UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN CRISTÓBAL DE HUAMANGA

ESCUELA DE POSGRADO

UNIDAD DE POSGRADO DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA DE MINAS, GEOLOGÍA Y CIVIL

TESIS:

Tratamiento de agua para riego de plantas de tallo bajo ymejora de calidad de agua mediante el Sistema Wetland, en la Comunidad de Compañía Baja del distrito de Pacaycasa provincia de Huamanga 2024

Para optar el grado académico de:

MAESTRO EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA, MENCIÓN GERENCIA DE PROYECTOS Y MEDIO AMBIENTE

PRESENTADO POR:

Bach. Johann Milthon CALDERON MOLINA

ASESOR:

Msc. Jaime Leonardo BENDEZÚ PRADO

AYACUCHO - PERÚ

2026

DEDICATORIA

A mi familia, por su amor incondicional y apoyo constante en cada paso de mi vida, a mis amigos, por su compañía y motivación en los momentos más desafiantes, y de manera especial a todas las personas que han formado parte de este proyecto, quienes, con su esfuerzo y colaboración, han hecho posible que esta investigación sea una realidad.

AGRADECIMIENTO

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento a todas las personas que han sido parte fundamental en la realización de este trabajo.

A mis asesores y docentes, por su valiosa orientación, conocimientos y paciencia durante todo el proceso de investigación, y gracias a ello, se pudo dar forma a este proyecto y sus consejos que fueron el impulso para seguir adelante.

A mis amigos y compañeros de trabajo, por su apoyo incondicional y por compartir este viaje académico conmigo, debido a que su compañía hizo de este proceso algo más llevadero.

ÍNDICE

DEDICATORIA ii

AGRADECIMIENTO iii

ÍNDICE iv

ÍNDICE DE FIGURAS vi

RESUMEN ix

PISILLAY x

INTRODUCCIÓN xi

CAPÍTULO I PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA 1

1.1. Planteamiento del problema 1

1.2. Formulación del problema 6

1.2.1. Problema general 6

1.2.2. Problemas específicos 6

1.3. Alcance y limitaciones 6

1.4. Variables e indicadores 8

1.5. Objetivos de la investigación 8

1.5.1. Objetivo general 8

1.5.2. Objetivos específicos 8

1.6. Justificación 9

1.7. Hipótesis 10

1.7.1. Hipótesis general 10

1.7.2. Hipótesis específicas 10

CAPÍTULO II MARCO TEÓRICO 12

2.1. Antecedentes de la investigación 12

2.1.1. Internacionales 12

2.1.2. Nacionales 16

2.1.3. Local 21

2.2. Bases teóricas 23

2.2.1. Tratamiento de agua para riego....23
2.2.2. Sistema Wetland....26
2.2.3. Interpretación de Resultados para el Sistema Wetland:....28
2.2.5. Dimensiones para el tratamiento de agua para riego de plantas de tallo bajo mediante el sistema Wetland....30
2.2.6. Plantas de tallo bajo....33
2.2.7. Características Deseables del Agua:....36
2.3. Términos básicos....42
CAPÍTULO III METODOLOGÍA....45
3.1. Tipo y nivel de investigación....45
3.1.2. Nivel de investigación....45
3.2. Diseño de la investigación....46
3.3. Método de investigación....47
3.4. Procedimiento de recolección de datos, población y muestra....48
3.4.1. Población....48
3.4.2. Muestra....49
3.5. Técnicas e instrumentos de recolección de datos....49
3.6. Análisis y procesamiento de datos....50
3.7. Aspectos éticos de la investigación....54
CAPÍTULO IV RESULTADOS Y DISCUSIÓN....55
4.1. Caracterización del agua para riego de la entrada y salida del sistema Wetland....55
4.1.1. Resultados de los parámetros fisicoquímicos del tratamiento con sistema Wetland.....56
4.1.2. Resultados de las características de los plaguicidas....71
4.1.3. Resultados de las características de metales....79
4.1.4. Resultados de los parámetros microbiológicos y parasitológicos.....**81**
4.2. Tratamiento de agua para riego de plantas de tallo bajo y la mejora de calidad de agua, mediante el Sistema Wetland.....82

4.2.1. Eficiencia del Sistema Wetland en la mejora los parámetros físico-químicos..82

4.2.2. Eficiencia del Sistema Wetland en la mejora las características de los metales85

4.2.3. Eficiencia del Sistema Wetland en la mejora las características de plaguicidas 87

4.2.4. Eficiencia del Sistema Wetland en la mejora los parámetros microbiológicos y parasitológicos 89

4.3. Discusión de resultados.....89

CAPÍTULO V CONCLUSIONES 102

Recomendaciones**.....104**

Referencias bibliográficas **.....105**

Anexos **.....110**

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Procesos del tratamiento de agua de riego.....55

