadmio determinadas en *Manihot esculenta*, evidenciando la importancia de estos estándares internacionales como herramientas para proteger la salud del consumidor y garantizar la calidad sanitaria de los productos agrícolas.

En regiones como la Amazonía peruana, donde la yuca constituye uno de los principales componentes de la dieta diaria, la bioacumulación adquiere una dimensión aún más relevante. La elevada frecuencia de consumo implica que pequeñas concentraciones de metales presentes en las raíces pueden representar una fuente continua de exposición para la población. Esta situación justifica plenamente el desarrollo de investigaciones orientadas a conocer el comportamiento de los metales en *Manihot esculenta* y evaluar su relación con las características de los suelos agrícolas donde se produce este cultivo.

La investigación que da origen a la presente obra parte precisamente de esta preocupación. El documento señala que la amplia demanda alimentaria de *Manihot esculenta* y la existencia de antecedentes relacionados con la presencia de metales en la región hacen necesario evaluar la relación entre la concentración de estos elementos en el suelo y su contenido en la planta, con el propósito de generar evidencia científica que contribuya a fortalecer la seguridad alimentaria y la gestión ambiental en la Amazonía peruana.

En síntesis, la bioacumulación representa el principal mecanismo mediante el cual los metales presentes en el suelo pueden incorporarse a la cadena alimentaria. La evidencia científica demuestra que este proceso depende de la interacción entre las propiedades del suelo, las características fisiológicas de las especies vegetales y las

condiciones ambientales del ecosistema. En el caso de *Manihot esculenta*, la importancia alimentaria de sus raíces convierte a la bioacumulación en un aspecto prioritario para la investigación científica, ya que de ella depende, en gran medida, la calidad sanitaria del cultivo y la protección de la salud de las poblaciones que lo consumen de forma habitual.

2.1.4. Aplicaciones de la yuca en estudios ambientales

Durante las últimas décadas, *Manihot esculenta* ha dejado de ser considerada únicamente como un cultivo de importancia alimentaria para convertirse en una especie de creciente interés dentro de las ciencias ambientales. Su amplia distribución geográfica, su capacidad de adaptación a diferentes condiciones edafoclimáticas y su interacción permanente con el suelo han motivado el desarrollo de investigaciones orientadas a comprender su papel en procesos de monitoreo ambiental, bioacumulación de contaminantes y recuperación de ecosistemas degradados. Como consecuencia, la yuca ha adquirido una doble importancia: por un lado, como alimento estratégico para la seguridad alimentaria y, por otro, como una herramienta biológica para evaluar y gestionar la calidad ambiental.

El interés científico por esta especie surge a partir del reconocimiento de que las plantas constituyen uno de los principales indicadores del estado de conservación de los ecosistemas. Debido a que mantienen un contacto permanente con el suelo mediante su sistema radical, las especies vegetales reflejan las condiciones físico-químicas del ambiente donde se desarrollan. Esta característica permite utilizarlas como organismos bioindicadores capaces de evidenciar la presencia de contaminantes, especialmente metales pesados, antes de que estos produzcan alteraciones visibles en los ecosistemas o representen riesgos significativos para la población.

En este contexto, *Manihot esculenta* presenta características que la convierten en una especie particularmente adecuada para investigaciones ambientales. Se trata de un cultivo ampliamente distribuido en regiones tropicales, con una elevada capacidad de adaptación a suelos ácidos y de baja fertilidad, condiciones características de gran parte de la Amazonía peruana. Además, su sistema radical permanece en contacto directo con el suelo durante todo el ciclo de cultivo, favoreciendo la absorción de agua, nutrientes y otros elementos presentes en la solución del suelo. Esta interacción convierte a la yuca

en un organismo de interés para estudiar los procesos de transferencia de metales entre el ambiente y las plantas.

El documento base de la presente investigación destaca precisamente que *Manihot esculenta* constituye uno de los cultivos más importantes de la Amazonía debido a su amplia demanda alimentaria y a su capacidad para desarrollarse bajo las condiciones edáficas propias de esta región. Asimismo, señala que la escasa información existente sobre el comportamiento de esta especie frente a los metales pesados justificó el desarrollo de investigaciones destinadas a comprender la relación entre la calidad del suelo y el contenido de estos elementos en la planta.

Una de las aplicaciones más importantes de la yuca dentro de los estudios ambientales corresponde a su utilización como **bioindicador de contaminación**. Las investigaciones realizadas en diferentes regiones han demostrado que la concentración de determinados metales presentes en las raíces puede reflejar las condiciones químicas del suelo donde se desarrolla el cultivo. En este sentido, el análisis de los tejidos vegetales complementa la evaluación directa del suelo, proporcionando información acerca de la fracción de metales que realmente ha sido absorbida por la planta y que potencialmente puede incorporarse a la cadena alimentaria.

La investigación desarrollada por Landeo (2018) constituye un claro ejemplo de esta aplicación. Al determinar la concentración de plomo y cadmio en diez variedades de *Manihot esculenta* comercializadas en el distrito de San Martín de Pangoa, el estudio evidenció que la mayoría de las muestras presentaban concentraciones de plomo superiores a los límites establecidos por el Codex Alimentarius. Más allá del resultado sanitario, esta investigación demuestra el valor de la yuca como indicador biológico de la calidad ambiental, ya que las concentraciones determinadas en las raíces permitieron inferir la existencia de condiciones ambientales que favorecían la presencia y transferencia de metales hacia el cultivo.

Otra importante línea de investigación ha explorado el potencial de *Manihot esculenta* dentro de los procesos de **fitorremediación**, entendida como el conjunto de técnicas que utilizan plantas para remover, inmovilizar o transformar contaminantes presentes en el ambiente. La fitorremediación representa una alternativa sostenible

frente a los métodos convencionales de recuperación ambiental debido a su bajo costo, reducido impacto ecológico y facilidad de aplicación en grandes extensiones de terreno.

El documento base señala que diversas especies vegetales poseen la capacidad de absorber concentraciones elevadas de metales y que algunas de ellas han sido utilizadas para procesos de fitoextracción, fitoestabilización, fitovolatilización y rizodegradación. Estas técnicas aprovechan los mecanismos fisiológicos naturales de las plantas para disminuir progresivamente la carga contaminante presente en los suelos. Asimismo, se menciona que determinadas especies pueden llegar a acumular concentraciones superiores a cien veces las observadas normalmente en otras plantas, razón por la cual son denominadas hiperacumuladoras. En relación con *Manihot esculenta*, uno de los antecedentes más relevantes corresponde a la investigación desarrollada por Torres (2019), quien evaluó la capacidad de diferentes tubérculos para absorber cromo, plomo y zinc presentes en suelos contaminados. Los resultados demostraron que la yuca, junto con otras especies como papa, camote, rábano y malanga, posee capacidad para absorber estos elementos, aunque con niveles de acumulación variables según la especie. A partir de estos hallazgos, el autor planteó la posibilidad de emplear estos cultivos como alternativas biológicas para procesos de recuperación de suelos contaminados mediante técnicas de fitorremediación.

Otro aporte importante dentro de esta línea corresponde al estudio realizado por Quinteros et al. (2017), quienes analizaron la evolución de la contaminación por metales pesados en la Cuenca del río Moche durante un periodo de treinta años. Los investigadores identificaron concentraciones importantes de hierro en *Manihot esculenta* y sugirieron que esta especie podría participar en procesos naturales de remediación ambiental debido a su capacidad para incorporar determinados metales presentes en el suelo. Esta investigación amplió el conocimiento sobre el potencial ecológico de la yuca y fortaleció el interés científico por sus aplicaciones ambientales.

Las aplicaciones ambientales de la yuca no se limitan al estudio de la planta viva. Investigaciones recientes también han demostrado que los residuos generados durante su procesamiento poseen importantes propiedades para la remoción de contaminantes. Un ejemplo destacado corresponde al estudio desarrollado por Linares

(2019), quien evaluó la capacidad de adsorción de plomo utilizando cáscara de yuca como material biosorbente. Los resultados evidenciaron porcentajes elevados de remoción del metal presente en aguas residuales, demostrando que un residuo agrícola de bajo costo puede convertirse en una alternativa eficiente para el tratamiento de efluentes contaminados. Este trabajo representa un avance importante dentro del aprovechamiento integral del cultivo y refuerza el potencial ambiental de *Manihot esculenta* más allá de su función alimentaria.

En los ecosistemas amazónicos, las aplicaciones ambientales de la yuca adquieren una importancia estratégica debido a las características particulares de la región. Los suelos amazónicos presentan condiciones de acidez, elevada humedad y abundante materia orgánica que modifican la movilidad y disponibilidad de los metales presentes en el ambiente. Bajo estas condiciones, especies ampliamente distribuidas como *Manihot esculenta* pueden convertirse en herramientas valiosas para evaluar la calidad ambiental y monitorear la posible transferencia de contaminantes hacia los alimentos.

Asimismo, el monitoreo ambiental realizado por la Autoridad Nacional del Agua en la cuenca del río Nanay evidenció concentraciones elevadas de mercurio, plomo y zinc en cuerpos de agua de la región, poniendo de manifiesto la necesidad de desarrollar investigaciones dirigidas a comprender cómo estos elementos pueden incorporarse a los sistemas agrícolas amazónicos. Aunque dicho estudio estuvo centrado en la calidad del agua, sus resultados refuerzan la importancia de utilizar especies agrícolas representativas, como la yuca, para evaluar la posible transferencia de metales hacia los cultivos de consumo humano.

Desde una perspectiva de gestión ambiental, las aplicaciones de *Manihot esculenta* también contribuyen al fortalecimiento de los programas de monitoreo y vigilancia ambiental. El análisis periódico del contenido de metales en este cultivo permite identificar cambios en la calidad del suelo, detectar posibles fuentes de contaminación y generar información útil para la toma de decisiones relacionadas con la protección de los recursos naturales y la seguridad alimentaria. Este enfoque resulta especialmente relevante en regiones donde la yuca constituye un alimento básico y donde la población depende directamente de la agricultura para su subsistencia.

En síntesis, la evidencia científica demuestra que *Manihot esculenta* ha adquirido un papel cada vez más relevante dentro de los estudios ambientales. Su utilización como bioindicador de contaminación, su potencial para procesos de fitorremediación y el aprovechamiento de sus residuos en tecnologías de tratamiento de aguas reflejan la versatilidad de esta especie y su contribución al desarrollo de estrategias sostenibles para la gestión ambiental. Estos antecedentes constituyen una base científica sólida para comprender el interés de la presente investigación, la cual analiza la relación entre la concentración de metales en el suelo y su contenido en *Manihot esculenta* cultivada en la Amazonía peruana, aportando evidencia que fortalece tanto el conocimiento científico como las acciones orientadas a proteger la seguridad alimentaria y la conservación de los ecosistemas agrícolas.

2.2. FUNDAMENTOS DE MANIHOT ESCULENTA

Manihot esculenta Crantz, conocida comúnmente como yuca, mandioca, casava o cassava, constituye una de las especies agrícolas de mayor importancia económica, social y alimentaria en las regiones tropicales del mundo. Su amplia capacidad de adaptación a diferentes condiciones ambientales, su elevado rendimiento energético y su resistencia a periodos de sequía y suelos de baja fertilidad han permitido que este cultivo se consolide como uno de los principales recursos alimentarios para millones de personas, especialmente en América Latina, África y Asia. Estas características han convertido a la yuca en objeto de numerosas investigaciones orientadas no solo a incrementar su productividad, sino también a comprender los procesos fisiológicos que determinan su crecimiento, desarrollo y respuesta frente a factores ambientales.

Desde el punto de vista científico, el conocimiento de las características biológicas y agronómicas de *Manihot esculenta* resulta indispensable para comprender los mecanismos mediante los cuales esta especie interactúa con el suelo. La absorción de agua, nutrientes y otros elementos presentes en el ambiente depende de una compleja red de procesos anatómicos, fisiológicos y bioquímicos que regulan el funcionamiento de la planta durante todo su ciclo de vida. En consecuencia, cualquier investigación relacionada con la presencia de metales pesados en este cultivo requiere previamente comprender la organización estructural de la especie y el comportamiento de su sistema

radical, principal órgano responsable de la incorporación de elementos minerales desde el suelo.

Uno de los aspectos que mayor interés ha despertado en la investigación científica corresponde precisamente a la capacidad fisiológica de la yuca para absorber y transportar diferentes elementos químicos. Al igual que otras especies vegetales, *Manihot esculenta* incorpora continuamente agua y nutrientes esenciales mediante procesos de absorción radicular. Sin embargo, estos mismos mecanismos pueden facilitar el ingreso de metales presentes en el suelo cuando las condiciones ambientales favorecen su disponibilidad. La distribución posterior de estos elementos hacia raíces, tallos y hojas depende de procesos internos de transporte y almacenamiento que han sido ampliamente estudiados dentro de la fisiología vegetal y que constituyen la base para comprender los fenómenos de bioacumulación descritos en investigaciones recientes.

El documento que da origen a la presente obra resalta la importancia de esta especie dentro de los sistemas agrícolas amazónicos, señalando que la yuca representa uno de los cultivos de mayor demanda alimentaria en la región y que sus raíces constituyen la principal parte destinada al consumo humano. Asimismo, destaca que la escasa información existente sobre el comportamiento de *Manihot esculenta* frente a los metales pesados justificó el desarrollo del estudio, especialmente considerando las características físico-químicas de los suelos amazónicos y la posibilidad de que estos elementos sean absorbidos por el cultivo.

La importancia de conocer los fundamentos biológicos de *Manihot esculenta* trasciende el ámbito estrictamente agrícola. En la actualidad, esta especie ocupa un lugar relevante dentro de investigaciones relacionadas con la seguridad alimentaria, la contaminación ambiental, la fisiología vegetal y la fitorremediación. Su capacidad para crecer en condiciones ambientales adversas, interactuar con diferentes elementos presentes en el suelo y producir un alimento de amplio consumo convierte a la yuca en un modelo de estudio para comprender la relación existente entre la calidad del ambiente y la inocuidad de los alimentos.

Desde una perspectiva agronómica, la adaptación de *Manihot esculenta* a suelos de baja fertilidad constituye una de sus principales ventajas productivas. No obstante, esta misma capacidad plantea interrogantes respecto a los mecanismos mediante los cuales la planta regula la absorción de elementos esenciales y potencialmente tóxicos. La evidencia científica disponible indica que factores como el pH, la textura, la humedad, la materia orgánica y la concentración de metales presentes en el suelo pueden modificar el comportamiento fisiológico de la especie y condicionar la acumulación de determinados elementos en las raíces tuberosas. Estos aspectos adquieren especial relevancia cuando la producción está destinada al consumo humano, ya que la calidad del cultivo depende directamente de las condiciones ambientales donde se desarrolla.

Las investigaciones desarrolladas durante los últimos años también han puesto de manifiesto que el conocimiento de la biología de la yuca resulta indispensable para interpretar adecuadamente los resultados obtenidos en estudios ambientales. La anatomía del sistema radical, la dinámica del transporte vascular, los procesos de almacenamiento de reservas y la distribución de nutrientes dentro de la planta influyen directamente sobre la forma en que los metales son absorbidos, movilizados y acumulados en los diferentes órganos vegetales. En consecuencia, el análisis de estas características constituye un componente esencial para comprender la transferencia de contaminantes desde el suelo hacia los alimentos.

En este apartado se desarrollan los principales fundamentos científicos relacionados con *Manihot esculenta* desde una perspectiva biológica, fisiológica y agronómica. Se abordan las características botánicas y agronómicas de la especie, los procesos de crecimiento y desarrollo, los mecanismos de absorción y transporte de metales, los fenómenos de bioacumulación y fitorremediación, así como la importancia económica y alimentaria del cultivo. Estos contenidos proporcionan el soporte conceptual necesario para interpretar el comportamiento de la yuca frente a la presencia de metales pesados y comprender la relación existente entre las propiedades del suelo, la fisiología vegetal y la seguridad alimentaria, aspectos que constituyen el eje central del caso de estudio desarrollado en el siguiente capítulo.

2.2.1. Características botánicas y agronómicas

Manihot esculenta Crantz, conocida comúnmente como yuca, mandioca o cassava, pertenece a la familia **Euphorbiaceae** y constituye una de las especies agrícolas de mayor importancia para las regiones tropicales del mundo. Su amplia distribución geográfica, su elevada capacidad de adaptación y su alto rendimiento energético la han convertido en uno de los cultivos estratégicos para la seguridad alimentaria de millones de personas. En América Latina, y particularmente en la Amazonía peruana, la yuca representa un alimento básico de consumo cotidiano y una fuente importante de ingresos para pequeños productores agrícolas, razón por la cual su estudio trasciende el ámbito agronómico para adquirir una notable relevancia ambiental, económica y social.

Desde el punto de vista botánico, *Manihot esculenta* es una planta perenne de porte arbustivo que, bajo condiciones de cultivo, suele manejarse como un cultivo anual o bianual dependiendo del destino de la producción y de las condiciones ambientales. Presenta un tallo erecto, semileñoso y ramificado, cuya altura puede variar entre uno y cuatro metros según la variedad cultivada, la fertilidad del suelo y las prácticas de manejo agronómico. El tallo constituye además el principal órgano utilizado para la propagación vegetativa del cultivo mediante estacas, técnica que permite conservar las características genéticas de las variedades y garantizar una producción uniforme.

Las hojas son alternas, simples y profundamente palmadas, generalmente compuestas por entre cinco y nueve lóbulos alargados. Estas estructuras representan el principal órgano fotosintético de la planta y desempeñan un papel esencial en la producción de carbohidratos que posteriormente serán almacenados en las raíces tuberosas. La intensidad de la actividad fotosintética depende de factores ambientales como la disponibilidad de agua, la radiación solar, la temperatura y el estado nutricional del cultivo, aspectos que influyen directamente sobre el rendimiento agrícola.

Uno de los componentes botánicos de mayor importancia corresponde al sistema radical. La yuca desarrolla inicialmente raíces fibrosas encargadas de absorber agua y nutrientes del suelo. Posteriormente, algunas de estas raíces experimentan un proceso de engrosamiento secundario hasta transformarse en raíces tuberosas de almacenamiento, donde se acumulan principalmente almidón y otros compuestos de reserva. Estas raíces

constituyen la parte comercial y alimentaria del cultivo, razón por la cual cualquier elemento absorbido desde el suelo puede llegar a concentrarse en los tejidos destinados al consumo humano.

Precisamente esta característica convierte a *Manihot esculenta* en una especie de gran interés dentro de los estudios ambientales. Debido a que las raíces permanecen en contacto directo con el suelo durante todo el ciclo de desarrollo, la planta mantiene una interacción constante con los elementos presentes en el ambiente edáfico. Como consecuencia, además de absorber nutrientes esenciales para su crecimiento, puede incorporar metales presentes en el suelo cuando estos se encuentran biodisponibles, situación que justifica la importancia de evaluar la calidad química de los sistemas agrícolas donde se desarrolla el cultivo. El documento base destaca que la elevada demanda alimentaria de la yuca y las características físico-químicas de los suelos amazónicos motivaron el desarrollo de investigaciones dirigidas a conocer el contenido de metales presentes en esta especie.

Desde una perspectiva taxonómica, *Manihot esculenta* pertenece al Reino **Plantae**, División **Magnoliophyta**, Clase **Magnoliopsida**, Orden **Malpighiales**, Familia **Euphorbiaceae**, Género **Manihot** y Especie *Manihot esculenta* Crantz. Esta clasificación refleja su pertenencia a uno de los grupos botánicos de mayor diversidad dentro de las regiones tropicales y explica algunas de sus características fisiológicas relacionadas con la tolerancia a condiciones ambientales adversas.

Agronómicamente, la yuca se caracteriza por poseer una extraordinaria capacidad de adaptación. Puede desarrollarse satisfactoriamente en suelos de fertilidad media o baja, soportar periodos prolongados de déficit hídrico y mantener niveles aceptables de producción bajo condiciones donde otros cultivos presentan limitaciones importantes. Estas cualidades han favorecido su expansión hacia regiones tropicales caracterizadas por elevadas temperaturas, abundantes precipitaciones y suelos ácidos, condiciones que predominan en gran parte de la Amazonía peruana.

El documento principal resalta precisamente que *Manihot esculenta* constituye uno de los cultivos más representativos de la región amazónica por su elevada demanda alimentaria y por su adaptación a las condiciones edáficas propias de este ecosistema.

Asimismo, señala que la investigación se desarrolló considerando la importancia de esta especie dentro de la producción agrícola regional y la necesidad de conocer su comportamiento frente a la presencia de metales pesados en el suelo.

Uno de los principales atributos agronómicos de la yuca es su eficiencia en el aprovechamiento de los recursos del suelo. Su sistema radical profundo le permite explorar un amplio volumen de suelo para obtener agua y nutrientes, lo que explica su capacidad para mantener la producción incluso bajo condiciones de limitada fertilidad. Sin embargo, esta misma característica incrementa la probabilidad de interacción con elementos químicos presentes en el perfil del suelo, incluidos diversos metales de importancia ambiental. Por esta razón, la fisiología radical de la yuca constituye un aspecto central dentro de las investigaciones relacionadas con contaminación ambiental y transferencia de metales hacia los alimentos.

El ciclo de cultivo varía dependiendo de la variedad y de las condiciones agroecológicas, aunque generalmente oscila entre ocho y doce meses. Durante este periodo la planta experimenta diferentes etapas de crecimiento, incluyendo establecimiento, desarrollo vegetativo, formación de raíces tuberosas y acumulación de reservas. La intensidad de los procesos fisiológicos desarrollados en cada etapa influye directamente sobre la absorción y redistribución de nutrientes y otros elementos minerales presentes en el suelo.

Desde el punto de vista productivo, la propagación de la yuca se realiza principalmente mediante estacas obtenidas de tallos maduros. Este método garantiza una rápida implantación del cultivo y permite conservar las características agronómicas de cada variedad. Asimismo, facilita la selección de materiales con mayor rendimiento, mejor adaptación ambiental y mayor resistencia a factores bióticos y abióticos.

La importancia agronómica de *Manihot esculenta* también se relaciona con su elevado rendimiento energético. Las raíces tuberosas poseen un alto contenido de almidón, convirtiéndose en una fuente importante de carbohidratos para la alimentación humana y animal. Además, la planta presenta múltiples usos industriales asociados a la producción de harinas, almidones, biocombustibles y otros derivados, lo que incrementa significativamente su valor económico dentro de las cadenas agroalimentarias.

Desde la perspectiva ambiental, las características botánicas de la yuca han despertado un creciente interés científico. Investigaciones citadas en el documento base demostraron que esta especie posee capacidad para absorber diversos metales presentes en el suelo, situación que ha permitido considerarla tanto como un cultivo de interés para evaluar riesgos asociados a la seguridad alimentaria como una posible alternativa para procesos de fitorremediación. Torres (2019) encontró que *Manihot esculenta* presenta capacidad para absorber cromo, plomo y zinc bajo condiciones experimentales, mientras que Quinteros et al. (2017) identificaron concentraciones importantes de hierro en esta especie durante el estudio realizado en la Cuenca del río Moche. Estos antecedentes evidencian que las características fisiológicas del cultivo favorecen su utilización en investigaciones relacionadas con la contaminación ambiental y la dinámica de los metales en los sistemas agrícolas. Asimismo, la investigación desarrollada por Landeo (2018) demostró la presencia de plomo y cadmio en raíces de *Manihot esculenta* destinadas al consumo humano, reforzando la necesidad de comprender en profundidad las características botánicas y fisiológicas de esta especie para interpretar adecuadamente los procesos de absorción y acumulación de metales. Estos resultados evidencian que la estructura radical de la planta, principal órgano de almacenamiento, desempeña un papel determinante en la transferencia de contaminantes desde el suelo hacia los alimentos.

En síntesis, las características botánicas y agronómicas de *Manihot esculenta* explican gran parte de su importancia dentro de la agricultura tropical y de los estudios ambientales. Su sistema radical especializado, su elevada adaptación a suelos amazónicos, su eficiencia fisiológica y el papel central que desempeñan sus raíces en la alimentación humana convierten a esta especie en un modelo de gran valor científico para comprender la interacción entre la calidad del suelo, la absorción de metales y la seguridad alimentaria. Estos fundamentos constituyen la base conceptual para analizar, en los siguientes apartados, los procesos fisiológicos que regulan el crecimiento del cultivo y los mecanismos responsables de la absorción, transporte y acumulación de metales en *Manihot esculenta*.

2.2.2. Crecimiento y desarrollo del cultivo

El crecimiento y desarrollo de *Manihot esculenta* constituyen procesos fisiológicos complejos que determinan la productividad del cultivo y su capacidad para adaptarse a diferentes condiciones ambientales. A lo largo de su ciclo biológico, la planta experimenta una serie de cambios morfológicos, anatómicos y metabólicos que permiten la formación de estructuras vegetativas y de almacenamiento, las cuales dependen de la interacción entre el potencial genético de la especie y las condiciones del ambiente donde se desarrolla. Comprender estos procesos resulta fundamental para interpretar el comportamiento de la yuca frente a la presencia de metales pesados, ya que la absorción y acumulación de estos elementos está estrechamente relacionada con el estado fisiológico de la planta y con la actividad de su sistema radical.

Desde el establecimiento del cultivo, *Manihot esculenta* presenta una elevada capacidad de adaptación a condiciones ambientales variables. A diferencia de muchas especies agrícolas propagadas por semillas, la yuca se reproduce principalmente mediante estacas obtenidas de tallos maduros. Este método de propagación vegetativa permite conservar las características genéticas de cada variedad, favorece una emergencia uniforme y reduce el tiempo necesario para el establecimiento del cultivo. Una vez sembradas las estacas, se inicia la emisión de nuevas raíces y brotes, marcando el comienzo del desarrollo vegetativo de la planta.

Durante las primeras semanas de crecimiento ocurre la formación del sistema radical primario, cuya función consiste en garantizar el suministro de agua y nutrientes indispensables para el establecimiento de la planta. Paralelamente, se desarrolla el tallo principal y comienzan a emerger las primeras hojas, responsables de iniciar la actividad fotosintética. En esta etapa, la disponibilidad de agua, oxígeno y nutrientes resulta determinante para asegurar un adecuado crecimiento inicial y favorecer la formación de un sistema radical vigoroso.

A medida que la planta avanza en su desarrollo, el sistema foliar incrementa progresivamente su capacidad fotosintética. Las hojas producen los carbohidratos que posteriormente serán transportados hacia las raíces mediante el floema, donde se almacenarán principalmente en forma de almidón. Este proceso constituye la base fisiológica del rendimiento del cultivo, ya que el crecimiento de las raíces tuberosas

depende directamente de la eficiencia fotosintética alcanzada por la planta durante las etapas vegetativas.

Uno de los procesos más característicos de *Manihot esculenta* corresponde precisamente a la diferenciación de las raíces de almacenamiento. No todas las raíces desarrolladas por la planta experimentan este proceso; únicamente un grupo reducido comienza a incrementar progresivamente su diámetro mediante la acumulación de almidón y otros compuestos de reserva. Estas raíces tuberosas representan el principal órgano de interés económico y alimentario, además de constituir la estructura donde pueden acumularse diversos elementos absorbidos desde el suelo.

Desde el punto de vista fisiológico, el desarrollo de las raíces tuberosas implica un incremento continuo en la actividad metabólica del sistema radical. Durante este periodo aumenta considerablemente la absorción de agua y minerales, situación que favorece tanto la incorporación de nutrientes esenciales como de otros elementos presentes en la solución del suelo. Esta característica adquiere especial importancia en investigaciones relacionadas con metales pesados, debido a que la fase de mayor crecimiento radical coincide con un incremento en la interacción entre la planta y el ambiente edáfico.

El documento base de la presente investigación resalta que *Manihot esculenta* constituye uno de los cultivos de mayor importancia para la Amazonía peruana debido a su amplia demanda alimentaria y a su capacidad para desarrollarse sobre suelos con características particulares, como elevada acidez, textura arcillosa y variaciones en el contenido de sales. Estas condiciones ambientales influyen directamente sobre el crecimiento del cultivo y sobre la disponibilidad de metales presentes en el suelo, aspectos que justifican la necesidad de estudiar la relación entre el desarrollo fisiológico de la planta y la acumulación de estos elementos.

El crecimiento de la yuca depende de diversos factores ambientales. La temperatura constituye uno de los principales reguladores del desarrollo vegetal, ya que controla la velocidad de los procesos metabólicos y la actividad fotosintética. De igual manera, la disponibilidad de agua condiciona la expansión celular, el transporte de nutrientes y la producción de biomasa. En regiones tropicales como la Amazonía

peruana, donde predominan temperaturas elevadas y abundantes precipitaciones, la especie encuentra condiciones favorables para expresar gran parte de su potencial productivo.

La fertilidad del suelo representa igualmente un factor determinante durante el desarrollo del cultivo. El crecimiento de *Manihot esculenta* requiere un suministro adecuado de macronutrientes como nitrógeno, fósforo y potasio, así como de micronutrientes indispensables para el funcionamiento enzimático y el metabolismo celular. Sin embargo, la disponibilidad de estos nutrientes depende de las propiedades físicas y químicas del suelo, particularmente del pH, la materia orgánica y la capacidad de intercambio catiónico, factores que también regulan la movilidad y biodisponibilidad de los metales pesados. El documento base señala que la absorción de metales se encuentra influenciada por el pH ácido y la textura del suelo, condiciones que caracterizan a muchos ecosistemas amazónicos.

A lo largo del ciclo del cultivo, la planta mantiene un intercambio continuo de sustancias con el suelo. Las raíces absorben diariamente grandes cantidades de agua y minerales para sostener el crecimiento vegetativo y la acumulación de reservas. Este proceso explica por qué la concentración de determinados elementos presentes en el suelo puede reflejarse posteriormente en los tejidos vegetales, especialmente cuando se trata de elementos con elevada disponibilidad química.

Diversas investigaciones citadas en el documento base han demostrado que *Manihot esculenta* posee capacidad para incorporar metales presentes en el ambiente durante su crecimiento. Torres (2019), al evaluar diferentes tubérculos cultivados en suelos contaminados, encontró que la yuca era capaz de absorber cromo, plomo y zinc, aunque con niveles variables respecto a otras especies agrícolas. Estos resultados evidencian que el crecimiento del sistema radical constituye un componente fundamental dentro de los procesos de transferencia de metales desde el suelo hacia la planta.

De manera similar, Quinteros et al. (2017) identificaron concentraciones importantes de hierro en *Manihot esculenta* durante el estudio realizado en la Cuenca del río Moche, sugiriendo que la especie posee mecanismos fisiológicos que favorecen

la incorporación de determinados elementos presentes en el ambiente. Los autores incluso plantearon la posibilidad de que la yuca participe en procesos de fitorremediación debido a su capacidad para absorber algunos metales presentes en el suelo.

La investigación desarrollada por Landeo (2018) aporta otra evidencia importante relacionada con el crecimiento del cultivo y la seguridad alimentaria. Al analizar raíces de yuca comercializadas en la región Junín, encontró concentraciones de plomo superiores a los límites establecidos por el Codex Alimentarius en la mayoría de las muestras evaluadas. Estos resultados indican que durante el desarrollo del cultivo pueden producirse procesos de absorción y almacenamiento de metales en las raíces tuberosas, reforzando la necesidad de comprender la fisiología del crecimiento para interpretar adecuadamente la dinámica de estos contaminantes.

Otro aspecto importante del desarrollo de *Manihot esculenta* corresponde a su capacidad para tolerar condiciones ambientales desfavorables. La especie presenta mecanismos fisiológicos que le permiten mantener la actividad metabólica durante periodos de déficit hídrico y desarrollarse sobre suelos de fertilidad limitada. Esta plasticidad fisiológica constituye una ventaja agronómica importante; sin embargo, también implica una mayor exposición prolongada del sistema radical a los elementos presentes en el suelo, incrementando la probabilidad de interacción con metales potencialmente tóxicos cuando estos se encuentran disponibles.

Desde una perspectiva agronómica, el momento de la cosecha representa la culminación del proceso de crecimiento y desarrollo del cultivo. La calidad de las raíces obtenidas depende del equilibrio alcanzado entre la producción de biomasa, la acumulación de reservas y las condiciones ambientales predominantes durante todo el ciclo vegetativo. En investigaciones relacionadas con contaminación ambiental, esta etapa adquiere especial importancia porque es el momento en que se determina la concentración final de metales presentes en las raíces destinadas al consumo humano.

En síntesis, el crecimiento y desarrollo de *Manihot esculenta* constituyen procesos fisiológicos estrechamente relacionados con la absorción de agua, nutrientes y otros elementos presentes en el suelo. Las características del sistema radical, la

formación de raíces tuberosas y la interacción permanente entre la planta y el ambiente explican la importancia de esta especie dentro de las investigaciones sobre transferencia de metales y seguridad alimentaria. Comprender las diferentes etapas del desarrollo del cultivo permite interpretar con mayor precisión los procesos de bioacumulación y proporciona el fundamento biológico necesario para analizar los mecanismos de absorción y transporte de metales que serán desarrollados en los apartados siguientes.

2.2.3. Absorción y transporte de metales en la planta

La absorción y el transporte de metales constituyen procesos fisiológicos esenciales para el desarrollo de las plantas y representan uno de los principales mecanismos mediante los cuales los elementos presentes en el suelo son incorporados a los tejidos vegetales. En condiciones normales, estos procesos permiten el ingreso de nutrientes minerales indispensables para el crecimiento, tales como hierro, zinc, cobre y manganeso, los cuales participan en numerosas reacciones metabólicas. Sin embargo, cuando el suelo contiene concentraciones elevadas de metales potencialmente tóxicos, los mismos mecanismos fisiológicos responsables de la nutrición vegetal pueden favorecer la incorporación de elementos como plomo, cadmio o cromo, generando procesos de acumulación que pueden afectar tanto a la planta como a los organismos que posteriormente la consumen.

Desde el punto de vista fisiológico, la absorción de metales comienza en el sistema radical. Las raíces constituyen el principal órgano de intercambio entre la planta y el suelo, ya que a través de ellas se produce la incorporación continua de agua y sustancias minerales presentes en la solución del suelo. Este proceso se desarrolla mediante mecanismos de transporte pasivo y activo, regulados por la actividad de las membranas celulares y por proteínas transportadoras especializadas que permiten el ingreso selectivo de determinados iones hacia los tejidos vegetales.

Las raíces no absorben directamente los metales presentes en las partículas sólidas del suelo, sino únicamente aquellos que se encuentran disueltos en la solución edáfica y que presentan condiciones adecuadas de biodisponibilidad. Por esta razón, la concentración total de un metal en el suelo no siempre guarda una relación directa con la cantidad absorbida por la planta. La disponibilidad de estos elementos depende de factores como el pH, la textura, la materia orgánica, la humedad y la capacidad de

intercambio catiónico, variables que modifican continuamente la composición química de la solución del suelo.

El documento base de la presente investigación destaca precisamente que la absorción de metales está condicionada por las características físico-químicas del suelo. Entre los factores de mayor influencia se encuentran el **pH ácido**, la textura del suelo y la sensibilidad propia de cada especie vegetal. Asimismo, señala que las plantas vasculares presentan diferentes niveles de tolerancia frente a los metales pesados y que su capacidad de absorción depende tanto de las condiciones ambientales como de sus características fisiológicas.

Una vez que los metales atraviesan la superficie radical, estos pueden seguir diferentes rutas dentro de la planta. Parte de los elementos permanece retenida en las paredes celulares o en los tejidos radicales como mecanismo de defensa fisiológica frente a posibles efectos tóxicos. Otra fracción continúa desplazándose hacia el cilindro vascular, donde es incorporada al sistema conductor para ser distribuida hacia los órganos superiores. La proporción de metales que sigue cada una de estas rutas depende del tipo de elemento, de la concentración presente en el suelo y de la capacidad fisiológica de la planta para regular su transporte interno.

El principal sistema responsable del transporte ascendente de los metales es el **xilema**, tejido vascular encargado de conducir agua y minerales desde las raíces hacia tallos, hojas y órganos de almacenamiento. El movimiento dentro del xilema ocurre gracias a la transpiración y al flujo continuo de agua generado por la evaporación en las hojas. De esta manera, los metales absorbidos pueden ser redistribuidos hacia diferentes partes de la planta, donde participan en procesos fisiológicos o permanecen almacenados.

