UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE LOS ANDES

FACULTAD DE INGENIERÍA

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL Y RECURSOS NATURALES

Tesis

Determinación de macroinvertebrados como bioindicadores en suelos contaminados por plaguicidas en el distrito de San Jerónimo, provincia de Andahuaylas -2023

Asesor:

Ing. Barazorda Carrillo, José Gabriel

Autores:

Altamirano Barrientos, Vanesa Ayco

Ccorimanya Ccorisoncco, Milusca

Para optar el Título Profesional:

Ingeniero Ambiental

Andahuaylas – Apurímac – Perú

2025

Acta de sustentación

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE LOS ANDES
FACULTAD DE INGENIERÍA AMBIENTAL
ESCUELA PROFESIONAL DE ING. AMBIENTAL Y RR. NN

ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TÍTULO PROFESIONAL

Acta N°: 009

En la ciudad de Andahuaylas, a los 20 días del mes de agosto del 2025, siendo las 10:07 am horas, se reunieron los integrantes del Jurado designado por Resolución Sub Directoral N° 041-2025-UTEA-FI-EPIARN/SD de la Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental y Recursos Naturales, Facultad de Ingenieria.

Presidente:	Mg. María Fuentes Allccahuaman
Dictaminante:	Mg. Waldir Pimentel Maldonado
Replicante:	Mg. David Centeno Cáceres

Para evaluar la sustentación, en la modalidad de:

☒ Tesis ☐ Trabajo de suficiencia profesional

Titulada:
Determinación de macroinvertebrados como bioindicadores en suelos contaminados por plaguicidas en el distrito de San Jerónimo, provincia de Andahuaylas – 2023.

Desarrollado por el (los) Bachiller (es):

Br.: Altamirano Barrientos Vanesa Ayco
(Apellidos y Nombres)

Br.: Ccorimanya Ccorisoncco Milusca
(Apellidos y Nombres)

Para optar el Título Profesional de:

Ingeniero ambiental
(Denominación del Título)

Concluido el acto, el Jurado dictaminó que el (la) (los) mencionado(a) (s) bachiller (es) fue (ron) APROBADO (S):

Por: Unanimidad
(Unanimidad o Mayoría) (*)

Emitiéndose el calificativo final de:

Bachilleres (Apellidos y Nombres)	Calificación (**)
Br. Altamirano Barrientos Vanesa Ayco	Aprobado
Br. Ccorimanya Ccorisoncco Milusca	Aprobado

Siendo las 12:00 horas concluyó la sesión, firmando los integrantes del Jurado.

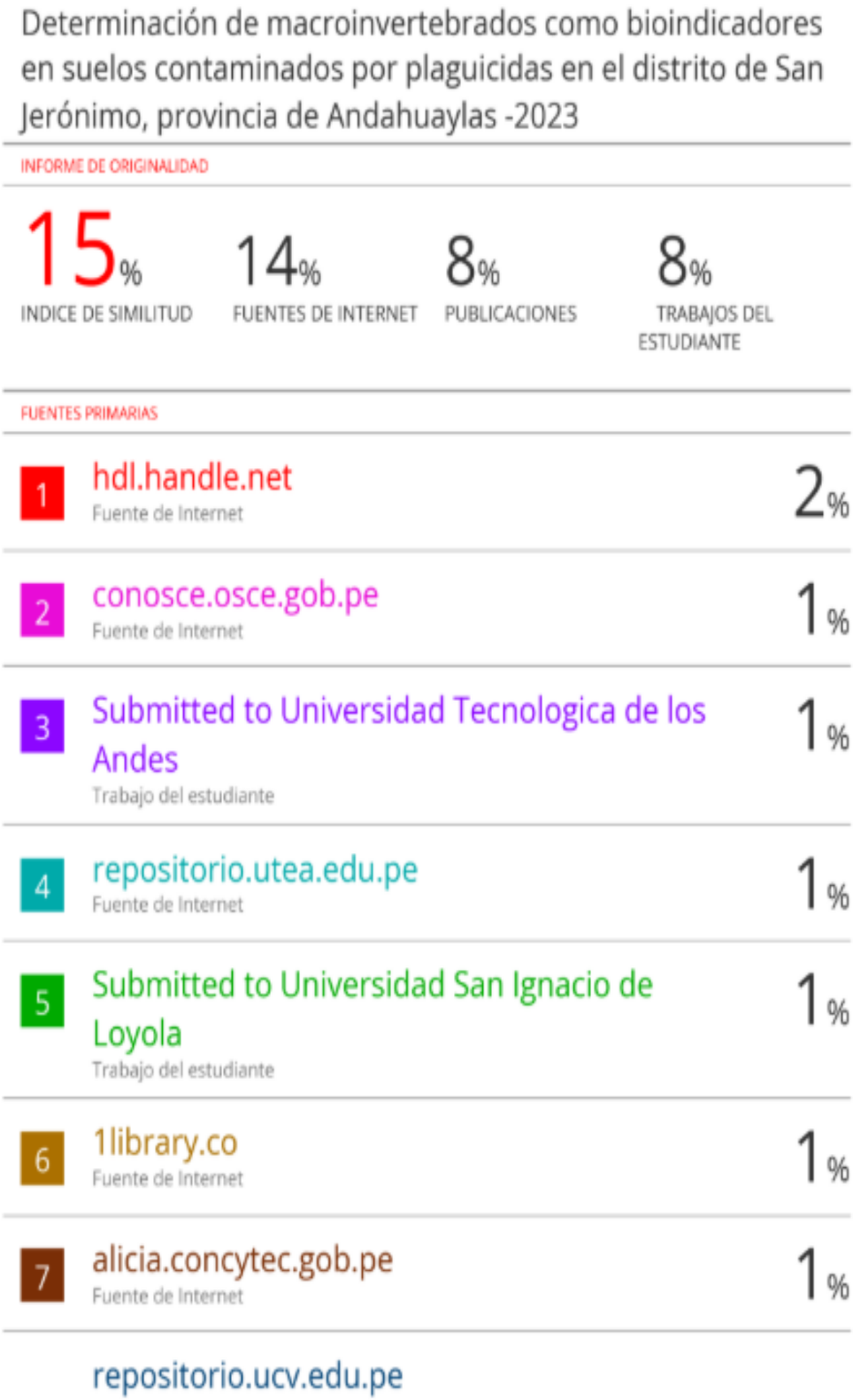
Presidente: Mg. María Fuentes Allccahuaman (Firma)

Dictaminante: Mg. Waldir Pimentel Maldonado (Firma)

Replicante: Mg. David Centeno Cáceres (Firma)

(*): **Mayoría:** Dos integrantes del jurado aprueban o desaprueban; **Unanimidad:** Todos los integrantes del jurado aprueban o desaprueban, Art.18 RGGAT.
(**): 0 a 10: Desaprobado, 11 a 15: Aprobado, 16 a 18: Aprobado Notable, 19 y 20: Aprobado con Distinción, Art. 18 RGGAT.

Reporte de similitud



Metadatos

Datos del Autor		
Apellidos y nombres	:	Altamirano Barrientos, Vanesa Ayco
Tipo de Documento de Identidad	:	Documento Nacional de Identidad
Número de Documento de Identidad	:	70667981
URL ORCID	:	https://orcid.org/0009-0006-4398-2552
Apellidos y nombres	:	Ccorimanya Ccorisoncco Milusca
Tipo de Documento de Identidad	:	Documento Nacional de Identidad
Número de Documento de Identidad	:	72043265
URL ORCID	:	https://orcid.org/0009-0009-8757-3058
Datos del Asesor		
Apellidos y nombres	:	Ing. Barazorda Carrillo Jose Gabriel
Tipo de Documento de Identidad	:	DNI
Número de Documento de Identidad	:	31174435
URL ORCID	:	https://orcid.org/0009-0006-5027-9398
Datos de la Investigación		
Facultad	:	Ingeniería
Escuela Profesional	:	Ingeniería Ambiental y Recursos Naturales
Línea de Investigación	:	Calidad ambiental
Rango de años en que se realizó la investigación	:	2023 – 2024
Fuente de Financiamiento	:	Recursos propios
Porcentaje de similitud	:	15 % con depósito
URL de OCDE	:	https://purl.org/pe-repo/ocde/ford#2.07.01

Dedicatoria

A mi madre Rocio, fuente de admiración por su fortaleza, dedicación, amor incondicional y pilar de la familia; a mis hermanas, quienes son la inspiración para ser mejor persona y profesional cada día.

Vanesa Altamirano.

A mis amados padres, Guillermo Ccorimanya y Paulina Ccorisoncco, pilares fundamentales de mi vida, por su amor incondicional y apoyo constante, que han sido mi mayor fortaleza; a mis queridos hermanos, Griselda, Rene, y Rudy, por su constante aliento y por creer siempre en mí. A mi abuelita Rosa, por seguir guiándome desde el cielo.

Milusca Ccorimanya.

Agradecimientos

A nuestros asesores, por su invaluable guía, paciencia y dedicación durante el proceso de investigación, asimismo a Leslie, Karina y María, por su apoyo y orientación en el proceso de muestreo de suelos y redacción. A la doctora Julia Iraida, por habernos facilitado el espacio necesario para llevar a cabo la caracterización y análisis de las muestras.

Vanesa y Milusca

A mis queridas amistades Yoan, Ani, Mary Carmen y Alisson; por su apoyo incondicional, a mi compañero de vida quien me apoyó incondicionalmente en este proceso. A mi compañera de tesis, su compromiso y colaboración fueron esenciales para el desarrollo de este trabajo.

Vanesa Ayco

A mis queridos amigos, quienes con su aliento y motivación me impulsaron a superar los momentos más difíciles. A mi compañera de investigación, Vanesa, con quien compartí cada paso de este camino. Tu tenacidad y colaboración hicieron posible este logro. Gracias por no rendirte y por demostrar que la colaboración y el esfuerzo conjunto pueden superar cualquier obstáculo.

Milusca

Resumen

Esta investigación tuvo como objetivo determinar las familias de macroinvertebrados indicadoras de suelos contaminados por plaguicidas organoclorados y organofosforados en del Centro Poblado de Lliupapuquio, del distrito de San Jerónimo, provincia de Andahuaylas. Se aplicó un diseño no experimental, de tipo aplicada y nivel descriptivo. La recolección de muestras se realizó en temporada de lluvias entre noviembre del 2023 al mes de abril del 2024, siguiendo los lineamientos de la Guía para el Muestreo de Suelos del Ministerio del Ambiente (MINAM), para determinar puntos y cantidad de muestra de suelo para analizar compuestos volátiles; del mismo modo el Protocolo para el Muestreo de Fauna del Suelo del Instituto de Biología y Suelos Tropicales (TSBF), para la recolección y conservación de macroinvertebrados edáficos. La diversidad de macroinvertebrados se determinó con el índice de Shannon Wiener; y los plaguicidas fueron analizados con el método de cromatografía de gases (EPA Method 8270 E, Rev 6, 2018), en un laboratorio acreditado por el Instituto Nacional de Calidad (INACAL). Los resultados del análisis de residuos de veintiún plaguicidas organoclorados y dos organofosforados, indicaron que las concentraciones en las parcelas agrícolas son menores al Límite de Cuantificación del Método (LCM), mientras que la parcela no agrícola se obtuvo concentraciones iguales al LCM de compuestos organoclorados como Clordano, Diclorodifeniltricloroetano (DDT), Aldrín + Dieldrín, Heptacloro + Heptacloro epóxido. Las familias Curculionidae, Lumbricidae y Díptera mostraron una distribución asociada a las condiciones del suelo y a la presencia de residuos, respaldando su utilidad como bioindicadores en suelos potencialmente contaminados.

Palabras clave: Bioindicadores, macroinvertebrados edáficos, plaguicidas organoclorados, plaguicidas organofosforados

Abstract

This research aimed to identify macroinvertebrate families that serve as indicators of soils contaminated by organochlorine and organophosphate pesticides in the community of Lliupapuquio, located in the district of San Jerónimo, province of Andahuaylas. A non-experimental, basic, descriptive level design was applied. Sample collection was conducted during the rainy season, from November 2023 to April 2024, following the guidelines of the Soil Sampling Guide by the Ministry of the Environment (2014) to determine sampling points and soil sample quantities for volatile compound analysis. Likewise, the Soil Fauna Sampling Protocol from the Institute of Tropical Biology and Soils (IBST) was used for the collection and preservation of soil macroinvertebrates. Macroinvertebrate diversity was assessed using the Shannon-Wiener index, and pesticide residues were identified through gas chromatography (EPA Method 8270 E, Rev. 6, 2018) in a laboratory accredited by the National Institute of Quality (INACAL). The analysis of residues from twenty-one organochlorine and two organophosphate pesticides indicated that concentrations in agricultural plots were below the Method Quantification Limit (MQL), while the non-agricultural plot showed concentrations equal to the MQL for organochlorine compounds such as Chlordane, Dichlorodiphenyltrichloroethane (DDT), Aldrin + Dieldrin, and Heptachlor + Heptachlor epoxide. The families Curculionidae, Lumbricidae, and Díptera exhibited distribution patterns associated with soil conditions and the presence of pesticide residues, supporting their usefulness as bioindicators in potentially contaminated soils.

Keywords: Bioindicators, soil macroinvertebrates, organochlorine pesticides, organophosphate pesticides, contaminated soil

Índice

Portada……i

Acta de Sustentación……...…...ii

Reporte de Similitud……..iii

Metadatos……..iv

Dedicatoria……v

Agradecimientos……vi

Resumen……..……vii

Abstract……....viii

Índice de Tablas……xi

Índice de Figuras…… …xii

Índice de Anexos…… ……xiii

Acrónimos…...……xiv

I. Introducción 15

II. Planteamiento del Problema 17

2.1. Descripción y Formulación del Problema 17

2.2. Objetivos 19

2.2.1. Objetivo General 19

2.2.2. Objetivos Específicos 19

2.3. Justificación e Importancia 20

2.4. Hipótesis 22

2.5. Variables 22

III. Marco Teórico 24

3.2. Bases Teóricas 34

3.3. Definición de Términos 49

IV. Metodología.....51

4.1. Tipo y Nivel de Investigación.....51

4.2. Ámbito Temporal y Espacial 53

4.3. Población y Muestra.....55

4.4. Instrumentos 57

4.5. Procedimientos 58

4.6. Análisis de Datos 72

4.7. Consideraciones Éticas.....72

V. Resultados y Discusión 75

VI. Conclusiones 98

VII. Recomendaciones.....100

VIII.Referencias 102

IX. Anexos 110

Índice de Tablas

Tabla 1 *Matriz de operacionalización de variables*……23

Tabla 2 *Grupos funcionales de macrofauna edáfica*…….38

Tabla 3 *Clasificación de familia química de plaguicida*……..…40

Tabla 4 *Clasificación según el grado de toxicidad*……...40

Tabla 5 *Clasificación de plaguicida según su persistencia*…….41

Tabla 6 *Clasificación según su composición química*…….....42

Tabla 7 *Número mínimo de puntos de muestreo para MI*……..……60

Tabla 8 *Clasificación de la reacción del suelo al peróxido de hidrógeno*……..……..70

Tabla 9 *Población de macroinvertebrados*……..…….75

Tabla 11 *Densidad de macroinvertebrados*……..……..79

Tabla 12 *Conducta alimenticia y cantidad de familias por punto de muestreo*……80

Tabla 13 *Resultado de diversidad de macroinvertebrados*……..83

Tabla 14 Inter*pretación de valores resultantes del Índice de Shannon-Wiener*……84

Tabla 15 *Residuos de plaguicidas organoclorados en suelos agrícolas*……..87

Tabla 16 *Residuos de plaguicidas organoclorados en suelos no agrícolas*…….88

Tabla 17 *Resultados de plaguicidas organofosforados en P1, P2 y P3*…….91

Tabla 18 *Resultados de plaguicidas organofosforados de P4*……..……..91

Tabla 19 *Resultados de color del de parcelas estudiadas*……..……92

Tabla 20 *Resultados de textura de suelos muestreados*…….93

Tabla 21 *Resultados de materia orgánica de suelos muestreados*…….....94

Tabla 22 *Resultados de parámetros fisicoquímicos cuantitativos*……....95

Índice de Figuras

Figura 1 *Estructura química del plaguicida organoclorado.*.....43

Figura 2 *Estructura química de plaguicida organofosforado*.....44

Figura 3 *Esquema del destino de los plaguicidas en el medio ambiente.*.....46

Figura 4 *Mapa de ubicación de las parcelas muestreadas.* 54

Figura 5 *Patrón de muestreo de rejillas regulares.* 59

Figura 6 Técnica *de cuarteado de muestra de suelo* 60

Figura 7 *Condiciones para conservación y preservación de muestras*.....*61*

Figura 8 *Procedimiento de recolección de macroinvertebrado en campo*.....63

Figura 9 *Fórmula del índice de Shannon-Wiener*.....64

Figura 10 *Fórmula de Proporción de Individuos* 65

Figura 11 *Punto idóneo de la pasta de saturación del suelo.* 66

Figura 12 *Agitación de muestras para medir pH*……..…….…..67

Figura 13 *Fórmula para calcular el porcentaje de humedad* 68

Figura 14 *Fórmula para calcular Humedad Gravimétrica y Densidad Aparente*…..…...69

Figura 15 *Fórmula para calcular Porosidad* 69

Figura 16 D*iferencia de volúmenes para determinar porosidad.*.....69

Figura 17 *Triángulo de identificación de texturas del suelo*.....71

Figura 18 *Diferencia de presencia en órdenes y familias*. 76

Figura 19 *Distribución de la población total.* 77

Figura 20 *Resultados del índice de Shannon Weiner.* 84

Índice de Anexos

Anexo 1. Ficha de registro de datos de parámetros fisicoquímicos 111

Anexo 2. Ficha de clasificación de macroinvertebrados 112

Anexo 3. Ficha de muestreo de suelo 113

Anexo 4. Cálculos de diversidad aplicando el índice de Shannon 114

Anexo 5. Matriz de consistencia 115

Anexo 6. Certificado de Acreditación de laboratorio SLAB SAC. 117

Anexo 7. Resultados de informe de ensayo P1 118

Anexo 8. Resultados de informe de ensayo P2 119

Anexo 9. Resultados de ensayo P3 120

Anexo 10. Resultados de ensayo P4 121

Anexo 11. Certificado de calibración de multiparámetro pH 122

Anexo 12. Certificado de calibración de multiparámetro CE 123

Anexo 13. Validación de instrumentos por expertos 124

Anexo 14. Autorización de acceso al área de estudio 125

Anexo 15. Panel fotográfico……...126

Acrónimos

DDD: Diclorodifenildicloroetano.

DDE: Diclorodifenildicloroetileno.

DDT: Diclorodifeniltricloroetano (pesticida organoclorado).

FAO: Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación.

LMC: Límite Mínimo de Cuantificación.

mg/kg: Miligramos por kilogramo (unidad de concentración en suelo).

MO: Materia Orgánica.

OMS: Organización Mundial de la Salud.

P1: Parcela de estudio 1.

P2: Parcela de estudio 2.

P3: Parcela de estudio 3.

P4: Parcela de estudio 4.

pH: Potencial de Hidrógeno.

SENASA: Servicio Nacional de Sanidad Agraria.

I. Introducción

La agricultura constituye una actividad estratégica para garantizar la seguridad alimentaria y el desarrollo económico de las poblaciones rurales en el Perú. Sin embargo, el modelo agrícola convencional, basado en el uso intensivo de plaguicidas, caracterizado por el uso intensivo de plaguicidas, ha generado impactos ambientales y sanitarios de gran relevancia. Según estudios de Pesticide Action Network International, (PAN International, 2020), señala que la incidencia de intoxicaciones agudas por plaguicidas ha tenido un incremento alarmante, pasando de unos 25 millones de afectados en 1990 a 385 millones en la actualidad, lo que provoca cerca de 11 000 fallecimientos cada año.

En particular, los plaguicidas altamente peligrosos (PAP), como los organoclorados y organofosforados, representan una amenaza crítica por su toxicidad aguda y crónica, su persistencia ambiental y su capacidad de bioacumulación. Su uso indiscriminado compromete la fertilidad del suelo, altera la biodiversidad edáfica y afecta servicios ecosistémicos esenciales como la aireación, el reciclaje de nutrientes y el control biológico. Además, estos compuestos pueden ser transportados por escorrentía hacia cuerpos de agua superficiales, infiltrarse hacia acuíferos o volatilizarse hacia la atmósfera, extendiendo su alcance contaminante a través de múltiples vías.

Ante este escenario, surge la necesidad de implementar herramientas de monitoreo ambiental que sean accesibles y efectivas. Los macroinvertebrados edáficos se reconocen como bioindicadores sensibles a los cambios fisicoquímicos y biológicos del suelo. Su presencia, abundancia y diversidad permiten describir las condiciones ecológicas y detectar posibles alteraciones ocasionadas por contaminantes químicos (Cabrera et al., 2022).

En el distrito de San Jerónimo, provincia de Andahuaylas, la actividad agrícola constituye una de las principales fuentes de ingreso económico. Sin embargo, no se dispone

de estudios previos que describan la presencia de residuos de plaguicidas en los suelos agrícolas y la biodiversidad edáfica. Por ello, este trabajo busca describir la diversidad y distribución de macroinvertebrados edáficos y la presencia de residuos de plaguicidas, con el propósito de identificar familias bioindicadores y aportar información técnica para la gestión ambiental y agrícola de la zona.

Esta investigación se organiza en nueve capítulos, el primer capítulo aborda la introducción general del estudio. El segundo capítulo detalla el planteamiento del problema, los objetivos, las hipótesis, las variables consideradas y la justificación del trabajo. En el tercer capítulo se desarrolla el marco teórico, incluyendo los antecedentes, las bases conceptuales y la definición de términos clave. El cuarto capítulo explica la metodología empleada, así como los procedimientos utilizados para la recopilación de datos. En el capítulo cinco se presentan los resultados obtenidos y su respectiva interpretación. El sexto capítulo expone las conclusiones derivadas del análisis. El séptimo capítulo ofrece recomendaciones dirigidas a optimizar el manejo agrícola y promover la conservación de la calidad del suelo. Finalmente, los capítulos ocho y nueve incluyen las referencias bibliográficas y los anexos correspondientes

II. Planteamiento del Problema

2.1. Descripción y Formulación del Problema

La agricultura moderna, aunque esencial para la seguridad alimentaria global, ha intensificado el uso de plaguicidas, muchos de ellos clasificados como altamente peligrosos generando consecuencias ambientales y sanitarias alarmantes. A nivel mundial la Organización Panamericana de la Salud (OPS, 2024) estima que 385 millones de personas sufren intoxicaciones agudas no intencionales por plaguicidas cada año, con más de 11,000 muerte asociadas, principalmente en países de ingresos bajos y medios. Además, el 64% de la tierra agrícola mundial está en riesgo de contaminación por múltiples ingredientes activos provenientes de plaguicidas, mientras que el 31% se encuentra en alto riesgo, afectando regiones de alta biodiversidad y con escasez de agua (Gomero, 2021, p.4).