Figura 2 Aceites y grasas (mg/L).....57

Figura 3 Bicarbonato (mg/L).....58

Figura 4 Cianuro Wad (mg/L) 59

Figura 5 Conductividad eléctrica (µS/cm) 60

Figura 6 Demanda Bioquímica de Oxigeno 61

Figura 7 Detergentes (SAAM) mg/L 62

Figura 8 Fenoles (mg/L).....63

Figura 9 Floruros (mg/L).....64

Figura 10 Nitratos (NO3-N) Nitritos (NO2-N) 65

Figura 11 Nitritos (NO2-N).....66

Figura 12 Oxígeno disuelto (mg/L) 67

Figura 13 Potencial de hidrogeno (pH).....68

Figura 14 Sulfatos (mg/L).....69

Figura 15 Temperatura (°C).....70

Figura 16 Aldrín (µg/l).....72

Figura 17 Clordano (µg/l) 73

Figura 18 Endosulfán (µg/l).....74

Figura 19 Endrín (µg/l).....75

Figura 20 Heptacloro y heptacloro epóxido (µg/l) 76

Figura 21 Lindano (µg/l).....77
Figura 22 Aldicarb (µg/l) 78
Figura 23 Metales mg/L.....80
Figura 24 Huevo de helmintos (Huevo/L) 81
Figura 25 Características de los componentes físico-químicos.....84
Figura 26 Eficiencia del Sistema Wetland en la mejora las características de los metales...86
Figura 27 Eficiencia del Sistema Wetland en la mejora las características de los plaguicidas. 88

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Parámetros de los Límites Máximos Permisibles para agua de riesgo del canal de la Comunidad de Compañía Baja. 4
Tabla 2 Parametros de la calidad de las aguas del rio Opancay. 5
Tabla 3 Límites Máximos Permisibles (LMP) de parámetros físico-químicos para agua destinada al riego de vegetales (Categoría D1 – MINAM).....38
Tabla 4 Límites Máximos Permisibles (LMP) de metales para agua destinada al riego de vegetales (Categoría D1 – MINAM).....39
Tabla 5 Límites Máximos Permisibles (LMP) de compuestos orgánicos, plaguicidas y parámetros microbiológicos para agua destinada al riego de vegetales (Categoría D1 – MINAM) 40
Tabla 6 Matriz de operacionalización de variables 114
Tabla 7 Parámetros fisicoquímicos del agua de la comunidad de Compañía Baja. 56
Tabla 8 Características de los plaguicidas de la comunidad de Compañía Baja.....71
Tabla 9 Características de los metales de la comunidad de Compañía Baja.....79
Tabla 10 Características de los parámetros microbiológicos y parasitológicos de la comunidad de Compañía Baja.....81
Tabla 11 Eficiencia del Sistema Wetland en la mejora los parámetros físico - químicas 82
Tabla 12 Eficiencia del Sistema Wetland en la mejora las características de los metales 85
Tabla 13 Eficiencia del Sistema Wetland en la mejora las características de los paguicidas. 87
Tabla 14 Eficiencia del Sistema Wetland en la mejora los parámetros microbiológicos y parasitológicos.....89
Tabla 15 Prueba de normalidad de Shapiro-Wilk.....94
Tabla 16 Prueba de muestras emparejadas de t de estudent para parámetros fisicoquímicos. 95

Tabla 17 Prueba de muestras emparejadas de t de estudent para plaguicidas.....98
Tabla 18 Prueba de muestras emparejadas de t de sstudent para parámetros microbiológicos y parasitológicos.....100

RESUMEN

El presente estudio tuvo como objetivo determinar la eficacia de un sistema Wetland de flujo subsuperficial horizontal en la mejora de la calidad físico química y microbiológica del agua destinada al riego de cultivos de tallo bajo en la comunidad de Compañía Baja, distrito de Pacaycasa-Ayacucho; la metodología adoptada, estructurada bajo el enfoque cuantitativo, con un diseño preexperimental de alcance descriptivo y explicativo, considerando la medición de parámetros antes y después del tratamiento mediante análisis de laboratorio. La población estuvo constituida por el agua del canal de riego de la comunidad de Compañía Baja, distrito de Pacaycasa, provincia de Huamanga, mientras que la muestra estuvo conformada por 12 muestras de agua de riego, distribuidas en 6 muestras pretest y 6 postest, recolectadas con una frecuencia mensual en los puntos de entrada y salida del sistema. Los resultados evidenciaron una elevada eficiencia del sistema en la remoción de contaminantes orgánicos y nutrientes, destacando una reducción del 93.3% en nitratos y la eliminación de nitritos al 99.92%, de igual forma, se registraron mejoras significativas en la Demanda Bioquímica de Oxígeno, detergentes y fenoles, cumpliendo con los estándares de calidad ambiental establecidos para riego, en contraste, la remoción de plaguicidas organoclorados fue limitada, lo cual se atribuye a su alta persistencia y baja biodegradabilidad, a nivel microbiológico, se logró una reducción del 66.67% de huevos de helmintos, evidenciando una mejora parcial en la calidad sanitaria del agua; se concluye que el sistema Wetland constituye una alternativa sostenibles, eficiente y de bajo costo para el tratamiento de aguas residuales con fines agrícolas, no obstante, requiere procesos de optimización para incrementar la remoción de contaminantes persistentes. El presente estudio aporta evidencia empírica relevante para la gestión de proyectos ambientales, promoviendo la implementación de soluciones basadas en la naturaleza en contextos rurales.

Palabras clave: Calidad de agua, Sistema Wetland, Eficiencia de remoción.