Posteriormente, algunos elementos pueden ser movilizados mediante el **floema**, tejido encargado de transportar los productos de la fotosíntesis y otros compuestos orgánicos hacia los órganos de reserva. Este proceso adquiere especial importancia en *Manihot esculenta*, debido a que las raíces tuberosas representan el principal órgano de almacenamiento de carbohidratos y, simultáneamente, la parte destinada al consumo

humano. En consecuencia, determinados metales pueden llegar a concentrarse en estos tejidos durante el desarrollo del cultivo.

La fisiología de la planta incorpora además mecanismos de regulación destinados a minimizar los efectos tóxicos derivados de la acumulación de metales. Algunas especies producen compuestos quelantes que inmovilizan determinados elementos dentro de las células, mientras que otras favorecen su almacenamiento en vacuolas o en tejidos específicos donde generan menor daño fisiológico. Estos mecanismos explican las diferencias observadas entre especies respecto a su capacidad para tolerar ambientes contaminados.

En el caso de *Manihot esculenta*, la interacción entre el sistema radical y el suelo reviste especial importancia debido a que las raíces constituyen simultáneamente el órgano encargado de absorber nutrientes y el principal tejido de almacenamiento. Esta característica incrementa el interés científico por comprender los mecanismos de absorción y transporte de metales, ya que cualquier elemento incorporado durante el crecimiento del cultivo puede permanecer finalmente en la porción destinada al consumo humano.

Diversas investigaciones citadas en el documento base confirman la capacidad de la yuca para absorber diferentes metales presentes en el ambiente. Torres (2019), al evaluar diversas especies de tubérculos cultivadas sobre suelos contaminados, demostró que *Manihot esculenta* era capaz de incorporar cromo, plomo y zinc desde el suelo, aunque con niveles de acumulación diferentes respecto a otras especies agrícolas. Este estudio evidenció que la absorción constituye un proceso dependiente tanto de las condiciones del suelo como de las características fisiológicas propias de cada cultivo.

Resultados similares fueron obtenidos por Quinteros et al. (2017), quienes analizaron la evolución de la contaminación por metales pesados en la Cuenca del río Moche. Los investigadores identificaron concentraciones importantes de hierro en *Manihot esculenta*, además de detectar la presencia de diversos metales en aguas y suelos agrícolas. Estos hallazgos permitieron establecer que la planta posee mecanismos fisiológicos capaces de incorporar determinados elementos presentes en el ambiente y

plantearon incluso la posibilidad de utilizar esta especie en programas de fitorremediación.

Otra evidencia importante sobre los procesos de absorción fue reportada por Landeo (2018), quien encontró concentraciones elevadas de plomo en raíces de yuca comercializadas en la región Junín. El hecho de que los metales fueran detectados precisamente en el órgano de almacenamiento confirma que los procesos de absorción radicular y transporte interno permiten la incorporación de estos elementos hasta los tejidos destinados al consumo humano, reforzando la necesidad de monitorear permanentemente la calidad ambiental de los suelos agrícolas.

Las investigaciones realizadas en la Amazonía peruana también han resaltado la influencia de las condiciones edáficas sobre estos procesos fisiológicos. El documento base señala que la yuca se desarrolla en suelos caracterizados por elevada acidez y textura arcillosa, condiciones que pueden favorecer la disponibilidad de determinados metales y modificar su absorción por el sistema radical. Estas características explican la importancia de estudiar simultáneamente las propiedades del suelo y el comportamiento fisiológico de la planta para comprender adecuadamente los procesos de transferencia suelo-planta.

La absorción y transporte de metales también constituyen la base fisiológica de procesos de interés ambiental como la fitorremediación. El documento principal describe mecanismos como la fitoextracción, la fitoestabilización, la fitovolatilización y la rizodegradación, los cuales dependen directamente de la capacidad de las plantas para absorber, inmovilizar o transformar los metales presentes en el suelo. Asimismo, señala que algunas especies hiperacumuladoras pueden concentrar niveles excepcionalmente elevados de estos elementos sin comprometer significativamente su desarrollo, lo que demuestra la importancia de comprender la fisiología del transporte interno de metales para el desarrollo de estrategias de recuperación ambiental. Desde la perspectiva de la seguridad alimentaria, el conocimiento de estos mecanismos resulta indispensable. La cantidad de metales presente en las raíces de *Manihot esculenta* no depende únicamente de la concentración existente en el suelo, sino también de la eficiencia con que la planta absorbe, transporta, redistribuye y almacena dichos elementos durante su crecimiento. Por ello, comprender estos procesos permite

interpretar adecuadamente los resultados obtenidos en investigaciones ambientales y diseñar estrategias orientadas a reducir la incorporación de contaminantes en los cultivos destinados al consumo humano.

En síntesis, la absorción y el transporte de metales constituyen procesos fisiológicos fundamentales que explican la interacción permanente entre *Manihot esculenta* y el ambiente donde se desarrolla. La evidencia científica demuestra que la incorporación de estos elementos depende tanto de las características físico-químicas del suelo como de la fisiología propia de la planta, determinando finalmente la concentración de metales presente en las raíces tuberosas. Estos fundamentos representan un componente esencial para comprender la bioacumulación de metales en la yuca y constituyen la base científica del caso de estudio desarrollado en la presente obra.

2.2.4. Bioacumulación y fitorremediación

La bioacumulación y la fitorremediación constituyen dos de los procesos más importantes dentro de las ciencias ambientales modernas debido a su estrecha relación con la dinámica de los metales pesados en los ecosistemas. Aunque ambos fenómenos se encuentran directamente vinculados con la capacidad de las plantas para absorber elementos presentes en el suelo, representan procesos con finalidades distintas. Mientras la bioacumulación describe la incorporación y almacenamiento de sustancias químicas en los tejidos vegetales, la fitorremediación aprovecha precisamente esa capacidad fisiológica para reducir la contaminación ambiental mediante el uso de especies vegetales capaces de extraer, inmovilizar o transformar contaminantes presentes en el suelo y el agua.

El interés científico por estos procesos ha aumentado considerablemente durante las últimas décadas como consecuencia del incremento de la contaminación ambiental y de la necesidad de desarrollar tecnologías sostenibles para la recuperación de ecosistemas degradados. A diferencia de los métodos tradicionales de remediación, que suelen implicar elevados costos económicos y alteraciones importantes del suelo, la utilización de plantas representa una alternativa ecológica basada en procesos naturales, con menor impacto ambiental y mayores posibilidades de aplicación en grandes extensiones agrícolas.

La bioacumulación constituye el fundamento fisiológico sobre el cual se desarrollan las técnicas de fitorremediación. Este proceso ocurre cuando una planta absorbe elementos presentes en el suelo a través de su sistema radical y los almacena en diferentes órganos vegetales. En condiciones normales, dicho mecanismo permite la incorporación de nutrientes esenciales para el crecimiento, como hierro, zinc, manganeso y cobre. Sin embargo, cuando en el ambiente existen metales potencialmente tóxicos, estos también pueden ser absorbidos utilizando las mismas rutas fisiológicas destinadas a la nutrición mineral, favoreciendo su acumulación en raíces, tallos, hojas o frutos.

La magnitud de la bioacumulación depende de numerosos factores. Entre ellos destacan la concentración del metal en el suelo, su biodisponibilidad, las propiedades físico-químicas del ambiente y las características fisiológicas propias de la especie vegetal. Asimismo, la etapa de desarrollo del cultivo, la intensidad de la actividad metabólica y la duración de la exposición influyen significativamente sobre la cantidad de metales que finalmente permanece almacenada en los tejidos de la planta.

El documento base de esta investigación señala que las plantas presentan diferentes niveles de sensibilidad frente a los metales pesados y que la absorción se encuentra condicionada por factores como el **pH**, la textura del suelo y las características fisiológicas de cada especie. Asimismo, indica que las plantas vasculares constituyen uno de los grupos con mayor tolerancia frente a estos elementos, aspecto que explica su potencial utilización en procesos de recuperación ambiental.

Uno de los conceptos más importantes desarrollados en la literatura científica corresponde al de **plantas hiperacumuladoras**. Estas especies poseen la capacidad de absorber y concentrar cantidades excepcionalmente elevadas de determinados metales sin experimentar daños fisiológicos significativos. El documento base señala que estas plantas pueden acumular concentraciones superiores a cien veces las observadas normalmente en otras especies vegetales, gracias a mecanismos bioquímicos especializados que les permiten inmovilizar o detoxificar los metales en diferentes compartimentos celulares. Esta característica constituye el fundamento biológico de numerosas estrategias de fitorremediación utilizadas actualmente para la recuperación de ecosistemas contaminados.

La fitorremediación comprende un conjunto de técnicas que aprovechan las capacidades naturales de las plantas para disminuir la concentración o disponibilidad de contaminantes presentes en el ambiente. De acuerdo con el documento principal, los principales mecanismos incluyen la **fitoextracción**, la **fitoestabilización**, la **fitovolatilización** y la **rizodegradación**, cada uno de los cuales responde a diferentes procesos fisiológicos desarrollados por las especies vegetales.

La **fitoextracción** consiste en la absorción de metales por las raíces y su posterior transporte hacia los órganos aéreos de la planta. Una vez acumulados en hojas, tallos o raíces, los tejidos vegetales pueden ser cosechados y retirados del sitio contaminado, reduciendo progresivamente la concentración de contaminantes presentes en el suelo. Esta técnica resulta especialmente útil para metales que presentan elevada movilidad y que pueden ser incorporados eficientemente por determinadas especies vegetales.

Por su parte, la **fitoestabilización** busca inmovilizar los metales dentro del suelo mediante la acción del sistema radical. En este caso, las plantas reducen la movilidad de los contaminantes al favorecer su precipitación, adsorción o retención en la rizósfera, disminuyendo así el riesgo de dispersión hacia otros compartimentos ambientales. Esta estrategia resulta particularmente importante en áreas donde la extracción completa de los contaminantes no resulta viable, pero sí es posible reducir significativamente su biodisponibilidad.

Otro mecanismo descrito en la literatura corresponde a la **fitovolatilización**, proceso mediante el cual algunas especies absorben determinados elementos y los transforman en compuestos volátiles que posteriormente son liberados a la atmósfera. Aunque esta técnica solo resulta aplicable para un número reducido de elementos, representa una alternativa de interés para el tratamiento de ciertos contaminantes específicos.

Finalmente, la **rizodegradación** aprovecha la interacción entre las raíces y los microorganismos presentes en la rizósfera para favorecer la transformación o degradación de sustancias contaminantes. Aunque este mecanismo se utiliza principalmente para compuestos orgánicos, forma parte de las estrategias integrales de

fitorremediación descritas en la literatura especializada y contribuye al mejoramiento de la calidad ambiental de los suelos.

En el caso de *Manihot esculenta*, la bioacumulación representa un aspecto de especial interés debido a que las raíces constituyen simultáneamente el órgano encargado de absorber elementos desde el suelo y la parte destinada al consumo humano. Esta característica hace que cualquier proceso de acumulación de metales deba analizarse desde una doble perspectiva: por un lado, considerando el potencial de la especie para participar en procesos de recuperación ambiental y, por otro, evaluando los riesgos asociados a la seguridad alimentaria cuando dichos elementos permanecen almacenados en las raíces tuberosas.

Diversas investigaciones citadas en el documento base respaldan esta doble función de la yuca. Torres (2019) evaluó la capacidad de diferentes tubérculos para absorber cromo, plomo y zinc presentes en suelos contaminados y encontró que *Manihot esculenta* presentaba capacidad para incorporar estos elementos, proponiendo incluso su posible utilización dentro de programas de fitorremediación. Los resultados evidenciaron que la especie posee mecanismos fisiológicos adecuados para interactuar con diversos metales presentes en el ambiente.

De manera similar, Quinteros et al. (2017), al estudiar la evolución de la contaminación por metales pesados en la Cuenca del río Moche, identificaron concentraciones importantes de hierro en *Manihot esculenta*. A partir de estos resultados, los autores plantearon la posibilidad de que la especie pueda contribuir a procesos naturales de recuperación ambiental mediante la absorción de determinados elementos presentes en el suelo, fortaleciendo así el interés científico por sus aplicaciones dentro de la fitorremediación.

No obstante, la bioacumulación también plantea importantes desafíos desde la perspectiva de la seguridad alimentaria. La investigación desarrollada por Landeo (2018) encontró que el 90 % de las muestras de yuca analizadas presentaban concentraciones de plomo superiores a los límites establecidos por el Codex Alimentarius. Este hallazgo demuestra que la capacidad de absorber metales puede representar un riesgo para la salud cuando las raíces destinadas al consumo humano

acumulan concentraciones elevadas de contaminantes. En consecuencia, el potencial de una especie para la fitorremediación debe evaluarse conjuntamente con el destino final del cultivo y con las condiciones ambientales donde se desarrolla.

Otra aplicación ambiental importante de *Manihot esculenta* fue descrita por Linares (2019), quien demostró que la **cáscara de yuca** posee una elevada capacidad para adsorber plomo presente en aguas residuales. Los resultados obtenidos evidenciaron altos porcentajes de remoción del contaminante, demostrando que incluso los residuos generados por este cultivo pueden aprovecharse como biosorbentes de bajo costo para el tratamiento de efluentes contaminados. Este estudio amplía considerablemente las aplicaciones ambientales de la especie y pone de manifiesto el potencial de la economía circular en el aprovechamiento de residuos agrícolas.

En los ecosistemas amazónicos, donde predominan suelos ácidos y condiciones ambientales que favorecen la movilidad de algunos metales, el estudio conjunto de la bioacumulación y la fitorremediación adquiere una importancia estratégica. La elevada dependencia de las comunidades respecto a cultivos como *Manihot esculenta* exige comprender tanto la capacidad de la especie para incorporar contaminantes como las posibilidades de aprovechar sus características fisiológicas para la recuperación de ambientes degradados. Esta visión integral permite equilibrar los objetivos de conservación ambiental con la protección de la seguridad alimentaria.

En síntesis, la bioacumulación y la fitorremediación representan procesos estrechamente relacionados que reflejan la capacidad de las plantas para interactuar con los metales presentes en el ambiente. La evidencia científica demuestra que *Manihot esculenta* posee características fisiológicas que le permiten absorber y acumular diversos elementos, situación que explica tanto su interés como bioindicador y especie potencial para programas de recuperación ambiental, como la necesidad de monitorear permanentemente la calidad de las raíces destinadas al consumo humano. Estos fundamentos constituyen un componente esencial para comprender la relación entre la calidad del suelo, la fisiología vegetal y la seguridad alimentaria, eje central del presente libro.

2.2.5. Riesgos para la salud asociados al consumo de cultivos contaminados

La contaminación de los cultivos agrícolas por metales pesados constituye uno de los principales problemas de salud ambiental a nivel mundial debido a la capacidad que poseen estos elementos para incorporarse a la cadena alimentaria y acumularse progresivamente en el organismo humano. A diferencia de muchos contaminantes orgánicos, los metales pesados no son biodegradables ni pueden ser destruidos mediante procesos biológicos naturales, por lo que permanecen durante largos periodos en el ambiente y pueden ingresar continuamente al organismo a través del consumo de alimentos contaminados. Esta característica ha convertido a la inocuidad de los productos agrícolas en una prioridad para la investigación científica y para las políticas de seguridad alimentaria desarrolladas por organismos nacionales e internacionales.

La principal vía de exposición de la población a los metales pesados corresponde precisamente a la alimentación. Cuando los cultivos se desarrollan sobre suelos donde estos elementos se encuentran disponibles, las plantas pueden absorberlos mediante el sistema radical y acumularlos en hojas, frutos, semillas o raíces destinadas al consumo humano. En consecuencia, la calidad sanitaria de los alimentos depende no solo de sus características nutricionales, sino también de la calidad ambiental del suelo y del agua utilizados durante su producción.

La seguridad alimentaria moderna reconoce que un alimento debe ser suficiente desde el punto de vista nutricional, pero también inocuo para la salud. Bajo este enfoque, la presencia de metales pesados representa un riesgo importante debido a que la exposición crónica puede producir efectos acumulativos en diferentes órganos y sistemas del cuerpo humano. Aunque las concentraciones presentes en un alimento individual pueden parecer reducidas, el consumo continuo durante largos periodos incrementa progresivamente la carga corporal de estos elementos y aumenta la probabilidad de desarrollar alteraciones fisiológicas.

El documento base de la presente investigación señala que la preocupación por la presencia de metales en los cultivos surge precisamente por el riesgo que representan para la salud de la población consumidora. Asimismo, destaca que la evaluación del contenido de metales en *Manihot esculenta* responde a la necesidad de conocer si un alimento ampliamente consumido en la Amazonía peruana puede constituir una vía de

exposición a estos contaminantes cuando se cultiva sobre suelos con determinadas características físico-químicas.

Entre los metales de mayor importancia sanitaria destacan el **plomo (Pb)** y el **cadmio (Cd)**, debido a que no desempeñan funciones biológicas conocidas en el organismo humano y presentan elevada toxicidad incluso cuando la exposición ocurre a bajas concentraciones durante periodos prolongados. El documento principal diferencia claramente estos elementos de otros metales esenciales como hierro, cobre, manganeso y zinc, indicando que mientras estos últimos participan en procesos metabólicos indispensables, el plomo y el cadmio constituyen contaminantes capaces de generar efectos adversos sobre la salud cuando superan determinados niveles de exposición.

El plomo es uno de los metales más estudiados debido a su elevada capacidad para acumularse en huesos, hígado, riñones y sistema nervioso. La exposición prolongada puede alterar el funcionamiento neurológico, afectar el desarrollo cognitivo, producir trastornos hematológicos y comprometer diversos procesos metabólicos. En poblaciones infantiles, el riesgo resulta aún mayor debido a que el sistema nervioso se encuentra en pleno desarrollo y presenta mayor susceptibilidad frente a este contaminante. Por esta razón, la presencia de plomo en alimentos constituye uno de los principales motivos de vigilancia dentro de los programas internacionales de inocuidad alimentaria.

El cadmio, por su parte, presenta una elevada afinidad por los tejidos renales y hepáticos. La exposición prolongada puede favorecer procesos de acumulación en estos órganos y alterar progresivamente su funcionamiento. Asimismo, diversos estudios han señalado que este metal posee una vida media muy prolongada en el organismo humano, lo que incrementa la importancia de prevenir la exposición continua mediante el control de los alimentos y de las condiciones ambientales donde estos se producen.

En contraste con estos elementos altamente tóxicos, algunos metales como hierro, cobre, manganeso y zinc cumplen funciones fisiológicas esenciales. Participan en la síntesis de enzimas, en el transporte de oxígeno, en procesos antioxidantes y en múltiples reacciones metabólicas indispensables para el funcionamiento del organismo. Sin embargo, el documento base enfatiza que incluso estos oligoelementos pueden

generar efectos perjudiciales cuando sus concentraciones exceden los requerimientos fisiológicos normales, razón por la cual su contenido en los alimentos también debe mantenerse dentro de rangos seguros.

La evidencia científica presentada en el documento principal demuestra que el riesgo sanitario asociado al consumo de cultivos contaminados no constituye únicamente una posibilidad teórica. Uno de los antecedentes más importantes corresponde a la investigación desarrollada por Landeo (2018), quien evaluó diez variedades de *Manihot esculenta* comercializadas en el distrito de San Martín de Pangoa. Los resultados mostraron que el **90 % de las muestras analizadas presentaban concentraciones de plomo superiores a los límites máximos establecidos por el Codex Alimentarius**, mientras que los niveles de cadmio permanecían dentro de los valores permitidos. Este hallazgo representa una evidencia directa de que la contaminación ambiental puede reflejarse en alimentos destinados al consumo humano y confirma la importancia de monitorear permanentemente la calidad sanitaria de los cultivos agrícolas.

Otra evidencia relevante proviene del estudio realizado por Quinteros et al. (2017) en la Cuenca del río Moche. Los investigadores identificaron concentraciones de hierro, plomo, cadmio, cobre, zinc y arsénico en aguas, suelos agrícolas y diferentes cultivos, incluyendo *Manihot esculenta*. Aunque el objetivo principal fue analizar la evolución de la contaminación ambiental durante tres décadas, los resultados demostraron que los metales presentes en el ambiente pueden incorporarse a los sistemas agrícolas, reforzando la preocupación por la posible exposición humana a través de la alimentación.

De igual manera, el monitoreo desarrollado por la Autoridad Nacional del Agua en la cuenca del río Nanay identificó concentraciones de mercurio, plomo y zinc superiores a los Estándares de Calidad Ambiental para cuerpos de agua destinados a la conservación del ambiente acuático. Aunque este estudio se centró en la calidad del agua, sus resultados ponen de manifiesto la existencia de fuentes potenciales de contaminación que podrían influir sobre los suelos agrícolas y, en consecuencia, sobre los cultivos destinados al consumo humano. Este tipo de investigaciones refuerza la

necesidad de desarrollar programas integrales de vigilancia ambiental que incluyan simultáneamente el análisis de agua, suelo y productos agrícolas.

Los riesgos asociados al consumo de cultivos contaminados también dependen de diversos factores relacionados con la alimentación de la población. La frecuencia de consumo, la cantidad ingerida, la edad, el estado nutricional y la susceptibilidad individual influyen sobre el grado de exposición a los metales. En regiones donde la yuca constituye uno de los principales alimentos de consumo diario, como ocurre en gran parte de la Amazonía peruana, incluso concentraciones moderadas de contaminantes pueden representar una fuente continua de exposición cuando el consumo ocurre de manera habitual durante largos periodos.

En este contexto, la inocuidad alimentaria adquiere una importancia estratégica dentro de las políticas públicas de salud y agricultura. La evaluación periódica del contenido de metales en los cultivos permite identificar oportunamente situaciones de riesgo, establecer medidas preventivas y proteger a la población frente a posibles efectos derivados de la contaminación ambiental. Asimismo, la comparación de los resultados obtenidos con los límites establecidos por organismos internacionales, como el **Codex Alimentarius**, constituye una herramienta fundamental para determinar si un alimento cumple con las condiciones necesarias para su consumo seguro.

Las investigaciones relacionadas con *Manihot esculenta* poseen una relevancia especial debido a la importancia alimentaria de este cultivo en la Amazonía peruana. El documento base resalta que la elevada demanda de esta especie y la existencia de antecedentes relacionados con la presencia de metales en la región justifican plenamente el desarrollo de estudios orientados a conocer la relación entre la concentración de metales en el suelo y su contenido en las raíces destinadas al consumo humano. Esta información resulta indispensable para fortalecer la seguridad alimentaria y orientar estrategias de manejo agrícola que reduzcan la incorporación de contaminantes a la dieta de la población.

Desde una perspectiva preventiva, la protección de la salud humana comienza en la conservación de la calidad del suelo y del agua utilizados para la producción agrícola. La implementación de programas de monitoreo ambiental, el cumplimiento de los

Estándares de Calidad Ambiental, el manejo adecuado de los recursos naturales y la vigilancia permanente de los alimentos constituyen estrategias complementarias destinadas a reducir la exposición de la población a los metales pesados y garantizar una producción agrícola segura y sostenible.

En síntesis, los riesgos para la salud asociados al consumo de cultivos contaminados reflejan la estrecha relación existente entre la calidad ambiental y la seguridad alimentaria. La evidencia científica demuestra que los metales presentes en el suelo pueden incorporarse a especies de consumo humano como *Manihot esculenta*, convirtiendo a los alimentos en una de las principales vías de exposición para la población. Por ello, comprender los mecanismos de bioacumulación y fortalecer los sistemas de vigilancia ambiental constituye una prioridad para proteger la salud pública, promover una agricultura sostenible y garantizar la inocuidad de uno de los cultivos más representativos de la Amazonía peruana.

2.2.6. Importancia económica y alimentaria de la yuca

Manihot esculenta Crantz constituye uno de los cultivos alimentarios más importantes del mundo tropical y representa una fuente estratégica para la seguridad alimentaria, el desarrollo rural y la economía agrícola de numerosos países. Su importancia no radica únicamente en el volumen de producción que alcanza anualmente, sino también en el papel que desempeña como alimento básico para millones de personas, especialmente en comunidades rurales donde constituye una de las principales fuentes de energía en la dieta diaria. Debido a su elevada adaptación a diferentes condiciones ambientales y a su capacidad para producir rendimientos aceptables en suelos de baja fertilidad, la yuca ha adquirido un valor estratégico dentro de los sistemas agrícolas sostenibles.

Desde una perspectiva alimentaria, la yuca destaca por el elevado contenido de carbohidratos presentes en sus raíces tuberosas. El almidón constituye el principal componente de este órgano de almacenamiento y representa una importante fuente de energía para la población. Gracias a esta característica, el cultivo ha sido incorporado tradicionalmente a la alimentación de numerosas comunidades de América Latina, África y Asia, donde forma parte de la dieta cotidiana en diferentes preparaciones culinarias. Además de su aporte energético, la yuca contribuye a garantizar la

disponibilidad de alimentos durante periodos de escasez, debido a que las raíces pueden permanecer en el suelo durante un tiempo considerable antes de la cosecha, funcionando como una reserva natural de alimentos.

El documento base de la presente investigación destaca que *Manihot esculenta* constituye una especie de amplia demanda alimentaria en la Amazonía peruana y que sus raíces representan uno de los productos agrícolas de mayor consumo por parte de la población. Esta importancia alimentaria fue uno de los principales argumentos que justificaron el desarrollo del estudio, ya que cualquier alteración en la calidad sanitaria del cultivo puede repercutir directamente sobre la seguridad alimentaria de las comunidades que dependen de él como alimento básico.

La importancia nutricional de la yuca trasciende su elevado contenido de almidón. Aunque las raíces poseen cantidades moderadas de proteínas y minerales en comparación con otros cultivos, constituyen una fuente importante de energía y complementan la alimentación cuando se combinan con otros alimentos ricos en proteínas y micronutrientes. En algunas regiones también se aprovechan las hojas de la planta, las cuales contienen mayores concentraciones de proteínas, vitaminas y minerales, ampliando el valor nutricional de esta especie dentro de los sistemas alimentarios tradicionales.

Desde el punto de vista económico, *Manihot esculenta* representa uno de los principales cultivos comerciales de numerosas regiones tropicales. Miles de pequeños productores dependen de su cultivo como fuente de ingresos familiares, ya que la producción de raíces frescas abastece tanto los mercados locales como diferentes cadenas de comercialización destinadas a la industria alimentaria. La facilidad de cultivo, los bajos requerimientos tecnológicos y la resistencia de la especie a condiciones ambientales adversas han favorecido su incorporación dentro de los sistemas de agricultura familiar y de subsistencia.

La importancia económica de la yuca también se refleja en la diversidad de productos derivados que pueden obtenerse a partir de sus raíces. El almidón extraído constituye una materia prima ampliamente utilizada en la industria alimentaria para la elaboración de harinas, féculas, espesantes y diversos productos procesados. Asimismo,

este recurso posee aplicaciones en la industria farmacéutica, papelera, textil y en la producción de biocombustibles, ampliando significativamente el valor agregado del cultivo y generando nuevas oportunidades para el desarrollo económico de las regiones productoras.

En la Amazonía peruana, la yuca desempeña además un papel fundamental dentro de las economías rurales. Su cultivo requiere inversiones relativamente bajas y presenta una elevada capacidad de adaptación a las condiciones climáticas predominantes en la región, permitiendo que pequeños agricultores mantengan una producción estable incluso bajo escenarios donde otros cultivos presentan mayores limitaciones. Esta característica convierte a *Manihot esculenta* en un componente esencial para la estabilidad económica de numerosas familias dedicadas a la agricultura.

El documento principal resalta precisamente que la yuca constituye uno de los cultivos agrícolas más representativos de la Amazonía y que su elevada demanda alimentaria motivó el desarrollo de la investigación. Los autores señalan que la importancia económica y social de esta especie hace indispensable evaluar la calidad ambiental de los sistemas donde se produce, considerando que cualquier proceso de contaminación puede afectar simultáneamente la salud de la población y la sostenibilidad de la actividad agrícola regional.

La relevancia económica del cultivo también ha impulsado el desarrollo de investigaciones orientadas a optimizar su aprovechamiento integral. Un ejemplo importante citado en el documento corresponde al estudio desarrollado por Linares (2019), quien demostró que la **cáscara de yuca**, considerada tradicionalmente un residuo agrícola, posee una elevada capacidad para adsorber plomo presente en aguas residuales. Este hallazgo demuestra que los subproductos del cultivo pueden adquirir un importante valor ambiental e industrial, promoviendo estrategias de economía circular que incrementan la rentabilidad de la cadena productiva y reducen el impacto ambiental generado por los residuos agrícolas.

Asimismo, investigaciones recientes han ampliado el interés por *Manihot esculenta* al demostrar que la especie posee aplicaciones potenciales dentro de programas de recuperación ambiental. Estudios experimentales desarrollados por Torres

(2019) evidenciaron que la yuca presenta capacidad para absorber cromo, plomo y zinc presentes en suelos contaminados, mientras que Quinteros et al. (2017) identificaron concentraciones importantes de hierro en esta especie durante la evaluación realizada en la Cuenca del río Moche. Estos resultados sugieren que, además de su importancia económica y alimentaria, la yuca podría desempeñar un papel relevante en investigaciones relacionadas con fitorremediación y monitoreo ambiental. Sin embargo, precisamente por tratarse de un cultivo ampliamente consumido, la presencia de metales pesados en sus raíces representa un desafío importante para la salud pública. La investigación desarrollada por Landeo (2018) encontró concentraciones de plomo superiores a los límites establecidos por el Codex Alimentarius en la mayoría de las muestras de yuca evaluadas, poniendo de manifiesto que la importancia económica del cultivo debe ir acompañada de un estricto control sobre su calidad sanitaria. Estos resultados evidencian que la sostenibilidad de la producción agrícola depende tanto de la productividad como de la inocuidad de los alimentos obtenidos.

En este contexto, la seguridad alimentaria adquiere una dimensión integral. No basta con garantizar la disponibilidad de alimentos suficientes; también es indispensable asegurar que dichos alimentos se encuentren libres de contaminantes capaces de afectar la salud de los consumidores. La elevada dependencia de muchas comunidades amazónicas respecto al consumo de *Manihot esculenta* hace que la calidad ambiental de los suelos agrícolas y la vigilancia permanente del contenido de metales en las raíces constituyan componentes esenciales para la protección de la salud pública.

La importancia económica de la yuca también se refleja en su contribución al desarrollo sostenible. Al tratarse de un cultivo resistente, adaptable y de elevada eficiencia productiva, favorece la diversificación agrícola, fortalece la seguridad alimentaria de las comunidades rurales y genera oportunidades para el desarrollo de cadenas agroindustriales basadas en el aprovechamiento integral de la planta. Estas características han motivado que numerosos programas de desarrollo agrícola promuevan su cultivo como una alternativa para mejorar la productividad y reducir la vulnerabilidad alimentaria en regiones tropicales.

Desde una perspectiva ambiental, la conservación de la calidad de los suelos donde se cultiva la yuca constituye un requisito indispensable para mantener su importancia económica. La presencia de metales pesados no solo puede comprometer la inocuidad del alimento, sino también afectar la comercialización del producto, disminuir su aceptación en los mercados y generar pérdidas económicas para los productores. En consecuencia, la protección del suelo, el monitoreo ambiental y la aplicación de buenas prácticas agrícolas representan inversiones fundamentales para garantizar la sostenibilidad de este cultivo.

En síntesis, *Manihot esculenta* constituye mucho más que un cultivo agrícola. Su importancia económica, alimentaria, social y ambiental la convierte en una especie estratégica para el desarrollo de las regiones tropicales y, particularmente, de la Amazonía peruana. La evidencia científica demuestra que garantizar la calidad sanitaria de este cultivo resulta indispensable para proteger la seguridad alimentaria, fortalecer la economía rural y promover sistemas agrícolas sostenibles. Estos fundamentos justifican plenamente la necesidad de investigar la relación entre la concentración de metales presentes en el suelo y su contenido en las raíces de yuca, objetivo central del caso de estudio desarrollado en la presente obra.

El desarrollo de este capítulo ha permitido comprender que *Manihot esculenta* constituye una especie de extraordinaria importancia no solo desde el punto de vista agrícola y alimentario, sino también desde una perspectiva ambiental y científica. Sus características botánicas, fisiológicas y agronómicas explican la estrecha relación que mantiene con el suelo durante todo su ciclo de desarrollo y fundamentan su utilización como especie de interés para estudiar los procesos de absorción, transporte y acumulación de metales presentes en los ecosistemas agrícolas.

La revisión de la evidencia científica demuestra que la yuca posee una notable capacidad de adaptación a las condiciones propias de los suelos tropicales, especialmente aquellos caracterizados por elevada acidez y baja fertilidad, condiciones predominantes en gran parte de la Amazonía peruana. Esta plasticidad fisiológica le permite mantener una producción estable en ambientes donde otros cultivos presentan limitaciones; sin embargo, también incrementa la importancia de conocer los mecanismos mediante los cuales la planta interactúa con los elementos químicos

presentes en el suelo, incluyendo aquellos metales que pueden representar un riesgo para la seguridad alimentaria.

Asimismo, quedó establecido que los procesos de absorción y transporte de metales forman parte del funcionamiento fisiológico normal de la planta. La incorporación de nutrientes esenciales y de otros elementos presentes en la solución del suelo depende de una compleja interacción entre las propiedades físico-químicas del ambiente y los mecanismos fisiológicos propios de *Manihot esculenta*. Cuando las condiciones del suelo favorecen la biodisponibilidad de determinados metales, estos pueden ser absorbidos por el sistema radical y redistribuidos hacia las raíces tuberosas, órgano que constituye la principal parte destinada al consumo humano.

Otro aspecto relevante desarrollado en este capítulo corresponde al análisis de la bioacumulación y la fitorremediación como procesos estrechamente vinculados con la interacción entre la planta y el ambiente. La literatura científica evidencia que la capacidad de la yuca para absorber determinados metales representa, simultáneamente, una oportunidad para el desarrollo de estrategias sostenibles de recuperación ambiental y un desafío para la protección de la salud pública cuando dichos elementos alcanzan concentraciones elevadas en las raíces destinadas al consumo humano. Esta doble condición pone de manifiesto la necesidad de interpretar los resultados de las investigaciones considerando tanto el potencial ambiental de la especie como su importancia dentro de la alimentación de la población.

De igual manera, la revisión de los estudios científicos permitió identificar antecedentes que evidencian la presencia de metales en *Manihot esculenta* y su relación con la calidad del suelo donde se desarrolla el cultivo. Estos trabajos fortalecen la hipótesis de que las características ambientales del ecosistema influyen directamente sobre la concentración de metales presentes en la planta y justifican la necesidad de continuar investigando esta problemática en regiones de alta importancia agrícola, como la Amazonía peruana.

Finalmente, se destacó el papel estratégico que desempeña la yuca dentro de la economía y la seguridad alimentaria regional. Su elevada demanda de consumo, su importancia para la agricultura familiar y su contribución al desarrollo económico

convierten a este cultivo en un recurso cuya calidad debe ser permanentemente evaluada. Garantizar la inocuidad de sus raíces no solo implica proteger la salud de la población, sino también preservar la sostenibilidad de uno de los sistemas productivos más representativos de la Amazonía.

Los fundamentos teóricos desarrollados en los dos primeros capítulos proporcionan el marco conceptual necesario para comprender la relación entre la concentración de metales presentes en el suelo y su contenido en *Manihot esculenta*. Sobre esta base científica se desarrolla el siguiente capítulo, dedicado al **caso de estudio**, en el cual se presenta la metodología de investigación, los procedimientos utilizados para la recolección y análisis de las muestras, así como los resultados obtenidos y su correspondiente interpretación. De esta manera, el conocimiento teórico expuesto se integra con la evidencia empírica para explicar, desde una perspectiva científica, la interacción entre la calidad del suelo agrícola y la seguridad alimentaria en la Amazonía peruana.