Olguín et al. (2024) investigaron sobre el uso de plaguicidas desde 1990 en 17 países seleccionados de América Latina, evidenciando un crecimiento sostenido y considerable. En ese año se aplicaron aproximadamente 163 mil toneladas, incrementándose en un 147% hacia el año 2000. Esta tendencia no se detuvo: para el 2010, el uso se había elevado otro 110%, y entre 2010 y 2020 se registró un aumento adicional del 37,5%, alcanzando un total cercano al millón de toneladas. Particularmente, los herbicidas representan la mayor proporción, con unas 764 mil toneladas, superando el uso de insecticidas, fungicidas y bactericidas. Estas cifras reflejan una fuerte expansión de compuestos químicos agrícolas en sistemas productivos y ecosistemas naturales, lo que sugiere una posible acumulación o dispersión de ingredientes activos en suelos, cuerpos de agua y áreas pobladas, generando interrogantes sobre sus impactos ambientales y la necesidad de indicadores biológicos para evaluar estos efectos (p.3-4).

En el caso de Perú, el problema se agrava por la débil fiscalización de las instituciones responsables y la persistencia de plaguicidas prohibidos en otros países. El Servicio Nacional de Sanidad Agraria (2021) reporta que el 16% de los alimentos analizados superaron los límites máximos permitidos de residuos de plaguicidas, cifra que se elevó al 265 en Lima y Callao, revelando una exposición masiva a contaminantes químicos.

El Ministerio de Salud en el año 2024 reportó 1,526 casos de intoxicación aguda por plaguicidas, con mayor incidencia en regiones agrícolas como Junín, Cusco y Apurímac. Según los resultados de la Encuesta Nacional Agraria de 2014, desarrollada por el Instituto Nacional de Estadística e Informática, el 47.5 % de los productores agropecuarios utiliza plaguicidas en sus labores. Sin embargo, únicamente el 14.5 % pone en práctica medidas adecuadas de producción e higiene. Además, apenas el 11 % de ellos recibió formación específica sobre el manejo de estos productos en los tres años previos (Instituto de Defensa Legal, 2022).

En el ámbito regional el año 2022, el Instituto de Desarrollo y Medio Ambiente (IDMA) llevó a cabo un estudio en las provincias de Abancay y Andahuaylas, las más destacadas de Apurímac por su productividad agrícola y diversidad de cultivos. Los resultados mostraron que el 66 % de los agricultores selecciona los plaguicidas basándose en su propia experiencia adquirida a lo largo de los años, mientras que solo un 30 % sigue recomendaciones externas. Además, más del 90 % señaló que adquiere estos productos libremente, sin restricciones, y la mayoría desconoce los niveles específicos de toxicidad que pueden representar para la salud o el medio ambiente (Vargas y Quispe, 2024).

A nivel local, el centro poblado de Lliupapuquio del distrito de San Jerónimo enfrenta una situación crítica. A pesar de su aptitud agrícola, no existen estudios que evalúen la presencia de residuos de plaguicidas en el suelo ni su impacto sobre la biodiversidad edáfica.

En este contexto, Cabrera et al. (2022) revelan que la macrofauna edáfica es un componente clave de la biodiversidad terrestre, puesto que desempeña funciones ecológicas fundamentales, incluyendo el secuestro de carbono, regulación de gases atmosféricos y la mitigación del cambio climático. Debido a su sensibilidad a las alteraciones del suelo y su bajo costo de aplicación, ha sido reconocida como un bioindicador eficiente para evaluar la salud del medio edáfico concluyendo que son ventajosos al no demandar un trabajo taxonómico complejo, son económicos, fácil y rápida aplicación en cualquier región y ecosistema, que precisen una evaluación comparativa.

Este estudio aportó conocimiento científico local del suelo mediante indicadores biológicos accesibles, como los macroinvertebrados, y así contribuir a una gestión ambiental más sostenible y justa. Este estudio busca evaluar la relación entre los macroinvertebrados edáficos y residuos de plaguicidas en los suelos del centro poblado de Lliupapuquio, distrito de San Jerónimo, provincia de Andahuaylas.

2.2. Objetivos

2.2.1. Objetivo General

Identificar macroinvertebrados edáficos bioindicadores de suelos contaminados por residuos químicos de plaguicidas organoclorados y organofosforados del Centro Poblado de Lliupapuquio del distrito de San Jerónimo, provincia de Andahuaylas.

2.2.2. Objetivos Específicos

- Determinar los residuos químicos de plaguicidas organoclorados y organofosforados en suelos del Centro Poblado de Lliupapuquio del distrito de San Jerónimo, provincia de Andahuaylas.

- Cuantificar la población y obtener la diversidad de macroinvertebrados edáficos en suelos contaminados por plaguicidas organoclorados y organofosforados del Centro Poblado de Lliupapuquio del distrito de San Jerónimo, provincia de Andahuaylas.
- Identificar las familias de macroinvertebrados edáficos indicadoras de suelos contaminados por plaguicidas organoclorados y organofosforados del Centro Poblado de Lliupapuquio, distrito de San Jerónimo, provincia de Andahuaylas.

2.3. Justificación e Importancia

La presente investigación adquiere especial relevancia por abordar una problemática que afecta simultáneamente la salud, el ambiente, la economía local, la dimensión social y el enfoque técnico en zonas de producción agrícola.

En salud, la identificación de residuos de plaguicidas altamente peligrosos en el suelo resulta crucial para evidenciar riesgos crónicos que afectan la salud humana. Este problema se intensifica en poblaciones vulnerables expuestas de forma indirecta, como niños, agricultores y consumidores de alimentos contaminados por procesos de bioacumulación. La obtención de datos sobre dicha exposición permite anticipar escenarios de intoxicación y enfermedades de origen químico, así como diseñar estrategias preventivas eficaces. Además, estos hallazgos pueden sustentar la formulación de políticas públicas orientadas a la protección de la salud colectiva, especialmente en entornos rurales donde el control ambiental es limitado.

Ambientalmente, analizar el efecto de los plaguicidas sobre macroinvertebrados edáficos permite evaluar la pérdida funcional del suelo, especialmente en procesos como la aireación, reciclaje de nutrientes y control biológico. Estos compuestos, además de alterar la biodiversidad del suelo, pueden desplazarse por escorrentía hacia cuerpos de agua o infiltrarse al subsuelo, generando contaminación hídrica. Algunos ingredientes activos

presentan volatilización atmosférica y tendencia a la bioacumulación, lo que amplifica su alcance y persistencia en el ambiente. En consecuencia, el uso intensivo de agroquímicos representa una amenaza transversal para la salud ecosistémica y humana, evidenciando la necesidad de monitoreo edáfico mediante indicadores biológicos sensibles

En el plano económico, la conservación de la calidad del suelo resulta esencial para garantizar la productividad agrícola sostenible, reducir la dependencia de insumos externos y minimizar pérdidas económicas asociadas a la degradación edáfica. Esta investigación aporta evidencia científica clave para orientar la toma de decisiones en comunidades rurales de bajos recursos, optimizando el uso de materiales, tiempo y tecnología en el manejo de suelos.

A nivel social, el fortalecimiento del conocimiento técnico local permite empoderar a la población en la adopción de prácticas agrícolas responsables, promoviendo la salud colectiva y reduciendo los riesgos asociados al uso inadecuado de agroquímicos. Además, disponer de información respaldada por evidencia científica permite fortalecer la cultura de prevención en las comunidades rurales, promoviendo una comprensión más crítica sobre los impactos ambientales derivados del uso de agroquímicos.

En el eje técnico, esta propuesta plantea una metodología eficiente, replicable y adaptable que integra indicadores biológicos accesibles, contribuyendo al desarrollo de herramientas prácticas para el monitoreo ambiental en contextos rurales. Cada una de estas dimensiones evidencia la urgencia y pertinencia del estudio, cuyo propósito es orientar acciones concretas hacia una agricultura más saludable, sostenible y justa.

2.4. Hipótesis

2.4.1. Hipótesis general

Existen macroinvertebrados edáficos bioindicadores en suelos contaminados por plaguicidas organoclorados y organofosforados del Centro Poblado de Lliupapuquio del distrito de San Jerónimo, provincia de Andahuaylas.

2.4.2. Hipótesis especificas

- Se identifican residuos químicos de plaguicidas organoclorados y organofosforados persistentes en suelos del Centro Poblado de Lliupapuquio, del distrito de San Jerónimo, provincia de Andahuaylas.
- La diversidad de macroinvertebrados edáficos es un indicador de suelos contaminados por plaguicidas organoclorados y organofosforados del Centro Poblado de Lliupapuquio, distrito de San Jerónimo, provincia de Andahuaylas.
- Existen familias de macroinvertebrados edáficos indicadores de suelos contaminados plaguicidas organoclorados y organofosforados del Centro Poblado de Lliupapuquio en el distrito de San Jerónimo, provincia de Andahuaylas.

2.5. Variables

A continuación, se presentan las variables de la investigación, siendo la variable "X" la independiente, y la variable "Y" la dependiente, estas se definen en la Tabla N°1.

Variable X: Suelos contaminados por plaguicidas organoclorados y organofosforados.

Variable Y: Macroinvertebrados edáficos como bioindicadores

Tabla 1

Matriz de operacionalización de variables.

Variable	Definición conceptual	Definición operacional	Dimensiones	Indicadores	Escala de medida	Instrumento
Variable independiente: Suelos contaminados por plaguicidas organoclorados y organofosforados	La presencia de plaguicidas en el suelo, se debe por la aplicación a las plantas para controlar plagas (insecticida, fungicidas y herbicidas), ocasionando un almacenamiento del 50% de los residuos en el suelo (Castillo et al., 2020).	Mediante el método de Cromatografía de gases y análisis de los parámetros fisicoquímicos del suelo.	Composición química de plaguicidas.	- Organoclorado - Organofosforado	mg/Kg.	-Informe de laboratorio contratado.
			Parámetros fisicoquímicos del suelo.	- Color - Textura - Porosidad - Temperatura - Conductividad Eléctrica - Materia Orgánica -PH	-Escala de Munsell -Triángulo Textural -Porcentaje -°C -mS/cm -Oxidación -Acido/Alcalino	-Ficha de registro de datos de parámetros fisicoquímicos.
Variable dependiente: Macroinvertebrados como Bioindicadores	Organismos visibles a simple vista, tales como lombrices de tierra, insectos y miriápodos, cuya presencia y diversidad funcional reflejan el estado ecológico del suelo. Son especialmente sensibles a perturbaciones causadas por prácticas agrícolas como la labranza y el uso de insumos químicos, lo que puede provocar una disminución poblacional, desplazamiento o eliminación de especies (Feijoo & Knapp, 1998).	Se mide a través de la cuantificación de población, identificación de familias y posterior aplicación del índice de Shannon Weiner	Diversidad de macroinvertebrados.	Población de macroinvertebrados.	Cuantificación de individuos por muestra.	-Ficha de clasificación de macroinvertebrados.
				Familias de macroinvertebrados	Cuantificación de familias por muestra.	

Nota. Elaborado por el autor.

III. Marco Teórico

3.1. Antecedentes

3.1.1. Antecedentes Internacionales

Oliveira et al., (2021) realizaron una investigación en la hacienda Sucupira, ubicada en la Región Baja de Bahía, Brasil, con el objetivo de evaluar la macrofauna del suelo como bioindicador de calidad edáfica en sistemas agroforestales sucesionales y bosques secundarios. El estudio buscó identificar cómo las prácticas de manejo agroforestal influyen en la diversidad y abundancia de organismos edáficos, considerando su papel funcional en procesos ecológicos clave. Se aplicó un diseño experimental con muestreos sistemáticos utilizando el método TSBF (Tropical Soil Biology and Fertility), recolectando macroinvertebrados en distintos estratos del suelo. Se analizaron variables como densidad, riqueza taxonómica e índices ecológicos (Shannon y Pielou), comparando los sistemas evaluados.

Los resultados mostraron que los sistemas agroforestales sucesionales presentaron mayor diversidad y abundancia de macrofauna edáfica, lo que indica una mejor calidad del suelo. Entre los grupos más representativos se encontraron órdenes como Coleóptera, Hymenoptera, Isopoda, Diplópoda y Chilopoda, y familias como Formicidae (hormigas), Scarabaeidae (escarabajos), Staphylinidae, Carabidae y Lumbricidae (lombrices). Estos organismos demostraron sensibilidad a las condiciones fisicoquímicas del suelo y variabilidad según el tipo de cobertura vegetal. El estudio concluye que la macrofauna del suelo, especialmente estas familias, constituye una herramienta eficaz para el monitoreo ambiental en contextos agroecológicos.

Silva et al. (2023) estudiaron un huerto del Campus Rural de la Universidad de Estadual do Rio Grande do Sul (UERGS), en Santana do Livramento (RS, Brasil), con el

objetivo de caracterizar la macrofauna edáfica como bioindicador de calidad del suelo en el Bioma Pampa. Se aplicó un muestreo manual sistemático en dos transectos del huerto, utilizando cuadrantes de 25 x 25 cm y extrayendo el suelo hasta 20 cm de profundidad. Los macroinvertebrados fueron recolectados manualmente e identificados hasta nivel de orden, registrando abundancia, diversidad y frecuencia relativa. Además, se empleó la técnica de cromatografía de Pfeiffer, que permite evaluar visualmente la vitalidad del suelo mediante patrones de difusión en papel filtro.

El estudio identificó 12 órdenes de macroinvertebrados, entre ellos Hymenoptera, Isoptera, Coleóptera, Diplópoda, Chilopoda, Araneae, Oligochaeta, Gastropoda, Hemíptera, Orthoptera, Díptera y Lepidóptera. Las familias más representativas fueron Formicidae, Termitidae, Scarabaeidae, Lumbricidae, Isopodidae, Carabidae, Staphylinidae y Diplopodidae, reconocidas por su sensibilidad a las condiciones fisicoquímicas del suelo. Estos grupos cumplen funciones ecológicas clave como la descomposición de materia orgánica, formación de poros, regulación de humedad y mineralización de nutrientes, lo que los convierte en bioindicadores confiables del estado de conservación edáfica.

Los resultados mostraron baja diversidad biológica y escasa mineralización orgánica, corroboradas por cromatogramas con simetría pobre y tonalidades oscuras. La predominancia de órdenes como Hymenoptera y Coleóptera, junto con la escasa presencia de Oligochaeta y Diplópoda, sugiere un suelo con actividad biológica limitada. El estudio concluye que la macrofauna edáfica, especialmente los grupos funcionales como ingenieros del suelo, detritívoros y depredadores, constituye una herramienta eficaz para el diagnóstico ambiental y la promoción de sistemas agroforestales urbanos

Morel y Ortiz (2022) realizaron una investigación en el campo experimental de la Facultad de Ingeniería Agronómica de la Universidad Nacional del Este (UNE), Paraguay,

con el objetivo de evaluar la calidad del suelo bajo distintos usos y manejos mediante la macrofauna edáfica como indicador biológico. Se estudiaron cinco parcelas: bosque natural (A), sistema agrícola mecanizado (B), integración agrícola-pecuaria (C), pastura (D) y cultivo perenne de caña de azúcar (E). El muestreo se realizó durante la estación lluviosa (primavera), utilizando el método TSBF (Tropical Soil Biology and Fertility), extrayendo bloques de suelo de 25 × 25 cm hasta 20 cm de profundidad. Los organismos recolectados fueron conservados en formaldehído al 4 % (lombrices) y alcohol etílico al 70 % (resto de macrofauna), luego identificados y clasificados por grupos funcionales: detritívoros, omnívoros, herbívoros, depredadores y otros.

Los resultados mostraron que la parcela E (cultivo perenne) presentó la mayor abundancia total con 406,4 individuos, predominando los detritívoros (74,8 %), lo que sugiere una alta actividad biológica y calidad edáfica. En contraste, la parcela B (sistema mecanizado) mostró menor diversidad funcional. Los grupos más representativos incluyeron Lumbricidae (lombrices), Diplópoda (milpiés), Formicidae (hormigas), Araneae (arañas), Chilopoda (ciempiés), Hemíptera y Lepidóptera, todos reconocidos como bioindicadores sensibles a las condiciones del suelo. El estudio concluye que la macrofauna edáfica refleja de manera efectiva el impacto del manejo agrícola sobre la salud del suelo, y su monitoreo puede orientar prácticas sostenibles en agroecosistemas tropicales.

Cabrera et al. (2022) estudiaron el efecto del uso intensivo del suelo sobre las comunidades de macroinvertebrados edáficos en el Centro de Apoyo Manglaralto, provincia de Santa Elena, Ecuador. El estudio comparó dos sistemas de uso de la tierra: un bosque seco tropical en regeneración (BSTr), sin actividad agrícola durante 30 años, y un cultivo de ciclo corto (CCC) manejado convencionalmente desde 2012 con especies como frijol, yuca, sandía y melón. Se realizaron dos muestreos al inicio del periodo lluvioso (febrero de 2020), siguiendo la metodología del programa TSBF (Tropical Soil Biology and Fertility),

recolectando macrofauna en 16 monolitos por sistema (25 × 25 × 30 cm). Los organismos fueron recolectados manualmente, conservados en alcohol etílico al 70 % y formol al 4 %, e identificados hasta nivel de orden, familia y grupo funcional (detritívoros, herbívoros, depredadores y omnívoros).

Los resultados revelaron una mayor riqueza taxonómica en el bosque regenerado, con 20 familias frente a 16 en el cultivo. Se identificaron 2 filos, 6 clases, 14 órdenes, 27 familias, 20 géneros y 9 especies. Las familias Formicidae (hormigas) y Termitidae (termitas) fueron las más dominantes en ambos sistemas, aunque con mayor predominio de termitas en el cultivo. Los índices ecológicos utilizados incluyeron Shannon (H′), Simpson (D), riqueza (S) y equitatividad de Pielou, y se aplicó la prueba Kruskal-Wallis para evaluar diferencias significativas entre sistemas y momentos de muestreo ($H = 4{,}871$; $p = 0{,}027$ en M1 y $H = 8{,}776$; $p = 0{,}003$ en M2). El estudio concluye que el uso intensivo del suelo reduce la diversidad funcional de la macrofauna edáfica, confirmando su valor como bioindicador sensible de la calidad ecológica del suelo.

Pang et al. (2022) realizaron una investigación sobre la degradación microbiana de los plaguicidas organoclorados Aldrín y Dieldrín en suelos contaminados, identificando rutas bioquímicas específicas mediante las cuales bacterias como *Pseudonocardia sp.* y hongos como *Mucor racemosus* transforman dichos compuestos. El estudio señala que Aldrín puede oxidarse a Dieldrín en condiciones ambientales, lo que incrementa su persistencia. Además, se determinó que factores como el pH, la textura del suelo, el contenido de materia orgánica y la humedad influyen significativamente en la tasa de biodegradación. Aunque el enfoque principal fue microbiológico, los autores destacan que la acumulación y baja movilidad de estos compuestos pueden alterar la biodiversidad del suelo y afectar organismos sensibles como los macroinvertebrados edáficos, reforzando su valor como indicadores ecológicos en ambientes contaminados

Vasconcelos et al., (2020) evaluaron la diversidad y abundancia de la macrofauna edáfica en tres sistemas de uso del suelo en la Amazonía oriental: bosque secundario (40 años), pastizal (20 años) y monocultivo de eucalipto (10 años), en el municipio de Marabá, estado de Pará, Brasil. El estudio tuvo como objetivo analizar la relación entre la estructura comunitaria de la macrofauna y las propiedades químicas del suelo, así como identificar los grupos funcionales más representativos. Se aplicó el método TSBF (Tropical Soil Biology and Fertility) en 48 monolitos distribuidos en transectos de 350 m, recolectando organismos en tres capas del suelo (hojarasca, 0–10 cm y 10–20 cm). Los individuos fueron identificados hasta nivel de familia y clasificados en grupos funcionales: detritívoros, depredadores, geófagos y fitófagos.

Los resultados mostraron que el bosque secundario presentó los mayores índices de diversidad (Shannon, Pielou) y riqueza familiar, con 29 familias exclusivas, mientras que el pastizal y el monocultivo de eucalipto mostraron menor diversidad y mayor homogeneidad. Aunque no se detectaron correlaciones significativas entre la estructura comunitaria y las propiedades químicas del suelo, se observó que el nivel de perturbación influye directamente en la composición de la macrofauna. Los grupos más sensibles fueron Oligochaeta (lombrices), Formicidae (hormigas), Scarabaeidae (escarabajos) y otros detritívoros, que disminuyeron en ambientes más degradados. El estudio concluye que la macrofauna edáfica es un bioindicador eficaz para evaluar el impacto del uso del suelo sobre la biodiversidad y la calidad ecológica en ecosistemas tropicales.

3.1.2. Antecedentes Nacionales

Entre las investigaciones de nivel nacional, se han considerado por su relevancia con la investigación las siguientes:

Jiménez (2022) Estudió “El uso de agroquímicos en el cultivo de papa y la contaminación del suelo agrícola en el distrito de Chinchero, Cusco Perú”, durante los años 2020 y 2021. El objetivo del estudio fue determinar si el uso de productos agroquímicos en el cultivo de Solanum tuberosum (papa) afecta a la contaminación del suelo agrícola. Se obtuvieron muestras de suelos de las microcuencas Piuray y Huaypo del distrito de Chinchero, utilizando enfoques de investigación descriptiva y explicativa.

Los resultados del estudio revelaron que el uso de productos agroquímicos en ambas microcuencas dio lugar a la presencia de residuos de pesticidas en el suelo agrícola, incluidos organoclorados (diclorvos, endosulfán a,b) y organofosforados (malatión). Además, se descubrió que los agroquímicos modifican física, química y biológicamente el suelo. La capacidad de absorción y retención de agua del suelo disminuyó, lo que permitió que los compuestos químicos se acumularan y persistieron. Debido a la falta de materia orgánica, el pH del suelo también se vio alterado, y la capacidad de intercambio catiónico disminuyó. Además, debido al uso regular de agroquímicos, se redujo drásticamente la presencia de algunos microorganismos, como el nematodo y Arcella sp. Según las conclusiones del estudio, el uso de agroquímicos en el cultivo de Solanum tuberosum en el distrito de Chinchero tiene un impacto negativo en la calidad del suelo agrícola, lo que puede perjudicar la productividad a largo plazo, así como la salud humana y medioambiental.

Olortegui (2022) en su tesis titulada "Impacto de agroquímicos en la densidad poblacional y actividad biológica de la fauna edáfica de la finca Santa Adela - Cañete" tuvo como objetivo evaluar el impacto de los agroquímicos en la fauna edáfica de la finca Santa Adela, en la provincia de Cañete. La técnica de la investigación consistió en definir las regiones de estudio, donde se eligieron tres áreas dentro de la finca con diferentes grados de uso de plaguicidas. A continuación, se examinó la densidad de población de la fauna edáfica y su actividad biológica, y se enviaron muestras de suelo a laboratorios para realizar análisis

biológicos, fisicoquímicos y de residuos de plaguicidas. Los resultados revelaron un descenso considerable de la densidad de población de la fauna del suelo en las regiones agrícolas con mayor aplicación de plaguicidas. Además, se observó una disminución de la actividad biológica del suelo en estas regiones. En conclusión, los agroquímicos utilizados en la finca Santa Adela tienen un impacto nocivo sobre la fauna y la actividad biológica del suelo. Para reducir este impacto, se aconseja que las explotaciones agrícolas utilicen alternativas más respetuosas con el medio ambiente.