PISILLAY

Kay yachay maskaypa hatun munayninqa karqan **Wetland** nisqa sistema, pampapa ukhunpi horizontal puriq yaku purichiywan, allin ruwaq kasqanta yachay, yakuq físico-química hinallataq microbiológica kayninta allinchaypaq, Compañía Baja llaqtapi, Pacaycasa distritupi, Ayacucho llaqtapi, uchuy tulluyuq tarpuykunapa riegonpaq. Kay yachayqa aplicadom yachaymi karqan, experimental diseño pretest-postest nisqawan, laboratoriopi análisis ruraspa hampiyman mana chayasqaraq hinallataq hampisqamanta qhipa parámetros nisqakunata tupuspa. Yachaypa llapan runasqa karqanku Compañía Baja llaqtapa riego canalmanta yaku, Pacaycasa distritupi, Huamanga provinciapi. Muestrataq karqan chunka iskay (12) yaku muestras, soqta (6) pretest hinallataq soqta (6) postest muestrasmanta, sapa killam tantasqa sistemaq yaykunanpi hinallataq lluqsinanpi. Taripakusqakunam rikuchirqan sistemaqa ancha allin kasqanta materia orgánica hinallataq nutrientes nisqakunata qichuypi. Aswan allinmi karqan nitratos nisqakunata 93,3% pisiyachispa, nitritos nisqakunatañataq 99,92% chinkachispa. Chaynallataq Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO), detergentes hinallataq fenoles nisqakunapipas hatun allinchaykuna rikurirqan, riegopaq Ministerio del Ambiente nisqapa churasqan calidad ambiental estandarkunata hunt'aspa. Ichaqa, plaguicidas organoclorados nisqakunata qichuyqa pisim karqan, imaraykuchus chay contaminantekuna unaymanta mana usqhaylla chinkaqchu, mana allinta biodegradakunchu. Microbiología nisqapa tupuyninpiqa, helmintos nisqapa runtuyninkuna 66,67% pisiyachisqa karqan, chaywanmi yakuq sanitario kaynin huk chhikanta allinyasqa kasqanta rikuchin. Kay yachaymanta tukukuyninqa nin: **Wetland** sistemaqa huk allin, wiñaypaq, aslla qullqiwansi atisqa hinallataq allin ruwaq alternativa kasqanta, agricultura raykupaq aguas residuales nisqakunata hampiypaq. Ichaqa, aswan allinta contaminantes persistentes nisqakunata qichunapaqmi sistemaqa mastaraq allinchasqa kanan. Kay yachayqa allin evidencia empírica nisqata qun proyectos ambientales nisqakunata sumaq kamachinapaq, naturalezawan kuska allichaykunata llaqtakunapi churayta kallpachaspa.

Sapi simikuna: Yakuq kalidadnin, Sistema Wetland, contaminante qichuypa allin ruwaynin.

INTRODUCCIÓN

La adecuación del agua empleada en riego agrícola constituye un eje técnico esencial en el marco de la gestión sostenible de los recursos hídricos, en tanto las características cualitativas del recurso inciden de forma directa sobre las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo, así como en los procesos fisiológicos que determinan el crecimiento, desarrollo y rendimiento productivo de los cultivos, cuando el agua utilizada presenta concentraciones elevadas de materia orgánica, sólidos en suspensión, compuestos inorgánicos, residuos de plaguicidas o agentes patógenos, pueden generarse alteraciones que disminuyen la eficiencia agronómica y ponen en riesgo la estabilidad e inocuidad del sistema de producción.

En lo agrícola, los cultivos de porte bajo muestran una mayor susceptibilidad frente a las condiciones del agua de riego, debido a su cercanía a la superficie del suelo y, en múltiples casos, al contacto directo con el flujo hídrico aplicado, por ello, la caracterización integral del recurso el cual incluye el análisis de parámetros fisicoquímicos, la determinación de metales pesados y plaguicidas, así como la evaluación microbiológica y parasitológica, resulta un procedimiento técnico imprescindible para establecer la aptitud del agua destinada a este tipo de explotaciones agrícolas.

Entre las alternativas tecnológicas disponibles para el tratamiento, el sistema basado en procesos naturales de depuración se configura como una opción sustentada en mecanismos ecológicos de remoción de contaminantes, donde este sistema funciona a partir de la interacción dinámica entre medios filtrantes, macrófitas acuáticas y comunidades microbianas, favoreciendo la reducción progresiva de la carga contaminante mediante procesos de filtración, sedimentación, adsorción, transformación química y biodegradación. Su implementación en entornos agrícolas se orienta a optimizar las condiciones del recurso hídrico previo a su reaprovechamiento en actividades de riego, contribuyendo así a la sostenibilidad ambiental y a la seguridad productiva.

El Sistema Wetland opera mediante la conducción controlada del flujo hídrico a través de lechos conformados por medios granulares y macrófitas seleccionadas, en los cuales se activan procesos físicos, químicos y biológicos orientados a la depuración

del recurso. En este entorno se produce la disminución de la carga orgánica, la reducción de sólidos en suspensión, la regulación del potencial de hidrógeno (pH) y la atenuación de microorganismos patógenos, así como de determinados compuestos inorgánicos. La eficiencia del sistema se determina a partir del análisis comparativo de los indicadores de calidad del agua registrados en la etapa previa y posterior al tratamiento, incorporando variables como la demanda bioquímica de oxígeno (DBO_5), la demanda química de oxígeno (DQO), la conductividad eléctrica, la concentración de metales, nutrientes y coliformes.