CAPÍTULO III

CASO DE ESTUDIO: CONCENTRACIÓN DE METALES EN EL SUELO Y SU RELACIÓN CON EL CONTENIDO EN *MANIHOT ESCULENTA* CULTIVADA EN PUERTO ALMENDRA Y NINA RUMI, LORETO

Los capítulos precedentes permitieron establecer los fundamentos científicos relacionados con la dinámica de los metales en el suelo agrícola y con los mecanismos fisiológicos mediante los cuales *Manihot esculenta* absorbe, transporta y acumula estos elementos durante su crecimiento. La revisión de la literatura evidenció que la interacción entre las características físico-químicas del suelo y la fisiología de las plantas constituye uno de los principales factores que determinan la calidad ambiental de los sistemas agrícolas y la inocuidad de los alimentos producidos. Sobre esta base conceptual se desarrolla el presente capítulo, en el cual se presenta el caso de estudio que sustenta la investigación.

El análisis se centra en dos de las principales zonas productoras de yuca de la región Loreto: **Puerto Almendra** y **Nina Rumi**, ubicadas en la provincia de Maynas. Estas localidades representan escenarios de particular interés científico debido a su importancia agrícola y a las características ambientales propias de la Amazonía peruana. Sus suelos, influenciados por condiciones de elevada humedad, abundantes precipitaciones, intensa actividad biológica y predominio de reacciones ácidas, constituyen ambientes donde la dinámica de los metales puede diferir significativamente de la observada en otros ecosistemas agrícolas, haciendo necesaria una evaluación específica bajo condiciones locales.

La selección de estas áreas responde también a la importancia que *Manihot esculenta* posee dentro de la economía y la alimentación regional. La yuca constituye uno de los cultivos de mayor consumo en la Amazonía peruana y forma parte esencial

de la dieta cotidiana de miles de familias. En consecuencia, conocer si existe una relación entre la concentración de metales presentes en el suelo y el contenido de estos elementos en las raíces destinadas al consumo humano representa una cuestión de gran relevancia para la seguridad alimentaria, la gestión ambiental y la sostenibilidad de la producción agrícola.

El caso de estudio parte de la premisa de que la calidad del suelo constituye uno de los principales determinantes de la calidad de los cultivos. Si bien la presencia de metales en el suelo no implica necesariamente su acumulación en las plantas, la evidencia científica revisada en los capítulos anteriores demuestra que factores como el pH, la textura, la materia orgánica, la biodisponibilidad de los elementos y las características fisiológicas de la especie pueden favorecer procesos de transferencia suelo-planta. Bajo esta perspectiva, el estudio busca aportar evidencia empírica que permita comprender el comportamiento de estos procesos en condiciones propias de la Amazonía peruana.

La investigación adquiere especial importancia debido a la limitada información existente sobre la relación entre la concentración de metales en los suelos amazónicos y su contenido en *Manihot esculenta*. Aunque investigaciones previas han documentado la presencia de metales en diferentes componentes ambientales de la región y en algunos cultivos agrícolas, aún resulta necesario profundizar en el conocimiento de los procesos de absorción y acumulación que ocurren en una especie de tan alto valor alimentario y económico como la yuca. En este sentido, el presente caso de estudio contribuye a fortalecer el conocimiento científico sobre una problemática ambiental que posee implicancias directas para la salud pública y el desarrollo sostenible.

Desde una perspectiva metodológica, este capítulo presenta de manera sistemática el proceso seguido para responder al problema de investigación. Se describen el enfoque metodológico, el diseño empleado, la población y muestra estudiadas, las técnicas e instrumentos utilizados para la recolección de información, los procedimientos de análisis de laboratorio y los métodos estadísticos aplicados para evaluar la relación entre las variables estudiadas. Posteriormente, se exponen los resultados obtenidos mediante el análisis de las muestras de suelo y de *Manihot*

esculenta, acompañados de su correspondiente interpretación y discusión a la luz de la evidencia científica revisada en el marco teórico.

Más allá de la descripción de resultados, este caso de estudio busca establecer un puente entre la teoría y la realidad observada en los sistemas agrícolas amazónicos. La integración de los fundamentos desarrollados en los capítulos anteriores con la evidencia empírica obtenida permite comprender cómo las características del suelo influyen sobre la calidad del cultivo y proporciona información científica útil para orientar estrategias de monitoreo ambiental, conservación de los recursos naturales y fortalecimiento de la seguridad alimentaria en la región Loreto.

En consecuencia, el presente capítulo representa el eje integrador de la obra. A través del análisis de la relación entre la concentración de metales presentes en el suelo y su contenido en *Manihot esculenta*, se generan evidencias que contribuyen a comprender uno de los principales desafíos ambientales de la agricultura amazónica contemporánea. Los resultados obtenidos no solo enriquecen el conocimiento científico sobre la interacción suelo-planta, sino que también constituyen un insumo valioso para el diseño de políticas y prácticas agrícolas orientadas a garantizar una producción sostenible, alimentos inocuos y una adecuada protección de la salud de las poblaciones que dependen de este importante cultivo.

3.1. CONTEXTO DEL ESTUDIO

El desarrollo de una investigación científica requiere comprender el entorno donde se manifiesta el fenómeno de estudio, ya que las características ambientales, geográficas, sociales y productivas influyen directamente sobre las variables analizadas y permiten interpretar adecuadamente los resultados obtenidos. En investigaciones relacionadas con la calidad de los suelos agrícolas y la presencia de metales en cultivos alimenticios, el contexto adquiere una importancia aún mayor, debido a que las propiedades naturales de cada ecosistema condicionan la movilidad de los elementos químicos, su disponibilidad para las plantas y, en consecuencia, su posible incorporación a la cadena alimentaria.

El presente estudio se desarrolla en dos zonas agrícolas representativas de la región Loreto: **Puerto Almendra** y **Nina Rumi**, ubicadas en la provincia de Maynas,

dentro de la Amazonía peruana. Estas localidades se caracterizan por presentar una importante actividad agrícola y por concentrar áreas destinadas al cultivo de *Manihot esculenta*, especie que constituye uno de los principales alimentos de la población amazónica. La elección de estas zonas responde tanto a su relevancia productiva como a la necesidad de generar evidencia científica sobre la relación existente entre las características del suelo y la calidad de uno de los cultivos más representativos de la región.

La Amazonía peruana posee condiciones ecológicas particulares que la diferencian de otros sistemas agrícolas del país. La presencia de elevadas precipitaciones, temperaturas relativamente constantes durante todo el año, alta humedad ambiental y una intensa actividad biológica favorecen procesos continuos de meteorización, lixiviación y transformación de los materiales que conforman el suelo. Como consecuencia, los suelos amazónicos presentan propiedades físico-químicas particulares que influyen sobre la disponibilidad de nutrientes y sobre el comportamiento de diversos elementos metálicos presentes de forma natural o incorporados por diferentes procesos ambientales.

Estas condiciones hacen que el estudio de los metales pesados en la Amazonía deba abordarse desde una perspectiva integral. La concentración total de un metal en el suelo constituye únicamente uno de los componentes del problema, ya que la absorción por parte de las plantas depende también de factores como el pH, la textura, el contenido de materia orgánica, la humedad y las características fisiológicas propias de cada especie vegetal. En consecuencia, comprender el contexto ambiental donde se desarrolla el cultivo resulta indispensable para interpretar adecuadamente la relación entre el suelo y *Manihot esculenta*.

El documento que sustenta la presente investigación señala que el estudio fue desarrollado con el propósito de determinar la relación existente entre la concentración de metales presentes en el suelo y su contenido en *Manihot esculenta* cultivada en Puerto Almendra y Nina Rumi, considerando que ambas localidades representan zonas de producción agrícola de importancia para la región Loreto. Asimismo, se destaca que la yuca constituye un cultivo de elevada demanda alimentaria, lo que hace necesario

conocer si las características químicas del suelo pueden influir sobre la calidad sanitaria de las raíces destinadas al consumo humano.

Otro aspecto que justifica el desarrollo del estudio corresponde a la limitada información científica disponible sobre esta problemática en la Amazonía peruana. Si bien investigaciones anteriores habían reportado la presencia de metales en diferentes componentes ambientales de la región, existía escasa evidencia acerca de su comportamiento en un cultivo de tanta importancia alimentaria como *Manihot esculenta*. Esta situación hacía necesario desarrollar investigaciones que integraran simultáneamente el análisis del suelo y del cultivo, permitiendo comprender los procesos de transferencia de metales bajo condiciones propias de los ecosistemas amazónicos.

En este contexto, el presente caso de estudio busca generar evidencia científica que contribuya a fortalecer el conocimiento sobre la interacción entre el suelo agrícola y la calidad de los cultivos. La información obtenida no solo permite comprender el comportamiento de los metales en las zonas evaluadas, sino que también proporciona elementos técnicos para orientar futuras estrategias de monitoreo ambiental, manejo sostenible del suelo y protección de la seguridad alimentaria en la región Loreto.

El conocimiento del contexto donde se desarrolla la investigación constituye, por tanto, el punto de partida para comprender la metodología empleada y los resultados obtenidos en los apartados siguientes. La caracterización del área de estudio, de las condiciones ambientales y de la importancia agrícola de las localidades evaluadas proporciona el marco necesario para interpretar la relación entre la concentración de metales en el suelo y su contenido en *Manihot esculenta*, objetivo central de la presente investigación.

3.1.1. Área geográfica

El área geográfica donde se desarrolla una investigación constituye uno de los elementos fundamentales para comprender el comportamiento de las variables analizadas, especialmente cuando el estudio aborda procesos ambientales estrechamente relacionados con las características naturales del territorio. En investigaciones sobre metales pesados en suelos agrícolas y cultivos alimenticios, la ubicación geográfica

determina en gran medida las condiciones climáticas, geológicas, hidrológicas y edáficas que regulan la movilidad de los elementos químicos y su disponibilidad para las plantas. Por esta razón, la caracterización del área de estudio representa un componente indispensable para interpretar adecuadamente los resultados obtenidos.

La presente investigación se desarrolló en las localidades de **Puerto Almendra** y **Nina Rumi**, ubicadas en la provincia de **Maynas**, departamento de **Loreto**, en la Amazonía peruana. Ambas zonas forman parte del entorno rural de la ciudad de Iquitos y se caracterizan por desarrollar una importante actividad agrícola, donde el cultivo de *Manihot esculenta* (yuca) constituye una de las principales alternativas productivas para las familias dedicadas a la agricultura. Estas localidades fueron seleccionadas debido a su representatividad dentro de los sistemas agrícolas amazónicos y a la necesidad de evaluar la calidad ambiental de los suelos donde se produce uno de los alimentos más consumidos de la región.

Desde el punto de vista geográfico, Loreto constituye el departamento de mayor extensión territorial del Perú y se encuentra cubierto principalmente por bosques tropicales húmedos. Su ubicación dentro de la cuenca amazónica determina un conjunto de condiciones ambientales particulares que influyen directamente sobre la formación y evolución de los suelos. Entre estas condiciones destacan las elevadas precipitaciones durante gran parte del año, temperaturas relativamente estables, alta humedad relativa y una intensa actividad biológica, factores que favorecen procesos permanentes de meteorización, lixiviación y reciclaje de materia orgánica.

Estas características ambientales condicionan la dinámica de los elementos químicos presentes en el suelo. La elevada precipitación favorece el lavado de nutrientes y modifica continuamente la composición de la solución del suelo, mientras que la intensa actividad microbiológica participa en los procesos de descomposición de la materia orgánica y en la transformación de diversos compuestos minerales. Como consecuencia, los suelos amazónicos presentan propiedades físico-químicas particulares que pueden influir sobre la movilidad y biodisponibilidad de los metales pesados.

El documento base de la investigación señala que el estudio se desarrolló específicamente en **Puerto Almendra** y **Nina Rumi**, dos zonas agrícolas

representativas del departamento de Loreto donde el cultivo de *Manihot esculenta* posee una elevada importancia alimentaria y económica. Asimismo, indica que ambas localidades fueron seleccionadas para determinar la relación existente entre la concentración de metales presentes en el suelo y el contenido de estos elementos en la yuca cultivada bajo condiciones propias de la Amazonía peruana.

Desde una perspectiva edafológica, los suelos predominantes en estas localidades presentan características comunes a numerosos ecosistemas amazónicos. Generalmente corresponden a suelos con reacción ácida, contenidos variables de materia orgánica y texturas que pueden favorecer o limitar la movilidad de determinados elementos químicos. Estas propiedades resultan especialmente importantes cuando se estudia la dinámica de los metales pesados, ya que factores como el pH, la textura y la composición mineralógica modifican la disponibilidad de los elementos para ser absorbidos por las plantas.

La investigación toma en consideración precisamente estas condiciones ambientales al plantear el análisis conjunto del suelo y del cultivo. En este sentido, la selección del área geográfica no responde únicamente a criterios de accesibilidad o disponibilidad de muestras, sino a la necesidad de evaluar un ecosistema agrícola representativo de la Amazonía, donde las características naturales del suelo pueden influir significativamente sobre la presencia de metales en *Manihot esculenta*.

Otro aspecto que justifica la elección de estas localidades corresponde a la importancia socioeconómica del cultivo de la yuca. En Puerto Almendra y Nina Rumi, la producción de *Manihot esculenta* constituye una actividad agrícola tradicional desarrollada principalmente por pequeños productores, quienes destinan parte de la cosecha al autoconsumo familiar y otra parte a la comercialización en mercados locales. Esta situación convierte a la calidad sanitaria del cultivo en un aspecto de interés no solo científico, sino también económico y social, debido a las implicancias que puede tener sobre la alimentación y los ingresos de la población.

La ubicación de ambas localidades dentro del entorno amazónico también las expone a procesos naturales que pueden influir sobre la composición química del suelo. La dinámica hidrológica de la cuenca amazónica, la sedimentación, el transporte de

materiales por acción del agua y los procesos de meteorización propios de los climas tropicales participan continuamente en la redistribución de minerales y elementos químicos. En consecuencia, el comportamiento de los metales presentes en estos suelos debe interpretarse considerando las condiciones ambientales propias de la región y no únicamente a partir de su concentración total.

El documento principal también menciona que la investigación surge ante la necesidad de generar información científica sobre una zona donde existía escasa evidencia relacionada con la presencia de metales en un cultivo de amplia demanda alimentaria como *Manihot esculenta*. La importancia agrícola de Puerto Almendra y Nina Rumi, sumada a las características ambientales de la Amazonía, convierte a estas localidades en escenarios apropiados para evaluar la interacción entre el suelo y el cultivo desde una perspectiva ambiental y de seguridad alimentaria.

Asimismo, los antecedentes revisados en el marco teórico evidencian que en la región Loreto se han desarrollado investigaciones relacionadas con la presencia de metales en diferentes componentes ambientales, particularmente en cuerpos de agua como la cuenca del río Nanay. Estos estudios identificaron concentraciones de metales como mercurio, plomo y zinc en el ambiente, lo que refuerza la importancia de ampliar las investigaciones hacia los sistemas agrícolas y comprender cómo las condiciones ambientales propias de la región pueden influir sobre la calidad de los cultivos destinados al consumo humano.

En conjunto, el área geográfica seleccionada reúne condiciones ambientales, agrícolas y sociales que justifican plenamente el desarrollo de la presente investigación. Puerto Almendra y Nina Rumi representan escenarios característicos de la agricultura amazónica, donde convergen la importancia económica de la yuca, las propiedades particulares de los suelos tropicales y la necesidad de garantizar alimentos inocuos para la población. Estas condiciones proporcionan el contexto adecuado para analizar la relación entre la concentración de metales en el suelo y su contenido en *Manihot esculenta*, aportando evidencia científica relevante para la gestión ambiental y la seguridad alimentaria en la Amazonía peruana.

3.1.2. Características ambientales de la zona de estudio

Las características ambientales del área de estudio constituyen un elemento determinante para comprender la dinámica de los metales en los ecosistemas agrícolas y su posible incorporación a los cultivos de consumo humano. Las condiciones climáticas, hidrológicas, edáficas y biológicas influyen de manera directa sobre los procesos de meteorización, lixiviación, transformación química y disponibilidad de los elementos presentes en el suelo. En consecuencia, el análisis de estos factores resulta indispensable para interpretar la relación existente entre la concentración de metales en el suelo y su contenido en *Manihot esculenta*.

Las localidades de **Puerto Almendra** y **Nina Rumi**, ubicadas en la provincia de Maynas, departamento de Loreto, forman parte del ecosistema amazónico peruano, uno de los ambientes tropicales de mayor biodiversidad del planeta. Esta región se caracteriza por presentar temperaturas elevadas durante todo el año, altos niveles de humedad relativa y precipitaciones abundantes, condiciones que favorecen una intensa actividad biológica y aceleran los procesos naturales de transformación del suelo. Estos factores diferencian claramente a los sistemas agrícolas amazónicos de otras regiones del país y explican la necesidad de realizar investigaciones específicas bajo condiciones propias de este ecosistema.

Uno de los principales rasgos ambientales de la zona de estudio corresponde al régimen de precipitaciones. La elevada disponibilidad de agua favorece procesos continuos de infiltración y lixiviación, mediante los cuales numerosos compuestos minerales son transportados hacia horizontes más profundos del suelo. Este fenómeno modifica permanentemente la composición química de la solución edáfica y puede influir sobre la movilidad de diversos metales, aumentando o disminuyendo su disponibilidad para ser absorbidos por las plantas dependiendo de las condiciones físico-químicas predominantes.

La temperatura constituye otro factor de gran importancia ambiental. Las condiciones cálidas características de la Amazonía mantienen una elevada actividad metabólica tanto en los organismos del suelo como en las plantas cultivadas. Como consecuencia, se aceleran los procesos de descomposición de la materia orgánica, el reciclaje de nutrientes y las reacciones químicas responsables de la transformación de

numerosos elementos minerales. Este dinamismo ambiental contribuye a modificar continuamente la disponibilidad de nutrientes y metales presentes en el suelo agrícola.

La elevada humedad relativa característica de la región amazónica también favorece el mantenimiento de condiciones apropiadas para el desarrollo de microorganismos del suelo. Hongos, bacterias y otros organismos participan activamente en la descomposición de residuos vegetales y en la transformación de compuestos orgánicos e inorgánicos, interviniendo directamente en los procesos de mineralización y movilización de diferentes elementos químicos. La intensa actividad biológica constituye, por tanto, uno de los principales factores que regulan la fertilidad de los suelos amazónicos y la dinámica de los metales presentes en ellos.

Desde el punto de vista edáfico, los suelos predominantes en la zona de estudio presentan características propias de ecosistemas tropicales húmedos. Generalmente se trata de suelos con **reacción ácida**, contenido variable de materia orgánica y texturas que pueden influir sobre la capacidad de retención de los metales. Estas propiedades condicionan la movilidad de numerosos elementos químicos y determinan la fracción que permanece disponible para ser absorbida por las raíces de las plantas.

El documento base de la investigación señala que el cultivo de *Manihot esculenta* se desarrolla en suelos amazónicos donde factores como el **pH**, la **textura arcillosa** y el contenido de sales pueden influir sobre la absorción de metales por parte de la planta. Asimismo, indica que estas características ambientales constituyen uno de los principales fundamentos para evaluar la relación entre la concentración de metales presentes en el suelo y el contenido de dichos elementos en las raíces destinadas al consumo humano.

La importancia del pH dentro de estos ecosistemas ha sido ampliamente reconocida en la literatura científica. El documento principal señala que los **suelos ácidos favorecen la absorción de metales**, especialmente cuando interactúan con otros factores como la textura y la sensibilidad fisiológica de las especies vegetales. Esta condición adquiere especial relevancia en la Amazonía peruana, donde la acidez constituye una de las propiedades más representativas de los suelos agrícolas y puede modificar significativamente la biodisponibilidad de diferentes elementos químicos.

Otro componente importante del ambiente corresponde a la composición mineralógica del suelo. La presencia de partículas arcillosas, óxidos de hierro, óxidos de manganeso y materia orgánica modifica la capacidad del suelo para adsorber o liberar metales hacia la solución edáfica. En determinados casos, estos componentes favorecen la retención de los contaminantes; sin embargo, cambios en las condiciones ambientales pueden alterar este equilibrio y aumentar nuevamente la disponibilidad de los elementos para las plantas.

La investigación desarrollada por la Autoridad Nacional del Agua en la cuenca del río Nanay, citada en el documento base, proporciona información relevante sobre estas características ambientales. El estudio encontró que el mercurio presenta afinidad por materiales arcillosos y materia húmica, mientras que el plomo se asocia principalmente con la materia orgánica y los sedimentos. Asimismo, el zinc mostró afinidad por los óxidos de hierro y manganeso presentes en el ambiente. Estos resultados evidencian que la composición natural de los suelos amazónicos desempeña un papel determinante en la movilidad y comportamiento de los metales presentes en el ecosistema.

Las condiciones hidrológicas de la región constituyen igualmente un factor de importancia. La presencia de numerosos cuerpos de agua, quebradas y ríos genera una intensa interacción entre los sistemas terrestres y acuáticos. Durante los periodos de lluvia, el transporte de sedimentos y materiales finos puede modificar la distribución de minerales y elementos químicos dentro de los sistemas agrícolas, favoreciendo procesos naturales de redistribución que influyen sobre la composición del suelo y sobre la calidad ambiental de las áreas cultivadas.

Otro aspecto característico de la zona de estudio corresponde a la abundante cobertura vegetal propia de los bosques amazónicos. La acumulación y descomposición continua de residuos orgánicos contribuyen a mantener un elevado contenido de materia orgánica superficial, componente que participa activamente en los procesos de intercambio catiónico y en la formación de complejos con diversos metales. Esta interacción modifica la disponibilidad de los elementos y constituye uno de los principales mecanismos reguladores de la fertilidad natural del suelo.

Desde la perspectiva agrícola, estas condiciones ambientales han favorecido históricamente el cultivo de especies adaptadas a ecosistemas tropicales, entre ellas *Manihot esculenta*. La capacidad fisiológica de la yuca para desarrollarse bajo condiciones de elevada humedad, temperaturas constantes y suelos ácidos explica su amplia distribución en la Amazonía peruana y justifica su selección como especie de estudio dentro de la presente investigación. No obstante, estas mismas condiciones también hacen necesario evaluar permanentemente la calidad ambiental de los suelos, considerando que la movilidad de los metales puede variar significativamente bajo ambientes tropicales.

El documento principal enfatiza que la elevada importancia alimentaria de *Manihot esculenta* en la región Loreto, junto con las características ambientales propias de los suelos amazónicos, motivó el desarrollo del estudio para determinar la relación existente entre la concentración de metales presentes en el suelo y su contenido en las raíces del cultivo. Esta aproximación permite comprender la interacción entre el ambiente y la planta bajo condiciones reales de producción agrícola.

En síntesis, las características ambientales de Puerto Almendra y Nina Rumi configuran un escenario de gran interés para el estudio de los procesos de transferencia de metales en sistemas agrícolas tropicales. Las condiciones climáticas, la elevada actividad biológica, la acidez de los suelos, la abundante materia orgánica y la dinámica hidrológica propia de la Amazonía influyen directamente sobre la movilidad y disponibilidad de los metales presentes en el ambiente. Comprender estas particularidades resulta esencial para interpretar adecuadamente los resultados del presente caso de estudio y para fortalecer las estrategias orientadas a la conservación de los suelos agrícolas, la protección de la seguridad alimentaria y el manejo sostenible de los recursos naturales en la Amazonía peruana.

3.1.3. Características del sistema de cultivo

El sistema de cultivo constituye uno de los principales componentes del agroecosistema, ya que integra las condiciones naturales del ambiente con las prácticas agrícolas desarrolladas por los productores para obtener alimentos. Su análisis resulta indispensable en investigaciones relacionadas con la contaminación de los suelos, debido a que las características del manejo agronómico pueden modificar la

disponibilidad de nutrientes, alterar las propiedades físico-químicas del suelo e influir sobre la absorción de metales por parte de los cultivos. En consecuencia, comprender el funcionamiento del sistema de producción donde se desarrolla *Manihot esculenta* permite interpretar con mayor precisión la relación entre la calidad del suelo y el contenido de metales presente en las raíces destinadas al consumo humano.

En las localidades de **Puerto Almendra** y **Nina Rumi**, el cultivo de *Manihot esculenta* forma parte de los sistemas tradicionales de producción agrícola característicos de la Amazonía peruana. Estos sistemas se desarrollan principalmente bajo el modelo de agricultura familiar, donde la producción está orientada tanto al autoconsumo como a la comercialización en mercados locales. La yuca representa uno de los cultivos de mayor importancia dentro de estas unidades productivas debido a su elevada adaptación a las condiciones ambientales de la región, su estabilidad productiva y su importancia como alimento básico para la población.

El documento base de la investigación señala que la elección de *Manihot esculenta* respondió precisamente a su amplia demanda alimentaria y a su importancia dentro de la producción agrícola de las zonas de estudio. Asimismo, destaca que las muestras fueron obtenidas en áreas cultivadas de Puerto Almendra y Nina Rumi con el propósito de evaluar la relación entre la concentración de metales presentes en el suelo y su contenido en las raíces del cultivo.

Desde una perspectiva agronómica, el sistema de cultivo de la yuca presenta características que favorecen su permanencia dentro de los sistemas productivos amazónicos. La especie posee una elevada tolerancia a condiciones de baja fertilidad, desarrolla un sistema radical profundo y requiere relativamente pocos insumos externos en comparación con otros cultivos comerciales. Estas condiciones permiten que pequeños productores mantengan una producción estable aun cuando los recursos tecnológicos disponibles sean limitados.

La propagación del cultivo se realiza principalmente mediante **estacas** obtenidas de tallos maduros de plantas seleccionadas. Este método de reproducción vegetativa garantiza la conservación de las características genéticas de cada variedad y favorece un establecimiento uniforme del cultivo. Una vez sembradas las estacas, la planta

desarrolla rápidamente un nuevo sistema radical y comienza un proceso continuo de crecimiento vegetativo que culmina con la formación de raíces tuberosas destinadas al consumo humano.

El ciclo productivo de *Manihot esculenta* generalmente comprende un periodo aproximado de ocho a doce meses, dependiendo de la variedad cultivada, de las condiciones ambientales y del destino comercial de la producción. Durante este tiempo, la planta mantiene una interacción constante con el suelo mediante la absorción continua de agua y nutrientes, situación que también puede favorecer la incorporación de metales cuando estos se encuentran disponibles en la solución del suelo.

Uno de los aspectos más importantes del sistema de cultivo corresponde precisamente al contacto permanente entre el sistema radical y el suelo agrícola. A diferencia de otros cultivos donde la parte comestible corresponde a frutos o semillas, en la yuca las raíces tuberosas constituyen simultáneamente el órgano de almacenamiento y el producto destinado al consumo humano. Esta característica convierte al sistema de producción en un componente crítico dentro de las investigaciones relacionadas con contaminación ambiental, ya que cualquier alteración en la calidad química del suelo puede reflejarse directamente en el alimento cosechado.

El documento principal señala que la absorción de metales por las plantas depende de factores como el **pH**, la **textura del suelo** y la sensibilidad fisiológica de cada especie. Estas condiciones se encuentran estrechamente relacionadas con el sistema de cultivo, ya que las prácticas agrícolas desarrolladas por el productor pueden modificar progresivamente algunas de estas propiedades y alterar la disponibilidad de los elementos presentes en el suelo.

El manejo del suelo constituye otro componente fundamental del sistema productivo. Las labores agrícolas, la preparación del terreno, la incorporación de residuos vegetales y otras prácticas de manejo modifican continuamente la estructura y composición del suelo. Estas intervenciones pueden influir sobre procesos como la aireación, la infiltración del agua, la actividad microbiana y la disponibilidad de nutrientes, factores que también participan en la movilidad de los metales dentro del agroecosistema.

La literatura utilizada en esta investigación señala que determinadas prácticas agrícolas, especialmente la fertilización intensiva, pueden alterar el equilibrio natural del suelo y favorecer procesos de **lixiviación**, modificando la distribución de nutrientes y otros elementos presentes en el perfil edáfico. Estas alteraciones pueden influir indirectamente sobre la dinámica de los metales y sobre la cantidad disponible para ser absorbida por los cultivos.

Otro componente importante del sistema de cultivo corresponde a la relación existente entre la planta y los microorganismos del suelo. En los ecosistemas amazónicos, la abundante materia orgánica favorece el desarrollo de bacterias, hongos y otros organismos que participan activamente en la descomposición de residuos vegetales y en el reciclaje de nutrientes. Esta intensa actividad biológica contribuye a mantener la fertilidad del suelo y también interviene en los procesos de transformación química de diversos metales, modificando su movilidad y biodisponibilidad.

La evidencia científica presentada en el documento base demuestra que el sistema de cultivo también influye sobre la capacidad de *Manihot esculenta* para absorber metales presentes en el ambiente. Torres (2019), al evaluar diferentes tubérculos cultivados en suelos contaminados, encontró que la yuca presentaba capacidad para incorporar cromo, plomo y zinc, lo que evidencia la estrecha relación existente entre las condiciones de producción agrícola y los procesos de absorción desarrollados por la planta.

De igual manera, Quinteros et al. (2017) identificaron concentraciones importantes de hierro en *Manihot esculenta* cultivada en la Cuenca del río Moche, demostrando que las condiciones ambientales y las características del sistema agrícola pueden favorecer la incorporación de determinados elementos presentes en el suelo. Estos resultados fortalecen la necesidad de evaluar conjuntamente el sistema de cultivo y las propiedades ambientales para comprender adecuadamente la transferencia de metales hacia los alimentos.

La investigación desarrollada por Landeo (2018) constituye otro antecedente relevante. Al analizar raíces de yuca destinadas al consumo humano, encontró concentraciones de plomo superiores a los límites establecidos por el Codex

Alimentarius en la mayoría de las muestras evaluadas. Este hallazgo pone de manifiesto que la calidad del sistema de producción agrícola influye directamente sobre la inocuidad del alimento obtenido y resalta la importancia de implementar programas permanentes de monitoreo ambiental en las zonas donde la yuca representa un cultivo de amplio consumo.

En las zonas de estudio, el cultivo de *Manihot esculenta* mantiene una estrecha relación con las condiciones ambientales propias de la Amazonía. La combinación de suelos ácidos, abundante humedad, temperaturas elevadas y alta actividad biológica favorece el crecimiento del cultivo, pero también hace necesario evaluar continuamente la calidad del ambiente agrícola. Bajo estas condiciones, el sistema de producción no puede analizarse únicamente desde la perspectiva del rendimiento, sino también considerando la inocuidad de los alimentos obtenidos y la sostenibilidad del recurso suelo.

Desde una perspectiva de desarrollo sostenible, el fortalecimiento de los sistemas de cultivo requiere integrar prácticas de manejo que permitan conservar la fertilidad del suelo, reducir el riesgo de contaminación y garantizar la producción de alimentos seguros. El monitoreo de la calidad del suelo, la aplicación de buenas prácticas agrícolas y la vigilancia permanente del contenido de metales en los cultivos constituyen herramientas fundamentales para alcanzar estos objetivos y proteger tanto la salud de los consumidores como la productividad de los agroecosistemas amazónicos.

En síntesis, el sistema de cultivo desarrollado en Puerto Almendra y Nina Rumi reúne las características propias de la agricultura tradicional amazónica, donde *Manihot esculenta* ocupa un lugar central dentro de la producción y la alimentación regional. La interacción permanente entre la planta, el suelo y las condiciones ambientales convierte a este sistema agrícola en un escenario idóneo para estudiar los procesos de absorción y acumulación de metales. Comprender sus características resulta esencial para interpretar los resultados del presente caso de estudio y para diseñar estrategias orientadas a fortalecer la seguridad alimentaria y la sostenibilidad de la producción agrícola en la Amazonía peruana.

3.2. METODOLOGÍA

La investigación científica requiere de un proceso metodológico sistemático que permita garantizar la validez, confiabilidad y objetividad de los resultados obtenidos. La metodología constituye el conjunto de procedimientos, técnicas y estrategias mediante los cuales se responde al problema de investigación y se alcanzan los objetivos planteados. En estudios relacionados con la contaminación ambiental y la seguridad alimentaria, el rigor metodológico adquiere una importancia particular, debido a que las conclusiones derivadas de estas investigaciones pueden contribuir al diseño de estrategias orientadas a la protección de la salud pública, la conservación de los recursos naturales y la gestión sostenible de los sistemas agrícolas.

En el presente caso de estudio, la metodología fue diseñada para evaluar la relación existente entre la concentración de metales presentes en el suelo y su contenido en *Manihot esculenta* cultivada en las localidades de Puerto Almendra y Nina Rumi, en la región Loreto. Para ello, fue necesario integrar procedimientos propios de las ciencias ambientales, la agronomía y el análisis estadístico, permitiendo obtener información confiable tanto sobre las características químicas del suelo como sobre la composición de las raíces destinadas al consumo humano.

La selección del diseño metodológico respondió a la naturaleza del problema investigado. Debido a que el propósito principal consistió en determinar la relación entre dos variables medidas en condiciones naturales, el estudio se desarrolló bajo un enfoque que permitió observar el fenómeno sin intervenir sobre las condiciones propias del ambiente agrícola. Este procedimiento posibilitó analizar el comportamiento real de los metales presentes en el suelo y su interacción con el cultivo, preservando las características naturales de las áreas evaluadas.

Asimismo, la metodología contempló procedimientos estandarizados para la obtención de muestras representativas de suelo y de *Manihot esculenta*, garantizando que los resultados obtenidos reflejaran adecuadamente las condiciones existentes en las zonas de estudio. Posteriormente, las muestras fueron sometidas a análisis de laboratorio para determinar la concentración de los metales de interés, información que constituyó la base para el análisis estadístico y la interpretación de la relación existente entre ambas variables.

La aplicación de métodos estadísticos apropiados permitió evaluar objetivamente la existencia de asociación entre la concentración de metales presentes en el suelo y el contenido de dichos elementos en la yuca. De esta manera, el tratamiento cuantitativo de la información proporcionó evidencia científica suficiente para responder al problema planteado y contrastar la hipótesis formulada, fortaleciendo la confiabilidad de las conclusiones obtenidas.

La metodología desarrollada en esta investigación no solo garantiza la solidez científica del estudio, sino que también proporciona un procedimiento replicable para futuras investigaciones relacionadas con la calidad ambiental de los suelos agrícolas y la seguridad alimentaria. Su aplicación permite generar información útil para comprender los procesos de transferencia de metales en los ecosistemas amazónicos y contribuye al desarrollo de estrategias orientadas al monitoreo ambiental, la conservación del recurso suelo y la producción de alimentos inocuos.

En los apartados siguientes se describen detalladamente los componentes metodológicos que sustentan la investigación, incluyendo el enfoque y diseño del estudio, la población y muestra, las técnicas e instrumentos de recolección de datos, los procedimientos de análisis de laboratorio y el tratamiento estadístico aplicado para evaluar la relación entre la concentración de metales en el suelo y su contenido en *Manihot esculenta*. Estos elementos constituyen la base metodológica sobre la cual se desarrollan posteriormente la presentación, el análisis y la interpretación de los resultados del caso de estudio.

3.2.1. Enfoque y diseño de investigación

El enfoque metodológico constituye uno de los componentes esenciales de toda investigación científica, ya que define la forma en que se obtiene, analiza e interpreta la información necesaria para responder al problema planteado. Su selección depende de la naturaleza de las variables, de los objetivos del estudio y del tipo de conocimiento que se pretende generar. En investigaciones relacionadas con las ciencias ambientales y la seguridad alimentaria, el enfoque metodológico debe permitir medir objetivamente las características del fenómeno estudiado y establecer relaciones entre las variables mediante procedimientos sistemáticos y verificables.

La presente investigación se desarrolló bajo un **enfoque cuantitativo**, debido a que el propósito principal consistió en medir la concentración de metales presentes en el suelo agrícola y determinar su relación con el contenido de dichos elementos en *Manihot esculenta* cultivada en Puerto Almendra y Nina Rumi, región Loreto. Este enfoque permitió obtener información expresada en valores numéricos, analizarla mediante procedimientos estadísticos y formular conclusiones sustentadas en evidencia objetiva.