Martínez (2019) investigó cómo las propiedades físico-químicas del suelo influyen en la diversidad y abundancia de la macrofauna edáfica en tres sistemas de uso: bosque secundario, cultivo de café y cultivo de cacao, en el distrito de Monzón, Huánuco. Se evaluaron variables como textura, porosidad, densidad aparente, pH, materia orgánica, nitrógeno, fósforo, potasio, calcio y capacidad de intercambio catiónico (CIC). Los resultados mostraron que suelos con mayor contenido de materia orgánica, pH neutro y alta porosidad favorecen la presencia y diversidad de macroinvertebrados. En particular, el bosque secundario presentó los valores más altos de diversidad ($H' = 1.72$ nats/ind), seguido por café ($H' = 1.71$) y cacao ($H' = 1.69$) lo que sugiere que el tipo de cobertura vegetal y el manejo influyen directamente en la estructura biológica del suelo.

Entre los grupos más representativos se identificaron Formicidae (hormigas), Lumbricidae (lombrices), Diplópodo (milpiés), Chilopoda (ciempiés) y Coleóptera (escarabajos), considerados especies indicadoras por su sensibilidad a cambios en las condiciones edáficas. Por ejemplo, las lombrices mostraron correlación positiva con la materia orgánica y el calcio, mientras que los milpiés y escarabajos se asociaron con suelos de textura franco-arcillosa y buena porosidad. El estudio concluye que la macrofauna edáfica refleja de manera efectiva el estado de salud del suelo, y su monitoreo puede ser una

herramienta útil para evaluar el impacto del uso del suelo sobre la biodiversidad y los procesos ecológicos.

Rios (2019) examinó la "Densidad y diversidad biológica en sistemas de uso del suelo en Palo de Acero, distrito de Monzón" el estudio se llevó a cabo con el propósito de evaluar la densidad y diversidad biológica en distintos sistemas de uso del suelo. Para lograrlo, se incluyeron diversas actividades como la descripción de las características físicas y químicas del terreno, la identificación y conteo de la macrofauna presente, así como el análisis de su distribución y variedad. También se examinó la relación entre los organismos edáficos y las propiedades físico-químicas del suelo en distintos niveles de profundidad, considerando terrenos cultivados con pastos, plátano, cacao y maíz.

La investigación era descriptivo-comparativo y explicativo, y el procedimiento de muestreo fue aleatorio, realizado a lo largo de la estación estival, a lo largo de un transecto rectilíneo de 40 metros de longitud muestras de suelo a intervalos de 10 metros (5 monolitos de suelo por parcela). Cada muestra de suelo se analizó a tres profundidades diferentes: 0 - 10 cm, 10 - 20 cm, y 20 - 30 cm. La fauna edáfica se contó in situ y se depositó en soluciones alcohólicas que oscilaban entre el 80% y el 10% para los insectos con el cuerpo intacto y entre el 4% y el 10% para las larvas y los insectos sin el cuerpo intacto. La biomasa (g/m2) y la densidad (individuos/m2) de todos los macroinvertebrados se midieron con ultrasonidos y se pesaron en una balanza de precisión antes de calcular el índice de diversidad mediante el método de Shannon-Wienner.

Los indicadores biológicos descubiertos fueron 15 órdenes, principalmente Hymenoptera, seguido de Haplotaxida e Isóptera, y por último los Isópoda, la densidad (63 Ind.m2 a 84 Ind.m2), la biomasa (7,95 g.m2 a 10,78 g.m2), la diversidad y la densidad predominaron en gramíneas y plátanos con el mayor número de especies, asimismo, se

encontró una relación directa entre materia orgánica, densidad aparente y presencia de macrofauna, lo que los posiciona como indicadores clave de calidad del suelo.

Grandez (2020), realizó una revisión sistemática de información documentada con el objetivo de determinar los agroquímicos en la calidad de los suelos agrícolas usando bioindicadores. Realizando una investigación de tipo básica, diseño bibliográfico y metodología cualitativa.

Obteniendo como resultado la disminución y mortalidad de los organismos bioindicadores, responsables de los ciclos de los nutrientes del suelo y responsables de la sostenibilidad ecológica; concluyendo que los suelos agrícolas son los más expuestos a su deterioro por las actividades que se desarrollan para obtener un terreno apto para cultivo, mediante el uso y aplicación de agroquímicos trayendo así disminución y muerte de organismos que desarrollan funciones a favor de la calidad del suelo.

Santa Cruz y Abner (2020) llevaron a cabo una investigación en el distrito de San Rafael, Bellavista, con el objetivo de evaluar la macrofauna edáfica como indicador de calidad del suelo en cultivos de arroz, dentro de un área de 5,000 hectáreas. Se seleccionaron aleatoriamente seis unidades de análisis: tres parcelas con cultivo de arroz y tres sin cultivo. El estudio fue de tipo descriptivo, con diseño no experimental y corte transversal.

El muestreo de suelo para análisis de metales pesados y compuestos organoclorados se realizó conforme al protocolo del MINAM (2014), y las muestras fueron analizadas mediante espectrofotometría de absorción atómica. Para el estudio de macrofauna, se extrajo un monolito de 25×25×30 cm por parcela, que luego fue procesado en laboratorio. La diversidad biológica se evaluó utilizando el índice de Shannon-Wiener.

Los resultados mostraron que los suelos con cultivo de arroz (P1, P2, P3) presentaron mayores concentraciones de organoclorados como 4,4-DDT, Aldrín, Endrín y Heptacloro, y

una menor diversidad de macrofauna, con presencia limitada de especies como Eisenia fetida y Lumbricus rubellus. En P3 no se hallaron organismos. En contraste, las parcelas sin cultivo (P4, P5, P6), libres de agroquímicos, mostraron mayor diversidad de especies, lo que sugiere una mejor calidad y salubridad del suelo.

3.1.3. Antecedentes Locales

Mendoza y Yupanqui (2023) investigaron en la localidad de Sucaraylla, ubicada en el distrito de Andahuaylas (región Apurímac), se realizó una investigación enfocada en determinar el nivel de contaminación del suelo por residuos de plaguicidas en cultivos de papa. Para ello, se tomaron 12 muestras de suelo que fueron analizadas para identificar sus propiedades físico-químicas y detectar la presencia de residuos mediante técnicas de cromatografía de gases. Los análisis revelaron compuestos como Carbofuran, Mancozeb, Carbendazima y Benomilo, siendo el Carbofuran el más preocupante por su concentración de 0.1 mg/kg, cifra que excede el límite permitido por la normativa ecuatoriana TULSMA, que es de 0.01 mg/kg. Este resultado pone en evidencia una contaminación considerable y prolongada, dado que el Carbofuran es un plaguicida de alta toxicidad y con una vida media extensa en el ambiente.

El estudio también identificó una correlación positiva significativa entre la presencia de plaguicidas y parámetros como la arcilla ($r = 0.569$) y la materia orgánica ($r = 0.652$), lo que sugiere que los coloides del suelo favorecen la adsorción y retención de estos compuestos, prolongando su permanencia. En contraste, el pH mostró una correlación negativa ($r = -0.569$), indicando que suelos más ácidos podrían facilitar la movilidad de los plaguicidas. Estos resultados refuerzan la necesidad de monitorear los residuos químicos en suelos agrícolas, especialmente en cultivos intensivos como la papa, donde el uso frecuente de agroquímicos puede comprometer la salud del suelo y los ecosistemas asociados.

A pesar de la creciente preocupación por la contaminación del suelo causada por residuos de plaguicidas, en la revisión bibliográfica realizada no se encontraron investigaciones previas desarrolladas a nivel local que aborden esta problemática de manera integral. Esta ausencia evidencia una brecha de conocimiento científico en la región respecto a la persistencia de plaguicidas y sus efectos sobre la calidad edáfica.

Durante la revisión bibliográfica, se identificaron únicamente un estudio local relacionado con suelos agrícolas contaminados por plaguicidas. Aunque esta investigación aportó referencias valiosas, no abordan de manera específica los ecosistemas altoandinos ni las condiciones agroecológicas del área de estudio. La limitada disponibilidad de investigaciones en este contexto evidencia una brecha científica en el monitoreo ecológico de suelos en regiones de altura, especialmente bajo el enfoque de bioindicadores.

3.2. Bases Teóricas

3.2.1. Suelo

Según la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO, s. f.).

> El suelo es tradicionalmente definido como el medio natural que permite el crecimiento de las plantas. Se considera un cuerpo natural formado por diferentes capas conocidas como horizontes, que están compuestas de materiales minerales meteorizados, materia orgánica, aire y agua. Es producto final de un proceso que involucra el paso del tiempo y la interacción de diversos factores como el clima, la topografía, los organismos (incluyendo la flora, fauna y el ser humano) y los materiales parentales (rocas y minerales originarios). Como resultado, el suelo se diferencia de su material parental en términos de textura, estructura, consistencia, color y propiedades químicas, biológicas y físicas.

Fertilidad del suelo. Se considera que un suelo es fértil cuando contiene los nutrientes necesarios para que las plantas puedan desarrollarse de manera óptima. Mientras que elementos como el carbono, hidrógeno y oxígeno son absorbidos del aire y del agua, otros nutrientes fundamentales como el nitrógeno, fósforo, potasio, calcio y magnesio son obtenidos directamente del suelo. Para garantizar la salud vegetal, estos nutrientes deben estar presentes en cantidades equilibradas, ya sea por la descomposición de la materia orgánica realizada por microorganismos o por el desgaste de las rocas (FAO, s. f.).

Textura del suelo. Rucks et al. (2004) hace la siguiente afirmación:

> La textura representa el porcentaje en que se encuentran los elementos que constituyen el suelo; arena gruesa, arena media, arena fina, limo, arcilla. Se dice que un suelo tiene una buena textura cuando la proporción de los elementos que lo constituyen le dan la posibilidad de ser un soporte capaz de favorecer la fijación del sistema radicular de las plantas y su nutrición (p.2).

Color del suelo. Rucks et al. (2004) dicen que "es una característica cómoda de identificar, asimismo suele estar en relación con los procesos de pedogénesis; las principales sustancias que confieren al suelo el color son el humus, compuestos minerales como los óxidos, sulfuros, sulfatos y carbonatos" (p.31).

Materia orgánica. El humus, como también se le conoce, carece de una definición unánime entre los expertos. No obstante, se emplea este término para referirse a un conjunto diverso de compuestos orgánicos, de tonalidades oscuras como el pardo y el negro, que se originan exclusivamente a partir de la descomposición de residuos vegetales. Esta sustancia contiene cerca de un 5 % de nitrógeno en su composición (Julca et al., 2006).

Humedad del suelo. La humedad del suelo representa la proporción de agua contenida en relación con el volumen total del suelo. Este parámetro desempeña un papel

fundamental en el desarrollo de las plantas, ya que determina cuánta agua está accesible para que las raíces puedan absorberla (Appopedia, s. f.).

Potencial de Hidrógeno (pH). El pH del suelo indica el nivel de concentración de iones de hidrógeno presentes, lo cual determina su grado de acidez o alcalinidad. En esta escala, un valor de pH 14 corresponde a suelos altamente alcalinos, mientras que un pH 7 indica un suelo neutro. Valores menores a 7 reflejan condiciones ácidas. Las plantas tienden a crecer mejor en suelos con pH cercano al neutro, ya que en ese rango los nutrientes se encuentran en un estado más equilibrado y disponible para ser absorbidos (Soriano, 2018).

Porosidad. La porosidad del suelo se refiere al porcentaje del volumen total que está formado por espacios vacíos, es decir, no ocupado por partículas sólidas. Este atributo se determina por la cantidad conjunta de macroporos y microporos presentes. Los macroporos, que no retienen agua, facilitan el drenaje y la circulación del aire en el suelo, condiciones esenciales para el desarrollo radicular de las plantas. En cambio, los microporos sí retienen agua, y son los encargados de suministrar la humedad necesaria para el crecimiento vegetal Rucks et al. (2004).

Indicadores Biológicos del Suelo. El suelo alberga una enorme diversidad de formas de vida, entre ellas invertebrados, insectos, arácnidos, lombrices, nematodos, protozoos, hongos y bacterias. Estos organismos interactúan entre sí y con los elementos no vivos del entorno, formando una compleja red ecológica. Dicha red es esencial para funciones como la descomposición de materia orgánica, el reciclaje de nutrientes, la eliminación de contaminantes y el mantenimiento de la estructura y estabilidad del suelo (Bracamontes et al., 2018).

3.2.2. Macrofauna del Suelo

"Incluye a los invertebrados visibles a simple vista que viven total o parcialmente dentro del suelo o inmediatamente sobre él. Estos invertebrados pueden incluir más de un millón de especies en un solo ecosistema y alcanzar densidades y biomasas más de un millón de individuos" (Brown, 2000, como se citó en Lema, 2016, p.8).

La macrofauna del suelo se refiere a los invertebrados que tienen una longitud igual o más y 2 mm de diámetro. Esta característica los hace fácilmente observables, ya sea en la superficie o en el interior del suelo (Cabrera, 2018).

Grupos funcionales. Con el objetivo de simplificar la complejidad inherente a las redes tróficas del suelo, se ha planteado la clasificación de los organismos en Grupos Funcionales. Una de las propuestas más relevantes consiste en categorizar la macrofauna edáfica según su patrón de alimentación (FAO, 2001, como se citó en Lema, 2016).

Detritívoros. Cabrera (2014, como se citó en Lema, 2016) afirma que estos organismos:

> Viven en la hojarasca, en la superficie e interior del suelo. Interviene en la descomposición de la materia orgánica y, fundamentalmente los invertebrados que habitan en la superficie se encargan de la trituración de los restos vegetales y animales que componen la hojarasca. La fragmentación mecánica de estos restos hace que haya mayor disponibilidad de alimentos para otros invertebrados más pequeños y para los microorganismos (por ejemplo: hongos y bacterias), jugando los detritívoros un papel importante en el reciclaje de nutrientes.

Herbívoros o Depredadores. Son organismos que se alimentan de material vegetal presente en el suelo, controlando así la cantidad de plantas en el suelo; por otro lado, los

depredadores, se encargan de mantener un equilibrio entre las poblaciones con respecto a los recursos disponibles en un ecosistema (Lema, 2016).

Ingenieros del Ecosistema. Biosil (2015, como se citó en Lema, 2016) define que:

> Los ingenieros existen mayormente en el interior del suelo y son responsables de la formación de poros, de la oxigenación y de la infiltración de agua, producto de las redes de galerías que construyen. También posibilitan la transformación de la materia orgánica por su interacción con algunos microorganismos (p.10).

Influyen en el proceso de agregación y formación de la estructura del suelo gracias al aporte de sus heces fecales, que son el producto de la mezcla en sus intestinos de material mineral (arena y arcilla) y orgánico del suelo, constituyendo reservorios de nutrientes (p.10).

Tabla 2

Grupos funcionales de macrofauna edáfica.

Grupo funcional	Grupo taxonómica	Nombre común
Detritívoros e ingenieros del suelo	Orden: Haplotaxida Familia: megascolecidae Especie: Polypheretima, Onychochaeta elegans	Lombrices de tierra
Detritívoros Depredadores	Familia: Subulinidae Especie: Subulina octona	Babosas y caracoles
Detritívoros	Orden: isópoda Familia: trachelipidae	Cochinillas
Detritívoros	Clase: Diplópoda	Milpiés
Depredadores	Clase: Chilopoda	Ciempiés
Depredadores	Orden: Araneae	Arañas
Depredadores	Orden: opiliones	Arañas patonas
Depredadores	Orden: Pseudoscorpionida	Falsos escorpiones
Detritívoros, herbívoros, omnívoros	Clase: insecta	Cucarachas

Detritívoros Herbívoros Depredadores	Orden: Dictyoptera Clase: insecta Orden: Coleóptera	Escarabajos
Detritívoros Depredadores	Clase: insecta Orden: Dermaptera	Tijeras
Detritívoros Depredadores	Clase: insecta Orden: Díptera	Moscas y mosquitos
Herbívoros	Clase: insecta Orden: Hemíptera	Chinches
Omnívoros Depredadores e Ingenieros del suelo	Clase: insecta Orden: Hymenoptera	Hormigas
Detritívoros e Ingenieros del suelo	Clase: insecta Orden: isóptera	Termitas o comejenes
Herbívoros	Clase: insecta Orden: Lepidóptera	Mariposas y orugas
Herbívoros	Clase: insecta Orden: Orthoptera	Grillos y saltamontes

Nota. Adaptado de Biosil (2015, como se citó en Lema, 2016)

3.2.3. Plaguicidas

La FAO (2004) lo define como:

> Cualquier sustancia o mezcla de sustancias o microorganismos, incluyendo virus, diseñadas para repeler, destruir o controlar cualquier plaga, incluyendo vectores de enfermedades humanas y animales, enfermedades molestas, especies no deseadas de plantas o animales, que de alguna manera causen daño o interfieran con la producción, procesamiento, almacenamiento, transporte o comercialización de alimentos, productos agrícolas y forestales, o alimentos para animales, o que puedan ser administrados a animales para el control de insectos, arácnidos u otras plagas internas o externas.

3.2.4. Clasificación de Plaguicidas

Tabla 3

Clasificación de familia química de plaguicida.

Familia química	**Organismos que controla**
Insecticida	Pulgones, pulgas, piojos, hormigas y diversos insectos
Herbicida	Malezas
Fungicida	Hongos
Molusquicida	Moluscos
Rodenticida	Roedores
Nematicida	Nematodos
Bactericida	Bacterias y ácaros
Acaricida	Ácaros

Nota. Extraído de (Mendoza y Yupanqui, 2023)

3.2.4.1. Según Toxicidad. Gonzales (2019, como se citó en Mendoza y Yupanqui (2023) clasifican según:

> Capacidad de un plaguicida de producir daño agudo a la salud a través de una o múltiples exposiciones, en un periodo de tiempo relativamente corto y se mide en dosis letal (DL50) o de concentración letal media (CL50) del ingrediente activo (p. 28).

Tabla 4

Clasificación según el grado de toxicidad.

Clasificación según peligro de la OMS		**DL50 del ingrediente activo (mg/kg vivo)**		**Información en la etiqueta**		
Grado de toxicidad		**Oral**	**Dermal**	**Peligro**	**Color de la banda**	**Símbolo de peligro**
I a	Sumamente peligroso	<50	<50	Muy tóxico	Rojo	
I b	Muy peligroso	5 – 50	5 – 200	Tóxico	Rojo	
II	Moderadamente peligroso	>50 – 2000	>200 -2000	Nocivo	Amarillo	
III	Poco peligroso	>2000 a 5000	>2000 a 5000	Cuidado	Azul	Cuidado
IV	Productos que normalmente	>5000	>5000	Precaución	Verde	Cuidado

	no ofrecen peligro

Nota. Adaptado de *Determinación del grado de contaminación por presencia de plaguicidas en suelos de cultivo de papa en la localidad de Sucaraylla*, Andahuaylas, por Mendoza y Yupanqui, 2023.

3.2.4.2. Según Persistencia. Se clasifican en cuatro categorías, desde no persistente, moderadamente persistente, persistente y permanentes con relación a su vida media, como se detalla a continuación:

Tabla 5

Clasificación de plaguicida según su persistencia.

Persistencia	Vida Media	Ejemplos
No persistente	De días hasta 12 semanas	Malatión, alcadicab, alacloro, diazenon, carbarilo, diametrin, carbofuran, carbenzima
Moderadamente persistente	De 1 a 18 meses	Paratión, lannate, atrazina, simazina, benomilo, clorfenvinfos, tetraconazol, mancozeb
Persistente	De varios meses a 20 años	DDT, Aldrín, Dieldrín, trifluralina, ciproconazol, lindano.
Permanentes	Indefinidamente	Productos hechos a partir de mercurio, plomo, arsénico

Nota. Adaptado de *Determinación del grado de contaminación por presencia de plaguicidas en suelos de cultivo de papa en la localidad de Sucaraylla*, Andahuaylas, por Mendoza y Yupanqui, 2023.

3.2.4.3. Según Composición Química. Se clasifican de acuerdo a su composición química, entre ellos compuestos orgánicos (Organoclorados, Organofosforados, Carbamatos, Tiocarbamatos, Piretroides y Derivados Bipiridilos) y compuestos inorgánicos, como se detalla a continuación:

Tabla 6

Clasificación según su composición química.

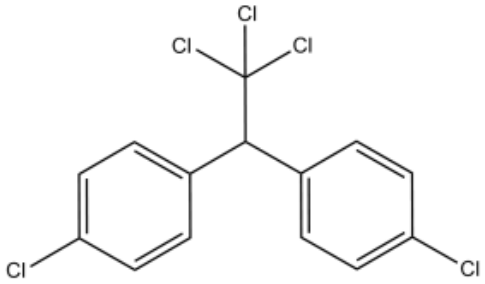
Familia química	Ejemplos
Organoclorados	DDT, aldrín, Endosulfán, Endrín, Dieldrín, Aldrín, Clordano, Heptacloro, Mirex
Organofosforados	Metamidofos, Malatión, Tamaron
Carbamatos	Carbaril, Metomil, Carbofuran, Mancozeb
Tiocarbamatos	Ditiocarbamatos, Mancozeb, Maneb
Piretroides	Cipermetrin, Fenvalerato, Deltametrina, Alfacipermetrina
Derivados bipiridilos	Clormequat, Diquat, Paraquat
Compuestos inorgánicos	Arsénico pentóxido, Fosfito de magnesio, Arsenato de plomo, Selenio, Talio

Nota. Adaptado de *Determinación del grado de contaminación por presencia de plaguicidas en suelos de cultivo de papa en la localidad de Sucaraylla*, Andahuaylas, por Mendoza y Yupanqui, 2023.

a) Plaguicidas Organoclorados. Los plaguicidas pertenecientes a este grupo se caracterizan por incluir elementos como cloro, carbono e hidrógeno en su composición, y en algunos casos también oxígeno y azufre. Predominantemente, los compuestos organoclorados actúan como insecticidas. Presentan una elevada persistencia en el ambiente edáfico y tienden a bioacumularse en tejidos lipídicos de organismos tanto humanos como animales a través de la cadena alimentaria (Comisión Intersectorial para el Control del Proceso y Uso de Plaguicidas, Fertilizantes y Sustancias Tóxicas [CICOPLAFEST],1991).

Figura 1

Estructura química del plaguicida organoclorado.