El estudio examina la aplicación del Sistema Wetland para el tratamiento del agua proveniente del canal de riego en la Comunidad de Compañía Baja, ubicada en el distrito de Pacaycasa, provincia de Huamanga, durante el periodo 2024. El propósito central consiste en establecer su incidencia en la optimización de la calidad del recurso destinado al riego de cultivos de porte bajo. Metodológicamente, la investigación se desarrolla desde un enfoque cuantitativo con diseño preexperimental, efectuando una evaluación comparativa de las características fisicoquímicas y microbiológicas del agua antes y después de la implementación del sistema.

La presente investigación encuentra su sustento en la necesidad de generar evidencia empírica y técnica que permita evaluar rigurosamente la efectividad del Sistema Wetland como opción tecnológica para el tratamiento de agua destinada al riego en entornos agrícolas locales. Desde una perspectiva técnica, el estudio posibilita cuantificar el nivel de remoción de contaminantes alcanzado por el sistema; en el ámbito ambiental, aporta elementos para la optimización del recurso hídrico empleado en la producción agrícola; y, desde el enfoque productivo, proporciona información relevante acerca de las condiciones de calidad del agua utilizada en el riego de cultivos de porte bajo.

En coherencia con este planteamiento, el objetivo general consiste en establecer el grado de incidencia del Sistema Wetland en el tratamiento del agua destinada al riego de plantas de tallo bajo y en la mejora de su calidad en la Comunidad de Compañía Baja, distrito de Pacaycasa, provincia de Huamanga, durante el año 2024. El primer capítulo desarrolla el planteamiento del problema, describiendo de manera detallada la situación actual del agua del canal de riego en la zona de estudio, así como la justificación, alcances y objetivos que orientan la investigación. El problema central

se formula en términos de determinar en qué medida la implementación del Sistema Wetland contribuye a la depuración del agua para riego y a la optimización de sus parámetros de calidad en el periodo analizado.

El segundo capítulo presenta el marco teórico, donde se abordan los fundamentos conceptuales relacionados con el tratamiento de agua mediante sistemas Wetland, la eficiencia de depuración, la sostenibilidad ambiental, los costos asociados y la viabilidad económica. Asimismo, se desarrollan los referentes teóricos sobre calidad de agua para riego, considerando dimensiones como propiedades fisicoquímicas, presencia de metales y plaguicidas, además de componentes microbiológicos y parasitológicos. En esta sección también se incorporan antecedentes y estudios previos que respaldan científicamente la investigación.

Posteriormente, se expone la metodología adoptada, estructurada bajo el enfoque cuantitativo, con un diseño preexperimental de alcance descriptivo y explicativo. La población estuvo constituida por el agua del canal de riego de la Comunidad de Compañía Baja, mientras que la muestra fue determinada conforme a los criterios técnicos establecidos por la Autoridad Nacional del Agua. Se detalla igualmente el procedimiento aplicado para la recolección y análisis comparativo de los datos antes y después de la implementación del Sistema Wetland.

En el cuarto capítulo se presentan y analizan los resultados obtenidos, evaluando las variaciones en la calidad del agua para riego en cada una de sus dimensiones fisicoquímicas, metales, plaguicidas y componentes microbiológicos y parasitológicos y contrastando las hipótesis formuladas. Finalmente, el último capítulo expone las conclusiones y recomendaciones derivadas del estudio. La investigación, titulada Tratamiento de agua para riego de plantas de tallo bajo y mejora de calidad de agua mediante el Sistema Wetland, en la Comunidad de Compañía Baja del distrito de Pacaycasa, provincia de Huamanga – 2024, tuvo como propósito central determinar la eficacia del Sistema Wetland en la mejora significativa de la calidad del agua para riego, consolidándolo como una alternativa técnicamente viable y ambientalmente sostenible para su aplicación agrícola en la zona de estudio.

CAPÍTULO I
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1. Planteamiento del problema

La Comunidad Compañía Baja, ubicada en el distrito de Pacaycasa, de la provincia de Huamanga, el agua proveniente del canal de riego es vital para el sustento de la agricultura local, especialmente para el cultivo de plantas de tallo bajo que son la base de la economía agrícola de la región. Sin embargo, el agua que llega a través de este canal presenta problemas de calidad que afectan negativamente el rendimiento de los cultivos y la productividad agrícola en general. El agua del canal de riego suele estar contaminada con sedimentos, materia orgánica, microorganismos patógenos y otros contaminantes, lo que reduce su calidad y eficacia para el riego de cultivos. Esta situación se agrava durante ciertas épocas del año, como en la temporada de lluvias, cuando aumenta el arrastre de sedimentos y materiales orgánicos hacia el canal. El riego con agua de mala calidad conlleva múltiples problemas para los agricultores de la Comunidad de Compañía Baja. Por un lado, afecta negativamente la salud de las plantas, disminuyendo su crecimiento, rendimiento y calidad. Además, puede provocar la propagación de enfermedades en los cultivos, lo que resulta en pérdidas económicas significativas para los agricultores.

Ante esta problemática, es necesario implementar un sistema de tratamiento de agua que permita mejorar la calidad del agua del canal de riego, garantizando así un suministro adecuado para el riego de las plantas de tallo bajo en la comunidad. El Sistema Wetland se presenta como una opción prometedora para abordar esta problemática, ofreciendo una solución efectiva y sostenible para mejorar la calidad del agua de riego y, por ende, impulsar la productividad agrícola en la región. Sin embargo, es fundamental realizar una investigación exhaustiva para evaluar la viabilidad y eficacia de este sistema en el contexto específico de la Comunidad de Compañía Baja del distrito de Pacaycasa, provincia de Huamanga, en el año 2024.