El documento base de la investigación señala que el estudio tuvo como objetivo determinar la relación entre la concentración de metales presentes en el suelo y el contenido de estos elementos en *Manihot esculenta*, utilizando análisis de laboratorio y procedimientos estadísticos para evaluar el comportamiento de ambas variables. Esta orientación metodológica corresponde claramente a un enfoque cuantitativo, caracterizado por la medición objetiva de los fenómenos y el empleo de técnicas estadísticas para el análisis de la información.

El enfoque cuantitativo presenta importantes ventajas en investigaciones ambientales porque permite comparar resultados con estándares nacionales e internacionales, establecer niveles de concentración de contaminantes y evaluar objetivamente la magnitud de las relaciones entre las variables estudiadas. En el presente caso, la determinación de concentraciones de metales en suelo y en raíces de yuca hizo posible contrastar los resultados obtenidos con los Estándares de Calidad Ambiental y con otros antecedentes científicos desarrollados en condiciones similares.

Asimismo, este enfoque favorece la reproducibilidad de la investigación. La utilización de procedimientos estandarizados para el muestreo, el análisis químico y el tratamiento estadístico permite que futuros estudios puedan replicar la metodología empleada y comparar los resultados obtenidos en diferentes contextos geográficos o temporales. Esta característica constituye uno de los principios fundamentales del método científico y fortalece la validez de los hallazgos alcanzados.

En cuanto al **diseño de investigación**, el estudio corresponde a un diseño **no experimental**, debido a que las variables fueron observadas y medidas en su ambiente natural sin que el investigador realizara manipulación alguna sobre ellas. Durante el

desarrollo del estudio no se modificaron las condiciones físicas, químicas o biológicas del suelo ni las características fisiológicas del cultivo; por el contrario, la investigación se limitó a registrar las condiciones existentes en las áreas agrícolas seleccionadas y analizar la relación entre ambas variables.

El documento principal describe que las muestras fueron obtenidas directamente de parcelas cultivadas en Puerto Almendra y Nina Rumi, evaluando la concentración de metales presente tanto en el suelo como en *Manihot esculenta* bajo condiciones naturales de producción agrícola. Esta característica confirma el carácter no experimental del estudio, ya que el fenómeno fue analizado tal como ocurre en el ambiente, sin intervención directa del investigador sobre las variables objeto de estudio.

Dentro de los diseños no experimentales, la investigación corresponde específicamente a un diseño **correlacional**, ya que su finalidad consistió en establecer el grado de relación existente entre dos variables cuantificables: la concentración de metales presentes en el suelo y la concentración de esos mismos elementos en *Manihot esculenta*. El interés principal no estuvo orientado a demostrar relaciones de causa y efecto, sino a determinar si ambas variables presentan un comportamiento asociado dentro de las condiciones ambientales propias de la Amazonía peruana.

Los estudios correlacionales poseen una amplia aplicación dentro de las ciencias ambientales debido a que numerosos fenómenos ecológicos dependen de la interacción simultánea de múltiples factores. En este tipo de investigaciones resulta especialmente importante identificar asociaciones estadísticas entre variables antes de plantear explicaciones causales más complejas. En el presente estudio, conocer la existencia y magnitud de la relación entre el contenido de metales en el suelo y en la yuca constituye un primer paso para comprender los procesos de transferencia suelo-planta en ecosistemas amazónicos.

Desde la perspectiva temporal, la investigación presenta un diseño **transversal**, ya que la recolección de datos se realizó en un único momento del tiempo. Tanto las muestras de suelo como las muestras de *Manihot esculenta* fueron obtenidas durante un mismo periodo de evaluación, permitiendo describir las condiciones existentes en las

zonas de estudio sin efectuar seguimiento longitudinal del comportamiento de las variables.

La elección de un diseño transversal respondió a los objetivos específicos de la investigación, los cuales estuvieron orientados a caracterizar el estado ambiental de los sistemas agrícolas evaluados y analizar la relación entre ambas variables durante el periodo de estudio. Este tipo de diseño resulta ampliamente utilizado en investigaciones ambientales porque proporciona una visión precisa de las condiciones existentes en un determinado momento y facilita la comparación de resultados entre diferentes áreas geográficas.

El carácter descriptivo del estudio también merece especial atención. Antes de establecer la relación entre las variables fue necesario determinar las concentraciones de metales presentes tanto en el suelo como en *Manihot esculenta*, describiendo las características observadas en cada una de ellas. Posteriormente, mediante procedimientos estadísticos apropiados, se evaluó la existencia de asociación entre ambas variables. En consecuencia, la investigación integra componentes descriptivos y correlacionales dentro de un mismo diseño metodológico.

La utilización de este enfoque y diseño permitió desarrollar la investigación bajo condiciones de rigurosidad científica, garantizando que los resultados obtenidos respondieran a las condiciones reales del sistema agrícola evaluado. Asimismo, favoreció la generación de evidencia objetiva sobre una problemática de gran importancia para la gestión ambiental y la seguridad alimentaria, permitiendo interpretar la interacción entre el suelo y *Manihot esculenta* sin alterar las características propias del ecosistema amazónico.

Desde una perspectiva metodológica, la combinación del enfoque cuantitativo con un diseño no experimental, transversal y correlacional representa una estrategia adecuada para investigaciones relacionadas con la calidad ambiental de los suelos agrícolas. Este esquema permite obtener información confiable sobre fenómenos que ocurren naturalmente, facilita la comparación con investigaciones desarrolladas en otros contextos y proporciona una base sólida para futuras investigaciones orientadas a

profundizar en los mecanismos de transferencia de metales dentro de los sistemas agrícolas tropicales.

En síntesis, el enfoque y diseño metodológico adoptados en esta investigación garantizan la objetividad, consistencia y validez del estudio. La aplicación de procedimientos cuantitativos, el análisis de las variables bajo condiciones naturales y la evaluación estadística de su relación permitieron generar evidencia científica acerca de la concentración de metales presentes en el suelo y su contenido en *Manihot esculenta* cultivada en Puerto Almendra y Nina Rumi, aportando información relevante para fortalecer el conocimiento sobre la calidad ambiental de los agroecosistemas amazónicos y sus implicancias para la seguridad alimentaria.

3.2.2. Variables de estudio

Las variables constituyen los elementos fundamentales de toda investigación científica, ya que representan las características o fenómenos susceptibles de ser observados, medidos y analizados con el propósito de responder al problema planteado. En el enfoque cuantitativo, las variables permiten establecer relaciones entre diferentes fenómenos mediante procedimientos objetivos de medición y análisis estadístico, proporcionando evidencia empírica que sustenta las conclusiones de la investigación.

En el presente estudio, las variables fueron definidas en función del objetivo general, el cual consistió en determinar la relación existente entre la concentración de metales presentes en el suelo agrícola y el contenido de dichos elementos en *Manihot esculenta* cultivada en las localidades de Puerto Almendra y Nina Rumi, región Loreto. Ambas variables fueron evaluadas mediante procedimientos de laboratorio que permitieron cuantificar objetivamente la concentración de los metales analizados y establecer posteriormente el grado de asociación existente entre ellas.

El documento base de la investigación establece como eje central del estudio la evaluación de la relación entre la concentración de metales presentes en el suelo y su contenido en *Manihot esculenta*, constituyendo estas dos variables el fundamento sobre el cual se desarrolla el análisis estadístico y la interpretación de los resultados.

La **primera variable** corresponde a la **concentración de metales en el suelo agrícola**, considerada como la variable independiente dentro del estudio. Esta variable

representa la cantidad de metales presentes en las muestras de suelo obtenidas en las áreas de cultivo de Puerto Almendra y Nina Rumi. Su evaluación permitió conocer las características químicas del ambiente edáfico y establecer si los niveles encontrados podían influir sobre la calidad del cultivo de yuca.

La importancia de esta variable radica en que el suelo constituye el principal reservorio de nutrientes y otros elementos minerales disponibles para las plantas. Las características físico-químicas del suelo, como el pH, la textura, la materia orgánica y la capacidad de intercambio catiónico, regulan la disponibilidad de los metales y condicionan su absorción por el sistema radical. Por esta razón, la concentración de metales presente en el suelo representa el punto de partida para comprender los procesos de transferencia suelo-planta desarrollados durante el crecimiento del cultivo.

La literatura revisada en los capítulos anteriores señala que la movilidad y biodisponibilidad de los metales dependen de múltiples factores ambientales, siendo el pH y la textura del suelo dos de los componentes de mayor influencia sobre la absorción de estos elementos por parte de las plantas. Asimismo, se reconoce que las características propias de los suelos amazónicos pueden modificar significativamente el comportamiento de los metales presentes en el ambiente.

La **segunda variable** corresponde al **contenido de metales en *Manihot esculenta***, considerada como la variable dependiente del estudio. Esta variable representa la concentración de los metales determinados en las raíces de yuca cultivadas en las mismas áreas donde fueron obtenidas las muestras de suelo. Su análisis permitió conocer el grado de incorporación de los metales presentes en el ambiente hacia la parte comestible del cultivo y evaluar la posible relación existente con las características químicas del suelo.

La selección de *Manihot esculenta* como variable de estudio responde a la elevada importancia alimentaria de esta especie dentro de la Amazonía peruana. Las raíces tuberosas constituyen uno de los principales alimentos consumidos por la población de la región, razón por la cual cualquier alteración en su composición química puede representar un aspecto relevante desde la perspectiva de la seguridad alimentaria y la salud pública. El documento principal destaca precisamente que la elevada

demanda alimentaria de la yuca justificó la necesidad de investigar la presencia de metales en este cultivo y su relación con las condiciones del suelo donde se desarrolla.

Desde el punto de vista conceptual, ambas variables mantienen una estrecha relación biológica y ambiental. La concentración de metales presente en el suelo constituye la fuente potencial de exposición para la planta, mientras que el contenido determinado en *Manihot esculenta* refleja el resultado de los procesos fisiológicos de absorción, transporte y acumulación desarrollados durante el crecimiento del cultivo. Sin embargo, esta relación no depende únicamente de la concentración total de los metales presentes en el suelo, sino también de la interacción con factores ambientales y fisiológicos que regulan su biodisponibilidad.

La evidencia científica revisada en el marco teórico demuestra que la absorción de metales por *Manihot esculenta* se encuentra influenciada por las propiedades del suelo y por las características fisiológicas propias de la especie. Investigaciones desarrolladas por Torres (2019), Quinteros et al. (2017) y Landeo (2018) evidenciaron que la yuca posee capacidad para absorber diversos metales presentes en el ambiente, aunque la magnitud de este proceso depende de las condiciones particulares del ecosistema donde se desarrolla el cultivo. Operacionalmente, ambas variables fueron medidas mediante procedimientos analíticos de laboratorio que permitieron determinar cuantitativamente la concentración de los metales seleccionados para el estudio. La utilización de técnicas instrumentales estandarizadas garantizó la precisión y confiabilidad de las mediciones, proporcionando información objetiva para el análisis estadístico posterior. Los resultados obtenidos fueron expresados en unidades de concentración y constituyeron la base para evaluar la existencia de asociación entre ambas variables.

La medición cuantitativa de estas variables permitió aplicar procedimientos estadísticos destinados a determinar el grado de relación existente entre ellas. De esta manera, fue posible establecer si las variaciones observadas en la concentración de metales presentes en el suelo guardaban correspondencia con el contenido determinado en las raíces de *Manihot esculenta*, aportando evidencia científica para responder al problema de investigación.

Desde una perspectiva metodológica, la adecuada definición de las variables garantiza la coherencia entre los objetivos, la hipótesis, los procedimientos de recolección de datos y el análisis estadístico desarrollado en la investigación. Asimismo, facilita la interpretación de los resultados y permite comparar los hallazgos obtenidos con investigaciones similares desarrolladas en otros contextos ambientales y agrícolas.

En síntesis, las variables consideradas en el presente estudio representan los dos componentes fundamentales del proceso de transferencia de metales dentro del sistema suelo-planta. La concentración de metales en el suelo constituye la condición ambiental de partida, mientras que el contenido de dichos elementos en *Manihot esculenta* refleja la respuesta fisiológica del cultivo frente a esa condición. El análisis conjunto de ambas variables proporciona el fundamento científico necesario para comprender la interacción entre el ambiente y la planta, así como sus implicancias para la calidad de los alimentos y la seguridad alimentaria en la Amazonía peruana.

3.2.3. Población y muestra

La definición de la población y la muestra constituye una etapa fundamental dentro del proceso metodológico de toda investigación cuantitativa, ya que permite delimitar el universo de estudio y garantizar que la información obtenida sea representativa del fenómeno analizado. En investigaciones ambientales, una adecuada selección de las unidades de estudio resulta especialmente importante debido a la variabilidad natural que presentan los ecosistemas y a la necesidad de obtener datos confiables sobre las características físicas, químicas y biológicas del ambiente.

En el presente estudio, la población estuvo conformada por los **suelos agrícolas cultivados con *Manihot esculenta* y las plantas de yuca establecidas en las localidades de Puerto Almendra y Nina Rumi**, ubicadas en la provincia de Maynas, departamento de Loreto. Estas áreas representan sistemas agrícolas característicos de la Amazonía peruana, donde la yuca constituye uno de los principales cultivos destinados al consumo humano y una actividad económica de gran importancia para las familias productoras de la región.

La selección de esta población respondió al objetivo central de la investigación, el cual consistió en determinar la relación existente entre la concentración de metales

presentes en el suelo y el contenido de dichos elementos en *Manihot esculenta*. Debido a ello, tanto el suelo como las plantas cultivadas en las zonas seleccionadas constituyeron las unidades de análisis necesarias para evaluar el proceso de transferencia de metales dentro del sistema suelo-planta.

El documento base de la investigación señala que el estudio fue desarrollado en las localidades de **Puerto Almendra** y **Nina Rumi**, considerando parcelas agrícolas donde se cultivaba *Manihot esculenta*. La selección de estas áreas permitió obtener muestras representativas tanto del suelo como del cultivo, con el propósito de evaluar la relación entre ambas variables bajo condiciones propias de la Amazonía peruana.

La población objeto de estudio presenta características particulares que justifican su elección. En primer lugar, corresponde a un sistema agrícola donde la yuca representa uno de los cultivos de mayor importancia alimentaria y económica. En segundo lugar, las condiciones ambientales propias de la región amazónica favorecen procesos físico-químicos que pueden modificar la movilidad y disponibilidad de los metales presentes en el suelo. Finalmente, la limitada información científica existente sobre esta problemática en Loreto hacía necesaria la generación de evidencia específica para este contexto geográfico.

Debido a las características del estudio y a la naturaleza de las determinaciones analíticas realizadas, fue necesario seleccionar una **muestra representativa** de la población. La muestra estuvo constituida por las **muestras de suelo agrícola y las correspondientes muestras de raíces de *Manihot esculenta* recolectadas en las parcelas seleccionadas de Puerto Almendra y Nina Rumi**, las cuales fueron posteriormente sometidas a análisis de laboratorio para determinar la concentración de los metales objeto de investigación.

El documento principal describe que tanto las muestras de suelo como las de yuca fueron obtenidas directamente de las zonas de cultivo seleccionadas, garantizando que ambas correspondieran a un mismo sistema agrícola y permitiendo evaluar objetivamente la relación entre la concentración de metales presente en el suelo y el contenido de dichos elementos en las raíces del cultivo.

La selección de la muestra respondió a criterios de representatividad y pertinencia científica. Cada unidad de análisis fue elegida considerando la presencia del cultivo de *Manihot esculenta*, las condiciones ambientales del área y la posibilidad de establecer una correspondencia directa entre las muestras de suelo y las muestras vegetales obtenidas. Este procedimiento permitió reducir posibles sesgos durante la interpretación de los resultados y asegurar que ambas variables fueran evaluadas bajo las mismas condiciones ambientales.

En investigaciones relacionadas con contaminación ambiental resulta indispensable que las muestras de suelo y de plantas correspondan al mismo sitio de producción. Esta estrategia metodológica permite interpretar con mayor precisión los procesos de absorción de metales y disminuye la influencia de factores externos que podrían alterar la relación entre las variables estudiadas. En el presente caso, la correspondencia espacial entre ambas muestras constituyó un aspecto fundamental para garantizar la validez del análisis correlacional desarrollado posteriormente.

Otro aspecto importante corresponde a la representatividad de las muestras obtenidas. Las técnicas de muestreo empleadas buscaron reflejar adecuadamente las condiciones existentes en las parcelas agrícolas evaluadas, evitando que variaciones puntuales del terreno influyeran significativamente sobre los resultados finales. De esta manera, las concentraciones determinadas en el laboratorio representan las condiciones predominantes del sistema agrícola donde se desarrolló la investigación.

La utilización de muestras provenientes de dos localidades diferentes permitió además ampliar la variabilidad ambiental del estudio. Puerto Almendra y Nina Rumi presentan características propias de los ecosistemas agrícolas amazónicos, lo que proporciona una visión más completa sobre el comportamiento de los metales en la región Loreto y fortalece la posibilidad de extrapolar los resultados hacia sistemas agrícolas con condiciones ambientales similares.

Las muestras obtenidas fueron sometidas posteriormente a procedimientos estandarizados de preparación y análisis químico para determinar la concentración de los metales seleccionados. La aplicación de protocolos de laboratorio permitió obtener

información objetiva y confiable sobre ambas variables, garantizando la calidad de los datos utilizados en el análisis estadístico.

Desde la perspectiva metodológica, la adecuada definición de la población y la selección de una muestra representativa constituyen elementos esenciales para asegurar la validez externa de la investigación. Al estudiar directamente suelos agrícolas y cultivos de *Manihot esculenta* pertenecientes a sistemas productivos reales de la Amazonía peruana, los resultados obtenidos reflejan las condiciones existentes en el área de estudio y proporcionan evidencia científica útil para futuras investigaciones relacionadas con la calidad ambiental y la seguridad alimentaria.

En síntesis, la población y la muestra fueron definidas de manera coherente con los objetivos de la investigación y con la naturaleza de las variables analizadas. La selección de parcelas agrícolas de Puerto Almendra y Nina Rumi, así como la obtención simultánea de muestras de suelo y de *Manihot esculenta*, permitió evaluar objetivamente la relación entre ambas variables bajo condiciones reales de producción agrícola. Esta estrategia metodológica proporciona una base sólida para el análisis estadístico desarrollado en los apartados siguientes y fortalece la confiabilidad de las conclusiones obtenidas sobre la dinámica de los metales en los sistemas agrícolas de la Amazonía peruana.

3.2.4. Técnicas e instrumentos

La recolección de información constituye una de las etapas más importantes del proceso metodológico, ya que de la calidad de los datos obtenidos depende la validez de los resultados y la confiabilidad de las conclusiones alcanzadas. En investigaciones relacionadas con las ciencias ambientales, la aplicación de técnicas e instrumentos apropiados resulta indispensable debido a que las variables de estudio corresponden a propiedades físico-químicas que requieren procedimientos estandarizados para su determinación. En consecuencia, la selección de las técnicas de recolección y de los instrumentos de análisis debe garantizar precisión, objetividad y reproducibilidad durante todo el proceso investigativo.

En el presente estudio, las técnicas fueron seleccionadas considerando la naturaleza cuantitativa de la investigación y el objetivo de determinar la relación

existente entre la concentración de metales presentes en el suelo y el contenido de dichos elementos en *Manihot esculenta*. Debido a que ambas variables corresponden a parámetros químicos medibles, la investigación requirió procedimientos especializados de muestreo y análisis de laboratorio que permitieran obtener información objetiva y científicamente verificable.

El documento base de la investigación señala que el estudio se desarrolló mediante la recolección de muestras de suelo agrícola y de raíces de *Manihot esculenta* provenientes de las localidades de Puerto Almendra y Nina Rumi, las cuales fueron posteriormente sometidas a análisis químicos para determinar la concentración de los metales evaluados. Esta metodología permitió obtener información cuantitativa suficiente para establecer la relación entre ambas variables.

La principal **técnica de recolección de datos** utilizada fue el **muestreo directo de campo**, procedimiento mediante el cual se obtuvieron las muestras representativas de suelo y de plantas en las parcelas agrícolas seleccionadas. Esta técnica permitió trabajar directamente sobre las condiciones naturales del sistema de cultivo, evitando modificaciones que pudieran alterar la composición química de las muestras y garantizando que la información obtenida reflejara adecuadamente las características reales del ambiente agrícola.

El muestreo de suelo constituye una técnica ampliamente utilizada dentro de las ciencias del suelo y de la ingeniería ambiental. Su finalidad consiste en obtener porciones representativas del terreno que permitan caracterizar las propiedades físicas, químicas y biológicas del área evaluada. En el presente estudio, esta técnica hizo posible determinar la concentración de los metales presentes en los suelos donde se desarrollaba el cultivo de *Manihot esculenta*, constituyendo la base para analizar posteriormente la relación con el contenido de dichos elementos en las raíces.

De manera complementaria, se realizó el **muestreo de material vegetal**, específicamente de raíces de *Manihot esculenta* destinadas al consumo humano. La obtención simultánea de muestras de suelo y de plantas provenientes de las mismas parcelas agrícolas permitió establecer una correspondencia directa entre ambas variables y fortaleció la validez del análisis correlacional desarrollado posteriormente.

Una vez obtenidas las muestras, la segunda técnica empleada correspondió al **análisis químico de laboratorio**, procedimiento mediante el cual se determinaron las concentraciones de los metales objeto de investigación. Este tipo de análisis constituye una herramienta fundamental dentro de las investigaciones ambientales, ya que permite cuantificar con elevada precisión la presencia de elementos químicos en diferentes matrices, como suelos, aguas y tejidos vegetales.

El documento principal indica que las determinaciones analíticas fueron realizadas utilizando procedimientos de laboratorio adecuados para establecer la concentración de los metales presentes tanto en el suelo como en *Manihot esculenta*. La aplicación de estas técnicas permitió obtener resultados expresados cuantitativamente, los cuales fueron utilizados posteriormente para el análisis estadístico de la investigación.

En cuanto a los **instrumentos de recolección de datos**, el principal instrumento estuvo constituido por los **protocolos de muestreo y las fichas de registro de laboratorio**, mediante los cuales se documentó la procedencia de las muestras, las características del área evaluada y los resultados obtenidos durante las determinaciones analíticas. Estos registros permitieron organizar sistemáticamente la información y garantizar la trazabilidad de cada una de las muestras procesadas.

Las fichas de registro constituyen instrumentos indispensables dentro de las investigaciones experimentales porque aseguran la adecuada identificación de las unidades de análisis, reducen la posibilidad de errores durante el procesamiento de la información y facilitan el control de calidad de los datos obtenidos. Asimismo, permiten mantener un registro detallado de todas las etapas desarrolladas durante el trabajo de campo y el análisis de laboratorio.

Otro instrumento fundamental correspondió al **equipamiento analítico de laboratorio**, mediante el cual se determinaron las concentraciones de los metales presentes en las muestras de suelo y de *Manihot esculenta*. La utilización de instrumentos especializados garantiza elevados niveles de precisión y exactitud en las determinaciones químicas, aspectos indispensables cuando se trabaja con

concentraciones de elementos potencialmente tóxicos y cuando los resultados serán sometidos posteriormente a análisis estadísticos.

La aplicación de instrumentos calibrados y procedimientos estandarizados constituye uno de los principios fundamentales del control de calidad analítico. En investigaciones relacionadas con contaminación ambiental, pequeñas variaciones en la concentración de determinados metales pueden modificar significativamente la interpretación de los resultados, razón por la cual el uso de metodologías normalizadas resulta indispensable para garantizar la confiabilidad de la información obtenida.

Una vez concluida la etapa analítica, los resultados fueron organizados en matrices de datos que facilitaron el tratamiento estadístico posterior. Estas matrices constituyeron un instrumento complementario para el procesamiento de la información, permitiendo comparar las concentraciones de metales obtenidas en suelo y en *Manihot esculenta*, así como evaluar objetivamente la relación existente entre ambas variables.

La selección de estas técnicas e instrumentos respondió a los principios de objetividad, precisión y reproducibilidad propios del enfoque cuantitativo. Al utilizar procedimientos ampliamente aceptados dentro de las ciencias ambientales, la investigación garantiza que los resultados obtenidos puedan ser contrastados con otros estudios desarrollados en contextos similares y que las conclusiones derivadas del análisis estadístico se encuentren sustentadas en evidencia confiable.

Asimismo, la integración entre el trabajo de campo y el análisis de laboratorio permitió abordar el fenómeno de estudio de manera integral. Mientras el muestreo proporcionó información representativa sobre las condiciones reales del sistema agrícola, las determinaciones químicas permitieron cuantificar objetivamente las variables de estudio, fortaleciendo la calidad metodológica de la investigación y la validez de sus resultados.

En síntesis, las técnicas e instrumentos utilizados en el presente estudio fueron seleccionados de acuerdo con la naturaleza del problema de investigación y las características de las variables analizadas. El empleo de muestreos de campo, análisis químicos de laboratorio, fichas de registro y procedimientos analíticos estandarizados permitió obtener información precisa y confiable sobre la concentración de metales

presentes en el suelo y en *Manihot esculenta*. Estos procedimientos constituyen el soporte metodológico que garantiza la calidad científica de la investigación y proporciona una base sólida para la interpretación de los resultados presentados en los apartados siguientes.

3.2.5. Procedimiento para la recolección y análisis de muestras

El procedimiento para la recolección y análisis de muestras constituye una de las etapas metodológicas más importantes en investigaciones relacionadas con la calidad ambiental de los suelos y la seguridad alimentaria, debido a que la confiabilidad de los resultados depende directamente de la correcta obtención, conservación y procesamiento del material analizado. La aplicación de procedimientos estandarizados permite minimizar posibles fuentes de error durante el trabajo de campo y el análisis de laboratorio, garantizando que las concentraciones determinadas representen adecuadamente las condiciones reales del sistema agrícola evaluado.

En el presente estudio, el procedimiento metodológico fue diseñado para evaluar simultáneamente la concentración de metales presentes en el suelo agrícola y su contenido en *Manihot esculenta* cultivada en las localidades de Puerto Almendra y Nina Rumi, región Loreto. Para ello, se desarrolló una secuencia ordenada de actividades que comprendió la selección de las áreas de estudio, la obtención de muestras representativas, el acondicionamiento del material recolectado, el análisis químico de laboratorio y el procesamiento estadístico de los resultados.

El documento base de la investigación señala que el estudio fue desarrollado mediante la obtención de muestras de suelo y de raíces de *Manihot esculenta* procedentes de las zonas agrícolas seleccionadas, con el propósito de determinar la concentración de los metales presentes en ambas matrices y evaluar posteriormente la relación existente entre ellas.

La primera etapa del procedimiento correspondió a la **identificación y selección de las áreas de muestreo**. Para ello se consideraron parcelas agrícolas donde el cultivo de *Manihot esculenta* se desarrollaba bajo condiciones representativas de los sistemas productivos de Puerto Almendra y Nina Rumi. La selección de estas áreas permitió trabajar sobre escenarios reales de producción agrícola, favoreciendo que los resultados

obtenidos reflejaran adecuadamente las condiciones ambientales propias de la Amazonía peruana.

Posteriormente, se procedió a la **recolección de las muestras de suelo**. Este procedimiento se realizó siguiendo criterios técnicos destinados a garantizar la representatividad del material obtenido. Las muestras fueron extraídas directamente de las áreas cultivadas con yuca, procurando que correspondieran al mismo sitio donde posteriormente se recolectaron las raíces del cultivo. Esta estrategia metodológica permitió establecer una correspondencia espacial entre ambas variables y fortaleció la confiabilidad del análisis correlacional desarrollado en la investigación.

De manera paralela, se efectuó la **recolección de muestras de *Manihot esculenta***. Las raíces fueron seleccionadas directamente de las plantas establecidas en las parcelas evaluadas, procurando que el material vegetal correspondiera a los mismos sitios donde se obtuvieron las muestras de suelo. Este procedimiento resulta fundamental en investigaciones relacionadas con transferencia de metales, ya que permite analizar simultáneamente la condición ambiental del suelo y la respuesta fisiológica del cultivo bajo las mismas condiciones de producción.

Una vez concluido el trabajo de campo, las muestras fueron correctamente **identificadas, rotuladas y acondicionadas** para su transporte al laboratorio. Esta etapa constituye un componente esencial del control de calidad metodológico, debido a que garantiza la trazabilidad de cada muestra y evita errores durante el procesamiento analítico. La adecuada identificación permitió conservar la correspondencia entre las muestras de suelo y las respectivas muestras vegetales obtenidas en cada parcela agrícola.

Posteriormente, se desarrolló la fase de **preparación de las muestras para el análisis químico**. Tanto el suelo como el material vegetal fueron sometidos a procedimientos de acondicionamiento previos a las determinaciones analíticas, con la finalidad de obtener muestras homogéneas y adecuadas para el procesamiento instrumental. Esta etapa permitió reducir la variabilidad asociada a las características físicas del material y asegurar la precisión de las mediciones posteriores.

El documento principal indica que las muestras fueron sometidas a **análisis de laboratorio** para determinar la concentración de los metales considerados en la investigación. La utilización de procedimientos analíticos estandarizados permitió cuantificar objetivamente el contenido de estos elementos tanto en el suelo como en *Manihot esculenta*, proporcionando la información necesaria para responder al objetivo central del estudio.

Las determinaciones químicas se realizaron utilizando metodologías apropiadas para el análisis de metales en matrices ambientales. Estos procedimientos permiten detectar concentraciones muy bajas de elementos químicos con elevados niveles de precisión y exactitud, características indispensables cuando se estudian contaminantes ambientales y se requiere comparar los resultados con estándares nacionales o internacionales de calidad.

Durante el desarrollo del análisis de laboratorio se implementaron procedimientos de **control de calidad analítico**, orientados a garantizar la confiabilidad de las determinaciones efectuadas. La aplicación de protocolos estandarizados, la correcta manipulación de las muestras y el seguimiento de procedimientos técnicos contribuyeron a minimizar posibles errores experimentales y fortalecieron la validez de los resultados obtenidos.

Una vez determinadas las concentraciones de los metales en ambas matrices, los resultados fueron organizados sistemáticamente en bases de datos para facilitar su procesamiento estadístico. Esta etapa permitió verificar la consistencia de la información obtenida, identificar posibles valores atípicos y preparar los datos para la aplicación de las pruebas estadísticas correspondientes.

El análisis estadístico constituyó la fase final del procedimiento metodológico. A partir de las concentraciones determinadas en suelo y en *Manihot esculenta*, se evaluó la relación existente entre ambas variables mediante técnicas estadísticas apropiadas para el enfoque cuantitativo de la investigación. Este procedimiento permitió establecer objetivamente el grado de asociación entre la concentración de metales presentes en el suelo y el contenido de dichos elementos en las raíces del cultivo.

La aplicación de un procedimiento secuencial, desde la recolección de muestras hasta el análisis estadístico de los resultados, garantizó la coherencia metodológica de la investigación. Cada etapa fue desarrollada siguiendo principios científicos de objetividad, trazabilidad y control de calidad, asegurando que la información obtenida fuera consistente con los objetivos planteados y permitiera generar conclusiones confiables sobre la relación entre las variables estudiadas.

Desde una perspectiva metodológica, este procedimiento presenta además la ventaja de ser replicable en futuras investigaciones desarrolladas bajo condiciones ambientales similares. La utilización de técnicas de muestreo estandarizadas, análisis químicos de laboratorio y procedimientos estadísticos ampliamente aceptados dentro de las ciencias ambientales facilita la comparación de resultados entre diferentes regiones y contribuye al fortalecimiento del conocimiento científico sobre la dinámica de los metales en los sistemas agrícolas.

En síntesis, el procedimiento para la recolección y análisis de muestras permitió obtener información objetiva y confiable acerca de la concentración de metales presentes en el suelo agrícola y en *Manihot esculenta* cultivada en Puerto Almendra y Nina Rumi. La integración del trabajo de campo, el análisis de laboratorio y el procesamiento estadístico proporcionó el soporte metodológico necesario para evaluar la relación entre ambas variables y generó evidencia científica sólida para comprender los procesos de transferencia de metales dentro de los agroecosistemas de la Amazonía peruana.

3.2.6. Procesamiento y análisis estadístico de los datos

El procesamiento y análisis estadístico de los datos constituye la etapa metodológica mediante la cual la información obtenida durante el trabajo de campo y el análisis de laboratorio es organizada, sistematizada e interpretada para responder a los objetivos de la investigación. En el enfoque cuantitativo, esta fase permite transformar los datos obtenidos en evidencia científica objetiva mediante la aplicación de procedimientos estadísticos que facilitan la descripción de las variables y la evaluación de las relaciones existentes entre ellas. La adecuada aplicación de estas técnicas garantiza la confiabilidad de los resultados y fortalece la validez de las conclusiones alcanzadas.

En la presente investigación, el procesamiento estadístico estuvo orientado a determinar la relación existente entre la concentración de metales presentes en el suelo agrícola y el contenido de dichos elementos en *Manihot esculenta* cultivada en las localidades de Puerto Almendra y Nina Rumi, región Loreto. Para ello, fue necesario organizar la información obtenida durante el análisis de laboratorio, verificar su consistencia y aplicar procedimientos estadísticos que permitieran contrastar la hipótesis planteada en el estudio.

El documento base señala que los resultados obtenidos a partir de las determinaciones analíticas fueron sometidos a tratamiento estadístico con la finalidad de establecer la relación entre las dos variables de estudio, constituyendo este procedimiento el fundamento para responder al objetivo general de la investigación.

La primera etapa del procesamiento consistió en la **organización y codificación de la información**. Los resultados correspondientes a las concentraciones de metales determinadas en las muestras de suelo y en las raíces de *Manihot esculenta* fueron registrados en una base de datos estructurada, permitiendo identificar cada unidad de análisis y mantener la correspondencia entre las muestras obtenidas en una misma parcela agrícola. Este procedimiento facilitó el manejo sistemático de la información y redujo la posibilidad de errores durante el análisis estadístico.

Posteriormente, se realizó la **depuración de la base de datos**, verificando la consistencia de los registros obtenidos, la correcta identificación de las muestras y la integridad de la información analítica. Esta etapa constituye un componente fundamental del control de calidad de los datos, ya que permite detectar posibles errores de digitación, inconsistencias o valores atípicos que pudieran afectar la interpretación de los resultados.

Una vez concluida la depuración, se desarrolló el **análisis descriptivo** de las variables. Este procedimiento permitió resumir la información obtenida mediante la elaboración de tablas y la utilización de medidas estadísticas descriptivas que facilitaron la caracterización de la concentración de metales tanto en el suelo como en *Manihot esculenta*. El análisis descriptivo constituye el primer nivel de interpretación de los datos y proporciona una visión general del comportamiento de las variables estudiadas.

Las medidas de tendencia central y de dispersión permitieron describir cuantitativamente la distribución de los datos obtenidos. Asimismo, la elaboración de tablas facilitó la comparación entre las concentraciones determinadas en las diferentes muestras y proporcionó una representación ordenada de la información, favoreciendo su interpretación posterior.

El siguiente paso correspondió a la evaluación del **comportamiento estadístico de los datos**, con el propósito de determinar el procedimiento más adecuado para analizar la relación entre las variables. En investigaciones cuantitativas, este análisis resulta indispensable debido a que la selección de las pruebas estadísticas depende de las características que presenta la distribución de la información obtenida.

El documento principal indica que la investigación tuvo como propósito establecer la relación existente entre la concentración de metales presentes en el suelo y el contenido de dichos elementos en *Manihot esculenta*, razón por la cual fue necesario aplicar procedimientos estadísticos que permitieran cuantificar objetivamente el grado de asociación entre ambas variables.

Para evaluar esta relación se aplicó un **análisis de correlación**, procedimiento estadístico ampliamente utilizado cuando se busca determinar el grado de asociación existente entre dos variables cuantitativas. Este tipo de análisis permite establecer si las variaciones observadas en una variable se encuentran relacionadas con los cambios registrados en la otra, así como identificar la intensidad y dirección de dicha relación.

La utilización del análisis correlacional resulta especialmente pertinente en investigaciones ambientales debido a que numerosos procesos ecológicos dependen de la interacción simultánea entre diferentes factores físicos, químicos y biológicos. En el presente estudio, este procedimiento permitió evaluar objetivamente si la concentración de metales presente en el suelo guarda relación con el contenido de dichos elementos determinado en las raíces de *Manihot esculenta*, aportando evidencia científica para comprender los procesos de transferencia suelo-planta.