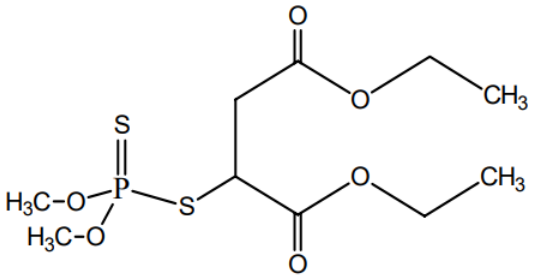
Nota: Adaptado de *Pesticidas Organoclorados*, por Biomonitoring California, s.f., (https://biomonitoring.ca.gov/es/chemicals/pesticidas-organoclorados).

Mecanismos de acción de plaguicidas organoclorados. Los plaguicidas organoclorados tienen como órgano blanco el sistema nervioso central (SNC). Afectan interviniendo el sostenimiento del estado polarizado de la membrana neuronal, dando como resultado la hiperexcitabilidad del sistema nervioso y descargas neuronales repetitivas (Instituto Nacional de Salud [INS], 2015).

b) Plaguicidas Organofosforados. Baird y Cann (2014) definen que las moléculas de los compuestos organofosforados son derivados del ácido fosfórico, $O{=}P(OH)_3$, están formadas por un átomo de fósforo central pentavalente al que están conectados un átomo de oxígeno o de azufre unidos mediante un enlace doble al átomo de P; dos grupos metoxi (—OCH_3) o etoxi (—OCH_2CH_3), unidos por medio de enlaces simples al átomo de P y un grupo característico R más complejo de cadena larga, unido por un enlace simple al átomo de fósforo, habitualmente a través de un átomo de oxígeno o de azufre (p.597).

Figura **2**

Estructura química de plaguicida organofosforado



Nota. Adaptado de *Environmental Fate of Malathion* (p.3) por KayLynn Newhart, 2006.

Mecanismo de acción de plaguicidas organofosforados. Estos "inactivan la actividad de la enzima acetilcolinesterasa, mediante la inhibición enzimática competitiva e irreversible; su mecanismo de acción se basa en la fosforilación de la enzima acetilcolinesterasa en las terminaciones nerviosas, provocando la inhibición de esta"(Milla y Palomino, 2022, p.13).

c) Plaguicidas carbamatos.

Ramírez y Lacasaña (2001) indican que:

> Son otro grupo de plaguicidas que pueden ser de tres tipos principales: a) Derivados de ésteres carbonatados, usados comúnmente como insecticidas; b) derivados del ácido tiocarbámico, utilizado como fungicidas, y c) carbamatos que se emplean como herbicidas. Todos estos son relativamente inestables, se les atribuye un tiempo corto de persistencia ambiental y cuentan con cierta selectividad (p.69).

Mecanismos de acción de los plaguicidas carbamatos. Aunque su composición química es distinta, posee el mismo mecanismo de toxicidad que los plaguicidas organofosforados. Bloqueando la acetilcolinerasa, esta enzima es crucial para desactivar la

acetilcolina (un neurotransmisor). La acumulación de acetilcolina conduce a una alteración del funcionamiento normal de las fibras nerviosas (Henao y Nieto, s. f.).

3.2.5. Movimiento de Plaguicidas en el Entorno Ambiental

El comportamiento de las plaguicidas en el ambiente se puede entender mejoral conocer las características del medio ambiente, como se desplazan, la geografía del lugar y las propiedades físicas y químicas de los plaguicidas

Para entender cómo se comportan los plaguicidas en el ambiente, se necesita información sobre las condiciones ambientales, el mecanismo de transporte, la geografía del lugar y las propiedades fisicoquímicas del plaguicida. Aunque predecir su destino exacto es complejo, ciertas características fisicoquímicas como la solubilidad, presión de vapor, constante de Henry, coeficiente de carbono orgánico (Koc) y coeficiente de partición octanol-agua (Kow) pueden ayudar a estimar dónde se encontrarán los residuos de plaguicidas. Estos no permanecen inalterados, ya que se degradan con el tiempo debido a factores como microorganismos, actividad química, pH, clima y el contenido de materia orgánica del suelo (Instituto Nacional de Ecología [INE], (s.f.), como se citó en González et al., 2013).

3.2.5.1. Mecanismos de transporte de los plaguicidas en el medio ambiente. Los mecanismos de transporte describen como los plaguicidas viajan en el medio ambiente, desde su origen hasta los lugares donde pueden generar exposición. El transporte ambiental abarca el movimiento de gases, líquidos y partículas sólidas dentro de un medio o mediante la interacción entre el aire, el agua, los sedimentos y los seres vivos (ATSDR,1995, como se citó en González et al., 2013).

Según el INE (s.f., como se citó en González et al., 2013) los mecanismos que influyen en el destino y transporte de los plaguicidas se describen a continuación.

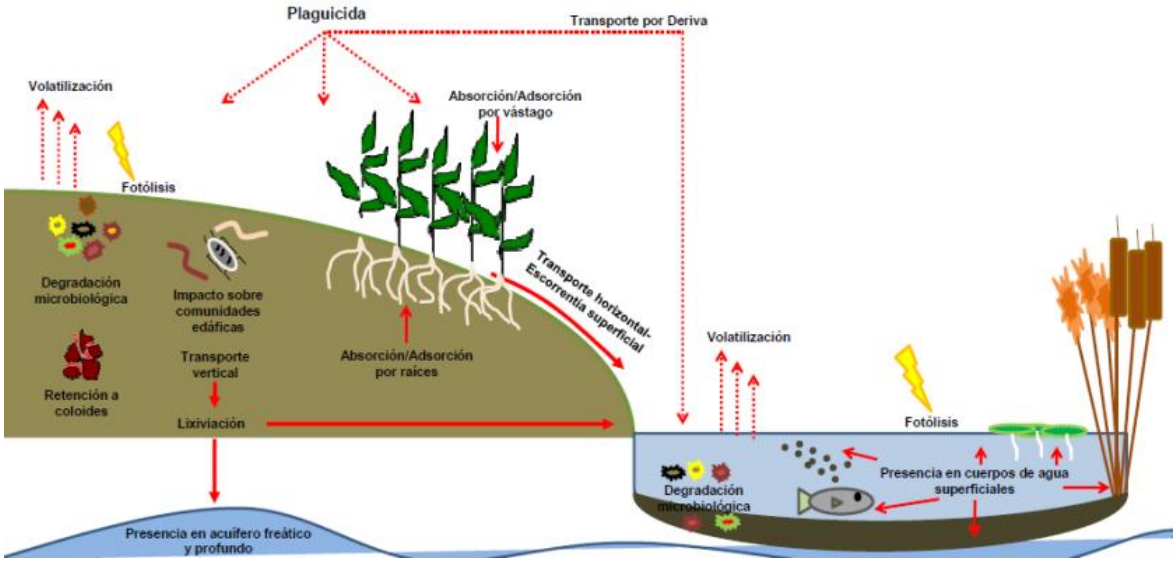
Difusión: Es el movimiento de moléculas desde áreas de alta concentración a áreas de baja concentración, proceso con movimientos aleatorios. La evaluación de la difusión de un compuesto en el suelo requiere considerar la interacción de parámetros como la porosidad, la adsorción y las propiedades del compuesto.

Lixiviación: Considerada el parámetro más relevante para entender el movimiento de sustancia en el suelo, está ligada al flujo de agua, la estructura del suelo y las características propias del plaguicida. Los compuestos pueden ser arrastrados por el agua a través del suelo, contaminando las capas profundas del acuífero.

Evaporación*:* La velocidad a la que un plaguicida se volatiliza, depende de la presión de vapor del plaguicida, la temperatura ambiental, su volatilidad inherente y la rapidez con que llega a la superficie para evaporarse (p.8).

Figura 3

Esquema del destino de los plaguicidas en el medio ambiente.



Nota. Adaptado de *Impacto ambiental de la aplicación de plaguicidas en siete modelos socio-productivos hortícolas del Cinturón Verde de Mendoza* (p. 27), por Carolina Mansilla, Universidad Nacional de Cuyo.

3.2.5.2. Influencia de las Características del Sitio en el Transporte de Plaguicidas. El desplazamiento de contaminantes está condicionado por las particularidades del terreno y del entorno natural. Por ello, para anticipar cómo se distribuirá un plaguicida, es fundamental disponer de información detallada sobre elementos como la topografía, la composición geológica, los tipos de suelo y su distribución, la permeabilidad, la cobertura vegetal, el régimen de precipitaciones, la temperatura ambiental y el comportamiento del aire y del agua en la zona. Estas características físicas y ambientales son decisivas para analizar el transporte y difusión de los plaguicidas en el área de estudio INE (s.f., como se citó en González et al.,2013).

3.5.2.3. Factores Fisicoquímicos que Influyen en el Destino y Transporte del Plaguicida. Entre estos se tienen como más resaltantes la volatilización, persistencia, solubilidad del agua, coeficiente de partición octanol/agua y coeficiente da adsorción de carbono orgánico.

a) Volatilización. La volatilidad de un plaguicida se refiere a su capacidad para transformarse en gas. Todos los compuestos orgánicos poseen cierto nivel de volatilidad, el cual depende de factores como su presión de vapor, el estado físico en el que se encuentra y la temperatura ambiental.

Para evaluar este comportamiento, se utiliza la constante de Henry, que relaciona la presión de vapor de la sustancia líquida con su solubilidad en agua. Un valor elevado de esta constante sugiere una alta probabilidad de que el plaguicida se volatilice en suelos húmedos, siempre que sea muy soluble en agua. En cambio, un valor bajo indica que el compuesto tiene mayor tendencia a ser arrastrado por el agua, es decir, a lixiviarse (Jenkins y Thomson, 1999).

1) ***Persistencia.*** La persistencia de los plaguicidas se refiere al tiempo durante el cual conservan su estructura química después de ser aplicados. Tanto los compuestos originales como sus productos de transformación pueden tener distintos efectos en el medio ambiente y en la salud humana.

Su duración está influenciada por factores como la foto degradación provocada por la radiación solar que afecta especialmente a los piretroides, la degradación química en el suelo, el agua y el aire, la adsorción en los coloides del suelo que depende del tipo de suelo, y la acción de los microorganismos, condicionada por la presencia de materia orgánica y las características edáficas. Estas variables dependen del clima y de las propiedades del terreno, lo que hace que la persistencia varíe según el lugar donde se aplican (CICOPLAFEST, 1991).

c) Solubilidad en agua. Indica la concentración máxima que puede disolverse el plaguicida en un litro de agua, generalmente entre 1 y 100000 mg/L. Los plaguicidas que se disuelven fácilmente en agua tienden a unirse poco al suelo, lo que facilita su movimiento a través de la lluvia, el riego o el agua que corre por la superficie, contaminando así fuentes de agua superficiales o subterráneas (INE, s.f, como se citó en González et al., 2013).

d) Coeficiente de adsorción de carbono orgánico (KOC). El Instituto para la Innovación Tecnológica en la Agricultura (INTAGRI, 2017), define como:

> El valor de Koc de un plaguicida indica su capacidad de ser absorbido por el suelo. Valores altos de Koc (>1000 ppm) sugieren una fuerte unión al suelo, reduciendo su movilidad. En contraste, valores bajos de Koc (300-500 ppm) indican que el plaguicida puede desplazarse fácilmente con el agua. Los valores ideales de Koc (100-1000 ppm) permiten la absorción por las raíces y efectividad contra patógenos.

e) Coeficiente de Partición Octanol/Agua (KOW). El coeficiente de partición octanol-agua (KOW) representa la capacidad de una sustancia química para distribuirse entre

dos líquidos que no se mezclan: el agua, que es polar, y el octanol, que es relativamente no polar y simula el comportamiento de las grasas. Este valor permite estimar el grado de polaridad de un plaguicida, y se utiliza comúnmente en modelos que analizan cómo dicho compuesto puede acumularse en tejidos grasos de organismos animales (González et al., 2013).

Al utilizar plaguicidas en los sistemas de cultivo, únicamente un 1 % del producto aplicado logra alcanzar el organismo objetivo. Aproximadamente el 25 % permanece sobre la superficie foliar, un 30 % se deposita en el suelo, y el 44 % restante es trasladado al entorno acuático o atmosférico mediante procesos como la escorrentía y la lixiviación (Ávila, 2020, como se citó en Mendoza y Yupanqui, 2023).

3.3. Definición de Términos

3.3.1. Metabolitos

Baird y Cann (2014) los definen como “Las sustancias producidas por metabolismo o en el medio ambiente en condiciones alcalinas de un compuesto químico” (p.581).

3.3.2. Adsorción

Según la Enciclopedia Britannica (2025) es la “Capacidad de todas las sustancias sólidas de atraer a su superficie moléculas de gases o soluciones con las que entran en contacto.”

3.3.3. DDT

Diclorodifeniltricloroetano es un insecticida organoclorado, Baird y Cann (2014) indican que estructuralmente es un etanol sustituido en:

“Un carbono los 3 hidrógenos son sustituidos por átomos de cloro, mientras que el otro, dos de los tres hidrógenos son sustituidos por un anillo bencénico” (p.581).

3.3.4. DDD, DDE

Baird y Cann (2014) refieren que el "DDE es un metabolito del DDT. El compuesto DDE también se produce lentamente en el medio ambiente por degradación del DDT en condiciones alcalinas" (p.581).

Mientras que el "DDD a veces denominado TDE, para-diclorodifenildicloroetano, que es un producto de degradación del DDT: difieren solo en que un átomo de cloro del grupo CCL_3 es reemplazado por un átomo de hidrógeno" (p.588).

3.3.5. Monolito

> Según Taboada-Castro et al. (2022) son perfiles de suelo extraídos con mínima alteración y preparados para su exposición constituyen una herramienta valiosa. A través de su observación directa es posible obtener información detallada sobre la organización del suelo como la tipología, grosor y disposición de los horizontes, así como sobre diversas propiedades morfológicas, entre ellas el color, la textura, la granulometría, la estructura, la actividad biológica, la profundidad de penetración de las raíces, la interacción de la fauna y la presencia de inclusiones (p.709).

3.3.6. Diversidad

La FAO (2021) define que la diversidad "Se refiere a la variedad de organismos vivos, la variedad de especies en un ecosistema".

IV. Metodología

4.1. Tipo y Nivel de Investigación

4.1.1. Tipo

Según el propósito de la investigación Hernández et al.(1991) define:

"La investigación puede cumplir dos propósitos fundamentales: a) producir conocimiento y teorías (investigación básica) y b) resolver problemas prácticos (investigación aplicada)" (p.16).

En ese sentido, la presente investigación se enmarca dentro del tipo aplicado, al utilizar información existente como base para proponer soluciones concretas a problemáticas ambientales locales. Esta orientación permite vincular el conocimiento científico con la gestión real de suelos afectados por plaguicidas, facilitando el uso de macroinvertebrados como bioindicadores para evaluar el impacto de dichos contaminantes.

Según Hernández et al. (2006) los enfoques de investigación representan las distintas maneras de abordar un fenómeno de estudio, agrupándose principalmente en tres categorías: cuantitativo, cualitativo y mixto. En particular, el enfoque cuantitativo se caracteriza por el uso sistemático de la recolección de datos numéricos, con el propósito de probar hipótesis mediante análisis estadísticos y establecer patrones de comportamiento que contribuyan a la formulación o validación de teorías (p.5).

Esta investigación se desarrolla bajo un enfoque cuantitativo, ya que se apoya en el análisis numérico de datos para comprender cómo los macroinvertebrados responden ante la presencia de residuos de plaguicidas en el suelo.

4.1.2. Nivel

Hernández Sampieri y Mendoza (2018) definen que los estudios descriptivos pretenden:

"Especificar propiedades y características de conceptos, fenómenos, variables o hechos en un contexto determinado" (p.108).

En ese sentido, mi investigación adopta un enfoque descriptivo porque busca analizar y detallar las propiedades ecológicas de los macroinvertebrados en su función como bioindicadores en suelos contaminados por pesticidas.

El diseño no experimental de investigación definida por Hernández y Mendoza (2018) se define como:

"Estudios que se realizan sin la manipulación deliberada de variables en los que solo se observan los fenómenos en su ambiente natural para analizarlos" (p.178).

Este estudio es no experimental porque analiza los macroinvertebrados en su ambiente natural, sin alterar las condiciones del suelo contaminado. Observando los fenómenos tal como ocurren para entender su relación con los plaguicidas.

El diseño no experimental clasificado según Hernández y Mendoza (2018), se realiza por:

"Dimensión temporal o el número de momentos o puntose el tiempo en los cuales se recolectan los datos: Transectoriales y longitudinales" (p.179).

Este estudio emplea un diseño transectorial, ya que los datos se recopilan en un solo momento. No se busca analizar cambios a lo largo del tiempo, sino describir la situación actual de los macroinvertebrados en suelos afectados por plaguicidas, tal como se presentan durante el muestreo.

4.2. Ámbito Temporal y Espacial

4.2.1. Temporal

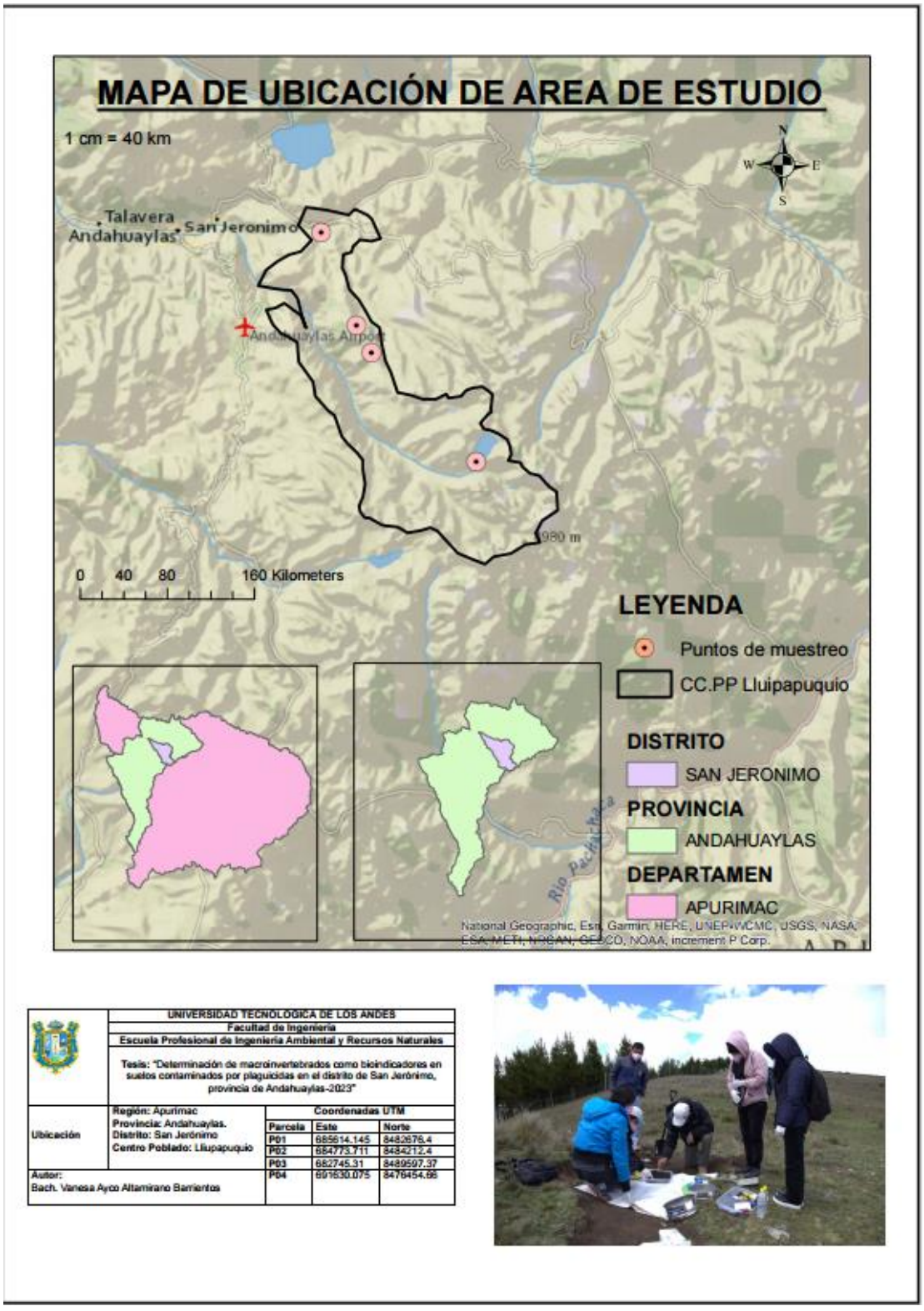
Esta investigación se realizó durante el periodo de noviembre del año 2023 hasta abril del año 2024, siendo preferible el muestreo dos meses después del inicio de las lluvias siendo esta necesaria para contar con mayor presencia de macroinvertebrados según lo establecido en Protocolo de muestreo para la Macrofauna del Suelo del Instituto de Biología y Fertilidad de Suelos Tropicales.

4.2.2. Espacial

Se ejecutó en las suelos agrícolas y no agrícolas del Centro Poblado de Lliupapuquio del distrito de San Jerónimo con coordenadas UTM Este: 682583.00 y Norte: 8488421.00, a una altitud de 3500 - 4200 m.s.n.m, como se observa en el mapa.

Figura 4

Mapa de ubicación de las parcelas muestreadas.



Nota. Se muestran los puntos de muestreo en la jurisdicción del Centro Poblado de Lliupapuquio. Elaborado por el autor mediante el programa ArcGIS 10.5.

4.3. Población y Muestra

4.3.1. Población

De acuerdo con Hernández et al. (2006):

> Una vez definido cual será la unidad de análisis, se procede a delimitar la población que va a ser estudiada y sobre la cual se pretende generalizar los resultados. Así, una población es el conjunto de todos los casos que concuerden con una serie de especificaciones (p.238).

La población de estudio estuvo conformada por suelos de uso agrícola y no agrícola pertenecientes al Centro Poblado de Lliupapuquio, ubicado en la cabecera de la microcuenca Chumbao. Esta zona presentó dos sistemas edáficos claramente contrastantes: uno influenciado por prácticas agrícolas intensivas en las áreas bajas, y otro con mínima intervención antrópica en las zonas altas, lo que permitió caracterizar condiciones edáficas diferenciadas según el grado de uso del suelo.

Esta proporción permitió establecer comparaciones entre ambientes sometidos a distintas actividades humanas, aspecto fundamental para evaluar la diversidad de macroinvertebrados del suelo y su relación potencial con residuos de plaguicidas.

Las áreas seleccionadas fueron determinadas en función de sus características geográficas y de las distintas actividades agrícolas que se desarrollan en ellas. A continuación, se describen cada una de las zonas y las parcelas correspondientes:

Zona baja – Sector "Llamachayocc". En esta zona se ubicó la parcela 3 (P3), situada a una altitud de 3,390 m s.n.m., con coordenadas UTM X: 685678.038 y Y: 8482654.867. El uso del suelo es de tipo integrado, combinando actividades agrícolas y ganaderas, lo que permite una producción continua y diversificada. Estas condiciones hicieron de esta zona un punto estratégico para el estudio.