En el contexto internacional, la administración de los recursos hídricos constituye un tema prioritario, particularmente en aquellos territorios donde la

actividad agrícola representa un pilar económico estratégico. Problemas como la limitada disponibilidad de agua y los procesos de contaminación hídrica se configuran como desafíos recurrentes para las comunidades dedicadas a la producción agraria a escala global. De acuerdo con la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, el sector agrícola concentra el mayor consumo de agua dulce a nivel mundial, por lo que optimizar su aprovechamiento resulta determinante para asegurar la seguridad alimentaria y promover un desarrollo sostenible (FAO, 2020).

En el ámbito nacional, la administración del recurso hídrico representa un factor determinante para el desarrollo del sector agrario y la calidad de vida de las poblaciones rurales. Aunque el Perú dispone de una considerable diversidad de fuentes de agua, la marcada variabilidad espacial y temporal de las precipitaciones, junto con deficiencias en infraestructura para almacenamiento y distribución, restringen el acceso oportuno al recurso en diversas zonas del territorio. De acuerdo con el Ministerio de Agricultura y Riego, alrededor del 70 % de la superficie agrícola del país depende de sistemas de riego, lo que evidencia que la optimización en el uso del agua constituye un elemento clave para incrementar la productividad y fortalecer los medios de subsistencia de los productores agrarios (MINAGRI, 2023).

En el contexto local, la disponibilidad y las condiciones de calidad del agua destinada al riego se configuran como factores críticos que inciden directamente en la dinámica productiva, particularmente en los cultivos de porte bajo. La limitada provisión de agua apta y la presencia de contaminantes en el canal de riego pueden afectar negativamente el desarrollo vegetativo y el rendimiento de los cultivos, generando repercusiones en la seguridad alimentaria y en la estabilidad económica de los agricultores de la zona. Frente a esta situación, resulta imprescindible promover soluciones tecnológicas orientadas al tratamiento y mejora del recurso hídrico, como la implementación del Sistema Wetland, con el propósito de optimizar la calidad del agua empleada en el riego y asegurar condiciones adecuadas para la producción agrícola en la comunidad.

El problema central en la comunidad de Compañía Baja del distrito de Pacaycasa, provincia de Huamanga en el año 2024, radica en la calidad deficiente con

respecto al agua proveniente del canal de riego, que compromete el desarrollo óptimo de los cultivos de plantas de tallo bajo, fundamentales para la económica agrícola local, la presencia de sedimentos, materia orgánica y microorganismos patógenos en el agua dirigido al riego afecta negativamente la salud y productividad de las plantas, resultado en pérdidas económicas para los agricultores y un riesgo para la seguridad alimentaria de la comunidad.

La comunidad de Compañía Baja, ubicada en el distrito de Pacaycasa, provincia de Huamanga, en el año 2024, enfrenta una problemática significativa relacionada con la calidad del agua de riego proveniente del canal local. La presencia de sedimentos, materia orgánica y microorganismos patógenos en el agua compromete el desarrollo óptimo de los cultivos de plantas de tallo bajo, que son esenciales para la economía agrícola de la región.

Esta situación afecta directamente la productividad y sustentabilidad de la agricultura local, generando pérdidas económicas para los agricultores y representando un riesgo para la seguridad alimentaria de la comunidad. Este problema implica la necesidad de identificar y aplicar un sistema de tratamiento de agua que sea efectivo y adecuado para las condiciones locales, con el objetivo de mitigar los efectos negativos de la contaminación del agua de riego en los cultivos agrícolas.

Según Gonzales (2019) en su investigación sobre el análisis del canal de riego de la Comunidad de Compañía Baja del distrito de Pacaycasa, encontró algunos resultados que se mencionan a continuación:

Tabla 1

Parámetros de los Límites Máximos Permisibles para agua de riesgo del canal de la Comunidad de Compañía Baja.

Parámetro	Resultado	Unidad	Límite Permisible
pH	7.8		7.0 - 8.5
Conductividad eléctrica	1.6	ds/m	0.8 - 1.5 ds/m
Turbidez	10	NTU	5 NTU
Sólidos totales disuelto	500	mg/L	300 mg/L
DBO5	10	mg/L	5 mg/L
DQO	80	mg/L	60 mg/L
Coliformes totales	2000	UFC/100 mL	1000 UFC/100 mL
Nitratos	20	mg/L	10 mg/L
Nitritos	5	mg/L	3 mg/L
Fosfatos	15	mg/L	10 mg/L
Hierro	0.5	mg/L	0.3 mg/L
Manganeso	0.4	mg/L	0.2 mg/L
Cadmio	0.01	mg/L	0.005 mg/L
Plomo	0.02	mg/L	0.01 mg/L
Bacterias coliformes	150	UFC/100 mL	100

Nota. Extraído del análisis del canal de riego de la Comunidad de Compañía Baja del distrito de Pacaycasa.

Estos resultados indican que la calidad del agua de riego en el canal de la Comunidad de Compañía Baja es moderadamente contaminada, especialmente en parámetros como DBO5, DQO, coliformes totales y nutrientes. Sin embargo, los niveles de metales pesados se mantienen por debajo de los límites permitidos, lo que sugiere una menor contaminación en este aspecto.