La interpretación de los resultados estadísticos se realizó considerando el nivel de significancia previamente establecido para la investigación. Este criterio permitió determinar si la relación observada entre las variables correspondía a un

comportamiento estadísticamente significativo o si podía atribuirse al azar. La aplicación de este procedimiento fortalece la objetividad del análisis y proporciona mayor respaldo científico a las conclusiones derivadas del estudio.

Asimismo, el análisis estadístico contempló la interpretación conjunta de los resultados obtenidos en laboratorio y de la información presentada en el marco teórico. Esta integración permitió comparar los hallazgos del presente estudio con investigaciones desarrolladas previamente sobre contaminación de suelos, bioacumulación de metales y calidad ambiental de los sistemas agrícolas, enriqueciendo la discusión científica de los resultados.

La utilización de procedimientos estadísticos también permitió expresar los resultados de manera objetiva y verificable, facilitando su comparación con otras investigaciones nacionales e internacionales. Esta característica constituye uno de los principales aportes del enfoque cuantitativo, ya que favorece la acumulación de conocimiento científico y la posibilidad de replicar el estudio bajo condiciones similares.

Desde una perspectiva metodológica, el procesamiento estadístico no solo permitió comprobar la hipótesis planteada, sino también fortalecer la confiabilidad de la investigación mediante la aplicación de procedimientos sistemáticos de análisis de datos. La organización adecuada de la información, el uso de técnicas estadísticas apropiadas y la interpretación objetiva de los resultados garantizan que las conclusiones obtenidas reflejen con precisión el comportamiento observado en las variables estudiadas.

Finalmente, el tratamiento estadístico constituyó el puente entre la obtención de los datos y la generación de conocimiento científico. Gracias a este proceso fue posible transformar los resultados analíticos obtenidos en el laboratorio en evidencia empírica capaz de explicar la relación entre la concentración de metales presentes en el suelo y su contenido en *Manihot esculenta*. Esta evidencia no solo permitió responder al problema de investigación, sino que también aporta información relevante para el fortalecimiento de la gestión ambiental, la conservación de los suelos agrícolas y la protección de la seguridad alimentaria en la Amazonía peruana.

3.3. RESULTADOS

La etapa de resultados constituye el componente central del proceso investigativo, ya que presenta la evidencia empírica obtenida mediante el trabajo de campo, el análisis de laboratorio y el procesamiento estadístico de la información. En esta sección se exponen de manera objetiva los datos generados durante la investigación, permitiendo responder a los objetivos planteados y proporcionar el sustento científico necesario para el análisis e interpretación desarrollados posteriormente. La presentación de los resultados se realiza siguiendo un orden lógico y sistemático, priorizando la claridad en la exposición de la información y la coherencia con las variables de estudio.

Los resultados fueron organizados considerando los objetivos específicos de la investigación, de manera que cada apartado refleja el comportamiento de las variables analizadas y facilita la comprensión de la relación existente entre la concentración de metales presentes en el suelo y el contenido de dichos elementos en *Manihot esculenta*. Esta organización permite al lector seguir de forma secuencial el desarrollo de la investigación, desde la caracterización de las muestras hasta la evaluación estadística de la relación entre ambas variables.

La información presentada en este capítulo proviene del análisis de **tres muestras de suelo agrícola**, así como de las correspondientes **muestras de raíces y hojas de *Manihot esculenta*** cultivadas en las localidades de **Puerto Almendra** y **Nina Rumi**, ubicadas en la región Loreto. Las muestras fueron recolectadas durante el periodo comprendido entre **mayo y julio de 2021**, siguiendo los procedimientos metodológicos descritos anteriormente y garantizando la representatividad de las unidades de análisis seleccionadas.

Las determinaciones analíticas fueron realizadas en el **Laboratorio de Suelos de la Universidad Nacional Agraria La Molina**, institución especializada en el análisis físico-químico de muestras ambientales y agrícolas. Mediante procedimientos estandarizados de laboratorio se determinaron las concentraciones de los metales de interés tanto en las muestras de suelo como en los tejidos vegetales, proporcionando información confiable para el desarrollo del análisis estadístico y la contrastación de la hipótesis de investigación.

Con el propósito de facilitar la interpretación de los resultados, la información se presenta mediante tablas y datos cuantitativos organizados de acuerdo con cada objetivo específico. En primer lugar, se describen las concentraciones de metales determinadas en las muestras de suelo; posteriormente, se presentan los resultados correspondientes a las raíces y hojas de *Manihot esculenta*; finalmente, se expone el análisis estadístico realizado para evaluar la relación existente entre ambas variables. Esta estructura permite comprender de manera integral el comportamiento de los metales dentro del sistema suelo-planta y proporciona la evidencia necesaria para sustentar las conclusiones de la investigación.

Los resultados expuestos en esta sección constituyen el fundamento empírico del presente caso de estudio y representan una contribución al conocimiento sobre la dinámica de los metales en los sistemas agrícolas de la Amazonía peruana. Asimismo, aportan información relevante para comprender la interacción entre las características del suelo y la calidad de uno de los cultivos de mayor importancia alimentaria en la región, fortaleciendo las bases científicas para futuras investigaciones relacionadas con la gestión ambiental, la conservación de los recursos edáficos y la seguridad alimentaria.

3.3.1. Concentración de los metales Fe, Cu, Mn, Zn, Cd, Pb y Cr sin tener en cuenta su estado de oxidación, en los suelos de cultivo de *M. esculenta* (yuca), en la zona de Puerto Almendra y Nina Rumi, Loreto.

La determinación de la concentración de metales en los suelos agrícolas constituye el punto de partida para comprender la calidad ambiental del sistema de cultivo y evaluar la posible transferencia de estos elementos hacia las plantas. El suelo representa el principal reservorio de nutrientes y minerales disponibles para el desarrollo vegetal; sin embargo, también puede actuar como un medio de acumulación de metales provenientes tanto de procesos geológicos naturales como de actividades antrópicas. En consecuencia, el conocimiento de su composición química resulta indispensable para interpretar los procesos de absorción desarrollados por *Manihot esculenta* y analizar las implicancias que estos pueden tener para la seguridad alimentaria.

En el presente estudio se evaluó la concentración de los metales **hierro (Fe), cobre (Cu), manganeso (Mn), zinc (Zn), cadmio (Cd), plomo (Pb) y cromo (Cr)** en

muestras de suelo agrícola procedentes de las localidades de **Puerto Almendra** y **Nina Rumi**, sin considerar el estado de oxidación en que dichos elementos se encontraban presentes. Esta aproximación permitió determinar la concentración total de cada metal en el suelo y establecer una caracterización inicial de las condiciones químicas del ambiente donde se desarrollaba el cultivo de *Manihot esculenta*.

La selección de estos elementos responde a su importancia ambiental y agrícola. El hierro, el cobre, el manganeso y el zinc son considerados micronutrientes esenciales para el crecimiento de las plantas, ya que participan en numerosos procesos fisiológicos relacionados con la fotosíntesis, la respiración celular, la actividad enzimática y el metabolismo vegetal. No obstante, cuando se presentan en concentraciones elevadas, incluso estos elementos pueden alterar el equilibrio del sistema suelo-planta y afectar el desarrollo normal del cultivo.

Por otra parte, el cadmio, el plomo y el cromo son reconocidos por su importancia dentro de los estudios de contaminación ambiental debido a su potencial toxicidad y a la capacidad que poseen para persistir durante largos periodos en el suelo. La presencia de estos metales en áreas agrícolas reviste especial interés científico porque pueden incorporarse a los cultivos mediante procesos de absorción radicular y, posteriormente, ingresar a la cadena alimentaria a través del consumo humano.

La literatura revisada en los capítulos anteriores ha señalado que la movilidad y disponibilidad de estos metales dependen de diversos factores propios del suelo, entre ellos el pH, la textura, la materia orgánica y la capacidad de intercambio catiónico. Estas propiedades modifican la fracción de los metales que permanece disponible para las plantas y condicionan la intensidad de los procesos de transferencia suelo-planta. Por ello, la determinación de la concentración total constituye una primera aproximación para comprender el comportamiento químico del sistema agrícola evaluado.

El documento base de la investigación establece que uno de los objetivos fundamentales del estudio consistió en determinar la concentración de metales presentes en los suelos cultivados con *Manihot esculenta* en Puerto Almendra y Nina Rumi, con la finalidad de analizar posteriormente su relación con el contenido de dichos elementos en las raíces del cultivo. Esta evaluación constituye la base para comprender la dinámica

de los metales dentro del agroecosistema amazónico y para interpretar los resultados obtenidos en las muestras vegetales.

Los resultados presentados en este apartado corresponden a los análisis realizados sobre las muestras de suelo procesadas en el **Laboratorio de Suelos de la Universidad Nacional Agraria La Molina**, donde se determinaron las concentraciones de los siete metales considerados en la investigación mediante procedimientos analíticos estandarizados. La información obtenida proporciona una caracterización química del suelo agrícola y constituye el fundamento para el análisis comparativo desarrollado en los siguientes apartados.

La presentación de los resultados se realiza mediante tablas que muestran la concentración de cada uno de los metales analizados en las diferentes muestras de suelo. Esta organización facilita la identificación de posibles variaciones entre las áreas evaluadas y permite disponer de una base objetiva para interpretar posteriormente la relación existente entre la composición química del suelo y el contenido de metales determinado en *Manihot esculenta*. De esta manera, el análisis de las concentraciones presentes en el suelo representa el primer paso para comprender los procesos de bioacumulación estudiados en la presente investigación y su posible impacto sobre la calidad ambiental y la seguridad alimentaria en la Amazonía peruana.

3.3.1.1. Concentración de metales en el suelo de 0 a 20 cm de profundidad en cultivo de M. esculenta en Puerto Almendra y Nina Rumi.

La capa superficial del suelo, comprendida entre **0 y 20 cm de profundidad**, constituye el horizonte de mayor importancia para el desarrollo de los cultivos agrícolas, debido a que en ella se concentra gran parte de la actividad biológica, la materia orgánica y el sistema radical responsable de la absorción de agua y nutrientes. En el caso de *Manihot esculenta*, esta franja del suelo representa la principal zona de interacción entre las raíces y el ambiente edáfico, razón por la cual el análisis de su composición química resulta esencial para comprender los procesos de disponibilidad y transferencia de metales hacia la planta.

Desde una perspectiva ambiental, la evaluación de la concentración de metales en este horizonte superficial permite caracterizar las condiciones químicas del suelo

agrícola y conocer la presencia de elementos esenciales y potencialmente tóxicos que pueden influir sobre el crecimiento del cultivo. Asimismo, proporciona información relevante para interpretar los mecanismos de absorción desarrollados por *Manihot esculenta* y evaluar la posible incorporación de estos elementos a las raíces destinadas al consumo humano.

El estudio de la capa de 0 a 20 cm adquiere especial importancia en los ecosistemas amazónicos debido a que en este horizonte ocurren los principales procesos de descomposición de la materia orgánica, reciclaje de nutrientes, actividad microbiana e intercambio químico entre el suelo y las raíces. Estas condiciones modifican continuamente la biodisponibilidad de los metales presentes en el ambiente y pueden favorecer o limitar su absorción por parte de las plantas, dependiendo de factores como el pH, la textura, la humedad y la composición mineralógica del suelo.

El documento base de la investigación establece que las muestras de suelo fueron obtenidas en parcelas cultivadas con *Manihot esculenta* en las localidades de **Puerto Almendra** y **Nina Rumi**, con el propósito de determinar la concentración de los metales presentes en el horizonte superficial del suelo y analizar posteriormente su relación con el contenido de dichos elementos en las raíces del cultivo.

En este apartado se presentan los resultados correspondientes a las concentraciones de **hierro (Fe), cobre (Cu), manganeso (Mn), zinc (Zn), cadmio (Cd), plomo (Pb) y cromo (Cr)** determinadas en las muestras de suelo recolectadas entre **0 y 20 cm de profundidad**. La información obtenida constituye una caracterización inicial de las condiciones químicas del suelo agrícola y permite identificar la distribución de estos elementos dentro del principal horizonte de desarrollo radicular de *Manihot esculenta*.

Los resultados se presentan de manera ordenada mediante tablas, facilitando la comparación entre las muestras procedentes de Puerto Almendra y Nina Rumi. Esta organización permite apreciar las variaciones observadas en la concentración de cada metal y proporciona la base necesaria para el análisis posterior de la relación existente entre las características químicas del suelo y el contenido de metales determinado en las raíces de la yuca. De esta manera, la información expuesta en este apartado constituye el

primer nivel de evidencia empírica para comprender la dinámica de los metales dentro del sistema suelo-planta evaluado en la presente investigación.

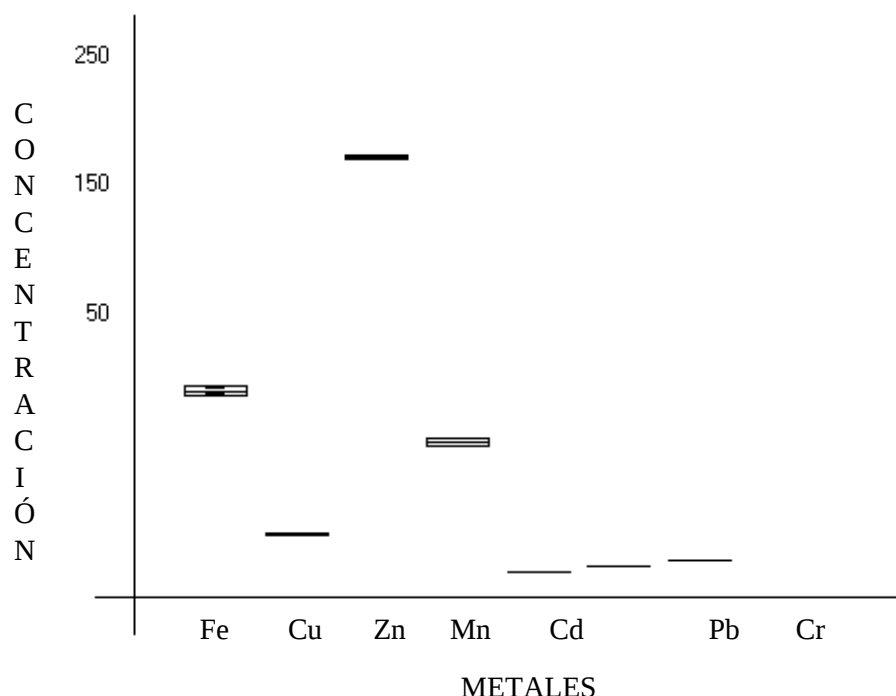
La tabla 1, nos muestra la concentración de metales en el suelo a una profundidad de 0 a 20 cm, sin tener en cuenta su estado de oxidación, estuvieron por encima de los rangos normales. Así tenemos que el hierro varió entre 80 a 98 ppm, el cobre varió entre 16 a 19 ppm, el manganeso entre 195 a 201 ppm, el zinc estuvo entre 61 a 65 ppm, el cadmio varió entre 0,07 a 0,08 ppm, el plomo entre 2,6 a 3,05 ppm y el cromo entre 5,5 a 5,6 ppm. Los valores bajos de la desviación estándar y el coeficiente de variación de los valores registrados indican que la concentración de los metales en el suelo entre 0 a 20 cm de profundidad fue relativamente homogénea.

Tabla 1. Estadígrafos empleados para analizar la variación de los datos obtenidos en el suelo entre 0-20 cm de profundidad, 2021

	Fe	Cu	Mn	Zn	Cd	Pb	Cr
	(ppm)	(ppm)	(ppm)	(ppm)	(ppm)	(ppm)	(ppm)
n =	3	3	3	3	3	3	3
Mínimo	80	16	195	61	0,07	2,60	5,5
Máximo	98	19	201	65	0,08	3,05	5,6
Amplitud Total	9	3	6	4	0,01	0,45	0,1
Mediana	86	18	200	63	0,08	2,7	5,55
Media Aritmética	85	1,66	198,6	63	0,0767	2,78	5,55
Varianza	21	2,33	10,33	4	0	0,055	0,0025
Desviación Estándar	4,58	1,52	3,214	2	0,0058	0,236	0,05
Coeficiente de Variación	5,39%	8,65%	1,62%	3,17%	7,53%	8,49%	0,90%

Fuente: Datos del tesista. 2021.

Figura 1. Desviación estándar de la concentración de metales en el suelo 0-20 cm de profundidad.



3.3.1.2. Concentración de metales en el suelo de 20 a 40 cm de profundidad en cultivo de *M.esculenta* en Puerto Almendra y Nina Rumi

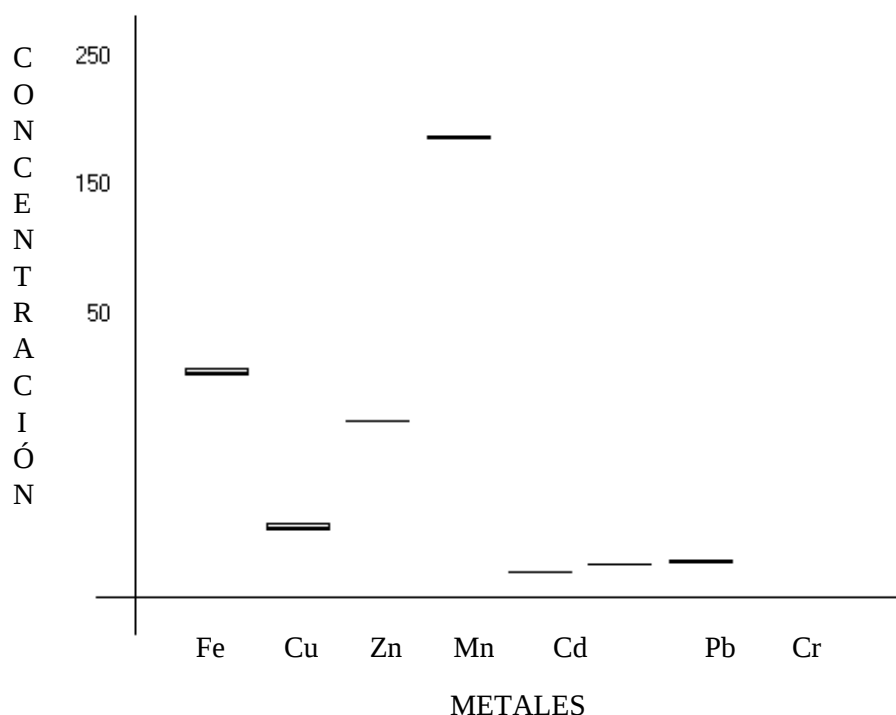
En la tabla 2, se muestra la concentración de metales en el suelo del cultivo de *M. esculenta* entre 20 a 40 cm de profundidad estuvieron por encima de los rangos normales. Así tenemos que el hierro varió entre 96 a 98 ppm, el cobre entre 21 a 23 ppm, el manganeso entre 210 a 213 ppm, el zinc entre 73 a 74 ppm, el cadmio entre 0,08 a 0,09, el plomo entre 3,7 a 3,75 ppm y el cromo entre 5,0 a 6,04. Los valores bajos de la desviación estándar y coeficiente de variación de los valores registrados indican que la concentración de los metales en el suelo entre 20 a 40 cm de profundidad fue relativamente homogénea.

Tabla 2. Estadígrafos empleados para analizar la variación de los datos obtenidos del suelo entre 20 a 40 cm de profundidad, 2021.

	Fe (ppm)	Cu (ppm)	Mn (ppm)	Zn (ppm)	Cd (ppm)	Pb (ppm)	Cr (ppm)
n =	3	3	3	3	3	3	3
Mínimo	96	21	210	73	0,08	3,70	5
Máximo	98	23	213	74	0,09	3,75	6,04
Amplitud Total	2	2	3	1	0,01	0,05	1,04
Media Aritmética	97	22	211,33	73,33	0,086	3,72	5,51
Varianza	1	1	2,33	0,33	0	0,0006	0,27
Desviación Estándar	1	1	1,52	0,57	0,0058	0,02	0,52
Coeficiente de Variación	1,03%	4,55%	0,72%	0,79%	6,66%	0,68%	9,43%

Fuente: Datos del tesista. 2021

Figura 2. Desviación estándar de la concentración de metales en el suelo de 20 a 40 cm de profundidad.



3.3.1.3. Pruebas de *t* en la concentración de metales en el suelo de cultivo de *M. esculenta* en Puerto Almendra y Nina Rumi

En las tablas de la 3 a la 9, se muestran las pruebas de *t* ejecutadas para la concentración de metales en el suelo del cultivo de *M. esculenta*, que indica que hay diferencias significativas entre la concentración del hierro, cobre, manganeso, zinc, plomo y cromo a un nivel de profundidad de 0 a 20 cm y 20 a 40 cm pues las concentraciones de estos metales en estas profundidades a un nivel de significancia de $\alpha = 0,05$, con el hierro ($t = 4,4313$), cobre ($t = 4,111$), manganeso ($t = 6,1644$), zinc ($t = 8,5979$), plomo ($t = 6,8516$) y cromo ($t = -0,1215$) que obtuvieron valores relativamente altos y teniendo en cuenta que *p* (bilateral) fue altamente significativo con probabilidades mayor a 0,0001, se rechaza la *H₀* y se acepta la *H_a*, de que hay diferencias en la concentración de estos metales a las profundidades indicadas, siendo más altos las concentraciones en la profundidad entre 0 a 20 cm; mientras que con respecto al cadmio, estas diferencias no son significativas.

Tabla 3. Prueba de *t* (diferencias de medias) del hierro del suelo a 0 a 20 y 20 a 40 cm de profundidad en cultivo de *M. esculenta*. 2021.

	Fe (0 a 20cm)	Fe (de 20 a 40cm)
Tamaño =	3	3
Media =	97	85
Varianza =	1	21
	Desigual	Igual
Varianza =	7,3333	11
<i>t</i> =	4,4313	4,4313
Grados de libertad =	2,19	4
<i>p</i> (unilateral) =	0,0237	0,0057
<i>p</i> (bilateral) =	0,0473	0,0114
Diferencia entre las medias =	12	---

Figura 3. Prueba de t para la concentración de Fe en 0 a 20 y 20 a 40 cm de profundidad en el suelo.

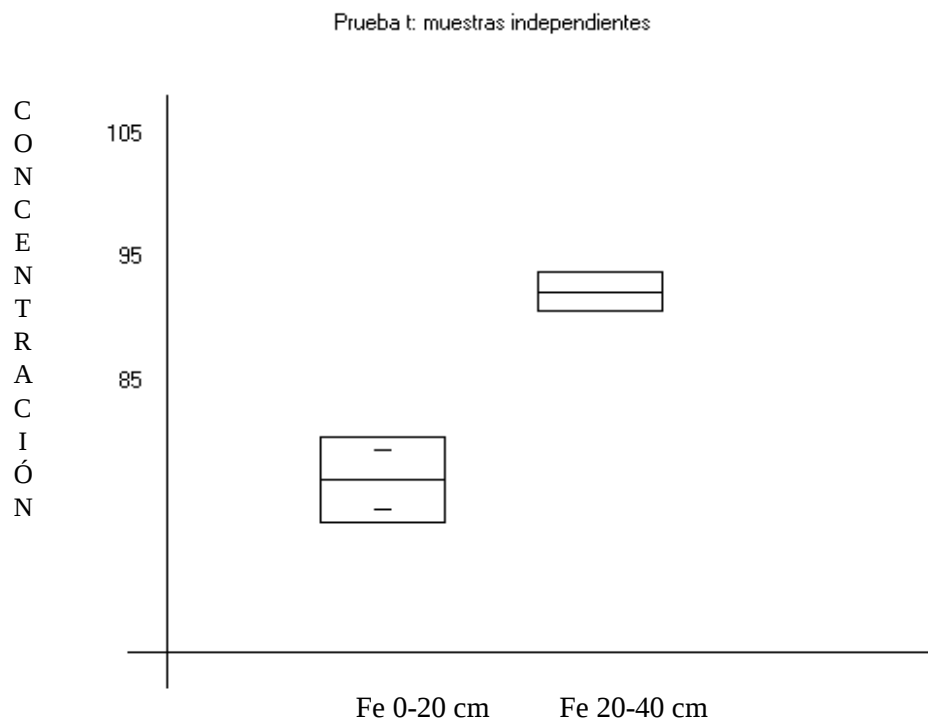


Tabla 4. Prueba de t (diferencias de medias) del Cobre del suelo de 0 a 20 y 20 a 40 cm de profundidad en zona de cultivo de *M. esculenta*. 2021.

	Cu 0 - 20	Cu 20 - 40
Tamaño =	3	3
Media =	22	17,6667
Varianza =	1	2,3333
	Desigual	Igual
Varianza =	1,1111	1,6667
t =	4,111	4,111
Grados de libertad =	3,45	4,0
p (unilateral) =	0,013	0,0073
p (bilateral) =	0,026	0,0147
Diferencia entre las medias =	4,3333	---

Figura 4. Prueba de t para la concentración de Cu de 0 a 20 y 20 a 40 cm de profundidad en el suelo.

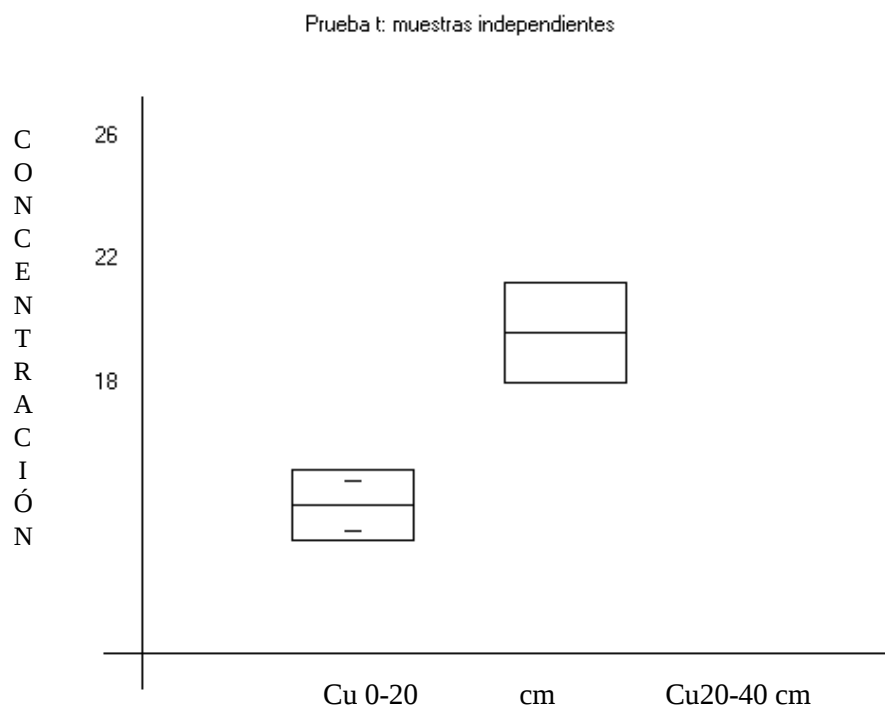


Tabla 5. Prueba de t (diferencias de medias) del manganeso del suelo de 0 a 20 y de 20 a 40 cm de profundidad en cultivo de *M. esculenta*. 2021.

	Mn 0 - 20	Mn 20 – 40
Tamaño =	3	3
Media =	211,3333	198,6667
Varianza =	2,3333	10,3333
	Desigual	Igual
Varianza =	4,2222	6,3333
t =	6,1644	6,1644
Grados de libertad =	2,86	4,0
p (unilateral) =	0,0127	0,0018
p (bilateral) =	0,0253	0,0035
Diferencia entre las medias =	12,6667	---

Figura 5. Prueba de t para la concentración de Mn en 0 a 20 y 20 a 40 cm de profundidad en el suelo.

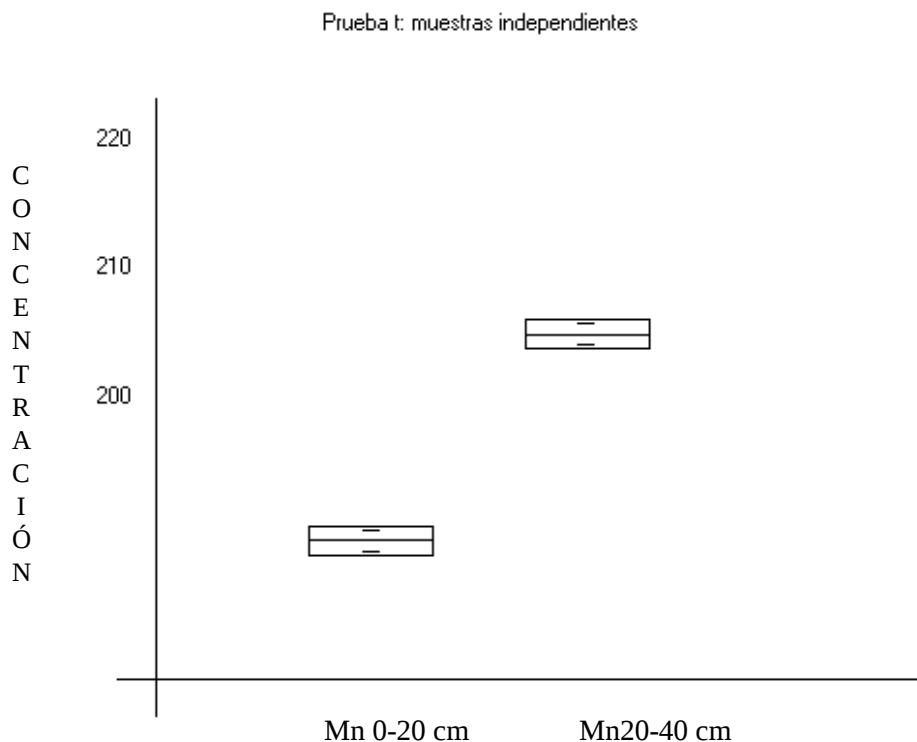


Tabla 6. Prueba de t (diferencias de medias) del Zinc del suelo de 0 a 20 y de 20 a 40 cm de profundidad en cultivo de *M. esculenta*. 2021.

Zinc	Zn 0 - 20	Zn 20 - 40
Tamaño =	3	3
Media =	73,3333	63
Varianza =	0,3333	4
	Desigual	Igual
Varianza =	1,4444	2,1667
t =	8,5979	8,5979
Grados de libertad =	2,33	4,0
p (unilateral) =	0,0066	0,0005
p (bilateral) =	0,0133	0,001
Diferencia entre las medias =	10,3333	---

Figura 6. Prueba de t para la concentración de Zn de 0 a 20 y 20 a 40 cm de profundidad en el suelo.

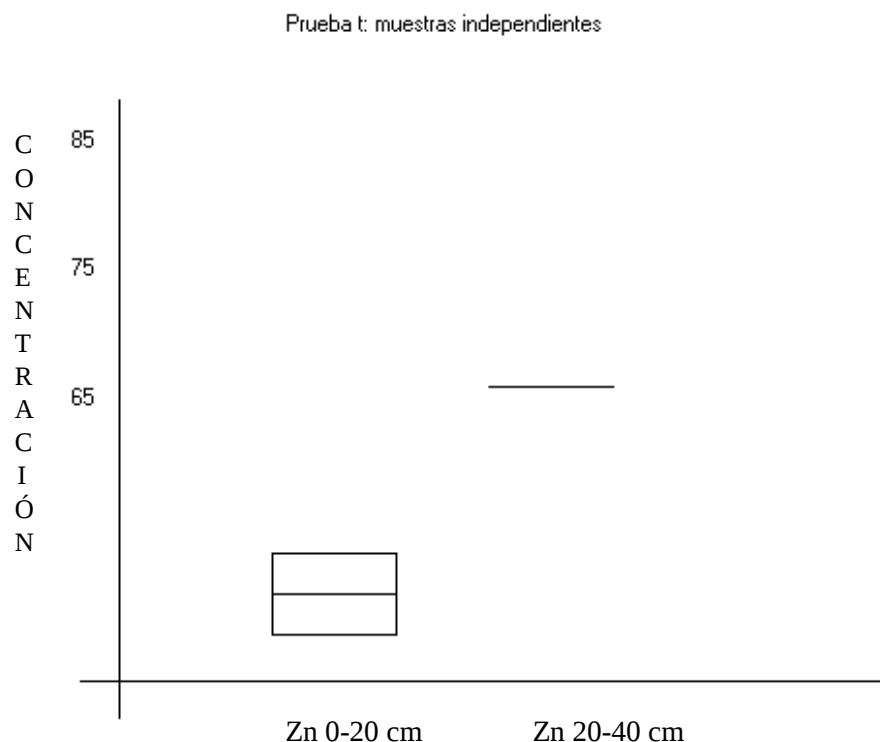


Tabla 7. Prueba de t (diferencias de medias) del Plomo del suelo de 0 a 20 y de 20 a 40 cm de profundidad en cultivo de *M. esculenta*. 2021.

	Pb 0 - 20	Pb 20 - 40
Tamaño =	3	3
Media =	3,7233	2,7833
Varianza =	0,0006	0,0558
	Desigual	Igual
Varianza =	0,0188	0,0282
t =	6,8516	6,8516
Grados de libertad =	2,05	4,0
p (unilateral) =	0,0103	0,0012
p (bilateral) =	0,0206	0,0024
Diferencia entre las medias =	0,94	---

Figura 7. Prueba de t para la concentración de Pb en una profundidad de 0 a 20 y de 20 a 40 cm del suelo.

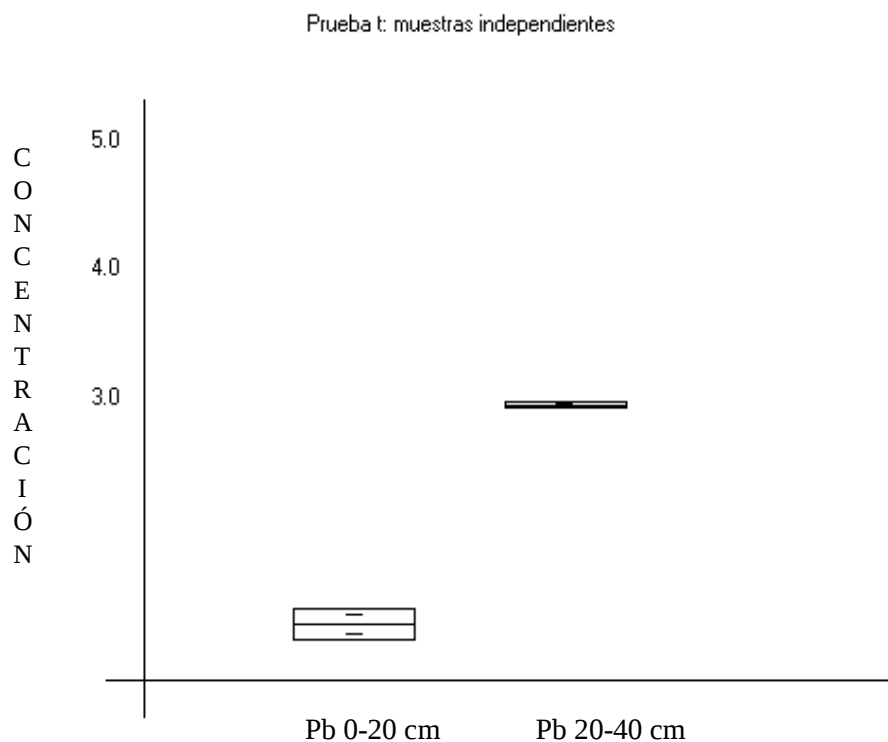


Tabla 8. Prueba de t (diferencias de medias) del cadmio en muestras de suelo de 0 a 20 y de 20 a 40 cm de profundidad en zona de cultivo de *M. esculenta*, 2021.

	Cd (de 0 a 20)	Cd (de 20 a 40)
Tamaño =	3	3
Media =	0,0867	0,0767
Varianza =	0	0
	Desigual	Igual
Varianza =	0	0
t =	2,1213	2,1213
Grados de libertad =	4	4
p (unilateral) =	0,0506	0,0506
p (bilateral) =	0,1011	0,1011
Diferencia entre las medias =	0,01	---

Figura 8. Prueba de t para la concentración de Cd en 0-20 y 20-40 cm de profundidad en el suelo.