Zona intermedia – Sector "Yuncaya". Corresponde a un área ubicada entre los 3,800 y 4,000 m s.n.m., con coordenadas UTM X: 684726.066 y Y: 8484166.805. En esta zona se observaron prácticas agrícolas extensivas, junto con la crianza predominante de ovinos y caprinos. Las condiciones geográficas y climáticas presentaron diferencias marcadas respecto a las zonas baja y alta, lo que permitió caracterizarla como un entorno intermedio con particularidades ecológicas propias. Asimismo, se evidenció la presencia de envases de plaguicidas abandonados, situación que fundamentó la selección de la parcela 2 (P2) como punto de muestreo, con el fin de evaluar el impacto potencial de dichas prácticas sobre el ecosistema edáfico

Zona media alta – Sector "Huayllapucro". Esta zona se encuentra a una altitud aproximada de 4,200 m s.n.m., con coordenadas UTM X: 682749.646 y Y: 8489599.285. La parcela 1 (P1) fue ubicada en el límite superior de la zona agrícola, en el punto de transición hacia el área de protección. Se caracterizó por presentar suelos en descanso, evidenciados por una cobertura vegetal densa y compacta, indicativa de procesos de regeneración natural. A partir de este sector, el paisaje mostró un cambio marcado, con la aparición de plantaciones de pino y ecosistemas que albergan flora y fauna nativa. Estas condiciones justificaron su selección como unidad de muestreo representativa de una zona de transición ecológica entre sistemas intervenidos y áreas conservadas.

Zona alta – Sector "Lagunas". En esta zona se ubicó la parcela 4 (P4), entre los 4,200 y 4,500 m s.n.m., con coordenadas UTM X: 691572.702 y Y: 8476378.443. La zona se caracterizó por una elevada biodiversidad, albergando especies emblemáticas como vicuñas, alpacas, llamas, aves silvestres y flora endémica adaptada a condiciones altoandinas. Además, se identificaron lagunas naturales de relevancia ecológica —Apacheta, Pampahuasi, Antaccocha, Paccococha y Huachuaccocha— cuya frecuente neblina contribuyó a la singularidad del paisaje. A diferencia de las demás áreas evaluadas, en esta

no se desarrollaron actividades agrícolas, lo que favoreció su conservación como área protegida. En este contexto, la parcela 4 (P4) fue seleccionada como unidad de muestreo representativa de un ecosistema no intervenido por prácticas agrícolas.

4.3.2. Muestra

Como define Hernández et al. (2006) La muestra constituyó un subgrupo representativo de la población estudiada, seleccionado ante la dificultad de abordar la totalidad de dicha población.

"En las no probabilísticas la elección no depende de la probabilidad, sino de las características de la investigación, siendo su procedimiento no mecánico ni utilizando fórmulas de probabilidad, sino dependiendo de las características de la investigación" (p.241).

En este estudio se empleó un muestreo no probabilístico por conveniencia, debido a la complejidad geográfica del área de investigación y a la diversidad de sus condiciones socioambientales. Se definieron cuatro puntos de muestreo representativos extraídos cada uno de una unidad de estudio, distribuidos a lo largo de un gradiente, abarcando desde zonas agrícolas intensamente utilizadas hasta sectores con escasa actividad antrópica. Esta selección respondió tanto a criterios de factibilidad operativa como a la necesidad de representar escenarios contrastantes del territorio, permitiendo una caracterización más detallada de las condiciones ambientales observadas.

4.4. Instrumentos

A continuación, se presentan los instrumentos empleados para la recolección de datos, seleccionados en función de los objetivos y el enfoque metodológico del estudio.

a) Libreta de campo.

b) Ficha de muestreo de suelo.

c) Ficha de clasificación de macroinvertebrados.

d) Ficha de registro de datos de parámetros fisicoquímicos.

Respecto a los literales, c) y d) se realizó la validación por juicio de expertos como se verifica en el Anexo 13; mientras que el literal b) se utilizó el formato de la Guía para el Muestreo de Suelos del Ministerio del Ambiente.

4.5. Procedimientos

Los procedimientos aplicados para el análisis de las variables en las parcelas seleccionadas combinaron técnicas cualitativas y cuantitativas, según la naturaleza de cada indicador y los objetivos específicos del estudio.

4.5.1. Muestreo para Análisis de Residuos de Plaguicidas Organoclorados y Organofosforados

Se empleó los procedimientos establecidos por el Ministerio del Ambiente (2014) en la Guía para el Muestreo de Suelos, siguiendo los procedimientos para toma de Muestra de Identificación (MI), el cual tiene por objetivo investigar la existencia de contaminación del suelo a través de la obtención de muestras representativas con el fin de establecer si el suelo supera o no los Estándares de Calidad Ambiental y/o los valores de fondo (p.11); de acuerdo con lo establecido en los Estándares de Calidad ambiental para suelo aprobado por el D.S. N° 002-2013-MINAM, norma a la actualidad derogada por D.S N° 011-2017-MINAM.

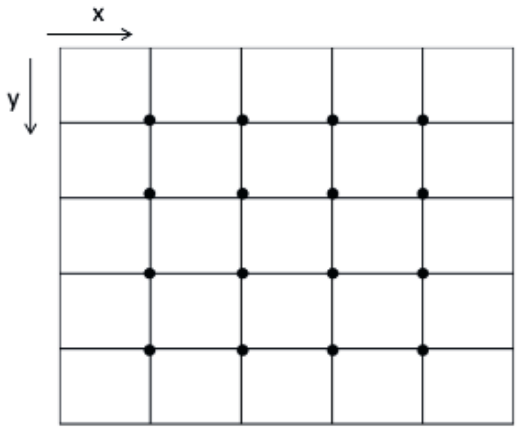
Dado que la investigación se orienta a describir la distribución de contaminantes en parcelas agrícolas, se asumió que la presencia de residuos de plaguicidas se encuentra homogéneamente distribuida en el área de cultivo, debido a que su aplicación se realiza de forma uniforme. Bajo este supuesto, se empleó un muestreo aleatorio simple, adecuado para

estudios descriptivos donde se busca caracterizar condiciones ambientales sin introducir sesgos en la selección de puntos.

La ubicación de los sitios de muestreo se realizó mediante una rejilla regular, como se muestra en la Figura 5, siguiendo criterios técnicos para superficies menores a 5 hectáreas. Este patrón permite obtener datos representativos sobre la concentración de contaminantes en suelo, facilitando el análisis comparativo entre sectores y asegurando una cobertura espacial adecuada (MINAM, 2014, p.40-41).

Figura 5

Patrón de muestreo de rejillas regulares.



Nota. Adaptado de la Guía de Muestreo de Suelos (p.41), por el *Ministerio del Ambiente* (2014).

De acuerdo con los lineamientos establecidos en la Guía de Muestreo de Suelos del MINAM, se delimitó un área de interés de 0.5 hectáreas por parcela. En función de esta superficie, se estableció que el número mínimo de puntos de muestreo debía ser seis, tal como se indica en la Tabla siguiente:

Tabla 7

Número mínimo de puntos de muestreo para MI

Área de Interés (ha.) *	Puntos de Muestreo
0.1	4
0.5	6
1	9

Nota. Número de puntos de toma de muestra en referencia al área estudiada. Adaptado de la *Guía para Muestreo de Suelos* (p.32) por MINAM, 2014.

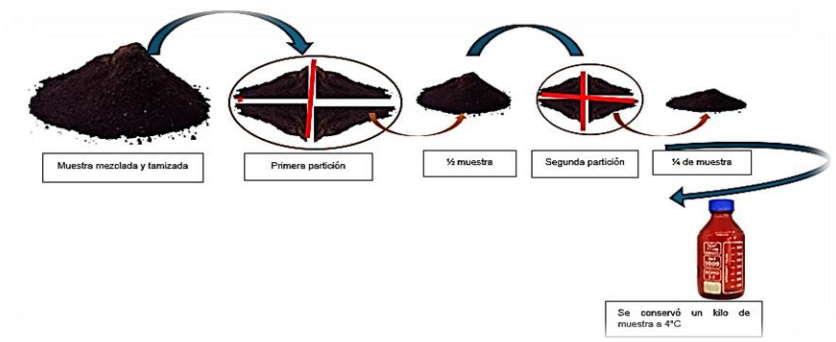
*ha. Se refiere al área de interés en hectáreas.

4.5.1.1. Toma de Muestra. Se utilizó la técnica para muestras superficiales, para suelos de uso agrícola con una profundidad de 0 a 30 cm, esta corresponde a la medida de profundidad de aradura del suelo, puesto que fue el área de interés de estudio y características de un muestreo de identificación de contaminantes (MINAM, 2014).

Seguidamente se procedió a homogenizar las seis submuestras obtenidas de la parcela para realizar el cuarteo de la misma para obtener la muestra representativa, como se detalla en la Figura 6.

Figura 6

Técnica de cuarteado de muestra de suelo



Nota. La ilustración detalla el proceso de partición de muestras superficiales, donde se realiza dos particiones, siendo de la última la cuarta parte la que se envió para el análisis de los plaguicidas. Adaptado de la *Guía para Muestreo de Suelos* (p.18) por MINAM, 2014.

4.5.1.2. Manejo de Muestras. La muestra se colocó en un recipiente de vidrio de boca ancha, con tapa y sello de teflón en una caja conservadora de temperatura a 4°C junto con la cadena de custodia, como detalla la Figura 7; posteriormente se envió para ser analizada en el laboratorio contratado (Sistema de Servicios y Análisis Químicos S.A.C), en la ciudad de Lima, por Courier local.

Figura 7

Condiciones para conservación y preservación de muestras.

Parámetro	Tipo de Recipiente	Temperatura de Preservación	Tiempo Máximo de Concentración
Compuestos orgánicos Volátiles BTEX Hidrocarburos Fracción Ligera Hidrocarburos Fracción Media Hidrocarburos Fracción Pesada Compuestos Orgánicos Semi-Volátiles y Plaguicidas	Frasco de vidrio boca ancha, con tapa y sello teflón	4°C	14 días
Metales Pesados y Metaloides	Bolsas de polietileno densa.	Sin restricciones.	Sin restricciones.
Mercurio	Frasco de vidrio con tapa de teflón que asegure la integridad de las muestras hasta su análisis.	4°C	14 días
PCB	Viales de vidrio con cierre de Teflón	4°C	14 días
PAH	Viales de vidrio con cierre de Teflón	4°C	14 días

Nota. Adaptado de la *Guía para Muestreo de Suelos* (p.25) por MINAM, 2014.

4.5.1.3. Métodos de Análisis Utilizado. La muestra de suelo fue sometida a análisis mediante el método EPA 8270E, versión 6 (junio de 2018), el cual permite identificar compuestos orgánicos semi volátiles utilizando cromatografía de gases acoplada a espectrometría de masas (GC/MS).

Gutiérrez (2002, como se citó en Mendoza y Yupanqui , 2023) destacan que la cromatografía de gases, especialmente cuando se combina con la espectrometría de masas, constituye una herramienta eficaz para separar, identificar y cuantificar los compuestos volátiles y semi volátiles presentes en mezclas complejas. Por su parte, Barquero (2006 como se citó en Mendoza y Yupanqui, 2023) explica que en este tipo de cromatografía las muestras deben volatizarse antes de ser introducidas en la parte inicial de una columna cromatográfica, lo que requiere que sean térmicamente estables. El proceso de elución ocurre mediante gases

inertes como helio, nitrógeno o hidrógeno, aunque la elección del gas depende del tipo de detector empleado.

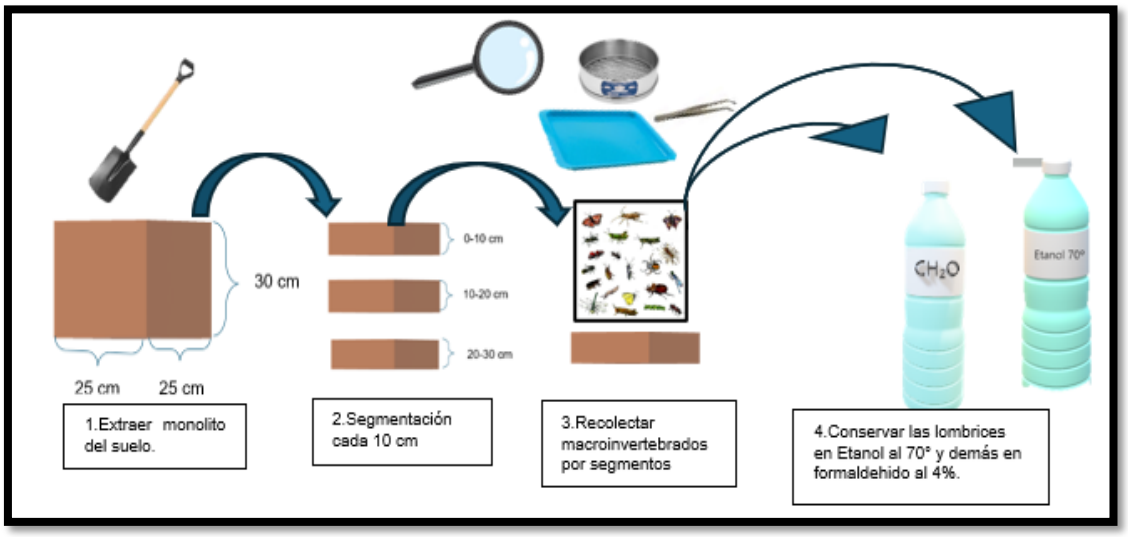
Además, se reconocen dos variantes principales de esta técnica: la cromatografía de gas sólido (CGS) y la cromatografía de gas líquido (CGL). Esta última es la más empleada, utilizando como fase estacionaria un líquido adherido a un soporte sólido inerte, que debe ser estable frente a las temperaturas del análisis y tener propiedades similares a los compuestos que se busca separar. En cambio, la CGS tiene aplicaciones más restringidas, ya que se limita a moléculas polares y emplea como fase estacionaria un sólido que retiene los analitos mediante adsorción física

4.5.2. Recolección e identificación de Macroinvertebrados

El muestreo de macroinvertebrados del suelo se realizó conforme a los lineamientos establecidos en el Protocolo para el Muestreo de Fauna del Suelo desarrollado por el Tropical Soil Biology and Fertility Programme (TSBF, s.f.). Con el fin de optimizar los tiempos de campo y asegurar la coherencia espacial entre variables, la recolección de organismos edáficos se llevó a cabo en los mismos puntos definidos para el muestreo de suelo destinado al análisis de residuos de plaguicidas. Esta estrategia permitió integrar el análisis biológico y químico en una misma unidad de observación, favoreciendo la interpretación conjunta de los impactos sobre la calidad del suelo.

Figura 8

Procedimiento de recolección de macroinvertebrado en campo.



Nota. Adaptado de *Protocolo de Muestreo para la Fauna del Suelo* (s. f.), por Instituto de Biología y Suelos Tropicales.

La Figura 8 ilustra de manera detallada el procedimiento aplicado para la recolección de macroinvertebrados del suelo, conforme al protocolo del TSBF. El proceso incluyó las siguientes etapas:

- Extracción de una fracción de suelo mediante corte vertical controlado;

- División del monolito extraído en tres capas horizontales de 10 cm de espesor cada una, con el fin de analizar la distribución vertical de la fauna edáfica;

-Tamizado manual de cada fracción utilizando bandejas plásticas, tamices y pinzas entomológicas, para facilitar la recuperación de organismos presentes;

-Conservación diferenciada de los especímenes recolectados: las lombrices fueron preservadas en etanol al 70%, mientras que el resto de macroinvertebrados se fijaron en solución de formaldehído al 4%, siguiendo las recomendaciones técnicas para garantizar la integridad morfológica de las muestras.

La identificación de familias y contabilización de macroinvertebrados se realizó en las instalaciones del laboratorio de Microbiología 2 del Departamento Académico de Ciencias Básicas de la Universidad Nacional José María Arguedas.

Para la observación, clasificación y registro fotográfico de las familias de macroinvertebrados identificadas, se utilizó un estereoscopio Leica con aumento de 4X. Durante el procedimiento se emplearon mascarillas, gafas de seguridad y pinzas entomológicas, con el fin de garantizar una manipulación segura y adecuada de las muestras. Los datos obtenidos fueron registrados en fichas de clasificación diseñadas para tal fin. Posteriormente, cada muestra fue preservada en frascos de vidrio con tapa rosca, diferenciados por parcela de estudio, que contenían solución de formaldehído para evitar la liberación de vapores tóxicos y asegurar su conservación.

4.5.3. Diversidad de Macroinvertebrados

El análisis se efectuó mediante la aplicación del índice de diversidad de Shannon-Wiener, el cual considera tanto el número de especies presentes en un hábitat como su abundancia relativa (Rain, s. f.). La fórmula del índice se presenta a continuación:

Figura 9

Fórmula del índice de Shannon-Wiener

$$H = -\sum pi \log (pi)$$

Nota. H = índice de diversidad de Shannon-Wiener; pi = proporción de individuos de la misma especie en el conjunto de una comunidad; Σ = símbolo sumatorio; ln = logaritmo natural. Adaptado de *Diversidad de Shannon* (p. 72), por E. Somarriba, 1999.

La proporción de individuos (*pi*) se determinó mediante la aplicación de la siguiente fórmula:

Figura 10

Fórmula de Proporción de Individuos

$$p_i = \frac{n}{N}$$

Nota. Donde pi: Proporción de individuos, n: individuos de un determinado tipo/especie, N: número total de individuos de una comunidad. Adaptado de *Diversidad de Shannon* (p.72), por E. Somarriba, 1999.

Para aplicar la fórmula, se procedió al conteo de la población total de macroinvertebrados recolectados y a su clasificación taxonómica por orden y familia. Posteriormente, los cálculos se desarrollaron mediante el programa Excel 2019, que permitió el procesamiento de los datos y la obtención de los índices de diversidad.

4.5.4. Medición de Parámetros Fisicoquímicos del Suelo

Para el análisis de los parámetros de conductividad eléctrica (CE) y potencial de hidrógeno (pH), se empleó un equipo multiparámetro HACH, modelo HQ2200, provisto de un certificado de calibración vigente que garantiza la confiabilidad y precisión de las mediciones. De manera complementaria, se utilizaron balanzas analíticas, estufas de secado, tamices, reactivos específicos y otros equipos pertenecientes al laboratorio de Microbiología 2 del Departamento Académico de Ciencias Básicas. Finalmente, la temperatura del suelo se midió in situ durante el muestreo, a fin de registrar las condiciones ambientales en el momento de la recolección.

4.5.4.1. Conductividad Eléctrica (CE). Para la determinación de la conductividad eléctrica del suelo, se pesaron 50 g de muestra previamente tamizada (<2 mm) y se colocaron en un vaso de precipitados limpio. Posteriormente, se adicionó agua destilada libre de impurezas en una proporción aproximada de 1:1.5 (suelo: agua), mezclando cuidadosamente con una varilla de vidrio hasta obtener una pasta homogénea y saturada.

Una vez obtenida la pasta homogénea y saturada como se observa en la Figura 11, se dejó reposar la mezcla durante 30 minutos. Posteriormente, se extrajo el extracto de saturación mediante filtración al vacío, empleando papel filtro Whatman N° 42 y una bomba de succión, lo que garantizó una separación clara del líquido.

Finalmente, la conductividad eléctrica del extracto se midió con un multiparámetro HACH, modelo HQ2200, previamente calibrado conforme a su certificado vigente, lo que aseguró la precisión y confiabilidad de las mediciones obtenidas (Hub Ibera Agrotech, s. f.).

Figura 11

Punto idóneo de la pasta de saturación del suelo.

Nota. Adaptado de *Extracto de saturación del suelo* [Video], por Universitat Politècnica de València, 2020, YouTube (https://www.youtube.com/watch?v=Rp__NNdpgLs).

Asimismo, de acuerdo con METER Group (2023), los valores de conductividad eléctrica (CE) reportados en la literatura corresponden, en la mayoría de los casos, a la CE del extracto de saturación.

4.5.4.2. Potencial de hidrógeno (pH). La medición del pH del suelo se efectuó empleando una relación suelo: solución de 1:2 (p/v) como lo indica Bazán, 2017, con el objetivo de obtener una estimación representativa bajo condiciones similares a las del campo. Para ello, se pesaron 10 g de suelo previamente tamizado (<2 mm) y se colocaron en un vaso de precipitados de 50 mL de capacidad. Posteriormente, se adicionaron 20 mL de solución de $CaCl_2$ 0.01 M y la mezcla fue sometida a agitación magnética durante 30 minutos, a fin de lograr una homogenización completa.

Figura 12

Agitación de muestras para medir pH.

Nota. Fotografía de autor.

Finalizada la agitación, la muestra se dejó en reposo durante 15 minutos para favorecer la estabilización de la solución. Posteriormente, se introdujo el electrodo del

equipo multiparámetro en la mezcla y se registraron directamente los valores de pH proporcionados por el instrumento.

4.5.4.3. Humedad. La determinación de la humedad del suelo se efectuó mediante el método gravimétrico, basado en la diferencia entre el peso húmedo y el peso seco (Bosch et al., 2012). Para ello, se pesaron 20 g de suelo en vasos de precipitados de vidrio de 100 mL previamente tarados, obteniéndose así el peso inicial. Posteriormente, las muestras se colocaron en una estufa de secado a 105 °C durante 24 horas. Transcurrido este periodo, se introdujeron en un desecador durante 30 minutos adicionales y, finalmente, se registró el peso seco de la muestra, cuyos valores se emplearon para la aplicación de la fórmula correspondiente.

Figura 13

Fórmula para calcular el porcentaje de humedad

$$\%\ Humedad = \%\ \omega = \left(\frac{P_2 - P_3}{P_2 - P_1}\right) x\ 100$$

Nota. donde P1 = peso de la cápsula P2 = peso de la cápsula más peso de la tierra fina húmeda P3 = peso de la cápsula más peso de la tierra fina seca. Adaptado de *Prácticas de Edafología: Métodos Didácticos para Análisis de Suelos* (p.18), por Andrades et al., 2015, Universidad de la Rioja.

4.5.4.4. Porosidad. Se aplicó el método aproximado de la probeta, que consistió en pesar 100 g de suelo seco al aire libre y colocarlos de manera homogénea en una probeta de 100 mL, obteniéndose así el volumen inicial (V1). Posteriormente, se añadió gradualmente un volumen (V) de 5 mL de agua, gota a gota, y la probeta se cubrió con papel aluminio con el fin de evitar la evaporación. Transcurridas 24 horas, se midió el volumen final (V2). Con estos valores, y mediante la aplicación de las fórmulas correspondientes, se determinó la humedad gravimétrica (Andrades et al., 2015).