Por otro lado, el estudio de impacto ambiental, al elaborar el expediente técnico para la construcción del puente Chanchará, en el distrito de Pacaycasa; evidencio en

el 2019, que el río Opancay, del cual nace los canales de riego, está contaminado para el riego. A continuación, se muestra los valores arrojados en dicho estudio:

Tabla 2

Parametros de la calidad de las aguas del rio Opancay.

Parámetro	Valor medido (mg/L)	Estado
DBO	8.2	Contaminado
DQO	15.6	Contaminado
Coliformes fecales	3200 UFC/100mL	Contaminado
Nitratos	25	Contaminado
Sólidos suspendidos	30	Contaminado
pH	7.5	Aceptable
Hierro	0.4	Aceptable
Manganeso	0.3	Aceptable
Cadmio	0.01	Aceptable
Plomo	0.02	Aceptable

Nota. Elaboración propia a través de la información del rio Opancay.

El cuadro presenta los resultados del análisis del agua del río Opancay en diferentes parámetros. Se observa que varios de estos parámetros, como DBO, DQO, coliformes fecales, nitratos y sólidos suspendidos, están por encima de los límites permisibles establecidos para el agua de riego, lo que indica una contaminación en el agua del río Opancay. Sin embargo, los niveles de metales pesados como hierro, manganeso, cadmio y plomo se encuentran dentro de los límites permisibles, lo que sugiere que no hay una elevada presencia de metales pesados en el agua, lo que podría ser una buena noticia para el potencial uso de esta agua para riego.

Por tanto, la presente investigación buscará evaluar la viabilidad técnica, económica y ambiental del Sistema Wetland como solución para mejorar la calidad del agua de riego y, por ende, aumentar la productividad y sostenibilidad de la agricultura en la comunidad de Compañía Baja.

1.2. Formulación del problema

1.2.1. Problema general

¿En qué medida se da el tratamiento de agua para riego de plantas de tallo bajo y la mejora de calidad de agua, mediante el Sistema Wetland, en la Comunidad de Compañía Baja del distrito de Pacaycasa, provincia de Huamanga 2024?

1.2.2. Problemas específicos

¿En qué medida el Sistema Wetland, mejora los parámetros físico - químicos del agua para riego de plantas de tallo bajo, en la Comunidad de Compañía Baja del distrito de Pacaycasa, provincia de Huamanga 2024?

¿En qué medida el Sistema Wetland, mejora las características de los metales del agua para riego de plantas de tallo bajo, en la Comunidad de Compañía Baja del distrito de Pacaycasa, provincia de Huamanga 2024?

¿En qué medida el Sistema Wetland, mejora las características de los plaguicidas del agua para riego de plantas de tallo bajo, en la Comunidad de Compañía Baja del distrito de Pacaycasa, provincia de Huamanga 2024?

¿En qué medida el Sistema Wetland, mejora los parámetros microbiológicos y parasitológicos del agua para riego de plantas de tallo bajo, en la Comunidad de Compañía Baja del distrito de Pacaycasa, provincia de Huamanga 2024?

1.3. Alcance y limitaciones

1.3.1. Alcance

El alcance de la investigación se limitó a la evaluación del tratamiento de agua de canal de riego mediante el Sistema Wetland para mejorar el riego de plantas de tallo bajo en la comunidad de Compañía Baja, ubicada en el distrito de Pacaycasa, provincia de Huamanga, en el año 2024, donde la investigación se centró en la implementación y efectividad de este sistema de tratamiento de agua en el contexto específico de esta comunidad agrícola.

El estudio incluye la recolección de datos sobre la calidad del agua de riego

antes y después del tratamiento con el Sistema Wetland, así como la evaluación del impacto del agua tratada en el crecimiento, desarrollo y rendimiento de las plantas de tallo bajo. Se examino aspectos técnicos, económicos y ambientales relacionados con la implementación de este sistema, con el objetivo de proporcionar recomendaciones prácticas para mejorar la gestión del agua de riego y la productividad agrícola en la comunidad de Compañía Baja.

1.3.2. Limitaciones

La investigación se enfoca específicamente en el tratamiento de agua de riego utilizando el Sistema Wetland para mejorar el crecimiento y rendimiento de plantas de tallo bajo en la comunidad de Compañía Baja, distrito de Pacaycasa, provincia de Huamanga, en el año 2024. El estudio se centró en los aspectos técnicos, económicos y ambientales relacionados con la implementación de este sistema de tratamiento de agua en el contexto agrícola local.

Por otro lado, la investigación se enmarcó en un estudio aplicado y de naturaleza práctica, con el objetivo de proporcionar soluciones concretas a una problemática específica en el ámbito agrícola. Donde se emplearon métodos de investigación experimental y de análisis de campo, específicamente en las características físicas, químicas y biológicas del agua del canal de riego, para evaluar la efectividad y viabilidad del Sistema Wetland en la mejora de la calidad del agua de riego y su impacto en el cultivo de plantas de tallo bajo.

También, el estudio se llevó a cabo exclusivamente en la comunidad de Compañía Baja, ubicada en el distrito de Pacaycasa, provincia de Huamanga, en Perú. Limitando al área geográfica específica donde se encuentra el canal de riego que abastece a esta comunidad y donde se implementará el Sistema Wetland para el tratamiento del agua de riego.

Finalmente, la investigación se enfocó en tres campos principales: el campo agrícola, donde evaluó el impacto del tratamiento de agua en el crecimiento y rendimiento de las plantas de tallo bajo; el campo ambiental, donde se analizará el efecto del Sistema Wetland en la calidad del agua y su entorno circundante; y el campo tecnológico y económico, donde se examinarán los aspectos relacionados con la

implementación y viabilidad económica de este sistema de tratamiento de agua en la comunidad de Compañía Baja.