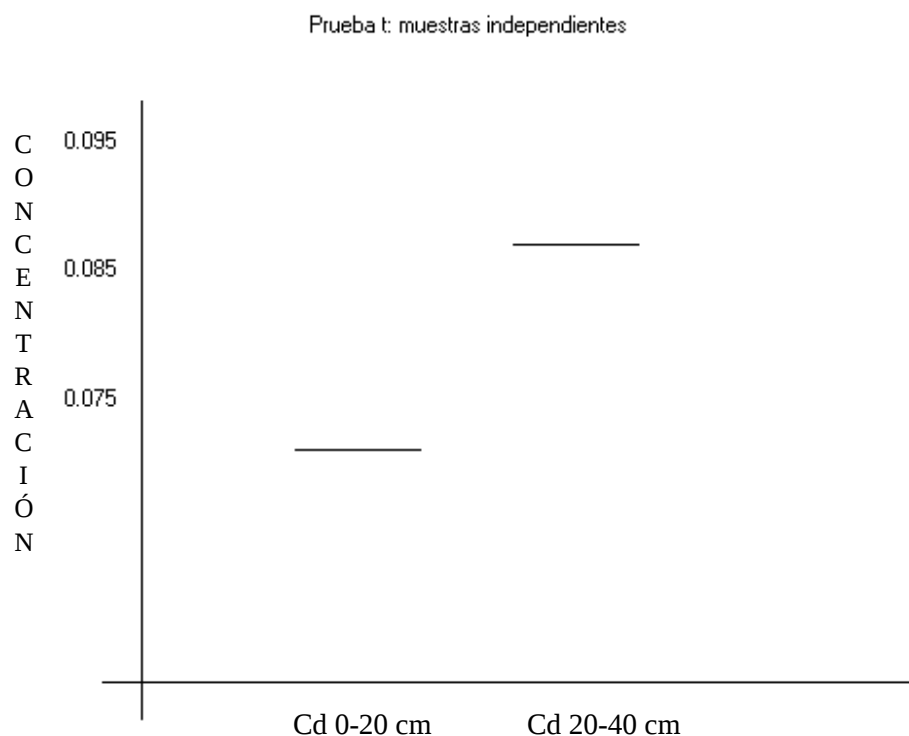
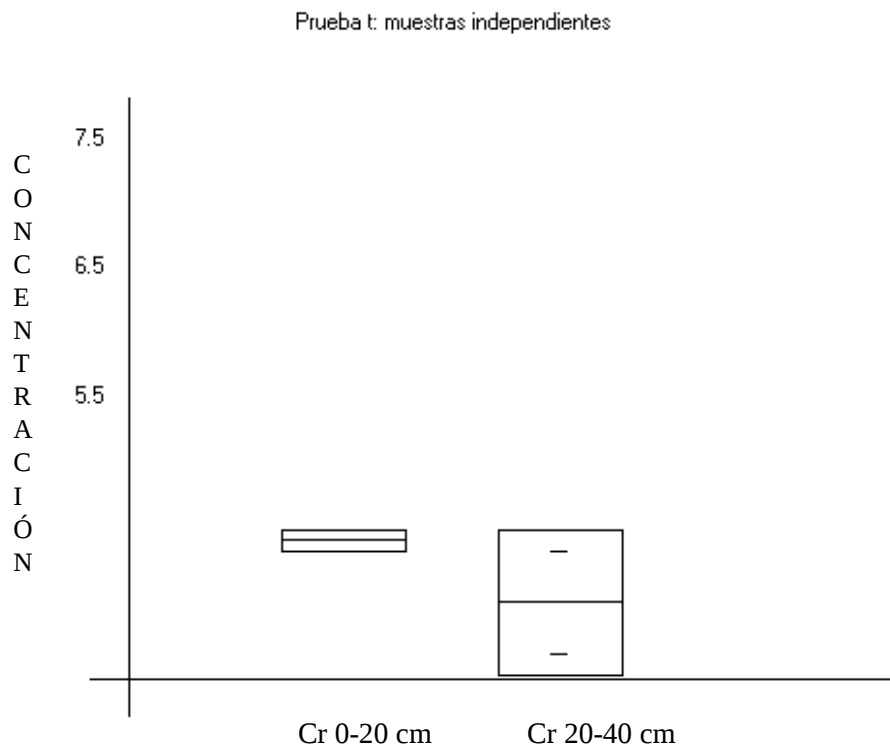


Tabla 9. Prueba de t (diferencias de medias) del cromo del suelo de 0 a 20 y de 20 a 40 cm de profundidad en cultivo de *M. esculenta*, 2021.

	Cr 0 - 20	Cr 20 - 40
Tamaño =	3	3
Media =	5,5133	5,55
Varianza =	0,2705	0,0025
	Desigual	Igual
Varianza =	0,091	0,1365
t =	-0,1215	-0,1215
Grados de libertad =	2,04	4,0
p (unilateral) =	0,4572	0,4546
p (bilateral) =	0,9144	0,9091
Diferencia entre las medias =	-0,0367	---

Figura 9. Prueba de t para la concentración de Cr de 0 a 20 y de 20 a 40 cm de profundidad en el suelo.



3.3.2. Concentración de los metales: Fe, Cu, Mn, Zn, Cd, Pb y Cr sin tener en cuenta su estado de oxidación, en la raíz y hojas de *M. esculenta* (yuca) cultivada en la zona de Puerto Almendra Nina Rumi

La evaluación de la concentración de metales en los tejidos vegetales constituye una etapa fundamental para comprender el comportamiento de los elementos químicos dentro del sistema suelo-planta y determinar el grado de incorporación de estos compuestos a los órganos de la especie cultivada. En el caso de *Manihot esculenta*, este análisis adquiere una importancia especial debido a que las raíces representan la principal parte destinada al consumo humano, mientras que las hojas participan activamente en los procesos fisiológicos relacionados con el crecimiento, el transporte de nutrientes y el metabolismo vegetal. El estudio conjunto de ambos órganos permite obtener una visión integral de la distribución de los metales dentro de la planta y comprender los mecanismos de absorción y translocación desarrollados durante su ciclo de crecimiento.

Los metales presentes en el suelo pueden ser absorbidos por el sistema radical cuando se encuentran disponibles en la solución del suelo y, posteriormente, ser transportados hacia diferentes órganos vegetales mediante los tejidos conductores de la planta. La magnitud de este proceso depende de múltiples factores, entre ellos la concentración de los metales en el suelo, las propiedades físico-químicas del ambiente, la biodisponibilidad de los elementos y las características fisiológicas propias de la especie. Por ello, el análisis de las raíces y las hojas constituye un indicador confiable para evaluar la dinámica de los metales dentro de *Manihot esculenta* y determinar su posible implicancia para la seguridad alimentaria.

En el presente estudio se determinó la concentración de **hierro (Fe), cobre (Cu), manganeso (Mn), zinc (Zn), cadmio (Cd), plomo (Pb) y cromo (Cr)** en las muestras de raíces y hojas de *Manihot esculenta* recolectadas en las localidades de **Puerto Almendra** y **Nina Rumi**, considerando la concentración total de estos elementos sin diferenciar su estado de oxidación. Esta metodología permitió caracterizar la composición química del cultivo y disponer de información objetiva para evaluar posteriormente la relación entre el contenido de metales en la planta y la concentración determinada en el suelo agrícola.

La selección de estos metales responde a su importancia desde las perspectivas agronómica, ambiental y sanitaria. El hierro, el cobre, el manganeso y el zinc constituyen micronutrientes esenciales para el metabolismo vegetal y participan en procesos relacionados con la fotosíntesis, la respiración celular, la síntesis enzimática y el desarrollo normal de la planta. Por su parte, el cadmio, el plomo y el cromo son considerados elementos de interés ambiental debido a su potencial toxicidad y a la capacidad que poseen para acumularse en los tejidos vegetales cuando las condiciones del suelo favorecen su absorción.

Como se desarrolló en el marco teórico, la bioacumulación de metales en *Manihot esculenta* representa un aspecto de especial relevancia debido a la importancia alimentaria de este cultivo en la Amazonía peruana. La presencia de determinados metales en las raíces puede constituir una vía potencial de exposición para la población cuando estas son destinadas al consumo humano, mientras que el análisis de las hojas

permite comprender los procesos internos de transporte y distribución de los elementos absorbidos por la planta.

El documento base de la investigación establece que uno de los objetivos centrales del estudio consistió en determinar la concentración de metales presentes en *Manihot esculenta* cultivada en Puerto Almendra y Nina Rumi, con el propósito de analizar posteriormente su relación con las concentraciones determinadas en el suelo agrícola. Esta información constituye el fundamento para evaluar el comportamiento de los procesos de transferencia suelo-planta bajo condiciones propias de los ecosistemas amazónicos.

Las concentraciones presentadas en esta sección corresponden a los análisis realizados sobre las muestras de raíces y hojas procesadas en el **Laboratorio de Suelos de la Universidad Nacional Agraria La Molina**, donde se aplicaron procedimientos analíticos estandarizados para cuantificar los metales considerados en la investigación. Los resultados obtenidos representan una evidencia objetiva sobre la composición química del cultivo y permiten caracterizar la distribución de los diferentes elementos en los principales órganos de la planta.

La presentación de los resultados se organiza de manera independiente para las raíces y las hojas, facilitando la comparación entre ambos tejidos vegetales y permitiendo identificar posibles diferencias en los patrones de acumulación de cada metal. Esta organización proporciona una visión más completa del comportamiento fisiológico de *Manihot esculenta* frente a los elementos presentes en el suelo y constituye una base sólida para el análisis estadístico desarrollado posteriormente.

En conjunto, los resultados expuestos en esta sección complementan la información obtenida en el análisis de los suelos agrícolas y permiten comprender de forma integral la interacción entre el ambiente edáfico y el cultivo. La comparación entre las concentraciones determinadas en el suelo, las raíces y las hojas aporta evidencia científica sobre los procesos de absorción, transporte y acumulación de metales en *Manihot esculenta*, fortaleciendo el análisis de la relación entre ambas variables y contribuyendo a una mejor comprensión de sus implicancias para la calidad ambiental y la seguridad alimentaria en la Amazonía peruana.

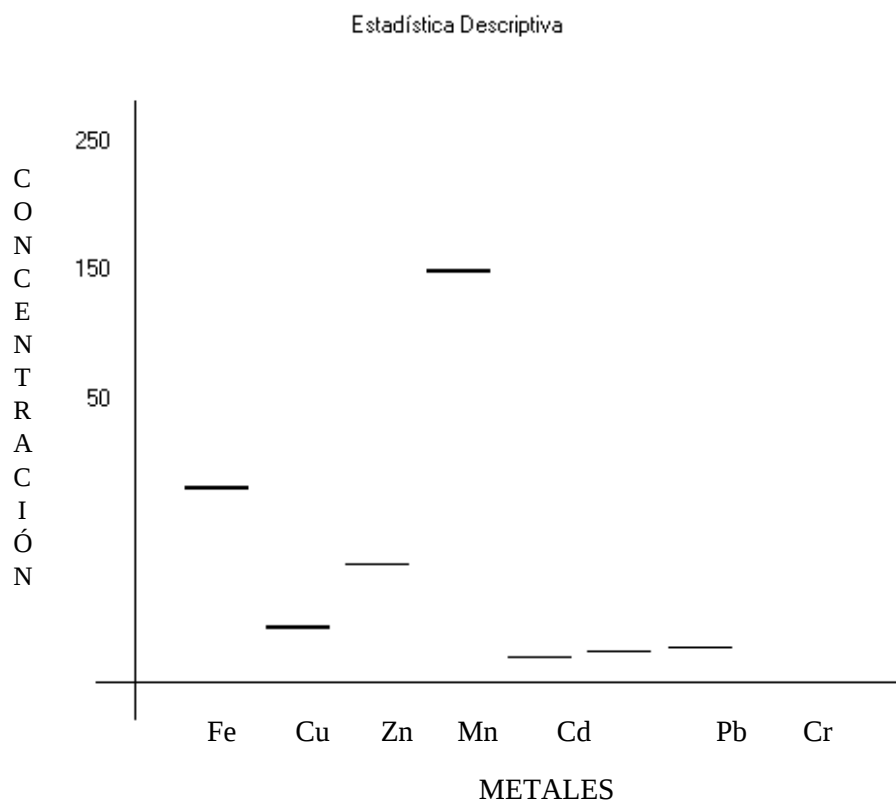
3.3.2.1. Concentración de metales en las hojas de *M. esculenta*

En la tabla 10, se muestra la concentración de los metales, sin tener en cuenta su estado de oxidación, como hierro, cobre, manganeso, zinc, cadmio, plomo y cromo en las hojas de *M. esculenta* (yuca) cultivada en la zona de Puerto Almendra Nina Rumi, todas las concentraciones estuvieron por encima de los valores permitidos. El hierro tuvo valores entre 82 a 83 ppm, el cobre varió entre 14 a 14,58 ppm, el manganeso de 185 a 187,75 ppm, el zinc con valores de 44 a 45 ppm, el cadmio varió entre 0,02 a 0,03 ppm (el cadmio fue el único metal que estuvo ligeramente dentro de su rango normal $\leq 0,02$ ppm), el plomo con 2,4 a 2,85 ppm y el Cromo varió entre 5 a 5,1 ppm. Así mismo, los valores bajos de la desviación estándar indica que la concentración de los metales en las hojas de *Manihot esculenta* es relativamente homogéneo.

Tabla 10. Estadígrafos empleados para analizar los metales en la hoja de *M. esculenta* cultivadas en Puerto Almendra y Nina Rumi, 2021.

	Fe (ppm)	Cu (ppm)	Mn (ppm)	Zn (ppm)	Cd (ppm)	Pb (ppm)	Cr (ppm)
n =	3	3	3	3	3	3	3
Mínimo	82	14	185	44	0,02	2,4	5
Máximo	83	14,58	187,75	45	0,03	2,85	5,1
Amplitud Total	1	0,58	2,75	1	0,01	0,45	0,1
Media Aritmética	82,35	14,29	186,58	44,66	0,026	2,6	5,05
Varianza	0,317	0,084	2,020	0,333	0,0	0,052	0,0025
Desviación Estándar	0,563	0,290	1,421	0,577	0,005	0,229	0,05
Coficiente de Variación	0,0068	0,0203	0,0076	0,0129	0,2165	0,0881	0,0099

Figura 10.Desviación estándar de la concentración de metales en la hoja de yuca



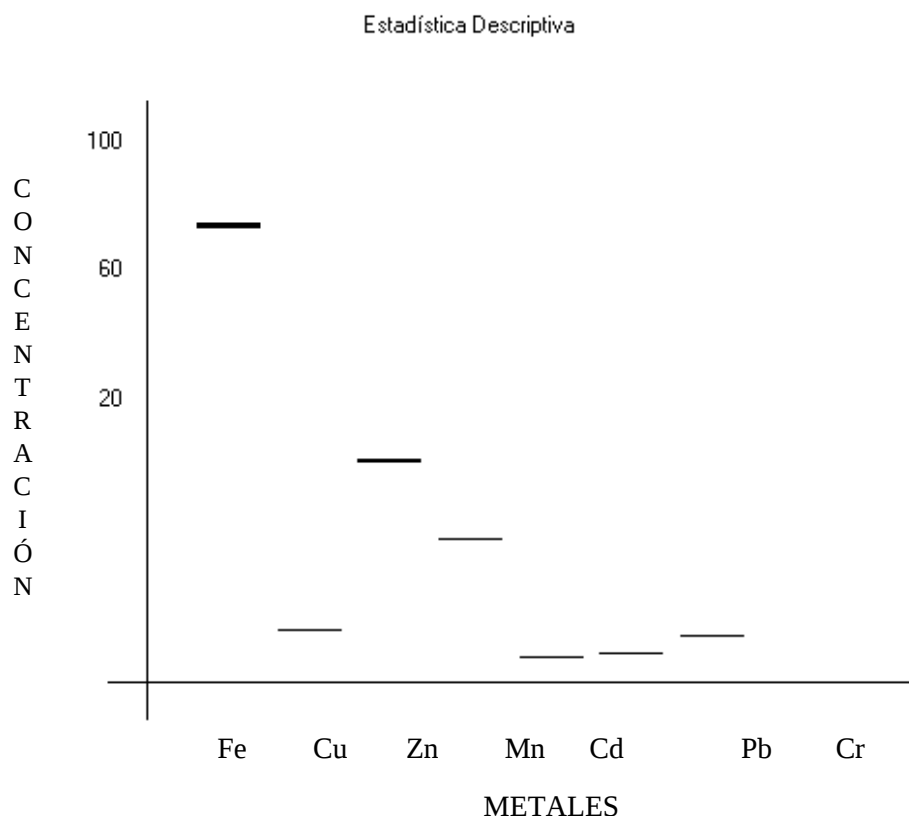
3.3.2.2. Concentración de metales en la raíz de *M. esculenta*

En la tabla 11 se muestra los valores obtenidos de la concentración de metales en la raíz de *M. esculenta* cultivadas en suelos de Puerto Almendra y Nina Rumi sobrepasó los límites permitidos. El hierro varió entre 83 a 83,85 ppm, el cobre entre 5,2 a 5,38 ppm, el manganeso estuvo entre 22 a 23 ppm, zinc varió entre 37 a 38,33 ppm, el cadmio entre 0,025 a 0,03 ppm (el cadmio fue el único metal que sobrepasó ligeramente el rango normal de $\leq 0,02$ ppm), el plomo estuvo entre 0,7 a 0,76 ppm y el Cromo entre 4 a 4,1 ppm. Por otra parte, la desviación estándar baja indica que los valores de la concentración de los metales en la raíz de *M. esculenta* fue relativamente homogénea.

Tabla 11. Estadígrafos empleados para analizar los metales en la raíz de *M. esculenta* cultivadas en Puerto Almendra y Nina Rumi. 2021.

	Fe	Cu	Mn	Zn	Cd	Pb	Cr
	(ppm)	(ppm)	(ppm)	(ppm)	(ppm)	(ppm)	(ppm)
n=	3	3	3	3	3	3	3
Mínimo	83	5,2	22	37	0,025	0,7	4
Máximo	83,85	5,38	23	38,33	0,03	0,76	4,1
Amplitud Total	0,85	0,18	1	1,33	0,005	0,06	0,1
Media Aritmética	83,45	5,293	22,667	37,77	0,026	0,736	4,05
Varianza	0,182	0,008	0,333	0,479	0	0,001	0,002
Desviación Estándar	0,427	0,090	0,577	0,692	0,002	0,032	0,05
Error Estándar	0,246	0,052	0,333	0,399	0,001	0,018	0,028
Coefficiente de Variación	0,0051	0,017	0,0255	0,0183	0,1083	0,0436	0,0123

Figura 11. Desviación estándar de la concentración de metales en la raíz de *M. esculenta*.



3.3.2.3. Pruebas de *t* en la concentración de metales en las hojas y raíz de *M. esculenta* en Puerto Almendra y Nina Rumi

En las tablas de la 12 a la 18, se muestran las pruebas de *t* ejecutadas para la concentración de metales en las hojas y raíz de *M. esculenta* cultivadas en los suelos de Puerto Almendra y Nina Rumi, indica que hay diferencias significativas entre la concentración del hierro, zinc, cadmio y plomo en las hojas y raíz de *M. esculenta* a un nivel de significancia de $\alpha = 0,05$, con el hierro ($t = -2,6944$), zinc ($t = 13,2613$), cadmio ($t = 0$) y plomo ($t = 13,9489$) que obtuvieron valores relativamente altos y teniendo en cuenta que *p* (bilateral) fue altamente significativo con probabilidades mayor a 0,0001, se rechaza la *H₀* y se acepta la *H_a*, de que hay diferencias en la concentración de estos metales en las hojas y raíz de *M. esculenta*, siendo más altos las concentraciones en las hojas que en la raíz; mientras que con respecto al cobre, manganeso y cromo estas diferencias no son significativas.

Tabla 12. Prueba de *t* (diferencias de medias) de hierro en las hojas y raíz de *M. esculenta*. 2021.

	Fe hoja	Fe raíz
Tamaño =	3	3
Media =	82,35	83,45
Varianza =	0,3175	0,1825
	Desigual	Igual
Varianza =	0,1667	0,25
<i>t</i> =	-2,6944	-2,6944
Grados de libertad =	3,73	4,0
<i>p</i> (unilateral) =	0,037	0,0272
<i>p</i> (bilateral) =	0,0741	0,0544
Diferencia entre las medias =	-1,1	---

Figura 12. Prueba de t para la concentración de Fe en las hojas y raíz de *M. esculenta*, 2021

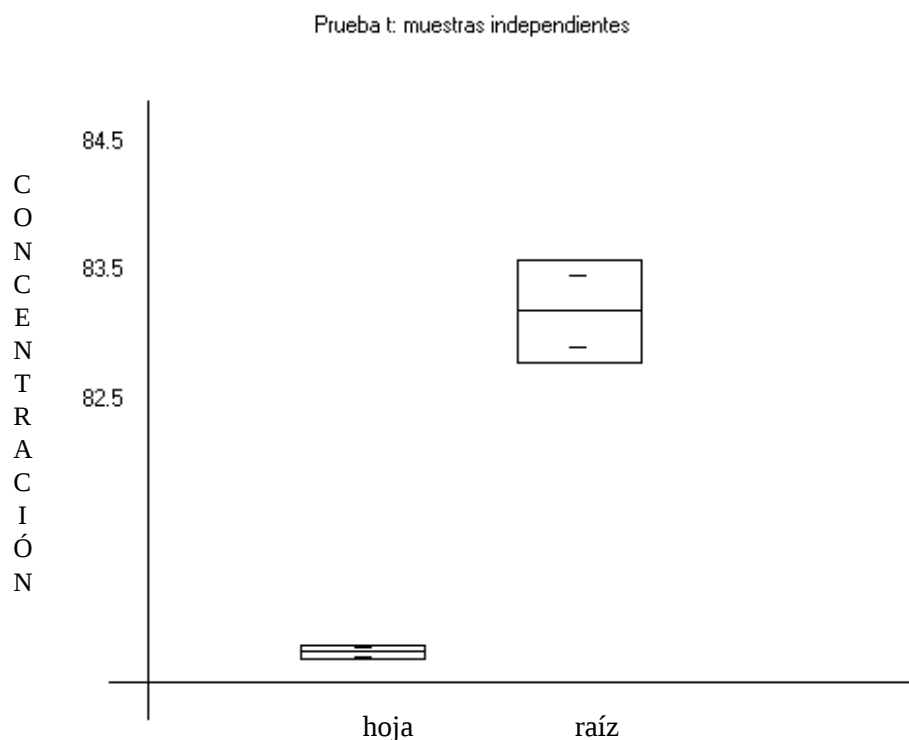


Tabla 13. Prueba de t (diferencias de medias) del cobre en las hojas y raíz de *M. esculenta*, 2021.

	Cu hoja	Cu raíz
Tamaño =	3	3
Media =	14,2933	5,2933
Varianza =	0,0841	0,0081
	Desigual	Igual
Varianza =	0,0308	0,0461
t =	51,3193	51,3193
Grados de libertad =	2,38	4
p (unilateral) =	0	0
p (bilateral) =	0	0
Diferencia entre las medias =	9	---

Figura 13. Prueba de t para la concentración de Cu en las hojas y raíz de *M. esculenta*, 2021.

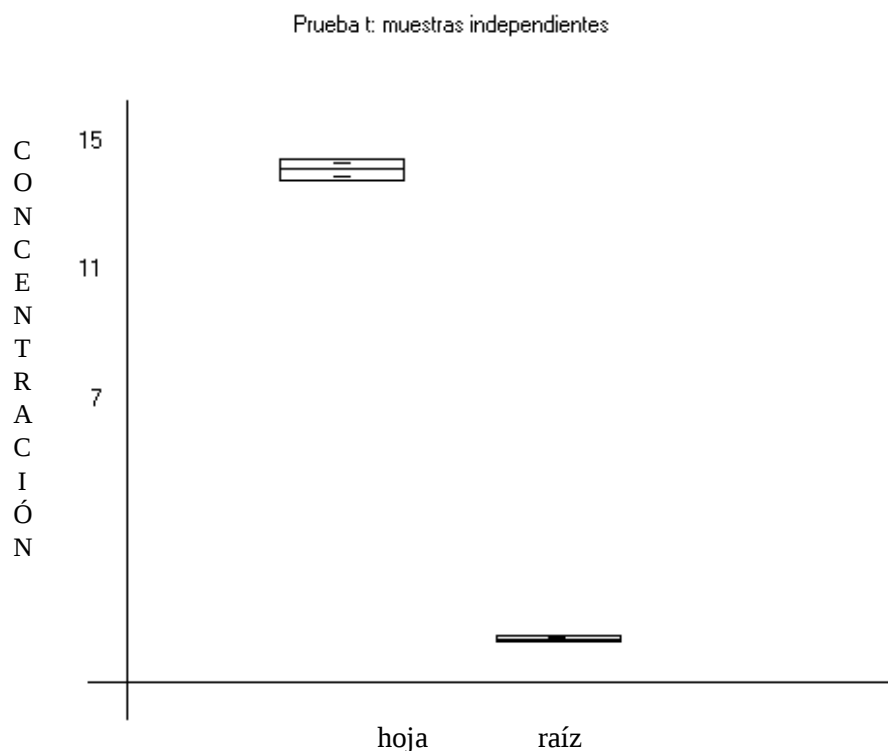


Tabla 14. Prueba de t (diferencias de medias) del manganeso en las hojas y raíz de *M. esculenta*, 2021.

	Mn hoja	Mn raíz
Tamaño =	3	3
Media =	186,5833	22,6667
Varianza =	2,0208	0,3333
	Desigual	Igual
Varianza =	0,7847	1,1771
t =	185,0398	185,0398
Grados de libertad =	2,64	4
p (unilateral) =	0	0
p (bilateral) =	0	0
Diferencia entre las medias =	163,9167	---

Figura 14. Prueba de t para la concentración de Mn en las hojas y raíz de *M. esculenta*, 2021.

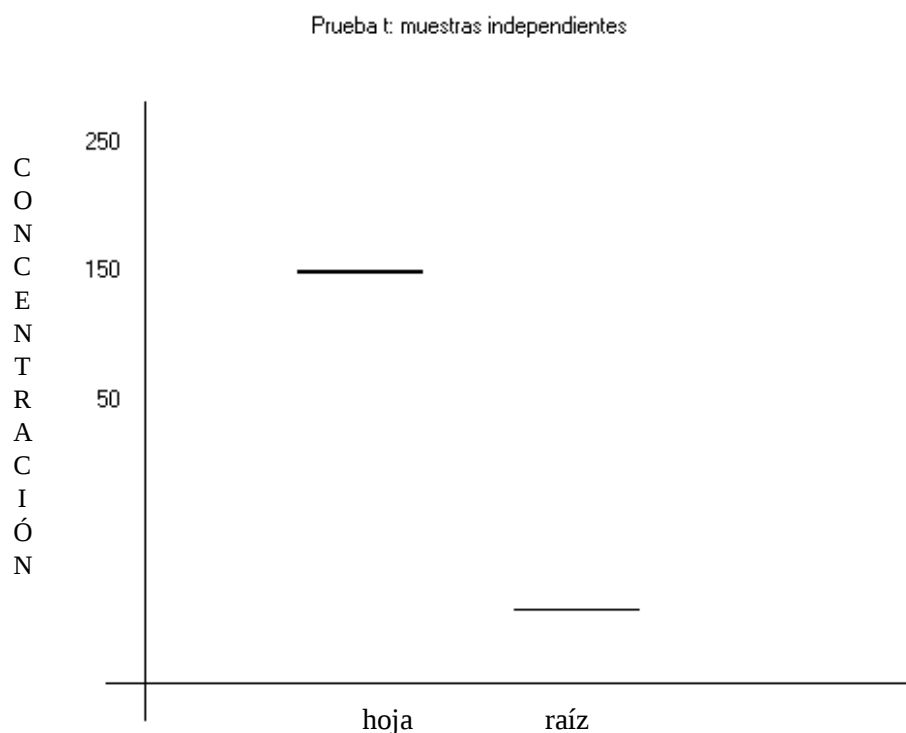


Tabla 15. Prueba de t (diferencias de medias) del zinc en las hojas y raíz de *M. esculenta*, 2021.

	Zn hoja	Zn raíz
Tamaño =	3	3
Media =	44,6667	37,775
Varianza =	0,3333	0,4769
	Desigual	Igual
Varianza =	0,2701	0,4051
t =	13,2613	13,2613
Grados de libertad =	3,88	4,0
p (unilateral) =	0,0005	0,0001
p (bilateral) =	0,0009	0,0002
Diferencia entre las medias =	6,8917	---

Figura 15. Prueba de t para la concentración de Zn en las hojas y raíz de *M. esculenta*, 2021.

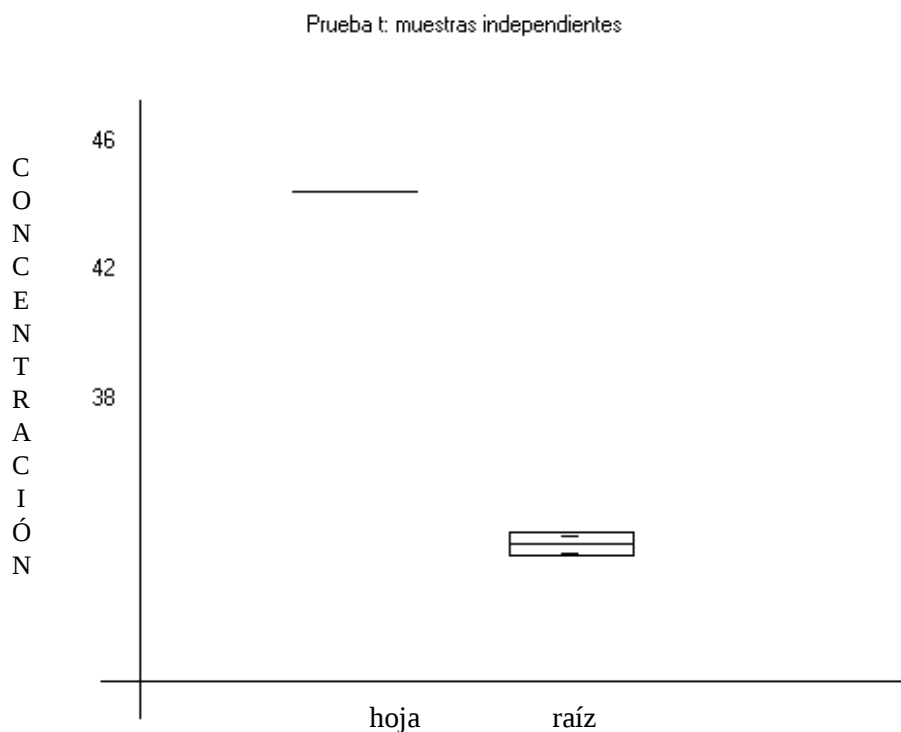


Tabla 16. Prueba de t (diferencias de medias) del cadmio en la hoja y raíz de *M. esculenta*. 2021.

	Cd hoja	Cd raíz
Tamaño =	3	3
Media =	0,0267	0,0267
Varianza =	0	0
	Desigual	Igual
Varianza =	0	0
t =	0	0
Grados de libertad =	2,94	4
p (unilateral) =	0,5	0,5
p (bilateral) =	1	1
Diferencia entre las medias =	0	---

Figura 16. Prueba de t para la concentración de Cd en hoja y raíz de *M.esculenta*, 2021.

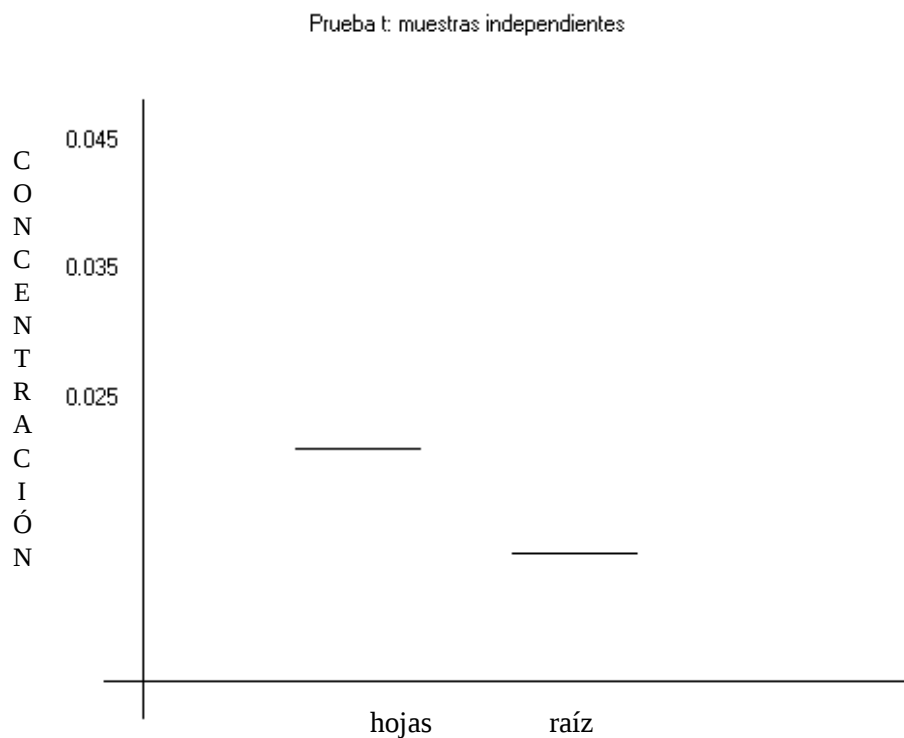


Tabla 17. Prueba de t (diferencias de medias) del plomo en las hojas y raíz de *M.esculenta*, 2021.

	Pb hoja	Pb raíz
Tamaño =	3	3
Media =	2,6	0,7367
Varianza =	0,0525	0,001
	Desigual	Igual
Varianza =	0,0178	0,0268
t =	13,9489	13,9489
Grados de libertad =	2,08	4,0
p (unilateral) =	0,0026	0,0001
p (bilateral) =	0,0051	0,0002
Diferencia entre las medias =	1,8633	---

Figura 17. Prueba de t para la concentración de Pb en las hojas y raíz de *M.esculenta*.