Figura 14

Fórmula para calcular Humedad Gravimétrica y Densidad Aparente.

$$\%\ Humedad\ Gravimétrica = \frac{V}{V1 - V2} x100$$

$$da = \frac{Peso\ de\ suelo\ seco}{V1} \left(\frac{gramos\ de\ suelo(gr.)}{centímetro\ cúbico\ de\ suelo\ (cm3)}\right)$$

Nota. donde da: es densidad aparente, V1: Volumen inicial. Adaptado de *Prácticas de Edafología: Métodos Didácticos para Análisis de Suelos* (p.18), por Andrades et al., 2015,

Posteriormente se realiza la estimación de porosidad aplicando la siguiente formula, considerando que la densidad real es 2.65gr/cm3.

Figura 15

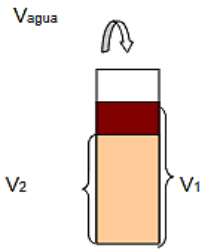
Fórmula para calcular la Porosidad.

$$\%P = \left(1 - \frac{da}{dr}\right) x100$$

Nota. Donde %P representa el porcentaje de la porosidad, da: Densidad aparente y dr: densidad relativa. Adaptado de *Prácticas de Edafología: Métodos Didácticos para Análisis de Suelos* (p.18), por Andrades et al., 2015.

Figura 16

Diferencia de volúmenes para determinar porosidad.



Nota. Adaptado de *Prácticas de Edafología: Métodos Didácticos para Análisis de Suelos* (p.36), por Andrades et al., 2015, Universidad de la Rioja.

4.5.4.5. Materia Orgánica (MO). La materia orgánica del suelo se analizó de manera cualitativa mediante la técnica de reacción con peróxido de hidrógeno, siguiendo el procedimiento descrito por (P. Silva, s. f.). Para ello, se colocaron 50 g de muestra de suelo en una placa Petri y se adicionaron, gota a gota, 10 mL de peróxido de hidrógeno al 30 % de pureza. La reacción se dejó transcurrir durante aproximadamente 30 segundos, observándose la efervescencia generada según la clasificación establecida.

Posterior a la aplicación de la técnica se procedió a comparar la rección de la muestra con la Tabla siguiente:

Tabla 8

Clasificación de la reacción del suelo al peróxido de hidrógeno.

Clasificación	Reacción	Imagen
Pobre	Sin burbujeo	(a)
Moderado	Burbujeo Leve	(b)
Bueno	Efervescencia intensa y/o espuma	(c)

Nota. (a) imagen referencial de reacción sin burbujeo, (b) imagen referencial *de la reacción* del burbujeo leve, (c) imagen referencial de burbujeo alto Adaptado de *Propiedades Químicas del Suelo,* por P. Silva, s. f., FAO.

4.5.4.6. Textura. Se determinó por el método de Bouyoucus, (1962), esta metodología permite estimar las proporciones de arena, limo y arcilla presentes en una muestra de suelo, basándose en la velocidad de sedimentación de las partículas en suspensión. Para ello, se utilizaron 50 gramos de suelo previamente tamizado (<2 mm), los

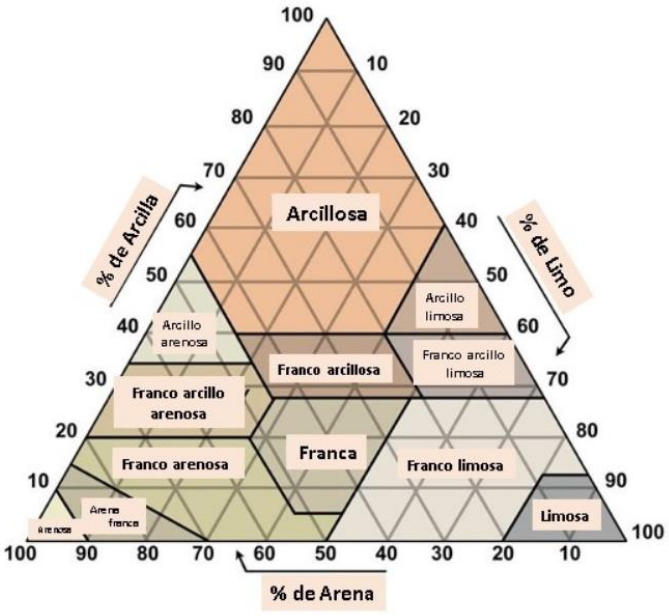
cuales fueron mezclados con agua destilada y un agente dispersante (hexametafosfato de sodio al 5 %).

La mezcla obtenida se agitó mecánicamente durante cinco minutos y luego se transfirió a una probeta aforada de 1000 mL, completando el volumen con agua destilada. Posteriormente, se realizó una agitación manual intensa y se introdujeron el hidrómetro y el termómetro, registrando las lecturas de densidad en dos momentos clave: a los 40 segundos para estimar la fracción de arena, y a las dos horas para determinar las fracciones de limo y arcilla. Los valores obtenidos fueron procesados mediante fórmulas específicas para calcular el porcentaje de cada componente textural, y finalmente se clasificó el tipo de suelo utilizando el triángulo de texturas.

Con los resultados obtenidos de arcilla, limo y arena, se procedió a identificar el color del suelo utilizando el triángulo de texturas del suelo (FAO, s. f.)

Figura 17

Triángulo de identificación de texturas del suelo.



Nota. Adaptado de *Propiedades del Suelo*, por Quimcasa, 2018, https://quimcasa.blog/ .

4.5.4.7. Color. La caracterización cromática del suelo se realizó mediante comparación directa con los patrones establecidos en el sistema Munsell, reconocido internacionalmente por su capacidad para clasificar colores en función de tres atributos fundamentales: matiz (hue), que corresponde al tipo de color; valor (value), que indica el grado de claridad u oscuridad; y croma (chroma), que representa la intensidad o saturación del color observado.

Para la evaluación, se tomó una muestra representativa de suelo y se contrastó visualmente con las tarjetas de referencia del sistema Munsell, hasta identificar la coincidencia más precisa. Este procedimiento se efectuó bajo condiciones de iluminación controlada, evitando la exposición directa a la luz solar, a fin de garantizar una percepción cromática adecuada y minimizar distorsiones en la interpretación del color (Moreno et al., s. f.).

4.6. Análisis de Datos

Dado el carácter descriptivo aplicativo de la investigación, orientado a la caracterización de residuos de plaguicidas en suelos agrícolas, se emplearon procedimientos analíticos estandarizados sin pretensión inferencial. La baja variabilidad observada entre las unidades muestreadas limitó la aplicación de fórmulas estadísticas e índices comparativos.

Por ello, el análisis se centró en la respuesta ecológica de macroinvertebrados edáficos, interpretada mediante observaciones directas y parámetros biológicos, utilizando exclusivamente estadística descriptiva, en coherencia con los objetivos y el diseño metodológico del estudio.

4.7. Consideraciones Éticas

Durante la ejecución de la investigación se contemplaron criterios éticos fundamentales, orientados a garantizar la integridad metodológica, el respeto por el entorno

y la transparencia en el manejo de la información. Estas consideraciones incluyeron el consentimiento informado para el acceso a predios agrícolas, la confidencialidad de los datos recolectados, el uso responsable de reactivos químicos y la preservación de organismos edáficos conforme a protocolos establecidos. Todo el procedimiento se desarrolló en concordancia con principios de ética ambiental y buenas prácticas científicas.

4.7.1. Propietarios de las Parcelas

Para la ejecución de las actividades de campo, se gestionó el acceso al área de estudio mediante coordinación directa con el alcalde del centro poblado de Lliupapuquio, quien facilitó el vínculo con los comuneros propietarios de parcelas individuales y responsables de áreas comunales ubicadas en zonas altas sin intervención agrícola.

Previo al inicio de la toma de muestras, se brindó información clara y detallada sobre los objetivos y procedimientos de la investigación, asegurando la comprensión por parte de los comuneros y evitando interferencias en sus actividades cotidianas. Este proceso se desarrolló bajo principios éticos de respeto, consentimiento informado y reconocimiento de las dinámicas socioculturales locales.

En el caso de la parcela comunal, situada en la cabecera de la microcuenca Chumbao, se notificó formalmente al presidente de la comunidad sobre las acciones a realizar. La autorización oficial para el ingreso y desarrollo de actividades se encuentra documentada en el Anexo 14, mediante la carta emitida por el alcalde del centro poblado.

4.7.2. Recolección de Macroinvertebrados

La técnica utilizada para el muestreo de macroinvertebrados edáficos fue de carácter no invasivo, garantizando la mínima alteración tanto del suelo como de los organismos recolectados. A diferencia de métodos más agresivos que emplean descargas eléctricas o la

introducción de reactivos químicos en el ecosistema, esta metodología priorizó la conservación de la integridad ambiental del área de estudio.

Las actividades se desarrollaron exclusivamente en los puntos de muestreo previamente establecidos, y tras la extracción de las muestras, cada cavidad fue cubierta cuidadosamente, con el fin de restituir las condiciones originales del terreno y evitar impactos residuales sobre la estructura del suelo y su biota.

4.7.3. Impacto Ambiental

Durante el proceso de recolección de muestras, se aplicaron medidas estrictas para evitar la introducción de contaminantes sólidos o líquidos en las parcelas, asegurando la preservación de las condiciones naturales del entorno de estudio. La técnica de muestreo utilizada fue ambientalmente responsable, diseñada para minimizar cualquier alteración física o química del ecosistema intervenido.

En cuanto al manejo post-analítico, el descarte de materiales y reactivos empleados en laboratorio se realizó conforme a los protocolos vigentes para la gestión segura de residuos, garantizando el cumplimiento de buenas prácticas ambientales y la trazabilidad de los insumos utilizados.

V. Resultados y Discusión

5.1. Resultados de Macroinvertebrados

A continuación, se presentan los resultados correspondientes al proceso de recolección e identificación taxonómica de macroinvertebrados edáficos en los suelos evaluados.

5.1.1. Familia y Población de Macroinvertebrados

La Tabla 9 presenta la sistematización de los macroinvertebrados recolectados en los suelos evaluados, detallando su clasificación taxonómica a nivel de orden y familia, así como la población total registrada en cada parcela de muestreo.

Tabla 9

Población de macroinvertebrados.

N°	Orden	Familia	Nombre común	Cantidad por parcela			
				P1	P2	P3	P4
1	Araneae	*Araneae*	Arañas	6	0	2	0
2	Coleóptera	*Carabidae*	Escarabajos	5	4	4	1
3	Coleóptera	*Staphylinidae*	Escarabajos	2	0	2	0
4	Coleóptera	*Elateridae*	Larva de escarabajo	7	3	0	0
5	Coleóptera	*Bostrichidae*	Escarabajo	0	0	0	1
6	Coleóptera	*Scarabaeidae*	Gusano blanco	14	3	2	1
7	Coleóptera	*Ptilodactylidae*	Larvas blancas	11	1	0	2
8	Coleóptera	*Tenebrionidae*	Escarabajo	8	0	0	0
9	Coleóptera	*Melyridae*	Escarabajo Mojorros	1	0	0	1
10	Coleóptera	*Curculionidae*	Escarabajo	54	41	1	48
11	Coleóptera	Nitidulidae	Escarabajo	0	0	0	1
12	Chilopoda	*Scolopendridae*	Ciempiés	19	2	3	1

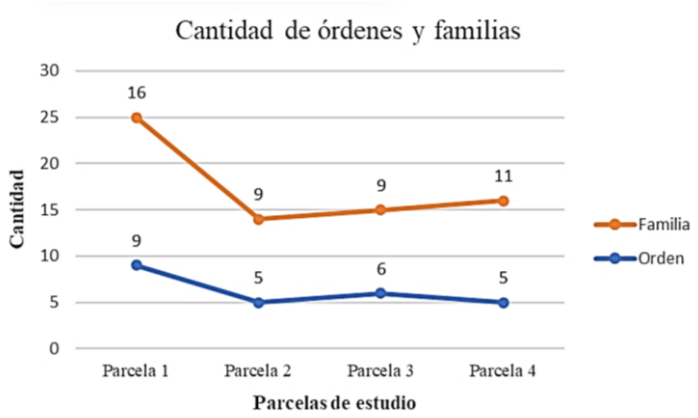
13	Diplópodo	*Polydesmidae*	Milpiés	9	0	0	8
14	Dermáptera	*Forficulidae*	Tijeretas	1	0	0	0
15	Díptera	*NI**	NI	27	9	1	249
16	Gasterópoda	*Arionidae*	Babosa	0	0	1	0
17	Hemíptera	*Nitidulidae*	NI	5	0	0	0
18	Lepidóptera	*Papilionidae*	Oruga de mariposa	1	3	0	0
19	Oligoqueta	*Lumbricidae*	Lombrices de tierra	18	16	321	17
		Población total		**188**	**82**	**337**	**330**

Nota. Distribución de macroinvertebrados edáficos por orden, familia y nombre común, según parcelas de muestreo. Donde P1, P2, P3 representan a las parcelas agrícolas y P4 a la parcela no agrícola. *NI: No identificado. Elaborado por la autora a partir de los datos obtenidos durante el monitoreo en campo realizado entre los años 2023 y 2024.

La Figura 18 muestra la variación en la presencia de macroinvertebrados edáficos según su clasificación taxonómica a nivel de orden y familia, registrada en las parcelas evaluadas.

Figura 18

Diferencia de presencia en órdenes y familias.



Nota. Relación entre la cantidad de órdenes y familias presentes por parcela. Elaborado por el autor con base en los datos obtenidos durante el muestreo de macroinvertebrados edáficos (2023-2024).

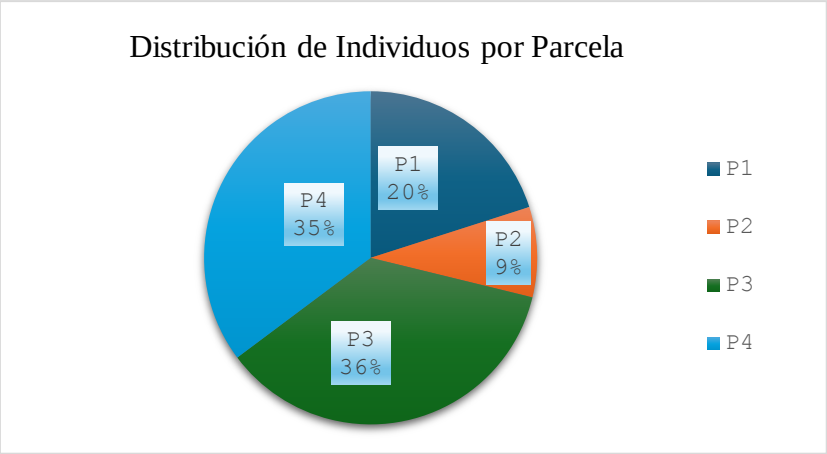
Se identificaron diez órdenes de macroinvertebrados edáficos, distribuidos en al menos dieciocho familias taxonómicas, además de un organismo no clasificado debido a que se encontraba en estado larval, lo que imposibilitó su determinación morfológica. El orden Coleóptera presentó la mayor representatividad, con presencia de múltiples familias, lo que evidencia su relevancia ecológica en los suelos evaluados y su capacidad de adaptación a distintos microhábitats edáficos.

La composición faunística mostró variaciones notables entre las parcelas muestreadas, reflejando diferencias en las condiciones físico-químicas y estructurales del suelo. Esta heterogeneidad en la distribución sugiere que factores como el uso agrícola, la altitud, la cobertura vegetal y la presencia de contaminantes influyen directamente en la diversidad y abundancia de organismos edáficos.

Asimismo, la Figura 19 representa la distribución de la población total de macroinvertebrados registrada en las parcelas evaluadas, permitiendo visualizar las diferencias en abundancia entre unidades de muestreo

Figura 19

Distribución de la población total.



Nota. Elaborado por el autor con base en los datos obtenidos durante el muestreo de macroinvertebrados edáficos (2023-2024).

La parcela P3 registró la mayor abundancia relativa de macroinvertebrados edáficos (36 %), seguida muy de cerca por P4. En conjunto, ambas parcelas concentraron más del 70 % de la población total observada, lo que sugiere condiciones edáficas más favorables, posiblemente vinculadas a una mayor disponibilidad de materia orgánica, estabilidad estructural o menor perturbación antrópica.

En cuanto a la diversidad taxonómica, se identificaron diez familias pertenecientes al orden Coleóptera, siendo este el grupo con mayor representatividad, especialmente en la parcela P1. Su predominancia refleja una alta capacidad de adaptación a distintos microhábitats del suelo y una posible función ecológica relevante en la dinámica edáfica local.

El segundo grupo más abundante fue el orden Díptera, registrado principalmente en la parcela P4, con individuos en estado larval y pupa. Estos organismos se localizaron en la sección superficial del monolito, aproximadamente a 3 cm de profundidad, lo que concuerda con su estrategia de protección frente a depredadores, como señala Barranco, 2003.

La presencia de pupas en esta zona estaría relacionada con la cercanía de cuerpos de agua estancados observados durante visitas previas al área de estudio, especialmente en las inmediaciones de la represa de las lagunas, donde se evidenció actividad de mosquitos. Esta condición ambiental local explicaría la concentración de dípteros en dicha parcela, reforzando la relación entre características del hábitat y distribución faunística.

En la parcela P1 se observó una marcada predominancia del orden Coleóptera, representado por diversas familias de escarabajos, junto con la presencia significativa de Diplópoda (milpiés). Estos últimos son considerados bioindicadores sensibles del estado de perturbación del suelo, debido a que habitan y se alimentan en la capa superficial, lo que los

expone directamente a variaciones bruscas de humedad, temperatura y cobertura vegetal (Cabrera, 2012).

La presencia de diplópodos en esta parcela, junto con la alta diversidad de macroinvertebrados registrada, sugiere condiciones edáficas favorables y un entorno con bajo nivel de alteración. Cabe destacar que P1 corresponde a un suelo en descanso, con cobertura vegetal estable, lo que favorecería a los procesos de recuperación ecológica. Estos resultados refuerzan la utilidad de los macroinvertebrados como indicadores funcionales en la evaluación de calidad del suelo y permiten interpretar la dinámica biológica del ecosistema desde una perspectiva aplicada.

Asimismo, la Tabla 10 presenta la densidad de macroinvertebrados edáficos por metro cuadrado en cada una de las parcelas evaluadas.

Tabla 10

Densidad de macroinvertebrados.

N°	Orden	Familia	Densidad Individuos/m2			
			P1	P2	P3	P4
1	Araneae	Araneae	20	0	7	0
2	Coleóptera	Carabidae	17	13	13	3
3	Coleóptera	Staphylinidae	7	0	7	0
4	Coleóptera	Elateridae	23	10	0	0
5	Coleóptera	Bostrichidae	0	0	0	3
6	Coleóptera	Scarabaeidae	47	10	7	3
7	Coleóptera	Ptilodactylidae	37	3	0	7
8	Coleóptera	Tenebrionidae	27	0	0	0
9	Coleóptera	Melyridae	3	0	0	3
10	Coleóptera	Curculionidae	180	137	3	160
11	Coleóptera	Nitidulidae	0	0	0	3
12	Chilopoda	Scolopendridae	63	7	10	3
13	Diplópodo	Polydesmidae	30	0	0	27
14	Dermáptera	Forficulidae	3	0	0	0

15	Díptera	NI*	90	30	3	830
16	Gasterópoda	Arionidae	0	0	3	0
17	Hemíptera	Nitidulidae	17	0	0	0
18	Lepidóptera	Papilionidae	3	10	0	0
19	Oligoqueta	Lumbricidae	60	53	1070	57
Densidad total			**627**	**273**	**1123**	**1100**

Nota. Donde *NI: no identificado. Elaborado por el autor en base a los datos obtenidos durante el monitoreo de campo realizado entre los años 2023 y 2024.

Los resultados evidencian variaciones significativas en la densidad de macroinvertebrados entre las parcelas evaluadas. La parcela P3 registró la mayor concentración, con 337 individuos recolectados, equivalente a 1123 individuos/m², destacando la dominancia de la familia Lumbricidae. Esta alta densidad sugiere condiciones edáficas favorables, posiblemente asociadas a una mayor disponibilidad de materia orgánica, buena aireación y textura del suelo adecuada. Estos hallazgos coinciden con lo reportado por Morel y Ortiz (2022), quienes señalan que los detritívoros como Lumbricidae tienden a predominar en suelos físicamente estables, especialmente en sistemas con cobertura vegetal permanente y elevada actividad biológica.

En contraste, la parcela P2 presentó la menor densidad, con 82 individuos, lo que refleja baja actividad biológica, limitada disponibilidad de nutrientes o algún grado de alteración edáfica. Las parcelas P1 y P4 mostraron densidades intermedias (188 y 330 individuos, respectivamente), aunque con composiciones taxonómicas diferenciadas. En particular, P4, correspondiente a un suelo no agrícola, evidenció una alta concentración de organismos del orden Díptera, en estado larval y pupal, lo que sugiere procesos activos de descomposición orgánica posiblemente vinculados a la presencia de cuerpos de agua estancados en las inmediaciones.

Tabla 11

Conducta alimenticia y cantidad de familias por punto de muestreo.

Conducta alimenticia	Cantidad de familias			
	P1	**P2**	**P3**	**P4**
Depredador	6	3	5	4
Herbívoro	4	3	2	2
Omnívoro	2	1	1	2
Detritívoro	3	2	1	3

Nota. se presenta los resultados de las familias según la conducta alimenticia, identificadas en las parcelas de estudio.

El análisis funcional de las familias de macroinvertebrados edáficos, según su conducta alimenticia, evidenció un predominio de organismos depredadores, especialmente en la parcela P1, donde se registraron seis familias con esta categoría trófica. Este patrón puede estar relacionado con la diversidad estructural del hábitat y la cobertura vegetal presente, factores que favorecen la presencia de niveles tróficos superiores y una mayor complejidad ecológica (Cabrera, 2018). La coexistencia de detritívoros, herbívoros y omnívoros en menor proporción refuerza la hipótesis de que el ecosistema edáfico se encuentra en proceso de recuperación, como lo indica la presencia de organismos sensibles como Diplópodo (milpiés) y Araneae (arañas), altamente vulnerables a variaciones en humedad y temperatura (Cabrera, 2012).

Según los resultados presentados en la Tabla 11, la parcela P2 mostró una baja riqueza funcional, con escasa representación de detritívoros y omnívoros. Esta condición estaría asociada a una menor cobertura vegetal y limitada disponibilidad de materia orgánica, lo que afecta directamente la colonización y permanencia de estos grupos. Esta situación es consistente con lo reportado por Morel y Ortiz (2022), quienes señalan que parcelas agrícolas

sometidas a manejo intensivo tienden a presentar menor diversidad funcional, predominando organismos tolerantes como los Curculionidae.

En el caso de la parcela P3, aunque se observó una alta abundancia de Lumbricidae, la riqueza funcional fue baja. Si bien las lombrices desempeñan un rol fundamental en la descomposición de materia orgánica y la aireación del suelo, la escasa presencia de otros grupos funcionales sugiere una comunidad poco diversa y posiblemente desequilibrada. Esta condición coincide con lo planteado por Vasconcelos et al. (2020), quienes afirman que la dominancia de un solo grupo funcional puede reflejar una pérdida de funcionalidad ecológica en el suelo.