1.4. Variables e indicadores

- **Variable Independiente:** Sistema Wetland

  Indicadores

  - Diseño del sistema
  - Parámetros hidráulicos
  - Componentes del sistema
  - Operación y mantenimiento

- **Variable dependiente:** Calidad de agua para riego

  Indicadores

  - Parámetros físico – químicos
  - Características de los metales
  - Características de los plaguicidas
  - Parámetros microbiológicos y parasitológicos

1.5. Objetivos de la investigación

1.5.1. Objetivo general

Determinar en qué medida se da el tratamiento de agua para riego de plantas de tallo bajo y la mejora de calidad de agua, mediante el Sistema Wetland, en la Comunidad de Compañía Baja del distrito de Pacaycasa, provincia de Huamanga 2024.

1.5.2. Objetivos específicos

Determinar en qué medida el Sistema Wetland, mejora los parámetros físico - químicos del agua para riego de plantas de tallo bajo, en la Comunidad de Compañía Baja del distrito de Pacaycasa, provincia de Huamanga 2024.

Determinar en qué medida el Sistema Wetland, mejora las características de los metales del agua para riego de plantas de tallo bajo, en la Comunidad de Compañía Baja del distrito de Pacaycasa, provincia de Huamanga 2024.

Determinar en qué medida el Sistema Wetland, mejora las características de los plaguicidas del agua para riego de plantas de tallo bajo, en la Comunidad de Compañía Baja del distrito de Pacaycasa, provincia de Huamanga 2024.

Determinar en qué medida el Sistema Wetland, mejora los parámetros microbiológicos y parasitológicos del agua para riego de plantas de tallo bajo, en la Comunidad de Compañía Baja del distrito de Pacaycasa, provincia de Huamanga 2024.

1.6. Justificación

La presente investigación se justifica debido a la necesidad de implementar tecnologías sostenibles que permitan mejorar la calidad del agua destinada al riego agrícola en comunidades rurales, donde el uso de aguas con presencia de contaminantes físicos, químicos y microbiológicos representa un riesgo para la productividad de los cultivos, la conservación de los suelos y la salud pública. En este contexto, el estudio evaluó la eficacia de un sistema Wetland de flujo subsuperficial horizontal como alternativa de tratamiento de bajo costo y con reducido impacto ambiental, orientada a contribuir con una gestión más eficiente y sostenible del recurso hídrico.

Por otro lado, la investigación contribuye a ampliar el conocimiento científico sobre el desempeño de los sistemas Wetland de flujo subsuperficial horizontal en la remoción de contaminantes presentes en aguas destinadas al riego agrícola. Si bien diversos estudios internacionales han demostrado la eficiencia de estos sistemas en el tratamiento de aguas residuales, aún existe limitada evidencia experimental desarrollada bajo las condiciones ambientales, climáticas y agrícolas de la región andina del Perú. En ese sentido, los resultados obtenidos constituyen un aporte científico que fortalece la base de conocimientos sobre la aplicación de tecnologías naturales para el tratamiento de aguas en contextos rurales, proporcionando

información que podrá ser utilizada como referencia para futuras investigaciones relacionadas con la gestión sostenible de los recursos hídricos.

Del mismo modo, la investigación responde a una problemática real relacionada con la calidad del agua utilizada para el riego de cultivos de tallo bajo en la comunidad de Compañía Baja, distrito de Pacaycasa. La implementación y evaluación del sistema Wetland permitió demostrar su capacidad para reducir significativamente diversos contaminantes, especialmente nutrientes, materia orgánica y algunos indicadores microbiológicos, favoreciendo el cumplimiento de los estándares de calidad ambiental establecidos para el uso agrícola. En consecuencia, los resultados constituyen una alternativa técnicamente viable y económicamente accesible para comunidades rurales que requieren soluciones eficientes para el tratamiento de aguas de riego, promoviendo una agricultura más segura y sostenible.

1.7. Hipótesis

1.7.1. Hipótesis general

El Sistema Wetland, mejora significativamente la calidad del agua para riego de plantas de tallo bajo, en la Comunidad de Compañía Baja del distrito de Pacaycasa, provincia de Huamanga 2024.

1.7.2. Hipótesis específicas

El Sistema Wetland, mejora significativamente los parámetros físico - químicos del agua para riego de plantas de tallo bajo, en la Comunidad de Compañía Baja del distrito de Pacaycasa, provincia de Huamanga 2024.

El Sistema Wetland, mejora significativamente las características de los metales del agua para riego de plantas de tallo bajo, en la Comunidad de Compañía Baja del distrito de Pacaycasa, provincia de Huamanga 2024.

El Sistema Wetland, mejora significativamente las características de los plaguicidas del agua para riego de plantas de tallo bajo, en la Comunidad de Compañía Baja del distrito de Pacaycasa, provincia de Huamanga 2024.

El Sistema Wetland, mejora significativamente las los parámetros microbiológicos y parasitológicos del agua para riego de plantas de tallo bajo, en la Comunidad de Compañía Baja del distrito de Pacaycasa, provincia de Huamanga 2024.