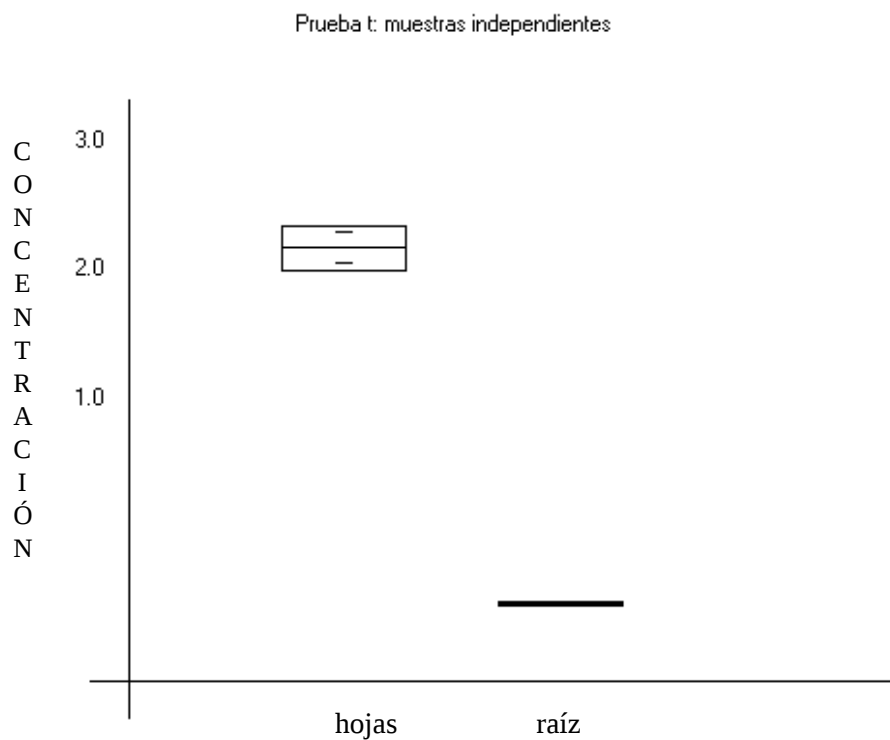
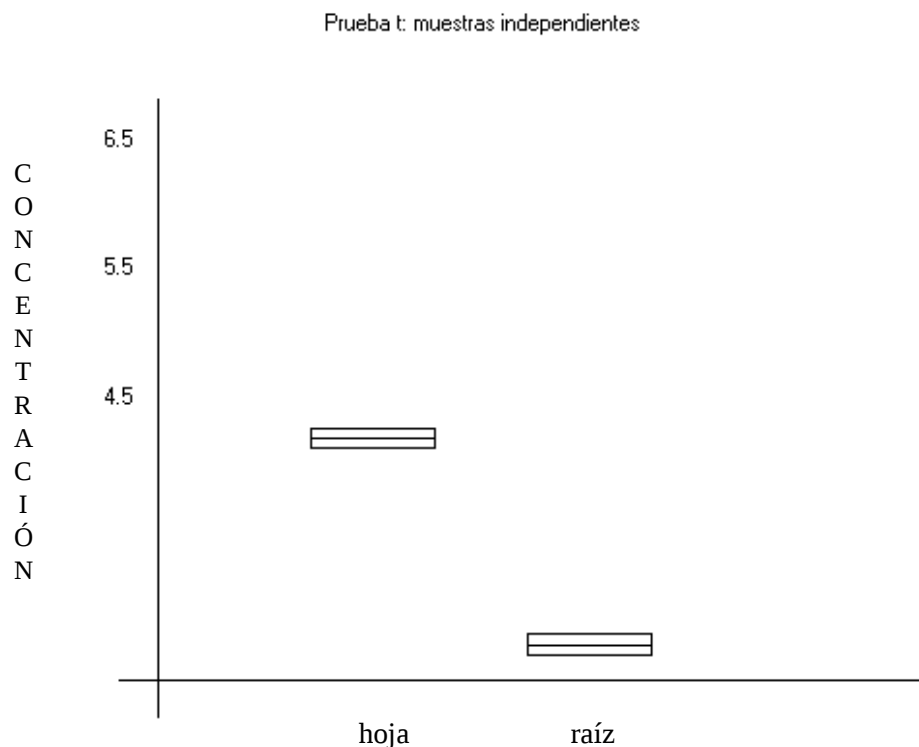


Tabla 18. Prueba de t (diferencias de medias) del cromo en las hojas y raíz de *M.esculenta*, 2021.

	Cr hoja	Cr raíz
Tamaño =	3	3
Media =	5,05	4,05
Varianza =	0,0025	0,0025
	Desigual	Igual
Varianza =	0,0017	0,0025
t =	24,4949	24,4949
Grados de libertad =	4	4
p (unilateral) =	0	0
p (bilateral) =	0	0
Diferencia entre las medias =	1	---

Figura 18. Prueba de t para la concentración de Cr en las hojas y raíz de *M. esculenta*, 2021.



3.3.3. Prueba de hipótesis de la relación entre los metales presentes en el suelo y su presencia en las hojas y la raíz de *M. esculenta* en Puerto Almendra y Nina Rumi

La etapa de contrastación de hipótesis representa el momento culminante del análisis cuantitativo, ya que permite determinar, mediante procedimientos estadísticos, si existe evidencia suficiente para aceptar o rechazar la hipótesis planteada al inicio de la investigación. A diferencia del análisis descriptivo, cuyo propósito consiste en caracterizar el comportamiento de las variables de estudio, la prueba de hipótesis busca establecer objetivamente la existencia de una relación estadísticamente significativa entre ellas, proporcionando el sustento científico necesario para responder al problema de investigación.

En el presente estudio, la prueba de hipótesis estuvo orientada a evaluar la relación existente entre la **concentración de los metales presentes en el suelo agrícola** y la **concentración de esos mismos elementos en las raíces y hojas de *Manihot esculenta*** cultivada en las localidades de Puerto Almendra y Nina Rumi, región Loreto.

Este análisis constituye el objetivo central de la investigación, debido a que permite determinar si las características químicas del suelo se encuentran asociadas con el contenido de metales acumulado por el cultivo bajo condiciones propias de la Amazonía peruana.

La hipótesis de investigación parte del fundamento científico de que los metales presentes en el suelo pueden ser absorbidos por el sistema radical de las plantas cuando las condiciones ambientales favorecen su biodisponibilidad. Una vez incorporados al organismo vegetal, estos elementos pueden ser transportados hacia diferentes órganos, entre ellos las raíces tuberosas y las hojas, mediante procesos fisiológicos relacionados con la absorción, la translocación y el almacenamiento de nutrientes y otros compuestos minerales. En consecuencia, si existe una relación entre ambas variables, es razonable esperar que las concentraciones determinadas en el suelo guarden correspondencia con las concentraciones observadas en los tejidos vegetales.

Como se desarrolló en los capítulos teóricos, la magnitud de esta relación puede estar influenciada por diversos factores, entre ellos el pH del suelo, la textura, el contenido de materia orgánica, la movilidad de los metales y las características fisiológicas de *Manihot esculenta*. Por esta razón, la comprobación estadística de la hipótesis adquiere una importancia fundamental, ya que permite determinar si, bajo las condiciones ambientales específicas de Puerto Almendra y Nina Rumi, la concentración de metales presente en el suelo constituye un factor asociado al contenido de dichos elementos en la planta.

El documento base de la investigación establece que el objetivo general consistió en **determinar la relación entre la concentración de metales presentes en el suelo y el contenido de estos elementos en *Manihot esculenta***, utilizando procedimientos estadísticos para contrastar la hipótesis planteada y responder científicamente al problema de investigación.

La prueba de hipótesis fue desarrollada a partir de los resultados obtenidos durante el análisis de laboratorio, utilizando las concentraciones determinadas en las muestras de suelo, raíces y hojas recolectadas en las zonas de estudio. Estos datos fueron sometidos al tratamiento estadístico correspondiente con la finalidad de

establecer el grado de asociación existente entre las variables y determinar si dicha relación presenta significancia estadística.

La aplicación de procedimientos estadísticos en investigaciones ambientales resulta indispensable porque permite diferenciar entre asociaciones reales y variaciones que podrían atribuirse al azar. De esta manera, la interpretación de los resultados deja de depender únicamente de la observación descriptiva y adquiere un respaldo cuantitativo que fortalece la objetividad de las conclusiones obtenidas.

Los resultados que se presentan en este apartado muestran el comportamiento estadístico de las variables estudiadas y permiten evaluar la hipótesis formulada tanto para las **raíces** como para las **hojas de *Manihot esculenta***. Este análisis posibilita identificar la intensidad de la relación existente entre la concentración de metales presente en el suelo y la acumulación de dichos elementos en cada uno de los órganos vegetales evaluados, aportando información relevante sobre los procesos de transferencia suelo-planta.

La interpretación de los resultados estadísticos no solo permite establecer la existencia de una relación entre las variables, sino que también proporciona evidencia científica para comprender el comportamiento de los metales dentro del agroecosistema amazónico. Asimismo, contribuye a explicar los mecanismos de bioacumulación desarrollados por *Manihot esculenta* y fortalece el conocimiento sobre los posibles riesgos asociados a la presencia de metales en un cultivo de elevada importancia alimentaria para la región Loreto.

En conjunto, la prueba de hipótesis constituye el fundamento analítico que integra toda la investigación. A través de ella se contrastan los planteamientos formulados en el marco teórico con la evidencia obtenida en el trabajo de campo y en el laboratorio, permitiendo establecer conclusiones objetivas acerca de la relación entre la concentración de metales presentes en el suelo y su presencia en las raíces y hojas de *Manihot esculenta*. De esta manera, esta sección proporciona el respaldo científico necesario para sustentar las conclusiones finales del estudio y aportar información útil para la gestión ambiental, la conservación de los suelos agrícolas y el fortalecimiento de la seguridad alimentaria en la Amazonía peruana.

3.3.3.1. Relación entre los metales presentes en el suelo y su presencia en las hojas de *M. esculenta* en Puerto Almendra y Nina Rumi

En la tabla 19, se muestra el coeficiente de correlación de Pearson (r) entre los metales presentes en el suelo entre 0 a 20 cm de profundidad y su presencia en las hojas de *M. esculenta*, indica una fuerte correlación positiva entre la profundidad y hojas con relación a los metales analizados, teniendo el plomo la correlación más alta con 0,9931, seguido del zinc con 0,8704, cobre con 0,7607 y los demás metales con menor correlación, rechazando la H_0 : no existe asociación entre la profundidad y hojas con respecto a los metales hierro, cobre, manganeso, zinc, cadmio, plomo y cromo por lo que se acepta la H_a : existe una correlación entre las dos variables, entre mayor la concentración en el suelo mayor será la concentración en las hojas (nivel de decisión = 0,05) y el Cadmio con una correlación de 0 (a un nivel de significancia de 95%), lo cual indica que ese metal no está presente en las hojas de *M. esculenta*.

En la tabla 20, se muestra el coeficiente de correlación de Pearson entre los metales presentes en el suelo a una profundidad de 20 a 40 cm y su asociación con respecto a las hojas, se observa una fuerte correlación positiva para plomo (0,9975), manganeso (0,6996), zinc (0,5774), cobre (0,4062), una baja correlación positiva para el cromo (0,0861) y para el cadmio una correlación de 0 (no hay correlación), mientras que para el hierro tuvo una correlación de -0,6885 indicando que es una prueba estadísticamente no significativa. De este modo, se rechaza la H_0 : no existe asociación entre la profundidad y hojas con respecto a los metales plomo, manganeso, zinc, cobre y cadmio y se acepta la H_a : existe una correlación entre las 2 variables, entre mayor la concentración en el suelo mayor será la concentración en las hojas (nivel de decisión = 0,05).

Tabla 19. Coeficiente de correlación de Pearson entre el metal del suelo entre 0 a 20 cm y su presencia en las hojas de *M. esculenta*.

	Fe/hoja		Cu/hoja		Zn/hoja		Mn/hoja		Cd/hoja		Pb/hoja	
N (pares) =	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
r (Pearson) =	0,1898	0,7607	0,8704	0,5726	0	0,9931	-0,94 a	-0,75 a	-0,55 a	-0,86 a	-0,96 a	0,70 a
IC 95% =	0,97	0,99	1,0	0,99	0,96	1,0	0,6418	-0,83 a	0,99	0,99	0,99	0,99
R2 =	0,036	0,5787	0,7576	0,3279	0	0,9863	0,2734	1,6573	2,5	0,9878	---	12
t =	0,2734	1,6573	2,5	0,9878	---	12	0,4119	0,4119	0,4119	0,4119	0,4119	0,4119
GL =	2	2	2	2	2	2	1,1836	1,1836	1,1836	1,1836	1,1836	1,1836
(p) =	0,8102	0,2392	0,1296	0,4273	0	0,0069	2	2	2	2	2	2

Figura 19. Correlación lineal de Pearson de Pb entre el suelo de 0 a 20 y las hojas de *M. esculenta*.

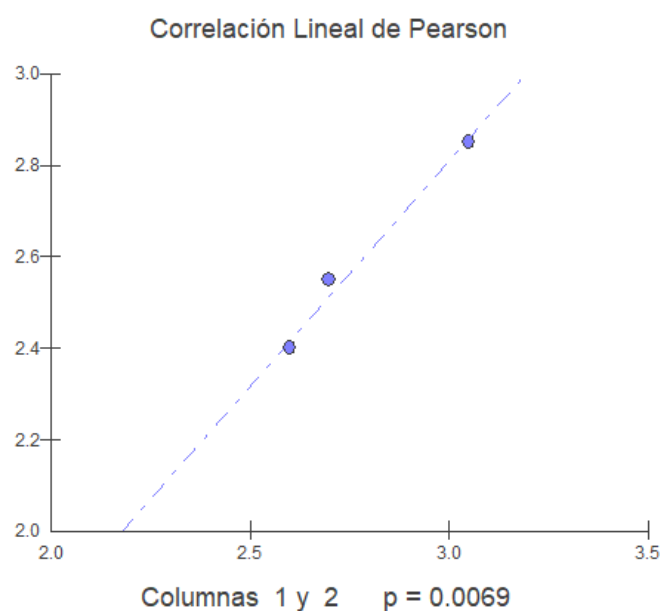


Figura 20. Correlación lineal de Pearson de Zn entre el suelo de 0 a 20 y las hojas de M. esculenta.

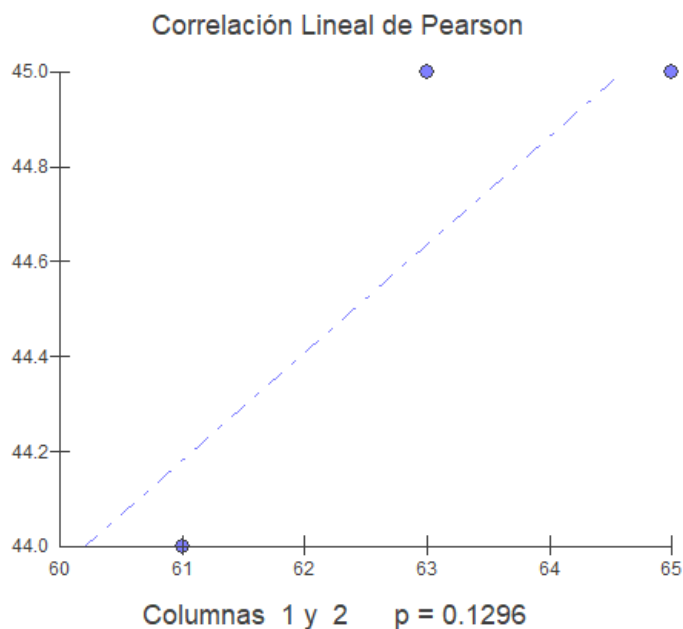


Figura 21. Correlación lineal de Pearson de Cu entre el suelo de 0 a 20 y las hojas de M. esculenta.

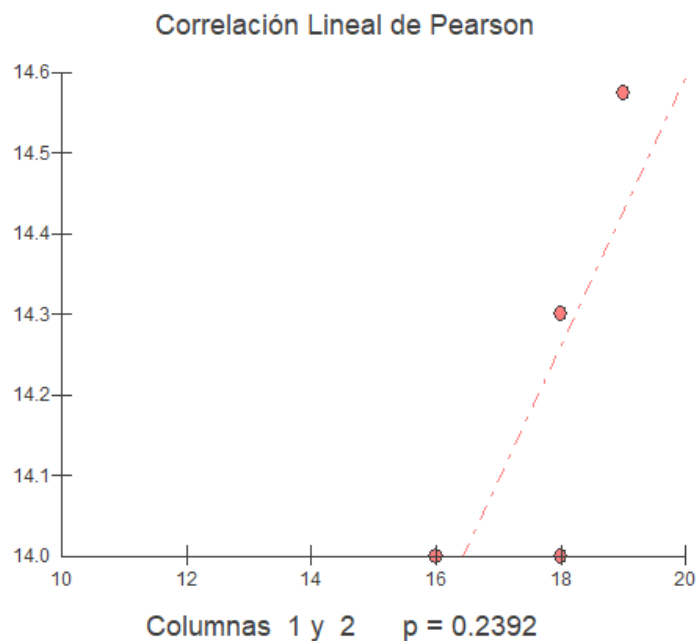


Tabla 20. Coeficiente de correlación de Pearson entre el contenido de metales en el suelo de 20 a 40 cm y su presencia en las hojas de *M. esculenta*.

	Fe	Cu	Zn	Mn	Cd	Pb	Cr
N (pares) =	3	3	3	3	3	3	3
r (Pearson) =	-0,6885	0,4062	0,5774	0,6996	0	0,9975	0,0861
	-0,99 a	-0,91 a	-0,86 a	-0,80 a	-0,96 a	0,88 a	-0,95 a
IC 95% =	0,81	0,98	0,99	0,99	0,96	1,00	0,97
R2 =	0,4741	0,165	0,3333	0,4894	0	0,995	0,0074
t =	-1,3427	0,6286	1	1,3845	---	20	0,1222
GL =	2	2	2	2	2	2	2
(p) =	0,3114	0,5938	0,4226	0,9139	0	0	0,9139

Figura 22. Correlación lineal de Pearson de Pb entre el suelo de 20 a 40 y las hoja de *M.esculenta*, 2021.

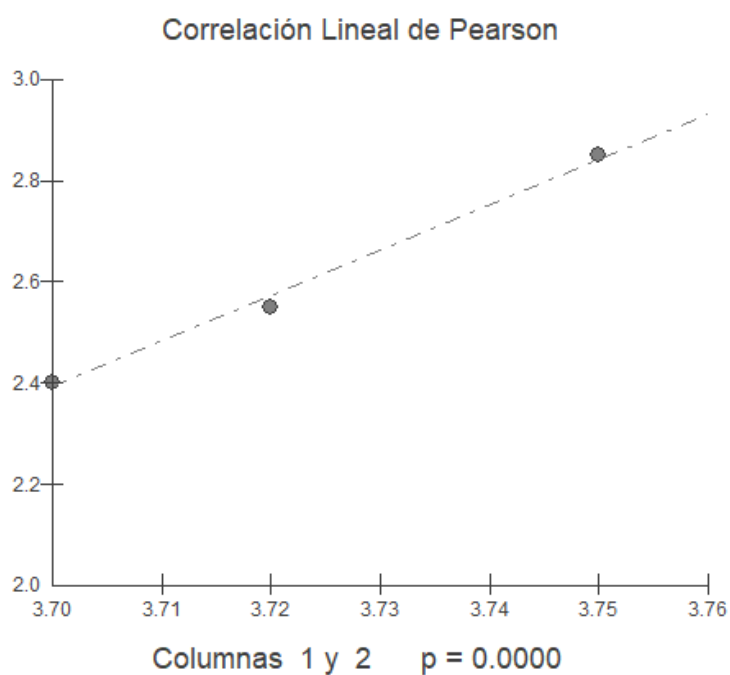


Figura 23. Correlación lineal de Pearson de Mn entre el suelo de 20 a 40 cm de profundidad y las hojas de *M.esculenta*,2021.

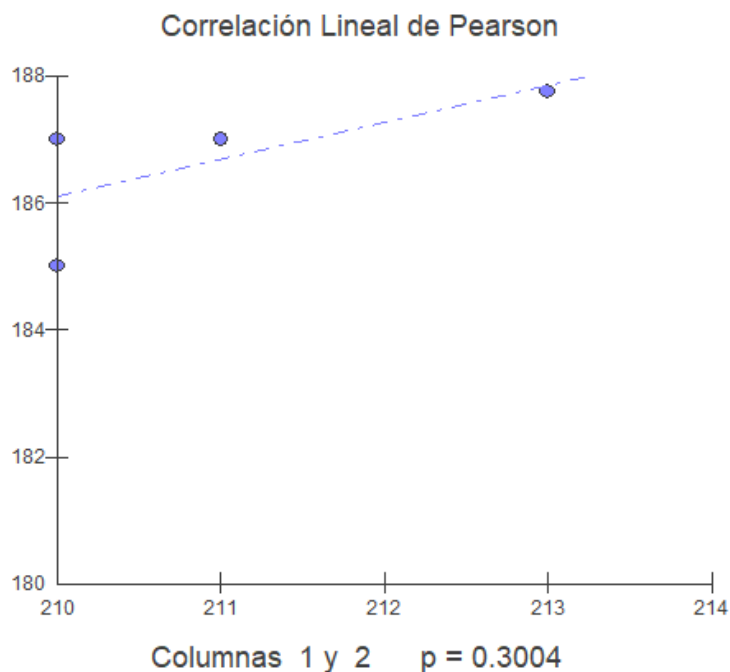


Figura 24. Correlación lineal de Pearson de Zn 20-40 y las hojas de *M.esculenta*,2021.

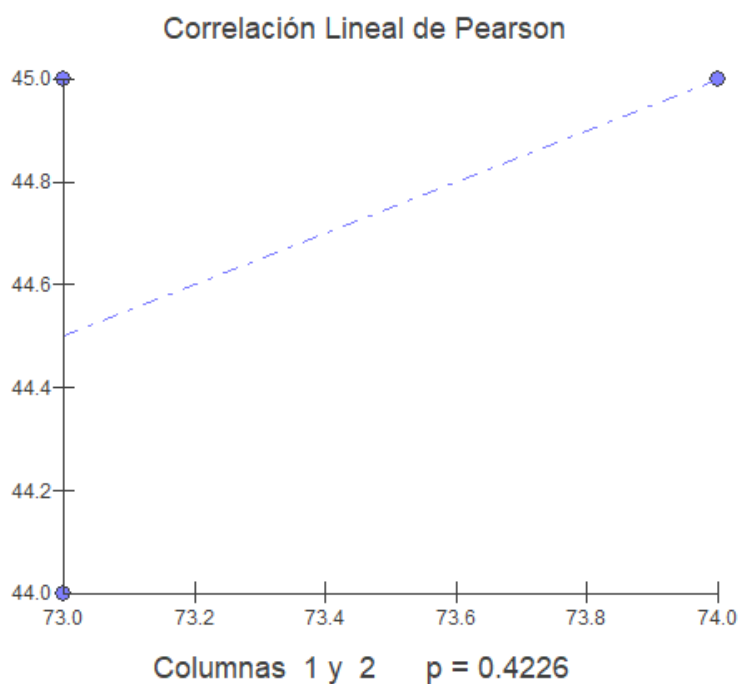
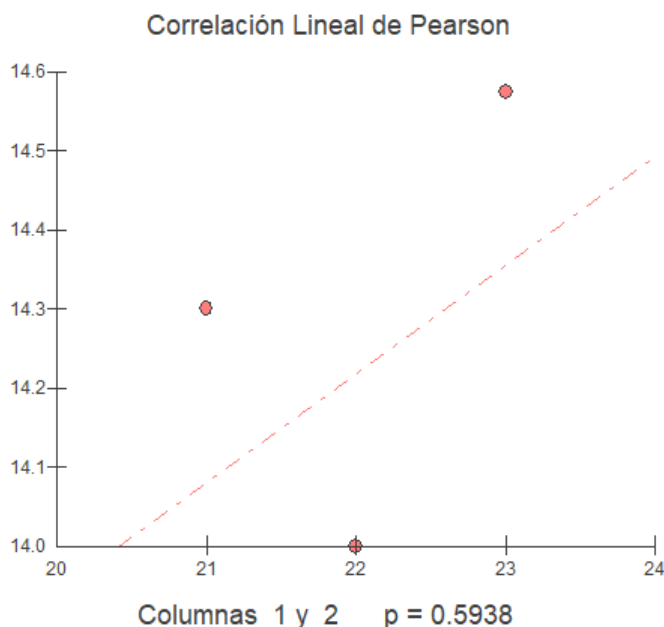


Figura 25 Correación lineal de Person de Cu de 20-40 y las hojas de *M.esculenta* ,2021.



3.3.3.2. Relación entre los metales presentes en el suelo y su presencia en la raíz de *M. esculenta* en Puerto Almendra y Nina Rumi

En la tabla 21, se muestra el coeficiente de correlación de Pearson (r) para los metales presentes a un nivel de profundidad entre 0 a 20 cm y su presencia en la raíz de *M. esculenta* fue altamente significativo estadísticamente para Cobre (0,9915), manganeso (0,9918), hierro (0,837), cadmio (0,577) y plomo (0,3746) cuyos resultados indican que se rechaza la H_0 : no existe asociación entre la profundidad 0 a 20 cm y raíz con respecto a los metales hierro, cobre, zinc, manganeso, cadmio, plomo y cromo, pero se acepta la H_a : existe una correlación entre las 2 variables, entre mayor la concentración en el suelo mayor será la concentración en la raíz (nivel de decisión = 0,05) para cobre, manganeso, hierro, cadmio y plomo y para zinc y cromo la prueba es no significativa estadísticamente.

En la tabla 22, se muestra el coeficiente de correlación de Pearson de metales en el suelo entre 20 a 40 cm de profundidad y su presencia en la raíz de *M. esculenta*, indica una fuerte correlación positiva para manganeso (0,8165), zinc (0,7247), plomo (0,7035), cobre (0,4264), hierro (0,3442) y cadmio (0,2462) una correlación negativa

para cromo (-0,568). Por lo tanto, se rechaza la H_0 : no existe asociación entre la profundidad de la muestra de suelo de 20 a 40 cm y raíz con respecto a los metales hierro, cobre, zinc, manganeso, cadmio, plomo y cromo, pero se acepta la H_a : existe una correlación entre las 2 variables, entre mayor la concentración en el suelo mayor será la concentración en la raíz (nivel de decisión = 0,05) para hierro, cobre, zinc, manganeso, cadmio y plomo y para cromo la prueba es no significativa estadísticamente.

Tabla 21. Coeficiente de correlación de Pearson entre el metal del suelo de 0 a 20 cm y su presencia en la raíz de *M. esculenta*, 2021.

	Fe 0 -20 raíz	Cu 0-20 raíz	Zn 0- 20 raíz	Mn 0-20 raíz	Cd 0-20 raíz	Pb 0- 20 raíz	Cr 0-20 raíz
N (pares) =	3	3	3	3	3	3	3
r (Pearson) =	0,837 -0,63 a	0,9915 0,64 a	0,1304 -0,97 a	0,9918 0,66 a	0,5774 -0,86 a	0,3746 -0,92 a	-0,5933 -0,99 a
IC 95% =	1,00	1,00	0,95	1,00	0,99	0,98	0,86
R2 =	0,7006	0,983	0,017	0,9837	0,3333	0,1403	0,3521
t =	2,1635	10,75	-0,186	11	1	0,5713	-1,0424
GL =	2	2	2	2	2	2	2
(p) =	0,1629	0,0085	0,8696	0,0082	0,4226	0,6254	0,4066

Figura 25. Correlación lineal de Pearson de Cu entre el suelo de 20 a 40 cm de profundidad y la raíz de *M. esculenta*, 2021.

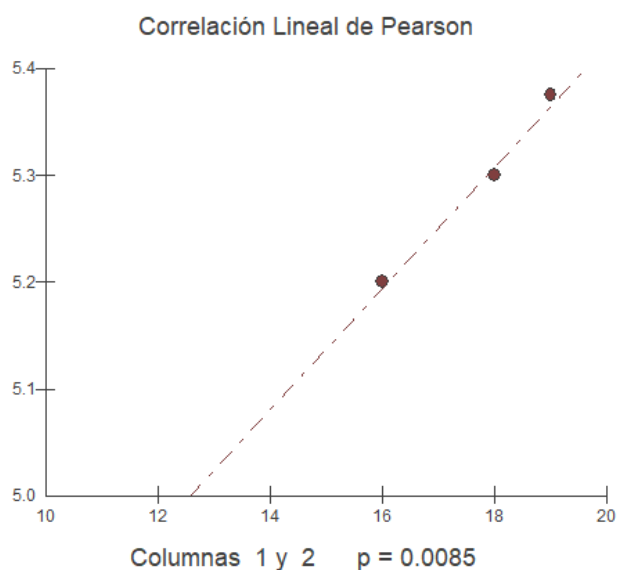


Figura 26. Correlación lineal de Pearson de Mn entre el suelo de 20 a 40 cm de profundidad y la raíz de *M.esculenta*,2021.

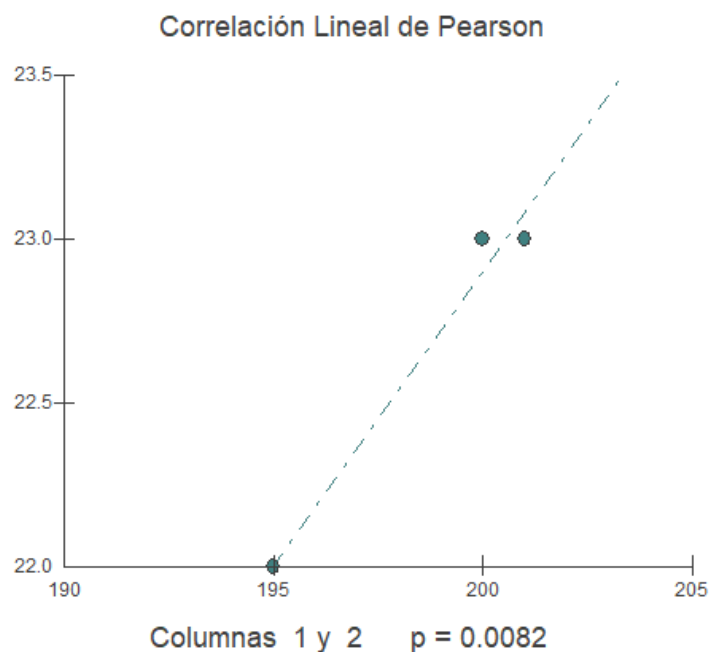


Figura 27. Correlación lineal de Pearson de Fe entre el suelo de 20 a 40 cm de profundidad y la raíz de *M.esculenta*,2021.

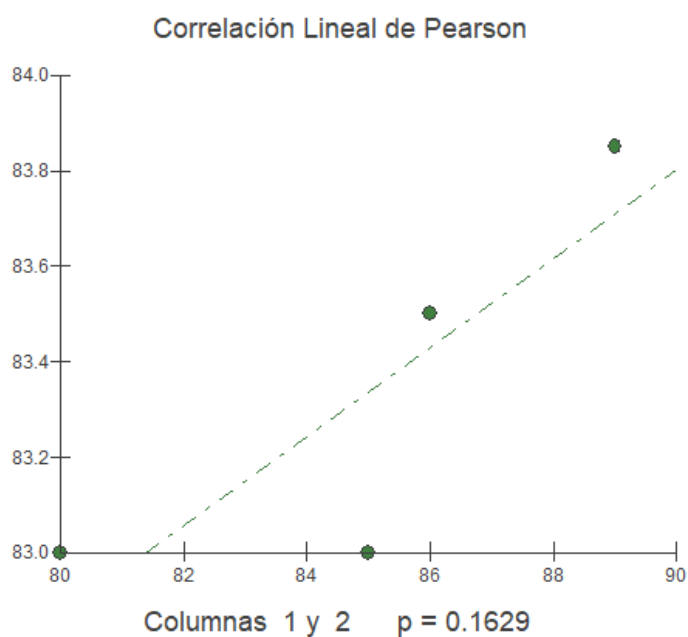


Figura 28. Correlación lineal de Pearson de Cd entre el suelo de 20 a 40 cm de profundidad y la raíz de M.esculenta,2021.

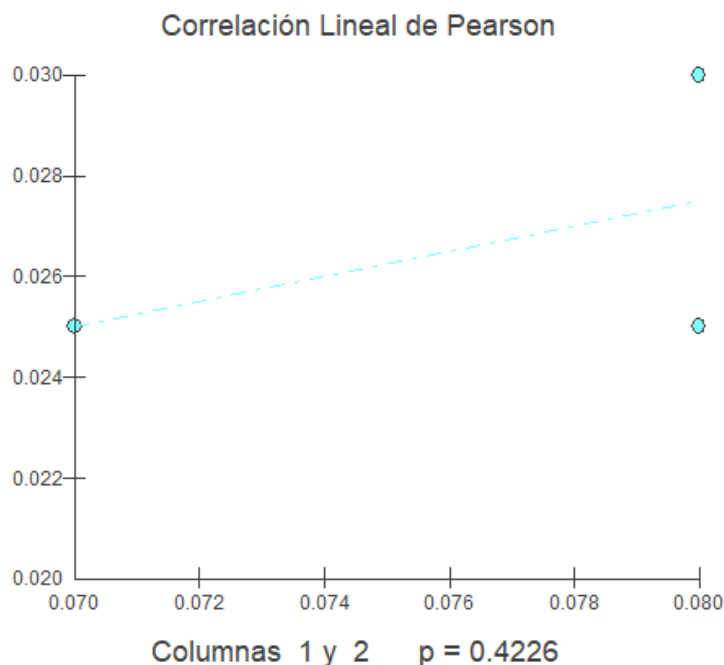


Tabla 22. Coeficiente de correlación de Pearson entre el metal del suelo entre 20 a 40 cm y su presencia en la raíz de M. esculenta, 2021.

	Fe 20-40 raíz	Cu 20-40 raíz	Zn 20-40 raíz	Mn 20-40 raíz	Cd20-40 raíz	Pb 20-40 raíz	Cr 20-40 raíz
N (pares) =	3	3	3	3	3	3	3
r (Pearson) =	0,3442	0,4264	0,7247	0,8165	0,2462	0,7035	-0,0568
	-0,92 a	-0,91 a	-0,78 a	-0,67 a	-0,94 a	-0,80 a	-0,97 a
IC 95% =	0,98	0,98	0,99	1,00	0,98	0,99	0,96
R2 =	0,1185	0,1818	0,5252	0,6667	0,0606	0,4949	0,0032
t =	0,5185	0,6667	1,4875	2	0,3592	1,4	-0,0804
GL =	2	2	2	2	2	2	2
(p) =	0,6557	0,5736	0,2752	0,1834	0,7538	0,2964	0,9432

Figura 29. Correlación lineal de Pearson de Mn entre el suelo de 20 a 40 cm de profundidad y la raíz de *M.esculenta*,2021

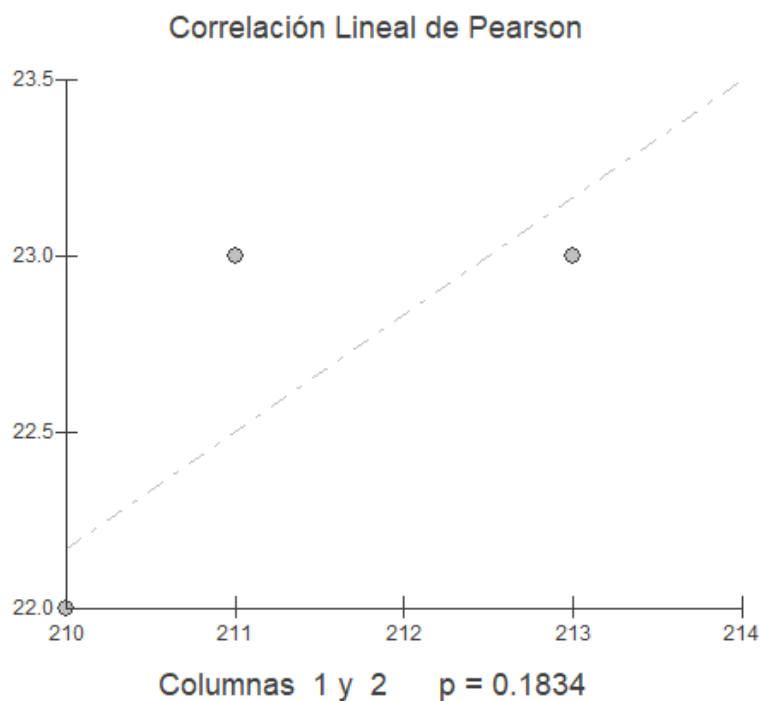


Figura 30. Correlación lineal de Pearson de Zn entre el suelo de 20 a 40 y la raíz de *M. esculenta*,2021.