Por otro lado, la parcela P4 presentó una distribución más equitativa entre detritívoros, depredadores y omnívoros, lo que sugiere una estructura funcional más estable. La elevada abundancia de organismos del orden Díptera, especialmente en estado larval, estas son vinculadas a procesos activos de descomposición en zonas húmedas, como plantea Barranco (2003). Su localización en los primeros centímetros del suelo refuerza su papel en la transformación de materia orgánica superficial.

Desde una perspectiva ecológica, la relación entre detritívoros y depredadores constituye un indicador funcional útil para diagnosticar el estado del suelo. Cabrera (2018) propone que una proporción mayor a 1 refleja suelos menos alterados, mientras que valores inferiores indican perturbación. En esta investigación, dicha relación varió considerablemente entre parcelas, lo que sugiere que factores como el uso histórico del suelo, el tipo de cultivo y la presencia de plaguicidas influyen directamente en la estructura funcional de la macrofauna edáfica.

5.1.2. Diversidad de Macroinvertebrados.

La Tabla 12 presenta la diversidad de macroinvertebrados edáficos registrada en las parcelas evaluadas, calculada mediante el índice de Shannon-Wiener. Este indicador permite estimar la riqueza y equidad de especies, considerando tanto la cantidad como la distribución de los organismos en función del uso y manejo del suelo. Tal como señalan Morel et al. (2021), la composición faunística es un parámetro clave en la evaluación de la calidad edáfica, ya que refleja el estado funcional del ecosistema y su capacidad de respuesta frente a perturbaciones ambientales.

Tabla 12

Resultado de diversidad de macroinvertebrados.

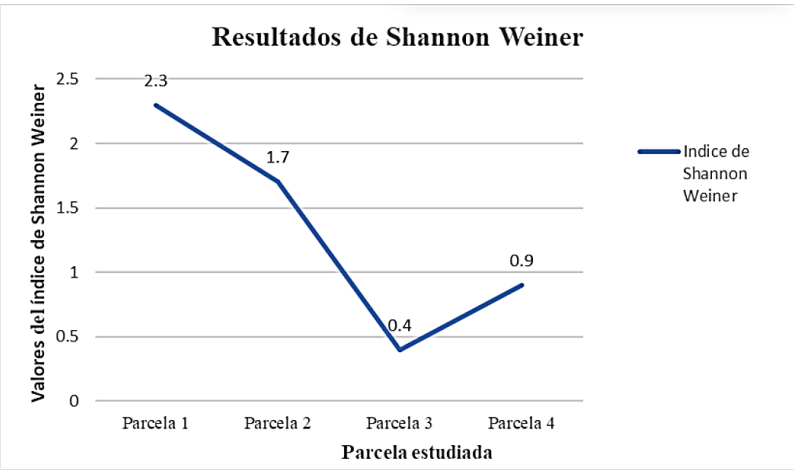
Parcela	Resultado de Diversidad
P1	2.3
P2	1.5
P3	0.3
P4	0.9

Nota. Elaborado por el autor con base en los resultados obtenidos durante el periodo de monitoreo 2023–2024.

La Figura 20 presenta un gráfico comparativo que representa los niveles de diversidad de macroinvertebrados edáficos registrados en las distintas parcelas evaluadas, calculados mediante el índice de Shannon-Wiener.

Figura 20

Resultados del índice de Shannon Weiner.



Nota: Comparación de la diversidad de macroinvertebrados edáficos entre parcelas muestreadas.

Basándonos en el índice de diversidad de Shannon-Wiener, el valor mínimo es 0 que significa que indicaría que existe una sola especie en espacio estudiado, se obtuvo que la P1 tiene mayor diversidad.

Tabla 13

Interpretación de valores resultantes del Índice de Shannon-Wiener

Valor de índice (H)	Interpretación de los valores de índice de Shannon-Wiener
H >3	Alta diversidad: la comunidad tiene un gran número de especies y la abundancia se distribuye de manera equitativa entre especies. Indica que es un ambiente estable y diverso.
$2 \leq H \leq 3$	Diversidad normal: la comunidad tiene un número moderado de especies y ninguna especie es dominante.
H < 2	Baja diversidad: la comunidad tiene poca especie o unas pocas especies dominantes, indica que es un ambiente perturbado y poco diverso.
H = 0	Comunidad monoespecífica: Comunidad compuesta por una sola especie.

Nota. Adaptado de Biodiversidad: inferencia basada en el índice de Shannon-Wiener y la riqueza, por Pla (2006), Interciencia.

La cuantificación de macroinvertebrados edáficos permitió establecer patrones definidos de diversidad y dominancia entre las parcelas evaluadas, aportando evidencia funcional sobre el estado ecológico del suelo. La parcela P1 presentó el valor más alto del índice de Shannon-Wiener (H = 2.3), lo que indica una diversidad ecológica estructurada y una distribución equitativa de especies. Este resultado es coherente con lo planteado por Vasconcelos et al. (2020), quienes señalan que ecosistemas con baja intervención antrópica tienden a presentar mayor riqueza taxonómica y complejidad funcional, como se evidenció en sus estudios en bosques secundarios de la Amazonía oriental.

En contraste, la parcela P3 registró el valor más bajo de diversidad (H = 0.3), con una comunidad dominada casi exclusivamente por la familia Lumbricidae. Si bien este grupo cumple un rol clave como ingeniero del suelo, favoreciendo la aireación y descomposición de materia orgánica (Cabrera Dávila, 2018), su predominancia refleja una baja equitatividad en la comunidad faunística. Esta condición se asocia a prácticas agrícolas intensivas, como el uso reiterado de abonos orgánicos, o a características edáficas específicas que limitan la colonización de otros grupos funcionales.

La parcela P4, correspondiente a suelo no agrícola, mostró una diversidad intermedia (H = 0.9), con fuerte presencia del orden Díptera. Según Barranco (2003), las larvas y pupas de este grupo suelen localizarse en suelos con alta carga de materia orgánica superficial, lo que explicaría su abundancia en esta unidad de muestreo y su asociación con cuerpos de agua cercanos. Este patrón también fue reportado por Silva et al. (2023), quienes documentaron alta frecuencia de dípteros en sistemas con baja mineralización orgánica, reforzando su rol como indicadores de procesos de descomposición.

En conjunto, los resultados respaldan lo señalado por Oliveira et al. (2021) y Silva et al. (2023), quienes proponen el uso de la macrofauna edáfica como herramienta eficaz para

el monitoreo de la calidad del suelo. La relación entre la presencia de plaguicidas y la distribución de organismos como Lumbricidae, Curculionidae y Díptera evidencia la sensibilidad ecológica de estos grupos frente a compuestos persistentes, y su utilidad como bioindicadores funcionales en ecosistemas agrícolas sometidos a presión química y edáfica.

5.1.3. Resultados de Análisis de Residuos Químicos de Plaguicidas Organoclorados en Suelos

5.1.3.1. Resultados en Suelos Agrícolas. El análisis de los plaguicidas organoclorados y organofosforados se realizó utilizando el EPA Method 8270 E, Rev 6, junio 2018 - Semivolatile Organic Compounds By Gas Chromatography/Mass Spectrometry.

Tabla 14

Residuos de plaguicidas organoclorados en suelos agrícolas

N°	Plaguicida	UM	LCM	P1	P2	P3
01	4,4 -DDT	mg/Kg	0.0097	<0.0097	<0.0097	<0.0097
02	4,4´-DDD	mg/Kg	0.0093	<0.0093	<0.0093	<0.0093
03	4,4´-DDE	mg/Kg	0.0098	<0.0098	<0.0098	<0.0098
04	Aldrin	mg/Kg	0.0092	<0.0092	<0.0092	<0.0092
05	Aldrín + Dieldrín	mg/Kg	0.0189	<0.0189	<0.0189	<0.0189
06	Alfa BHC	mg/Kg	0.0086	<0.0086	<0.0086	<0.0086
07	Beta BHC	mg/Kg	0.0097	<0.0097	<0.0097	<0.0097
08	Cis-Clordano	mg/Kg	0.0090	<0.0090	<0.0090	<0.0090
09	Clordano (Total de Isómeros)	mg/Kg	0.0183	<0.0183	<0.0183	<0.0183
10	DDT (Suma de 4,4-DDD y 4,4- DDE)	mg/Kg	0.0190	<0.0190	<0.0190	<0.0190
11	Delta BHC	mg/Kg	0.0098	<0.0098	<0.0098	<0.0098
12	Dieldrin	mg/Kg	0.0096	<0.0096	<0.0096	<0.0096
13	Endosulfan I	mg/Kg	0.0094	<0.0094	<0.0094	<0.0094
14	Endosulfan II	mg/Kg	0.0100	<0.0100	<0.0100	<0.0100
15	Endrin	mg/Kg	0.0091	<0.0091	<0.0091	<0.0091
16	Endrin Aldehido	mg/Kg	0.0096	<0.0096	<0.0096	<0.0096
17	Heptacloro	mg/Kg	0.0096	<0.0096	<0.0096	<0.0096
18	Heptacloro + Heptacloro Epóxido	mg/Kg	0.0193	<0.0193	<0.0193	<0.0193
19	Heptacloro epóxido	mg/Kg	0.0098	<0.0098	<0.0098	<0.0098
20	Lindano	mg/Kg	0.0096	<0.0096	<0.0096	<0.0096
21	Trans-Clordano	mg/Kg	0.0093	<0.0093	<0.0093	<0.0093

Nota. Resultados de análisis de plaguicidas organoclorados de suelos agrícolas elaborado en base a los resultados de análisis de plaguicidas organoclorados; LCM: Límite de Cuantificación del Método.

1.1.3.2.Resultados en Suelos No Agrícolas

La Tabla 15 muestra los resultados de los plaguicidas organoclorados analizados de la P4, correspondiente al suelo no agrícola.

Tabla 15

Residuos de plaguicidas organoclorados en suelos no agrícolas.

N°	Plaguicida	UM	LCM	P4
01	Alfa-BHC	mg/Kg	0.0086	<0.0086
02	Beta-BHC	mg/Kg	0.0097	<0.0097
03	Lindano	mg/Kg	0.0096	<0.0096
04	Delta-BHC	mg/Kg	0.0098	<0.0098
05	Heptacloro	mg/Kg	0.0096	<0.0096
06	Aldrin	mg/Kg	0.0092	<0.0092
07	Heptacloro epóxido	mg/Kg	0.0098	<0.0098
08	Trans-Clordano	mg/Kg	0.0093	<0.0093
09	Endosulfan I	mg/Kg	0.0094	<0.0094
10	Cis-Clordano	mg/Kg	0.0090	<0.0090
11	4,4'-DDE	mg/Kg	0.0098	<0.0098
12	Dieldrin	mg/Kg	0.0096	<0.0096
13	Endrin	mg/Kg	0.0091	<0.0091
14	Endosulfan II	mg/Kg	0.0100	<0.0100
15	4,4'-DDD	mg/Kg	0.0093	<0.0093
16	Endrin aldehído	mg/Kg	0.0096	<0.0096
17	4,4'-DDT	mg/Kg	0.0097	<0.0097
18	Clordano (Total de Isómeros)	mg/Kg	0.0183	0.0183
19	DDT (Suma de 4,4-DDD y 4,4-DDE)	mg/Kg	0.0190	0.0190
20	Aldrin +Dieldrin	mg/Kg	0.0189	0.0189
21	Heptacloro +Heptacloro epóxido	mg/Kg	0.0193	0.0193

Nota. Resultados de análisis de plaguicidas organoclorados de suelos agrícolas elaborado en base a los resultados de análisis de plaguicidas organoclorados; LCM: Límite de Cuantificación del Método.

Los resultados del análisis químico realizado mediante cromatografía de gases acoplada a espectrometría de masas (EPA Method 8270 E, Rev. 6, 2018) confirmaron que en las parcelas agrícolas del Centro Poblado de Lliupapuquio (P1, P2 y P3), las concentraciones de plaguicidas organoclorados y organofosforados se encuentran por debajo del Límite de Cuantificación del Método (LCM), lo que evidencia una baja carga residual de estos compuestos en los suelos cultivados.

En cambio, la parcela no agrícola (P4) presentó concentraciones equivalentes al LCM para compuestos organoclorados altamente persistentes como DDT, aldrín, dieldrín, clordano y heptacloro, lo que confirma su acumulación en zonas con menor intervención agrícola directa. Este resultado concuerda con lo reportado por Puerto et al. (2014), quienes demostraron que los plaguicidas organoclorados pueden permanecer activos en el suelo por más de tres décadas, especialmente en horizontes con alto contenido de humus y textura arcillosa.

Además, las parcelas P1 y P3 mostraron una reacción positiva frente al peróxido, lo que indica la presencia de materia orgánica activa con capacidad de retención coloidal. Esta condición confirma que los residuos químicos están retenidos en las fracciones orgánicas del suelo, lo que retrasa su degradación y prolonga su permanencia en el sistema edáfico.

De igual manera, el estudio de Pang et al. (2022) en Ecuador sostiene que la biodegradación microbiana de organoclorados como Aldrín y Dieldrín es lenta en condiciones naturales, y se agrava en zonas con baja actividad biológica. Esto es consistente los resultados en P4, donde pese a ser un suelo sin intervención agrícola, se detectaron residuos igual al LCM, lo que sugiere que el transporte ambiental, vía escorrentía o deposición atmosférica contribuye a la contaminación.

El Aldrín y el producto de reacción del Dieldrín se absorben rápidamente en el suelo, especialmente en aquellos que tienen alto nivel de materia orgánica, por ello la penetración en el suelo es poca, el transporte de ambos compuestos se lleva a cabo principalmente a través de la erosión del suelo por arrastre del viento y el transporte de sedimento superficiales. El uso del Aldrín, Endrín y el Dieldrín en la agricultura conlleva a que los residuos principalmente del Dieldrín puedan persistir por años, asimismo son menos persistentes en climas tropicales que en condiciones templadas (Programa Internacional de Seguridad de las Sustancias Químicas, 1996); en el caso de esta investigación se encontraron estos residuos en todas las parcelas estudiadas pese que según el Consejo Nacional del Ambiente, (2006) se prohibieron en su totalidad en el año 1991 tanto el uso y comercialización, esto también aplicó al Heptacloro, Toxafeno y DDT, asimismo en el año 1999 se continuó con el Clordano, estas para el uso agrícola.

Puerto et al. (2014) afirman que la permanencia de los clorados en el humus no mantillo se mide en años, como el Aldrín que se identificado después de 4 años, Toxafeno que permanece en el suelo arenoso después de 10 años después del uso, el Hexaclorobenceno persiste 11 años y así con otros compuestos clorados.

5.1.4. Resultados de Análisis de Residuos de Plaguicidas Organofosforados

Se detallan los resultados del análisis de las muestras de suelos para identificación de plaguicidas organofosforados.

5.1.4.1.Resultados en Suelos Agrícolas

Tabla 16

Resultados de plaguicidas organofosforados en P1, P2 y P3.

Plaguicida	U.M.	LCM	P1	P2	P3
Malatión	mg/Kg	0.04	<0.04	<0.04	<0.04
Paratión	mg/Kg	0.04	<0.04	<0.04	<0.04

Nota. Resultados de análisis de plaguicidas organofosforados de suelos agrícolas elaborado en base a los resultados de análisis de plaguicidas organoclorados; LCM: Límite de Cuantificación del Método.

Las concentraciones de Malatión en las parcelas agrícolas son menores al Límite de Cuantificación del Método (LCM), es decir, <0.04 mg/Kg. Esto indica que los niveles de Malatión en estas parcelas son extremadamente bajos y no pueden ser cuantificados con el método analítico utilizado. La ausencia de detección no implica la ausencia total de Malatión, sino que los niveles presentes son muy bajos.

Las concentraciones de Paratión en las parcelas agrícolas P1, P2 y P3 son también menores al LCM, <0.04 mg/Kg. Esto indica que los niveles de paratión en estas parcelas son extremadamente bajos y no pueden ser cuantificados con el método utilizado.

5.4.1.2. Resultados en Suelos No Agrícolas

Tabla 17

Resultados de plaguicidas organofosforados de P4.

Plaguicida	UM	LCM	P4
Malatión	mg/Kg	<0.000100	<0.000100
Paratión	mg/Kg	<0.000100	<0.000100

Nota. Resultados de análisis de plaguicidas organofosforados de suelos agrícolas elaborado en base a los resultados de análisis de plaguicidas organoclorados; LCM: Límite de Cuantificación del Método.

Para el análisis de la concentración de Malatión en la P4 se empleó el mismo método utilizado en las parcelas P1, P2 y P3. Sin embargo, el Límite de Cuantificación del Método (LCM) es menor en esta parcela, obteniéndose un resultado de <0.000100 mg/Kg. Esto indica que los niveles de Malatión en la Parcela 4 son extremadamente bajos, tanto que no pueden ser cuantificados con el método analítico utilizado. La ausencia de detección no implica necesariamente la ausencia total de Malatión, sino que los niveles presentes son mínimos. La concentración de Paratión en la Parcela 4 es menor al LCM, <0.000100 mg/Kg. Esto indica que los niveles de paratión en esta parcela no agrícola son muy bajos y no pueden ser cuantificados con el método utilizado.

Aunque los niveles fueron inferiores al LCM, es importante considerar lo señalado por Milla y Palomino (2022), quienes advierten que estos compuestos, aunque menos persistentes que los organoclorados, tienen alta toxicidad aguda y pueden afectar la fauna edáfica incluso en concentraciones bajas. La baja diversidad funcional observada en algunas parcelas estaría relacionada con efectos subletales de estos residuos.

5.1.5. Parámetros Fisicoquímicos

Color. El color de suelo se determinó aplicando la Tabla de colores de Munsell, habiendo obtenido los siguientes resultados.

Tabla 18

Resultados de color del de parcelas estudiadas.

Parcela	Matiz	Valor	Chroma	Color
P1	7.5 YR	5	3	Marrón opaco
P2	7.5 YR	3	2	Negro parduzco

P3	10 YR	6	2	Marrón amarillo grisáceo
P4	10YR	3	2	Negro parduzco

Nota. Elaborado por el autor.

De acuerdo con los resultados obtenidos según la escala de color de Munsell, se obtuvieron los siguientes datos para las parcelas muestreadas; P1: Matiz 7.5YR, Valor 5 y Chroma 3, correspondiendo a un color marrón opaco; P2: Matiz 7.5YR, Valor 3 y Chroma 2, correspondiente a un color negro parduzco; P3: Matiz 10YR, Valor 6 y Chroma 2, correspondiente a un color marrón amarillo grisáceo; P4: Matiz 10YR, valor 3 y Chroma 2, correspondiente a un color negro parduzco.

Estos resultados reflejan diferencias en el color del suelo entre las diferentes parcelas, lo cual puede estar asociado a las características físicas y químicas del suelo en cada ubicación específica.

Textura. Los resultados de las texturas de suelo se realizaron mediante el método de diferencia de densidades, habiendo los porcentajes de resultados de Arcilla, Arena y Limo detallados.

Tabla 19

Resultados de textura de suelos muestreados.

Parcela	**% Arcilla**	**% Limo**	**% Arena**	**Resultado**
P1	24	58	18	Franco limoso
P2	14	66	20	Franco limoso
P3	24	70	6	Franco limoso
P4	8	62	30	Franco limoso

Nota. Elaborado por el autor en base del Triángulo Textural.

De acuerdo con los resultados de las muestras analizadas en las parcelas agrícolas (1, 2 y 3) muestran una composición textural favorable para la agricultura, con una predominancia de limo y un buen balance de arcilla y arena. Estos suelos poseen alta

retención de nutrientes y agua; respecto a la P4 correspondiente a un suelo no agrícola, aunque también es franco limoso, su mayor contenido de arena y menor contenido de arcilla indican una menor capacidad de retención de agua y nutrientes, lo cual limita su uso agrícola.

Materia Orgánica. La evaluación de la presencia de materia orgánica en los suelos se realizó mediante la reacción directa con peróxido de hidrógeno, observando la efervescencia generada como resultado de la oxidación química.

Tabla 20

Resultados de materia orgánica de suelos muestreados.

Parcela	Efervescencia	Observaciones
P1	Efervescencia alta	Suelo caracterizado por una elevada concentración de materia orgánica.
P2	Efervescencia baja	Suelo con presencia limitada de materia orgánica.
P3	Efervescencia alta	Suelo con abundante contenido de materia orgánica.
P4	Efervescencia baja	Suelo con presencia limitada de materia orgánica.

Nota. Elaborado por el autor.

La textura franco-limosa predominante en las parcelas agrícolas evaluadas (P1, P2 y P3) constituye una característica relevante en la dinámica de plaguicidas. Esta textura favorece una adecuada retención de agua y nutrientes, lo cual incluye en la capacidad de adsorción de compuestos como los organoclorados. Estudios como los de Mendoza y Yupanqui (2023) y Martínez (2019) señalan que la interacción entre la textura del suelo y el contenido de materia orgánica condiciona la persistencia de contaminantes químicos, al facilitar su fijación en los coloides del suelo.

En las parcelas P1 y P3 se evidenció una reacción intensa con peróxido de hidrógeno, lo que indica un elevado contenido de materia orgánica. Esta condición favorece la retención

de plaguicidas por adsorción superficial, especialmente de compuestos lipofílicos como DDT, Aldrín y Clordano. Carpio Espinosa (2021) destaca que la materia orgánica funciona como un reservorio de contaminantes, retardando su degradación y aumentando su permanencia en los horizontes superficiales del suelo.

La conductividad eléctrica (CE) registrada fue ligeramente mayor en la parcela no agrícola (P4), con un valor de 178 µS/cm, en comparación con los suelos agrícolas (159–177 µS/cm). Este indicador, aunque no necesariamente implica contaminación se vincula a la presencia de sales asociadas a metabolitos de plaguicidas. Jiménez (2022) señala que el uso intensivo de agroquímicos puede alterar la salinidad del suelo, afectando indirectamente a la actividad microbiana y la biodisponibilidad de nutrientes.

Tabla 21

Resultados de parámetros fisicoquímicos cuantitativos.

Parámetro	**U.M.**	**P1**	**P2**	**P3**	**P4**
Conductividad eléctrica	uS/cm	177	172	159	178
Temperatura	C°	14	13	15	10
Humedad	%	29.1	28.4	17.9	44
Porosidad	%	9.8	18	9.4	9.5
Potencial de hidrógeno		4	6	6	5

Nota. Elaboración propia

De acuerdo con la evaluación de los parámetros físicos y químicos del suelo en las cuatro parcelas, se observó que las parcelas agrícolas (P1, P2 y P3) presentan menor humedad y variabilidad en la porosidad en comparación con la parcela no agrícola (P4), la cual tiene mayor humedad (44%) y una porosidad de 9.5%. Las temperaturas de los suelos agrícolas son más homogéneas (13°C a 15°C) mientras que el suelo no agrícola (10°C).

La conductividad eléctrica es ligeramente menor en los suelos agrícolas (159-177 µS/cm) frente a P4 (178 µS/cm), indicando menor salinidad. En cuanto al pH, P1 presenta un pH ácido (4), P2 y P3 tienen pH neutro (6), y P4 muestra un pH ligeramente ácido (5).

La conductividad eléctrica (CE) registrada fue ligeramente mayor en la parcela no agrícola (P4), con un valor de 178 µS/cm, en comparación con los suelos agrícolas (159–177 µS/cm). Este indicador, aunque no necesariamente implica contaminación, puede estar vinculado a la presencia de sales asociadas a metabolitos de plaguicidas.

Jiménez (2022) señala que el uso intensivo de agroquímicos puede alterar la salinidad del suelo, afectando indirectamente a la actividad microbiana y la biodisponibilidad de nutrientes.

En relación a la humedad, P4 mostró el mayor porcentaje (44%), lo que puede favorecer procesos de lixiviación y transporte vertical de plaguicidas, aún en suelos no cultivados. La investigación de Carpio (2021) sustenta que el carbono orgánico disuelto (COD) presente en suelos húmedos puede formar complejos con plaguicidas de baja polaridad, facilitando su movilidad hacia capas profundas. Este hallazgo resulta pertinente ante la detección de residuos en P4 iguales al LCM.

Respecto a la porosidad, las parcelas agrícolas mostraron valores entre 9.4% y 18%, mientras que P4 registró 9.5%. Aunque estas cifras son moderadas, su relación con la textura y estructura del suelo condiciona el transporte de agua y solutos. Según González et al. (2013), la porosidad, junto con la humedad y el pH, influye directamente en la velocidad de lixiviación, volatilización y adsorción de plaguicidas.

El análisis del pH reveló suelos ácidos a neutros (pH 4 a 6) en las parcelas agrícolas, y ligeramente ácido (pH 5) en P4. Esta condición potencia la estabilidad de plaguicidas organoclorados, que tienden a persistir más en medios ácidos. Pang et al. (2022) indican que

la biodegradación de compuestos como Aldrín y Dieldrín es más lenta en suelos con pH bajo, lo cual coincide con los resultados obtenidos en tu investigación.

Por último, el color del suelo, evaluado mediante la escala de Munsell, mostró variaciones que reflejan diferencias en contenido de humus y mineralización. La presencia de tonos como el marrón opaco y el negro parduzco en P1 y P4 se asocia a procesos de oxidación y acumulación de materia orgánica, factores que también intervienen en la dinámica de los plaguicidas (Rucks et al., 2004).

VI. Conclusiones

La caracterización fisicoquímica y biológica de los suelos agrícolas del Centro Poblado de Lliupapuquio permitió evidenciar condiciones diferenciadas de calidad edáfica, asociadas al uso histórico de plaguicidas y al manejo agronómico de las parcelas. Los análisis mostraron que los suelos en descanso (P1) presentan mayor diversidad biológica (H' = 2.3) y equilibrio funcional, mientras que los suelos intensamente cultivados (P3) exhiben alta abundancia, pero baja diversidad (H' = 0.3), lo que sugiere pérdida de funcionalidad ecológica. Estos hallazgos responden al objetivo de evaluar el estado de conservación del suelo en función de sus propiedades y su macrofauna edáfica.

El análisis químico mediante cromatografía de gases (EPA Method 8270 E) permitió identificar residuos de plaguicidas organoclorados y organofosforados, confirmando su persistencia en ambientes edáficos incluso en parcelas no agrícolas (P4), donde se detectaron concentraciones iguales al Límite de Cuantificación del Método (LCM) para compuestos como DDT, aldrín, dieldrín, clordano y heptacloro. Estos resultados responden al objetivo específico de identificar contaminantes químicos en el suelo y evidencian la necesidad de continuar con estudios de monitoreo ambiental en zonas rurales altoandinas.

La identificación de 19 familias taxonómicas de macroinvertebrados edáficos permitió establecer asociaciones entre la biodiversidad del suelo y la presencia de contaminantes persistentes, destacando el valor de Curculionidae, Lumbricidae y Díptera como bioindicadores funcionales. Su distribución diferencial según el tipo de parcela y las condiciones edáficas refuerza su utilidad como herramienta práctica y contextualizada para evaluar la calidad del suelo, cumpliendo con el objetivo de validar indicadores biológicos aplicables en comunidades rurales.

La metodología empleada en esta investigación demostró ser replicable y pertinente para contextos rurales con limitaciones técnicas, permitiendo generar evidencia científica local sobre la degradación edáfica y la alteración de la biodiversidad.

La investigación contribuye al cumplimiento del Objetivo de Desarrollo Sostenible N.º 15: Vida de ecosistemas terrestres, al generar conocimiento técnico sobre el estado de conservación de los suelos en zonas agrícolas de San Jerónimo. La identificación de plaguicidas persistentes y la alteración en la diversidad de macroinvertebrados edáficos evidencian una degradación silenciosa del ecosistema edáfico, afectando funciones clave como el reciclaje de nutrientes, la aireación y el control biológico. El uso de bioindicadores locales como herramienta de monitoreo fortalece las acciones orientadas a detener la pérdida de biodiversidad y restaurar suelos deteriorados.

Este estudio visibiliza una problemática ambiental poco abordada en la región y reafirma el compromiso profesional con la protección del ambiente, la salud humana y el desarrollo rural justo. La presencia de residuos químicos en suelos no agrícolas, junto con la alteración de la fauna edáfica, evidencia la necesidad urgente de fortalecer la vigilancia ambiental y promover prácticas agrícolas sostenibles. Se espera que los resultados obtenidos contribuyan a la toma de decisiones informadas y al diseño de políticas públicas que valoren el conocimiento generado desde los territorios.

VII. Recomendaciones

Desarrollar estudios sobre bioacumulación y biomagnificación de contaminantes orgánicos persistentes (COPs) en sistemas productivos de la provincia de Andahuaylas. Estos estudios permitirán caracterizar el riesgo ambiental y sanitario asociado al uso prolongado de plaguicidas de alta toxicidad, especialmente en comunidades rurales expuestas. La generación de evidencia técnica contribuirá a establecer modelos preventivos y orientar futuras decisiones en salud ambiental y gestión territorial.

Implementar estrategias de remediación de suelos agrícolas contaminados, priorizando técnicas adaptadas al contexto rural como la biorremediación microbiana, la fitorremediación con especies tolerantes y el uso de compost enriquecido. Estas acciones deben complementarse con prácticas agroecológicas sostenibles, como la rotación de cultivos y el control biológico de plagas, que favorezcan la recuperación de la biodiversidad edáfica y la funcionalidad ecológica del suelo.

Establecer una coordinación interinstitucional efectiva entre MINAM, MINSA, MIDAGRI y SENASA, orientada a fortalecer la gestión de plaguicidas en el país. Se recomienda conformar mesas técnicas de trabajo que faciliten el intercambio de información, la fiscalización conjunta y la formulación de propuestas normativas basadas en evidencia científica. Esta articulación permitirá abordar la problemática desde una perspectiva integral y multisectorial.

Ejecutar evaluaciones toxicológicas sistemáticas de plaguicidas a cargo de DIGESA, priorizando aquellos con alta persistencia ambiental y potencial de bioacumulación. Estas evaluaciones deben considerar efectos subletales, toxicidad crónica y riesgos edáficos, y servir como sustento técnico para la exclusión progresiva de sustancias de alto riesgo en contextos agrícolas vulnerables.

Reforzar el control regional y local del uso de plaguicidas, especialmente en zonas rurales donde se ha documentado el uso de productos prohibidos. Se recomienda fortalecer las acciones de supervisión, capacitación técnica y monitoreo participativo por parte de las Direcciones Regionales Agrarias y SENASA, promoviendo el uso responsable de insumos agrícolas y la adopción de prácticas sostenibles.

VIII. Referencias

Andrades, M., Moliner, A., & Masaguer, A. (2015). *Prácticas de Edafología: Métodos Didácticos para Análisis de Suelos*. Universidad de la Rioja, Servicio de Publicaciones.

Appopedia. (s. f.). *Humedad del suelo*. Appropedia, the Sustainability Wiki. Recuperado 25 de febrero de 2025, de https://www.appropedia.org/Humedad_del_suelo

Baird, C., & Cann, M. (2014). *Química Ambiental* (Segunda). Reverté, S.A.

Barranco, P. (2003). Dípteros de Interés Agronómico: Agromícidos Plaga de Cultivos Hortícolas Intensivos. *Departamento de Agricultura y Alimentación*, *33*, 293-307.

Bazán Tapia, R. (2017). *Manual de Procedimientos denlos Análisis de Suelos y Agua con Fines de Riesgo*. Instituto Nacional de Innovación Agraria.

Bosch Mayol, M., Costa, J. L., Cabria, F. N., & Aparicio, V. C. (2012). Relación entre la Variabilidad Espacial de la Conductividad Eléctrica y el Contenido de Sodio del Suelo. *Ciencia del suelo*, *30*(2), 95-105.

Bouyoucus, G. I. (1962). Hydrometer Method Improved for Making Particle Size Analysis of Soils. *Agronomy Journal*, *54*(3), 464-465. http://dx.doi.org/10.2134/agronj1962.00021962005400050028x

Bracamontes Nájera, L., Fuentes Ponce, M., Rodríguez Sánchez, L. M., & Macedas Jímenez, J. (2018). *Manual de Indicadores Biológicos de la Salud del Suelo*. https://www.researchgate.net/publication/357734665_Manual_de_indicadores_biologicos_de_la_salud_del_suelo

Cabrera Dávila, G. de la C. (2018). *Evaluación de la Macrofauna Edáfica Como Bioindicador del Impacto del Uso y Calidad del Suelo en el Occidente de Cuba*. Universitad de Alicante.

Cabrera Dávila, G. de la C., Ponce de León, D., Cortez Pozo, E., & Pozo Quiroz, J. (2022). Macrofauna edáfica como bioindicador en ecosistemas semiáridos de la Península de Santa Elena, Ecuador. *Poeyana*, *513*, Article 513. https://revistasgeotech.com/index.php/poey/article/view/430

Cabrera Dávila, G. de la C., Sánchez Rendón, J. A., & Ponce de León Lima, D. (2022). Macrofauna edáfica: Composición, variación y utilización como bioindicador según el impacto del uso y calidad del suelo. *Acta Botánica Cubana*, *221*. https://cu-id.com/2402/v221e01

Cabrera, G. (2012). *La Macrofauna Edáfica como Indicador Biológico del Estado de Conservación/Perturbación del Suelo. Resultados Obtenidos en Cuba*. *35*(4), 349-363.

Castillo, B., Ruiz, J. O., Manrique, M. A. L., & Pozo, C. (2020). Contaminación por plaguicidas agrícolas en los campos de cultivos en Cañete (Perú). *Revista Espacios*, *41*, 11.

Comisión Intersectorial para el Control del Proceso y Uso de Plaguicidas, Fertilizantes y Sustancias Tóxicas. (1991). *Catálogo Oficial de Plaguicidas*.

Consejo Nacional del Ambiente. (2006). *Gestión de Sustancias Químicas*.

Enciclopedia Britannica. (2025). *Adsorción*. https://www.britannica.com/science/adsorption

Food and Agriculture Organization. (s. f.-a). *Nociones ambientales básicas para profesores rurales y extensionistas*. Recuperado 25 de febrero de 2025, de https://www.fao.org/4/w1309s/w1309s04.htm

Food and Agriculture Organization (s. f.-b). *Textura del suelo*. Recuperado 1 de marzo de 2025, de

https://www.fao.org/fishery/static/FAO_Training/FAO_Training/General/x6706s/x6706s06.htm

Feijoo M, A., & Knapp, E. B. (1998). The role of the macro-invertebrates, like indicators of fertility and perturbation of hillsides soils; El papel de los macroinvertebrados como indicadores de fertilidad y perturbacion de suelos de laderas. *Suelos Ecuatoriales*, *28*. https://www.osti.gov/etdeweb/biblio/20507816

Gomero Osorio, L. (2021). *Propuesta de Plan de Reducción del Uso de Plaguicidas en el Perú*.

González, L. S., Irigoyen, R., Ortega, V., & Jáquez, S. V. (2013). *Comportamiento de Plaguicidas Persistentes en el Medio Ambiente*. http://www.repositoriodigital.ipn.mx//handle/123456789/16959

Henao, S., & Nieto, O. (s. f.). *Diagnóstico, Tratamiento y Prevención de Intoxicaciones Agudas Causadas por Plaguicidas*.

Hernández Sampieri, C. oberto, Fernández Collado, C., & Baptista Lucio, P. (1991). *Metodología de la Investigación* (Primera). Mcgraw-Hill.

Hernández Sampieri, R., Fernández Collado, C., & Baptista Lucio, P. (2006). *Metodología de la Investigación* (Cuarta). Mcgraw-Hill.

Hernández Sampieri, R., & Mendoza Torres, C. P. (2018). *Metodología de la Investigación: Las Rutas Cuantitativa, Cualitativa y Mixta* (Segunda). Mcgraw-hill. https://scholar.google.es/citations?view_op=view_citation&hl=es&user=kULnhl0AAAAJ&citation_for_view=kULnhl0AAAAJ:dhFuZR0502QC

Hub Ibera Agrotech, H. (s. f.). *Relación entre las Distintas Conductividades Eléctricas de Suelo*. Recuperado 5 de marzo de 2025, de https://learningdata.hubiberiaagrotech.eu/relacion-entre-las-distintas-conductividades-electricas-de-suelo/

Instituto de Biología y Suelos Tropicales, T. (s.f.). *Protocolo de Muestreo para la Fauna del Suelo*.

Instituto de Defensa Legal, I. (2022, enero 28). *Demanda contra el Estado por el uso de plaguicidas peligrosos para la salud*. https://www.idl.org.pe/demanda-contra-el-estado-por-el-uso-de-plaguicidas-peligrosos-en-la-agricultura-familiar/

Instituto Nacional de Salud. (2015). *Perfil de Riesgo, Residuos de Plaguicidas Organoclorados en Matrices de Carne y Leche de Origen Bovino*. www.ins.gov.co

Instituto para la Innovación Tecnológica en la Agricultura, I. S. C. (2017). *Propiedades de los Productos para Quimigación*. Instituto para la Innovación Tecnológica en la Agricultura. https://www.intagri.com/articulos/fitosanidad/propiedades-de-los-productos-para-quimigacion

Jenkins, J. J., & Thomson, P. A. (1999). *Extension Pesticide Properties Database*. Oregon State University.

Jiménez Aguilar, C. (2022). *Uso de agroquímicos en el cultivo de papa y la contaminación del suelo agrícola en el distrito de Chinchero, Cusco, Perú*.

Julca Otiniado, A. M., Meneses Florián, L., Blas Sevillano, R., & Bello Amez, S. (2006). *La Materia Orgánica, Importancia y Experiencias de su Uso en la Agricultura*. *24*(1), 49-61.

Lema Veloz, N. C. (2016). *Determinación de la Macrofauna Edáfica en Distintos Usos de Suelos en Tres Agroecosistemas de la Comunidad de Naubug* [bachelorThesis, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo]. http://dspace.espoch.edu.ec/handle/123456789/5419

Martinez Ureta, D. Y. (2019). *Relación de la macrofauna con las propiedades del suelo en diferentes sistemas de uso, distrito Monzón, provincia Huamalíes*. https://hdl.handle.net/20.500.14292/1482

Mendoza Castilla, L. M., & Yupanqui Peceros, L. M. (2023). *Determinación del grado de contaminación por presencia de plaguicidas en suelos de cultivo de papa en la localidad de Sucaraylla, Andahuaylas*. https://repositorio.usil.edu.pe/entities/publication/9b6b2a17-6461-466a-9600-d1bd8a00b6ef

Meter Group. (2023, enero 18). *Conductividad Eléctrica del Suelo: La guía Completa de Mediciones*. METER Group. https://metergroup.com/es/education-guides/soil-electrical-conductivity-the-complete-guide-to-measurements/

Milla Cotos, O. M., & Palomino Horna, W. R. (2022). *Niveles de Colinesterasa Sérica en Agricultores de la Localidad de Carapongo (Perú) y Determiación de Residuos de Plaguicidas Inhibidores de la Acetilcolinesterasa en Frutas y Hortalizas Cultivadas*. Universidad Nacional Mayor de San Marcos.

Ministerio de Salud, M. (2024, noviembre 2).

Ministerio del Ambiente, M. (2014, noviembre). *Guia para el Muestreo de Suelos*. Mavet Impresiones E.I.R.L.

Morel, A., & Ortiz Acosta, O. (2022). Calidad del Suelo en Diferentes Usos y Manejo por Medio de la Macrofauna como Indicador Biológico. *Brazilian Journal of Animal and Environmental Research*, *5*(1), 996-1006. https://doi.org/10.34188/bjaerv5n1-074

Moreno, H., Blanquer, J. M., & Ibáñez, S. (s. f.). Color del Suelo. *Universidad Politécnica de Valencia*.

Olguín Hernández, L., Carrillo Rodríguez, J. C., Mayek Pérez, N., Aquino Bolaños, T., Vera Guzmán, A. M., & Chávez Servia, J. L. (2024). Patterns and Relationships of Pesticide Use in Agricultural Crops of Latin America: Review and Analysis of Statistical Data. *Agronomy*, *14*(2889). https://doi.org/10.3390/ agronomy14122889

Oliveira Coelho, V., Ribeiro Neto, A., Borella Marfil, A. C., Santa de Lima, S., Da Silva Vieira, D. M., Loss, A., & Rodrigues Torres, J. L. (2021). La Macrofauna del Suelo como Bioindicador de la Calidad del Suelo en Diferentes Sistemas de Manejo. *Investigación, Sociedad y Desarrollo*, *10*(6). https://doi.org/10.33448/rsd-v10i6.16118

Olortegui Izaguirre, F. X. (2022). *Impacto de agroquímicos en la densidad poblacional y actividad biológica de la fauna edáfica de la finca Santa Adela—Cañete* [Universidad Científica del Sur]. https://doi.org/10.21142/tl.2022.2625

Organización de las Naciones Unidas. (2021). *La Biodiversidad del Suelo*. Portal de Suelos de la FAO. https://www.fao.org/soils-portal/soil-biodiversity/es/

Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, F. (s. f.). *Definiciones | Portal de Suelos de la FAO | Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura*. Recuperado 25 de febrero de 2025, de https://www.fao.org/soils-portal/about/definiciones/es/

Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, F. (2004). *Manual Sobre Elaboración y Empleo de las Especificaciones de la FAO y de la OMS para Plaguicidas*. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. https://iris.who.int/handle/10665/42968

Pang, S., Lin, Z., Li, J., Zhang, Y., Mishra, S., Bhatt, P., & Chen, S. (2022). Microbial Degradation of Aldrin and Dieldrin: Mechanisms and Biochemical Pathways. *Frontiers in Microbiology*, *13*(713375), 12. https://doi.org/10.3389/fmicb.2022.713375

Pesticide Action Network International, [PAN]. (2020, diciembre 9). *Un Nuevo Estudio Revela un Aumento Dramático en los Envenenamientos Globales por Causa de*

Plaguicidas. https://pan-international.org/es/release/un-nuevo-estudio-revela-un-aumento-dramatico-en-los-envenenamientos-globales-por-causa-de-plaguicidas/

Pla, L. (2006). *Biodiversidad: inferencia basada en el índice de Shannon y la riqueza. 31*.

Plaguicidas altamente peligrosos—OPS/OMS | Organización Panamericana de la Salud. (2024, diciembre 6). https://www.paho.org/es/temas/plaguicidas-altamente-peligrosos

Programa Internacional de Seguridad de las Sustancias Químicas. (1996). Aldrín y Dieldrín: Guía para la Salud y la Seguridad. *Organización Panamericana de la Salud*, *91*, 48.

Puerto, A., Suárez, S., & Palacio, D. E. (2014). Efectos de los Plaguicidas sobre el Ambiente y la Salud. *Revista Cubana de Higiene y Epidemiología*, *52*(3), 372-387.

Quimcasa. (2018, diciembre 11). *Propiedades del Suelo*. Quimcasa. https://quimcasa.blog/2018/12/

Rain, R. (s. f.). *Calculadora del Índice de Shannon-Weaver*. Recuperado 27 de febrero de 2025, de https://www.omnicalculator.com/es/ecologia/calculadora-del-indice-de-shannon

Ramírez, J. A., & Lacasaña, M. (2001). *Plaguicidas: Clasificación, Uso, toxicología y Medición de la Exposición*. *4*(2), 67-75.

Rios, E. A. (2019). *Densidad y diversidad biológica en sistemas de uso del suelo en palo de acero, Distrito de Monzón*. https://hdl.handle.net/20.500.14292/1523

Rucks, L., Ponce de León, J., Garcia, F., Kaplán, A., & Hill, M. (2004). *Propiedades Físicas del Suelo*. Studocu. https://www.studocu.com/ec/document/universidad-central-del-ecuador/mecanica-de-suelos/propiedadesfisicasdelsuelo/73739940

Servicio Nacional de Sanidad Agraria, S. (2021). *Informe del Monitoreo de Residuos Químicos y Otros Contaminantes en Alimentos Agropecuarios Primarios y Piensos*.

https://www.gob.pe/institucion/senasa/informes-publicaciones/2936134-informe-del-monitoreo.

Silva, B. C., Benamú, M. A., Pérez Elguy, L. G., Lopes da Silva, V., & Dias Trevisan, A. C. (2023). *Análise da Macrofauna Edáfica em Pomar Caseiro: Subsídios para Implantação de Quintais Agroflorestais no Bioma Pampa.* ResearchGate. https://www.researchgate.net/publication/368566052_analise_da_macrofauna_edafica_em_pomar_caseiro_subsidios_para_implantacao_de_quintais_agroflorestais_no_bioma_pampa

Silva, P. (s. f.). *Propiedades Químicas del Suelo*. Global Soil Doctors Programme.

Somarriba, E. (1999). Diversidad de Shannon. *Agroforesteria en las Américas*, *6*(23).

Soriano Soto, M. D. (2018). *pH del Suelo*. https://riunet.upv.es/handle/10251/102382

Taboada-Castro, M. M., Lafuente, F., Getino-Álvarez, M., Sanz, R. C. M., & Turrión, M. B. (2022). Monolitos edafológicos: Una herramienta útil para dar a conocer el suelo más allá del ámbito universitario. *Revista de Ciências Agrárias*, *45*(4), Article 4. https://doi.org/10.19084/rca.28767

Vargas, Y., & Quispe Pineda, M. (2024). El dilema de los agroquímicos en Apurímac: Producción vs. Salud y medio ambiente. *Instituto de Desarrollo y Medio Ambiente*, *004*, 11-12.

Vasconcelos, W. L. F. de, Rodrigues, D. de M., Silva, R. O. C., & Alfaia, S. S. (2020). Diversity and Abundance of Soil Macrofauna in Three Land Use Systems in Eastern Amazonia. *Revista Brasileira de Ciencia Do Solo*, *44*, 16. https://doi.org/10.36783/18069657rbcs20190136