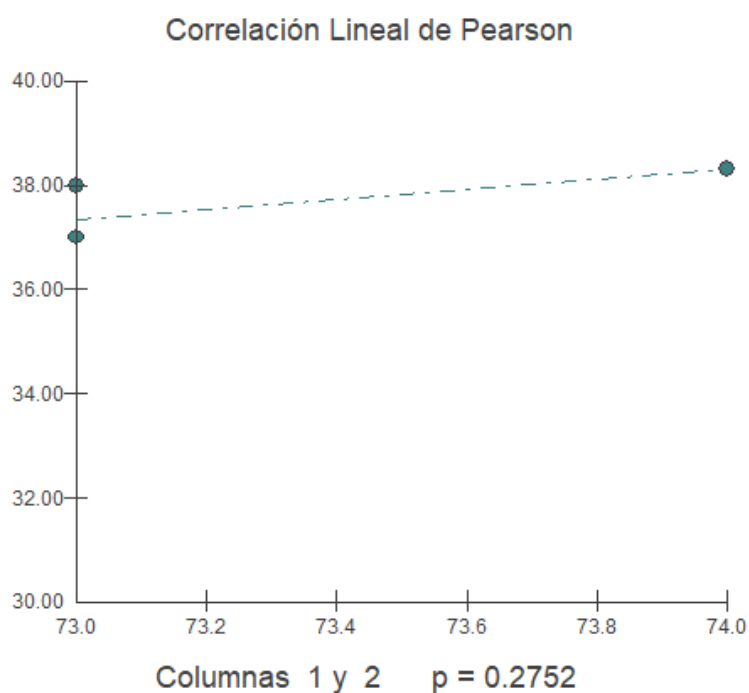
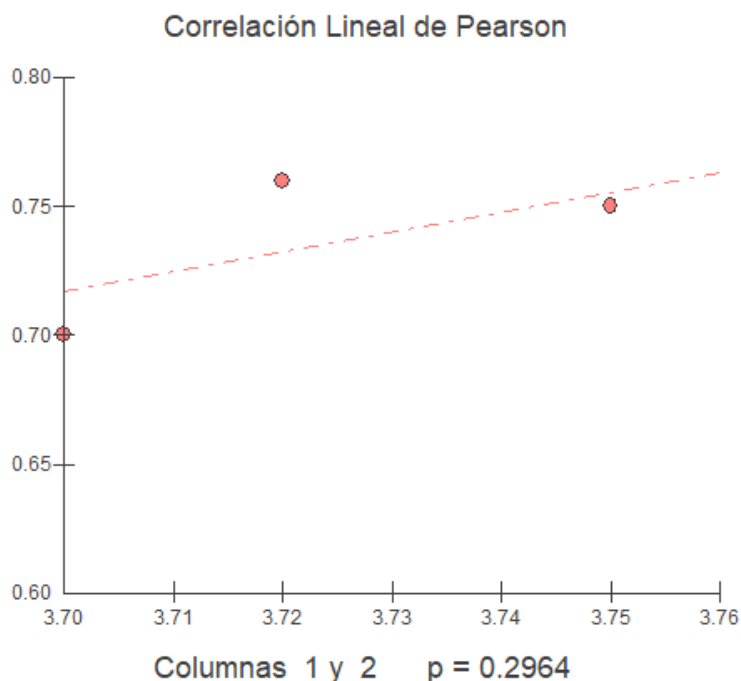


Figura 31. Correlación lineal de Pearson del Pb entre el suelo de 20 a 40 cm de profundidad y la raíz de *M.esculenta*,2021.



3.3.4. Comparación con estándares ambientales

La evaluación de la calidad ambiental de los suelos agrícolas no se limita únicamente a la determinación de las concentraciones de metales presentes en las muestras analizadas, sino que requiere comparar dichos resultados con los valores de referencia establecidos por la normativa ambiental vigente. Esta comparación permite determinar si las concentraciones encontradas corresponden a niveles considerados seguros para el desarrollo de actividades agrícolas o si, por el contrario, representan un potencial riesgo para el ambiente, la productividad de los cultivos y la salud de la población.

Los estándares ambientales constituyen instrumentos técnicos elaborados sobre la base de evidencia científica y tienen como finalidad establecer límites que permitan proteger los ecosistemas y garantizar la inocuidad de los recursos naturales. En el caso de los suelos agrícolas, estos valores sirven como referencia para evaluar la presencia de elementos potencialmente tóxicos y orientar la toma de decisiones relacionadas con la gestión ambiental, la conservación del suelo y la seguridad alimentaria.

En el Perú, los **Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para Suelo** establecen concentraciones máximas de diversos contaminantes químicos con el propósito de preservar la calidad de los suelos destinados a diferentes usos, incluyendo las actividades agrícolas. Estos estándares constituyen una herramienta fundamental para identificar posibles procesos de contaminación y evaluar si las condiciones ambientales favorecen un desarrollo seguro de los cultivos destinados al consumo humano.

Asimismo, en el ámbito internacional, organismos como la **Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO)** y la **Organización Mundial de la Salud (OMS)**, así como el **Codex Alimentarius**, han desarrollado criterios técnicos que orientan la evaluación de contaminantes en alimentos y recursos agrícolas. Aunque estos instrumentos poseen finalidades diferentes, en conjunto proporcionan un marco de referencia ampliamente aceptado para interpretar los resultados obtenidos en investigaciones relacionadas con la contaminación ambiental y la seguridad alimentaria.

El documento base de la investigación señala que uno de los propósitos del estudio fue evaluar la presencia de metales en el suelo y en *Manihot esculenta* considerando su importancia para la seguridad alimentaria y la calidad ambiental de las zonas agrícolas de Puerto Almendra y Nina Rumi. La comparación de los resultados obtenidos con los estándares ambientales constituye, por tanto, una etapa necesaria para interpretar el significado de las concentraciones determinadas y establecer si estas representan condiciones compatibles con una producción agrícola segura.

En esta sección se realiza la comparación de las concentraciones de **hierro (Fe), cobre (Cu), manganeso (Mn), zinc (Zn), cadmio (Cd), plomo (Pb) y cromo (Cr)** determinadas durante el estudio con los valores de referencia establecidos por la normativa ambiental aplicable y con otros criterios técnicos reconocidos internacionalmente. Este procedimiento permite contextualizar los resultados obtenidos y valorar objetivamente la situación ambiental de los suelos evaluados.

La comparación con estándares ambientales también facilita la identificación de aquellos metales cuyas concentraciones permanecen dentro de los límites considerados

aceptables y de aquellos que requieren un análisis más detallado debido a su potencial impacto sobre el ambiente o sobre la salud humana. Este análisis resulta especialmente importante cuando se trata de cultivos de amplio consumo, como *Manihot esculenta*, cuya calidad depende directamente de las condiciones químicas del suelo donde se desarrolla.

Desde la perspectiva de la seguridad alimentaria, la interpretación de los resultados no debe limitarse exclusivamente al cumplimiento de los estándares para suelo. La capacidad de las plantas para absorber determinados elementos hace necesario considerar simultáneamente las concentraciones presentes en el ambiente y el contenido de dichos metales en las raíces destinadas al consumo humano. Por ello, la comparación con los estándares constituye un complemento indispensable del análisis estadístico desarrollado anteriormente y permite comprender de manera integral el comportamiento de los metales dentro del sistema suelo-planta.

La literatura científica revisada en el marco teórico ha señalado que la presencia de metales en el suelo no implica necesariamente la existencia de riesgo para la salud, ya que la absorción por parte de las plantas depende de diversos factores relacionados con la biodisponibilidad de los elementos y con las características fisiológicas de cada especie. Sin embargo, cuando las concentraciones ambientales superan los niveles establecidos por la normativa, aumenta la necesidad de implementar programas de monitoreo que permitan prevenir posibles procesos de acumulación en los cultivos agrícolas.

De igual manera, investigaciones previas citadas en el documento principal, como las desarrolladas por Landeo (2018), Quinteros et al. (2017) y la Autoridad Nacional del Agua, evidencian la importancia de comparar los resultados obtenidos con valores de referencia reconocidos, ya que esta práctica facilita la identificación de situaciones de riesgo y fortalece la interpretación científica de los hallazgos relacionados con la contaminación ambiental y la bioacumulación de metales. Los resultados presentados en este apartado permiten establecer una valoración objetiva de las condiciones ambientales de los suelos agrícolas evaluados y proporcionan elementos técnicos para interpretar la calidad del sistema de producción de *Manihot esculenta* en Puerto Almendra y Nina Rumi. Asimismo, constituyen un insumo

importante para la formulación de recomendaciones orientadas al monitoreo ambiental, la conservación de los recursos edáficos y la protección de la seguridad alimentaria en la Amazonía peruana.

En conjunto, la comparación con los estándares ambientales complementa el análisis descriptivo y correlacional desarrollado en los apartados anteriores, permitiendo contextualizar los resultados obtenidos dentro del marco normativo vigente. Esta integración entre evidencia científica y criterios regulatorios fortalece las conclusiones de la investigación y proporciona una base técnica sólida para valorar la calidad ambiental de los suelos agrícolas y la inocuidad de uno de los cultivos más importantes para la alimentación de la población amazónica.

3.3.5. Discusión de los resultados

La discusión de los resultados constituye una de las etapas más importantes de la investigación científica, ya que permite interpretar la evidencia obtenida a la luz del marco teórico y contrastarla con los antecedentes desarrollados por otros investigadores. A diferencia de la presentación de resultados, donde los datos se exponen de manera objetiva, la discusión busca explicar el significado de los hallazgos, identificar sus implicancias científicas y establecer su contribución al conocimiento sobre el fenómeno estudiado. En este sentido, la discusión representa el espacio donde convergen la evidencia empírica, los fundamentos teóricos y la interpretación científica del investigador.

En la presente investigación, la discusión se orienta a analizar la relación entre la concentración de metales presentes en el suelo agrícola y su contenido en las raíces y hojas de *Manihot esculenta* cultivada en Puerto Almendra y Nina Rumi, región Loreto. Los resultados obtenidos permiten comprender el comportamiento de los metales dentro del sistema suelo-planta bajo condiciones propias de la Amazonía peruana y proporcionan evidencia relevante para evaluar la calidad ambiental de los suelos agrícolas y su posible influencia sobre la seguridad alimentaria.

Los análisis efectuados evidencian que la presencia de metales en el suelo constituye un componente inherente a los ecosistemas agrícolas. Sin embargo, la sola existencia de estos elementos no determina necesariamente su acumulación en los

tejidos vegetales, ya que la absorción depende de diversos factores relacionados con la biodisponibilidad de los metales, las propiedades físico-químicas del suelo y la capacidad fisiológica de la especie para incorporar y transportar dichos elementos. Esta observación coincide con los fundamentos desarrollados en el marco teórico, donde se estableció que variables como el pH, la textura, la materia orgánica y la capacidad de intercambio catiónico modifican significativamente la movilidad de los metales y su disponibilidad para las plantas.

Los resultados obtenidos también ponen de manifiesto la importancia de analizar conjuntamente el suelo y el cultivo. La evaluación simultánea de ambas matrices permitió comprender que la dinámica de los metales dentro del sistema agrícola responde a un proceso continuo de interacción entre el ambiente edáfico y la fisiología vegetal. Este comportamiento confirma que la calidad del suelo constituye un elemento determinante para comprender la composición química de los cultivos, aunque dicha relación se encuentra modulada por mecanismos biológicos propios de cada especie.

Los hallazgos de la investigación presentan concordancia con los resultados reportados por **Torres (2019)**, quien encontró que *Manihot esculenta* posee capacidad para absorber metales como cromo, plomo y zinc cuando estos se encuentran disponibles en el suelo. De acuerdo con dicho estudio, la magnitud de la absorción depende tanto de las condiciones ambientales como de las características fisiológicas de la planta, situación que resulta consistente con los resultados obtenidos en la presente investigación y confirma la importancia de considerar simultáneamente los factores edáficos y biológicos durante el análisis de la transferencia de metales.

De manera similar, los resultados guardan relación con lo reportado por **Quinteros et al. (2017)** en la Cuenca del río Moche, donde se identificó la presencia de diversos metales en suelos agrícolas, aguas y cultivos de *Manihot esculenta*. Los autores concluyeron que la interacción entre el ambiente y la planta constituye un proceso dinámico condicionado por las características del ecosistema, interpretación que coincide con la evidencia obtenida en las localidades de Puerto Almendra y Nina Rumi. Ambos estudios destacan que la concentración de metales observada en la planta no depende exclusivamente del contenido presente en el suelo, sino también de la

disponibilidad de los elementos y de los mecanismos fisiológicos de absorción y transporte desarrollados por la especie.

Asimismo, los resultados obtenidos adquieren especial relevancia cuando se comparan con la investigación desarrollada por **Landeo (2018)**, quien reportó concentraciones de plomo superiores a los límites establecidos por el Codex Alimentarius en raíces de *Manihot esculenta* comercializadas en la región Junín. Aunque las condiciones ambientales y geográficas difieren de las evaluadas en el presente estudio, ambos trabajos coinciden en resaltar la necesidad de mantener un monitoreo permanente sobre la calidad química de los suelos agrícolas y de los cultivos destinados al consumo humano, especialmente cuando se trata de especies de elevada importancia alimentaria como la yuca.

Otro aspecto importante que emerge del análisis corresponde al comportamiento diferencial de los metales esenciales y los metales potencialmente tóxicos. Los elementos como hierro, cobre, manganeso y zinc forman parte del metabolismo normal de las plantas y participan activamente en procesos fisiológicos indispensables para su crecimiento y desarrollo. En contraste, elementos como cadmio, plomo y cromo carecen de funciones biológicas conocidas en la planta y su presencia responde principalmente a procesos naturales o antrópicos relacionados con la composición del suelo. Esta diferencia explica la necesidad de interpretar individualmente el comportamiento de cada metal y evitar generalizaciones durante el análisis ambiental.

Desde la perspectiva de la seguridad alimentaria, los resultados obtenidos refuerzan la importancia de evaluar permanentemente la calidad de los suelos donde se cultivan alimentos destinados al consumo humano. La yuca constituye uno de los principales componentes de la dieta en la Amazonía peruana y, por tanto, cualquier alteración en la composición química de sus raíces puede tener repercusiones directas sobre la salud de la población. En este contexto, la investigación aporta evidencia científica útil para fortalecer los programas de vigilancia ambiental y orientar estrategias de manejo sostenible de los recursos edáficos.

La comparación de los resultados con los estándares ambientales también aporta elementos importantes para la interpretación del estudio. Más allá del cumplimiento de

los límites establecidos por la normativa vigente, los resultados evidencian la necesidad de comprender el comportamiento dinámico de los metales dentro del sistema suelo-planta. En numerosos casos, concentraciones ambientales consideradas aceptables pueden presentar diferentes niveles de biodisponibilidad dependiendo de las características del suelo, mientras que concentraciones relativamente elevadas pueden no traducirse necesariamente en una acumulación significativa dentro del cultivo. Esta situación confirma que la evaluación ambiental debe integrar simultáneamente el análisis químico del suelo y el estudio fisiológico de la planta.

Los resultados también resaltan la importancia de continuar desarrollando investigaciones en los ecosistemas amazónicos. La mayoría de los estudios disponibles sobre contaminación por metales han sido realizados en otras regiones geográficas, mientras que la información correspondiente a la Amazonía peruana continúa siendo limitada. En este sentido, la presente investigación constituye un aporte significativo al conocimiento científico regional al proporcionar evidencia obtenida directamente en sistemas agrícolas de Puerto Almendra y Nina Rumi, fortaleciendo la comprensión de la dinámica de los metales bajo condiciones propias de los suelos tropicales.

Desde una perspectiva metodológica, la utilización conjunta de análisis de laboratorio y procedimientos estadísticos permitió obtener resultados objetivos y comparables con investigaciones nacionales e internacionales. Esta estrategia fortalece la confiabilidad de las conclusiones y demuestra la importancia de integrar diferentes herramientas analíticas para abordar problemas complejos relacionados con la contaminación ambiental y la seguridad alimentaria.

Finalmente, los resultados obtenidos permiten afirmar que la interacción entre la concentración de metales presentes en el suelo y su contenido en *Manihot esculenta* constituye un proceso multifactorial donde intervienen componentes físicos, químicos y biológicos del agroecosistema. Comprender esta interacción resulta fundamental para promover sistemas agrícolas sostenibles, garantizar la producción de alimentos inocuos y fortalecer las estrategias de monitoreo ambiental en la Amazonía peruana.

En conjunto, la discusión evidencia que los hallazgos de la presente investigación mantienen coherencia con los fundamentos teóricos y con los

antecedentes científicos revisados, al tiempo que aportan información específica para un contexto geográfico poco estudiado como la región Loreto. De esta manera, el estudio amplía el conocimiento disponible sobre la dinámica de los metales en los sistemas agrícolas amazónicos y proporciona bases científicas para futuras investigaciones orientadas a la protección del suelo, la seguridad alimentaria y la salud pública.

El desarrollo del presente capítulo permitió trasladar los fundamentos teóricos expuestos en los capítulos anteriores al análisis de una situación real, mediante el estudio de la concentración de metales en los suelos agrícolas y su relación con el contenido de dichos elementos en *Manihot esculenta* cultivada en las localidades de Puerto Almendra y Nina Rumi, en la región Loreto. La integración de procedimientos de campo, análisis de laboratorio y técnicas estadísticas proporcionó evidencia científica suficiente para comprender el comportamiento de las variables estudiadas y responder al objetivo central de la investigación.

La caracterización del contexto de estudio permitió reconocer que las condiciones ambientales propias de la Amazonía peruana constituyen un escenario particular para el análisis de la dinámica de los metales en los sistemas agrícolas. Factores como la elevada humedad, la acidez de los suelos, la intensa actividad biológica y las características propias del ecosistema amazónico influyen sobre la movilidad y disponibilidad de los elementos químicos, condicionando los procesos de absorción desarrollados por *Manihot esculenta*. Estas características justifican la importancia de generar investigaciones específicas para la región, evitando extrapolar resultados obtenidos en ecosistemas con condiciones ambientales diferentes.

Desde la perspectiva metodológica, el estudio demostró la utilidad del enfoque cuantitativo y del diseño correlacional para analizar la interacción entre el suelo y el cultivo. La aplicación de procedimientos estandarizados de muestreo, análisis químico y tratamiento estadístico permitió obtener información objetiva y confiable, fortaleciendo la validez científica de los resultados y proporcionando una base sólida para la interpretación de los hallazgos.

Los resultados obtenidos evidenciaron que la concentración de metales presente en el suelo constituye un componente esencial para comprender la calidad ambiental de

los sistemas agrícolas; sin embargo, también confirmaron que la acumulación de estos elementos en *Manihot esculenta* responde a un proceso complejo donde intervienen múltiples factores físicos, químicos y fisiológicos. La biodisponibilidad de los metales, las propiedades del suelo y la capacidad de absorción de la planta actúan de manera conjunta, determinando el comportamiento observado en las raíces y hojas del cultivo.

Asimismo, la contrastación de la hipótesis permitió establecer, con base en el análisis estadístico, el grado de relación existente entre las variables de estudio. Este procedimiento no solo permitió responder al problema planteado, sino que también fortaleció la comprensión científica de los procesos de transferencia suelo-planta en condiciones propias de la Amazonía peruana. Los resultados obtenidos constituyen un aporte importante para ampliar el conocimiento sobre la dinámica de los metales en ecosistemas tropicales y ofrecen evidencia útil para futuras investigaciones relacionadas con la calidad ambiental y la seguridad alimentaria.

La comparación de los resultados con los estándares ambientales y con los antecedentes científicos permitió contextualizar los hallazgos dentro del marco normativo y de la literatura especializada. Este análisis evidenció la importancia de mantener programas permanentes de monitoreo de la calidad de los suelos agrícolas y de los cultivos destinados al consumo humano, especialmente en regiones donde la yuca representa uno de los principales alimentos de la población. La vigilancia ambiental constituye una herramienta esencial para prevenir riesgos potenciales y promover sistemas de producción sostenibles.

Otro aspecto relevante que emerge del estudio corresponde a la importancia de considerar la calidad del suelo como un componente estratégico para la seguridad alimentaria. La conservación de las propiedades físicas, químicas y biológicas del recurso edáfico no solo favorece la productividad agrícola, sino que también contribuye a garantizar la obtención de alimentos inocuos y de alta calidad. En este sentido, la gestión sostenible del suelo debe entenderse como un elemento fundamental para proteger simultáneamente el ambiente, la economía rural y la salud de la población.

La presente investigación también pone de manifiesto la necesidad de continuar desarrollando estudios sobre la interacción entre metales y cultivos alimenticios en la

Amazonía peruana. La diversidad de condiciones ambientales existentes en la región, así como la importancia económica y alimentaria de especies como *Manihot esculenta*, hacen indispensable ampliar la evidencia científica disponible mediante investigaciones que incorporen nuevas áreas de estudio, un mayor número de muestras y análisis complementarios relacionados con la biodisponibilidad de los metales y los factores que regulan su transferencia hacia los alimentos.

En conjunto, el caso de estudio desarrollado en este capítulo demuestra que el análisis integrado del suelo y del cultivo constituye una herramienta indispensable para comprender los procesos ambientales que influyen sobre la calidad de los alimentos. La información obtenida fortalece el conocimiento científico acerca de la relación entre la concentración de metales presentes en el suelo y su contenido en *Manihot esculenta*, aportando evidencia útil para la gestión ambiental, la formulación de estrategias de monitoreo y la toma de decisiones orientadas a la protección de la seguridad alimentaria en la Amazonía peruana.

Con el desarrollo de este capítulo se cumple el propósito científico de la obra, al integrar los fundamentos teóricos con la evidencia empírica obtenida mediante el caso de estudio. Los hallazgos alcanzados permiten comprender de manera más amplia la interacción entre los suelos agrícolas y uno de los cultivos más importantes de la región amazónica, proporcionando bases sólidas para las reflexiones finales y las conclusiones que se presentan a continuación.

REFLEXIONES FINALES

La relación entre la calidad del suelo y la inocuidad de los alimentos constituye uno de los mayores desafíos que enfrenta actualmente la agricultura sostenible. En un contexto caracterizado por el crecimiento de la demanda alimentaria y por la necesidad de conservar los recursos naturales, comprender el comportamiento de los metales presentes en los ecosistemas agrícolas resulta indispensable para garantizar sistemas de producción que sean, al mismo tiempo, productivos, ambientalmente responsables y seguros para la población. El presente estudio se desarrolló precisamente bajo esta perspectiva, analizando la interacción entre la concentración de metales en el suelo y su contenido en *Manihot esculenta* cultivada en dos importantes zonas agrícolas de la Amazonía peruana.

A lo largo de la investigación quedó demostrado que el suelo constituye mucho más que el soporte físico donde crecen los cultivos. Se trata de un sistema dinámico en el que interactúan procesos físicos, químicos y biológicos que regulan permanentemente la disponibilidad de nutrientes y otros elementos minerales para las plantas. La presencia de metales en este medio forma parte de la composición natural del ambiente; sin embargo, las características propias del suelo determinan si dichos elementos permanecen inmovilizados o si, por el contrario, se encuentran disponibles para ser absorbidos por el sistema radical de los cultivos. Esta interacción explica la complejidad del proceso de transferencia suelo-planta y justifica la necesidad de analizar ambas variables de manera integrada.

Uno de los principales aportes de esta investigación consiste en haber generado evidencia científica sobre una problemática poco estudiada en la Amazonía peruana. La mayor parte de las investigaciones relacionadas con metales pesados en sistemas agrícolas se han desarrollado en otras regiones del país o en contextos internacionales con características ambientales diferentes. En contraste, el presente estudio aporta información específica obtenida en Puerto Almendra y Nina Rumi, dos localidades

representativas de la región Loreto, permitiendo comprender el comportamiento de los metales bajo condiciones propias de los ecosistemas amazónicos.

Los resultados obtenidos permitieron caracterizar la concentración de hierro, cobre, manganeso, zinc, cadmio, plomo y cromo presentes tanto en los suelos agrícolas como en las raíces y hojas de *Manihot esculenta*. Asimismo, el análisis estadístico permitió evaluar la relación existente entre ambas variables y comprender que la transferencia de metales hacia la planta constituye un proceso condicionado por múltiples factores, entre ellos las propiedades físico-químicas del suelo, la biodisponibilidad de los elementos y la capacidad fisiológica del cultivo para absorberlos y transportarlos hacia sus diferentes órganos.

Estos hallazgos fortalecen los planteamientos desarrollados en el marco teórico, donde se estableció que la concentración total de un metal en el suelo no constituye el único factor que determina su incorporación a la planta. La movilidad de los elementos depende también del pH, la textura, el contenido de materia orgánica y de las condiciones ambientales propias del ecosistema. Esta comprensión integral permite interpretar con mayor precisión la dinámica de los metales en los sistemas agrícolas y evita simplificaciones que podrían conducir a conclusiones erróneas sobre la calidad ambiental de los suelos.

Desde la perspectiva de la **agricultura sostenible**, la investigación pone de manifiesto la importancia de conservar la calidad de los suelos como uno de los principales recursos para garantizar la productividad agrícola en el largo plazo. La sostenibilidad de los sistemas de producción no depende únicamente del rendimiento de los cultivos, sino también de la preservación de las condiciones ambientales que permiten obtener alimentos seguros y proteger la biodiversidad de los ecosistemas. En este sentido, el monitoreo permanente de las características químicas del suelo constituye una herramienta esencial para prevenir procesos de degradación ambiental y promover prácticas agrícolas responsables.

Asimismo, el estudio evidencia que la gestión sostenible del suelo debe integrar acciones orientadas a la conservación de sus propiedades físicas, químicas y biológicas. La aplicación de buenas prácticas agrícolas, el uso racional de fertilizantes e insumos, la

protección de la cobertura vegetal y el monitoreo continuo de los elementos potencialmente tóxicos representan estrategias fundamentales para mantener el equilibrio del agroecosistema y reducir el riesgo de contaminación de los cultivos destinados al consumo humano.

Las implicancias del estudio trascienden el ámbito estrictamente agrícola y adquieren especial importancia desde la perspectiva de la **salud pública y la seguridad alimentaria**. *Manihot esculenta* constituye uno de los alimentos básicos de la población amazónica y forma parte de la dieta cotidiana de miles de familias. En consecuencia, conocer la relación entre la concentración de metales presentes en el suelo y su contenido en las raíces del cultivo resulta indispensable para proteger la salud de los consumidores y fortalecer las políticas de vigilancia sanitaria de los alimentos.

La seguridad alimentaria contemporánea no puede entenderse únicamente como la disponibilidad suficiente de alimentos. También implica garantizar que dichos alimentos sean inocuos y que su consumo no represente riesgos para la salud humana. En este contexto, investigaciones como la presente contribuyen a fortalecer los sistemas de monitoreo ambiental y proporcionan evidencia científica útil para orientar programas de prevención, vigilancia y control de contaminantes en las cadenas de producción agrícola.

Del mismo modo, la información generada puede constituir un importante insumo para las instituciones responsables de la gestión ambiental y agrícola, permitiendo fortalecer programas de monitoreo de la calidad de los suelos, establecer estrategias de manejo adaptadas a las condiciones amazónicas y promover políticas públicas orientadas a la protección de los recursos naturales y de la salud de la población.

No obstante, como toda investigación científica, el presente estudio presenta algunas **limitaciones** que deben ser consideradas al interpretar sus resultados. En primer lugar, el análisis se desarrolló en dos localidades específicas de la región Loreto, por lo que los resultados reflejan las condiciones ambientales particulares de Puerto Almendra y Nina Rumi y no necesariamente representan la totalidad de los ecosistemas agrícolas amazónicos. En segundo lugar, el número de muestras analizadas respondió al diseño

metodológico planteado en la investigación, permitiendo cumplir los objetivos propuestos, aunque futuras investigaciones podrían incorporar un mayor tamaño muestral para ampliar la capacidad de generalización de los resultados.

Asimismo, el estudio se centró en la determinación de la concentración total de determinados metales presentes en el suelo y en *Manihot esculenta*, sin diferenciar las distintas especies químicas o estados de oxidación de cada elemento, aspectos que pueden influir sobre su biodisponibilidad y comportamiento ambiental. De igual manera, variables como las características mineralógicas del suelo, la influencia estacional, la dinámica hidrológica y la interacción con otros factores ambientales podrían incorporarse en futuras investigaciones para lograr una comprensión aún más amplia de los procesos de transferencia suelo-planta.

Estas limitaciones no disminuyen el valor científico del estudio; por el contrario, representan oportunidades para continuar ampliando el conocimiento sobre la dinámica de los metales en los ecosistemas amazónicos y fortalecer las líneas de investigación relacionadas con la calidad ambiental y la seguridad alimentaria.

En este sentido, las **perspectivas para futuras investigaciones** son amplias y prometedoras. Resultaría de especial interés desarrollar estudios que incorporen un mayor número de localidades distribuidas en diferentes regiones de la Amazonía peruana, permitiendo comparar el comportamiento de los metales bajo diversas condiciones edafoclimáticas. Asimismo, investigaciones de carácter longitudinal permitirían evaluar la evolución temporal de las concentraciones de metales y analizar cómo factores como la estacionalidad, el manejo agrícola y el cambio climático influyen sobre su movilidad y acumulación en los cultivos.

Igualmente, futuras investigaciones podrían ampliar el número de especies vegetales evaluadas, incorporar técnicas avanzadas para el análisis de especiación química de los metales y desarrollar estudios relacionados con la biodisponibilidad, la bioacumulación y la evaluación de riesgos para la salud humana. Estas líneas de trabajo contribuirían significativamente a fortalecer el conocimiento científico sobre los agroecosistemas amazónicos y proporcionarían herramientas más precisas para la toma de decisiones en materia de gestión ambiental y producción agrícola.

También resulta pertinente promover investigaciones interdisciplinarias que integren la agronomía, la química ambiental, la ecología, la salud pública y la nutrición, permitiendo comprender de manera integral la relación existente entre el ambiente, los sistemas productivos y la calidad de los alimentos. Este enfoque contribuiría a formular estrategias más efectivas para garantizar la sostenibilidad de la agricultura amazónica y la protección de la seguridad alimentaria de las generaciones presentes y futuras.

En conclusión, la presente obra demuestra que el estudio de los metales presentes en el suelo y su relación con *Manihot esculenta* trasciende el interés académico para convertirse en una herramienta de gran utilidad para la gestión ambiental, la agricultura sostenible y la salud pública. Comprender la interacción entre el suelo y uno de los cultivos más importantes de la Amazonía peruana permite fortalecer las bases científicas para el aprovechamiento responsable de los recursos naturales y reafirma que la calidad de los alimentos comienza, inevitablemente, con la calidad del suelo donde estos se producen. Proteger el suelo significa preservar la productividad agrícola, conservar los ecosistemas y garantizar que la seguridad alimentaria continúe siendo uno de los pilares fundamentales del desarrollo sostenible en la Amazonía peruana.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Agraz, F., Guízar, B., A., L., Luis-Castillo, M., & Velásquez, A. V. (04 de marzo de 2013). Intoxicación por metales pesados en la salud. Recuperado el 23 de 12 de 2018.
- Apaclla, R., & Pezo, A. Evaluación de metales en corteza de *Maytenus macrocarpa* (chuchuhuasi) de uso etnomedicinal en la región Loreto. Tesis, Universidad Nacional de la Amazonía Peruana, Iquitos-Perú; 2015.
- Ayala F. Taxonomía Vegetal (Gymnospermae y Angiospermae de la Amazonia Peruana). Imp. Centro de Estudios Teológicos de la Amazonia (CETA) Iquitos-Perú. Primera Edición Vol. 2 pág. 71 y 73. [Visitada 09.11.2018]. Disponible en: www.books.google.com/.../Taxonomia_vegetal.
- Barragán, H. Desarrollo, salud humana y amenazas ambientales. la crisis de la sustentabilidad. (P. A., & m. y. Bourgeois, Edits.) Buenos Aires, La Plata, Argentina: Universidad de La Plata. (2010).
- Campbell P.G.C. & Tessier A. Ecoloxixology of metals in aquatic environments Geochemical aspects In Ecoloxixology A hierarchical treatment. M.C.Newman and C.H. Jagos, eds. Lewis Publishers, Boca Raton. Florida; USA; 1996.
- Cerón, I., & Aristizábal, F. Dinámica del ciclo del nitrógeno y fósforo en suelos. *Revista Colombiana de Biotecnología*; 2012; 14 (1).
- Contreras, R. (22 de Abril de 2016). Bioquímica: Que son los oligoelementos. Recuperado el 23 de 12 de 2018, de Biología. La guía 2000. com: <https://biologia.laguia2000.com/bioquimica/que-son-los-oligoelementos>.
- De La O Valenzuela, Z., & Quispe, J. Determinación cuantitativa de plomo y cadmio en diez tipos de yuca (*Manihot esculenta*) comercializadas en el mercado del distrito de San Martín de Pangoa, de la ciudad de Satipo, Dpto de Junin. Tesis,

- Universidad Wiener. Lima: Escuela Académico Profesional de Farmacia y Bioquímica. 2017.
- Delgadillo-López A., González-Ramírez, C., Prieto-García F., & Villagómez-Ibarra J. A.-S. Fitorremediación: una alternativa para eliminar la contaminación. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*. 2011; 14: 597-612.
- Flores, J. *Distribución espacial y ubicación fisiográfica de cuatro especies vegetales de uso medicinal en el área de influencia de la carretera Iquitos-Nauta Loreto-Perú*. Tesis, Universidad Nacional de la Amazonía Peruana, Iquitos-Perú; 2014.
- García, T., & Uribe, R. Evaluación de metales de la especie *Tynanthus panurensis* (clavo huasca), de uso etnoterapéutico en la región Loreto. Tesis, Universidad Nacional de la Amazonía Peruana, Iquitos-Perú; 2015.
- Gliessman, S. *Agroecología: Procesos Ecológicos en Agricultura Sostenible*. Turrialba, Costa Rica EUA: LITOCAT, 2002.
- Guevara, P., & Montes, L.. Espacialización de concentración de metales pesados cromo, zinc y plomo en el complejo industrial Fabrillfame y propuesta de remediación de suelos. 10 de abril de 2014. Obtenido de repositorio.espe.edu.ec/handle/21000/8202
- Huaranga Moreno F., Méndez E., Quilcat, V., & Huaranga Arévalo F. Contaminación por metales pesados en la Cuenca del Río Moche, 1980 – 2010, La Libertad – Perú. *Scientia Agropecuaria*. 2012; 3, 235-247.
- Informe Técnico N° 029-2021-ANA-AAA.A-ALA.IQ/EJDG. Monitoreo de calidad de agua superficial de los cuerpos naturales de agua ubicados en las instalaciones de la Agropecuaria La Chacra, cuenca Nanay. Iquitos, Perú; 2021.
- Instituto Amazónico de Investigaciones Científicas, SINCHI. Diversidad de yucas (*Manihot esculenta Crantz*) entre los Ticuna: Riqueza cultural y genética de un producto tradicional. Leticia, Amazonas; 2005. 3 y 14

- Jain C.K. & Ram D. Adsorption of metal ions on bed sediments. *Hidrological Sciences- Journal des Sciences Hydrologiques*; 1997; 42(5): 713-723.
- Londoño-Franco, L., Londoño-Muñoz, P., & Muñoz-García, F. Los riesgos de los metales pesados en la salud humana y animal. *Biotecnología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial*. (2016); 14 (2), 145-153.
- Madueño, F. *Determinación de metales pesados (plomo y cadmio) en lechuga (Lactuca sativa) en mercados del Cono Norte, Centro y Cono Sur de Lima Metropolitana*. Tesis, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Lima-Perú; 2017.
- Medina, C., & Taminche, S. Evaluación de metales en la corteza de *Campsiandra angustifolia* Spruce ex Benth "Huacapurana" de uso etnoterapéutico en la región Loreto. Tesis, Universidad Nacional de la Amazonia Peruana. Loreto-Perú; 2015.
- Ministerio Ambiente. Decreto Supremo N° 004-2017-MINAM. Estándares de Calidad Ambiental(ECA), para Agua. Lima, Perú; 2017.
- Ministerio Ambiente. Decreto Supremo N° 012-2017-MINAM. Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para Suelo. Lima, Perú; 2017.
- Perú.info. Super raíces, super yuca. Nov. 2016. Recuperado el 23 de 12 de 2018, de superfoods: peru.info/es-pe/superfoods/detalle/super-yuca.
- Prieto Méndez, J., González Ramírez, C., & Román Gutiérrez, A. y. Contaminación y fitotoxicidad en plantas por metales pesados provenientes de suelos y agua. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*. 2009; 10: 29-44.
- Skoog D. Análisis Instrumental. México. Ed. Interamericana. p.16-19; 2000.
- Tejada C., Montiel Z., & Acevedo D. Aprovechamiento de cáscaras de yuca y ñame para el tratamiento de aguas residuales contaminadas con Pb(II). *Información Tecnológica*. 2016; 27 (1), 9-19.

Traxco. (12 de 11 de 2014). Agricultura en zonas de crecidas. Recuperado el 23 de 12 de 2018, de Noticias agricolas: www.traxco.es/blog/noticias-agricolas/agricultura-en-zonas-de-crecidas