CAPÍTULO II
MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes de la investigación

2.1.1. Internacionales

Francini et al. (2023), desarrollo la investigación "Remoción de microcontaminantes en efluentes tratados mediante humedales construidos operados por lotes a escala piloto", El objetivo de la investigación fue evaluar la eficiencia de humedales construidos operados por lotes para la remoción de microcontaminantes presentes en efluentes de plantas de tratamiento de aguas residuales, considerando el efecto del biochar y la aireación. La metodología consistió en la construcción de tres humedales piloto de flujo subsuperficial: uno con arena y dos con mezcla de corteza y biochar, uno de ellos con aireación continua. Los sistemas fueron monitoreados durante 10 meses mediante ciclos de alimentación y drenaje de 8 horas. La muestra estuvo conformada por efluentes municipales contaminados con 12 microcontaminantes farmacéuticos y orgánicos, con concentraciones aproximadas de 5 μg/L. Los resultados demostraron que los humedales con biochar mejoraron significativamente la remoción de 11 de los 12 microcontaminantes analizados. Se registraron eficiencias superiores al 80% para trimetoprim, metoprolol, propranolol, furosemida y claritromicina, mientras que compuestos como carbamazepina, diclofenaco y sulfametoxazol presentaron remociones entre 40% y 80%. Asimismo, el uso de biochar incrementó más del 40% la eliminación de irbesartán, carbamazepina e hidroclorotiazida en comparación con el sistema de arena. La investigación concluyó que la incorporación de biochar en humedales construidos mejora notablemente la adsorción y remoción de microcontaminantes, constituyendo una alternativa sostenible y eficiente para el tratamiento avanzado de aguas residuales.

Saeed, y Sun (2021). La remoción de nitrógeno y materia orgánica en reactores de humedales de flujo vertical: modelos predictivos, con el objetivo de desarrollar modelos predictivos para evaluar la eficiencia de los humedales construidos de flujo vertical en la remoción de nitrógeno y materia orgánica presentes en aguas residuales. La metodología empleada consistió en el análisis experimental de reactores de

humedales de flujo vertical operados bajo diferentes condiciones hidráulicas y cargas contaminantes, considerando variables como demanda química de oxígeno (DQO), nitrógeno total y tasas de carga orgánica. La muestra estuvo conformada por distintos sistemas experimentales de humedales construidos utilizados para el tratamiento de aguas residuales domésticas. Los resultados demostraron que los humedales de flujo vertical alcanzaron elevadas eficiencias en la remoción de nitrógeno y compuestos orgánicos, identificándose que factores como el tiempo de retención hidráulica, la aireación natural y la carga orgánica influyen significativamente en el rendimiento del sistema. Asimismo, los modelos predictivos desarrollados mostraron alta precisión para estimar la eficiencia de tratamiento en diferentes condiciones operativas. La investigación concluyó que los humedales construidos de flujo vertical representan una tecnología sostenible y eficiente para el tratamiento de aguas residuales, permitiendo optimizar procesos de remoción de contaminantes y facilitando el diseño de sistemas de tratamiento más eficientes y de bajo costo.

Maine et al. (2021) presento la investigación “Remoción de nutrientes y metales en un humedal construido de flujo superficial libre”, con el objetivo de evaluar la eficiencia de un humedal construido de flujo superficial libre en la remoción de nutrientes y metales pesados presentes en aguas contaminadas, además de comparar sus resultados con un prototipo experimental de menor escala. La metodología consistió en la implementación de un humedal construido con especies macrófitas locales, entre ellas Eichhornia crassipes, Typha domingensis y Panicum elephantipes, analizando periódicamente la calidad del agua de entrada y salida mediante parámetros fisicoquímicos y concentraciones de metales. La muestra estuvo conformada por aguas contaminadas sometidas al tratamiento en el humedal experimental. Los resultados evidenciaron que Eichhornia crassipes alcanzó un 80% de cobertura del humedal, mientras que Typha domingensis y Panicum elephantipes lograron coberturas de 14% y 4%, respectivamente. Asimismo, el sistema removió 86% de cromo (Cr), 67% de níquel (Ni) y 95% de hierro (Fe). Las concentraciones de zinc (Zn) fueron inferiores a 50 μg/L en la mayoría de muestreos. Además, se eliminó aproximadamente el 70% de nitrato y 60% de nitrito. Se concluyó que los humedales construidos representan una alternativa eficiente y sostenible para la remoción de metales pesados y nutrientes en

aguas contaminadas, destacando el papel de las macrófitas en los mecanismos de retención de contaminantes.

Vymazal (2021), realizo la investigación “Remoción de nutrientes en diversos tipos de humedales construidos”, el objetivo de la investigación fue evaluar la eficiencia de distintos tipos de humedales construidos en la eliminación de nutrientes, principalmente nitrógeno y fósforo, presentes en aguas residuales domésticas e industriales. La metodología consistió en una revisión comparativa de investigaciones previas relacionadas con humedales de flujo superficial y subsuperficial utilizados en el tratamiento de aguas residuales, analizando variables como mecanismos de remoción, condiciones operativas y desempeño ambiental. La muestra estuvo conformada por diversos estudios experimentales y sistemas de humedales construidos implementados en diferentes países y condiciones climáticas. Los resultados evidenciaron que los humedales construidos presentan una alta capacidad para remover nitrógeno mediante procesos de nitrificación y desnitrificación, mientras que la remoción de fósforo mostró mayor variabilidad debido a las características del sustrato y la capacidad de adsorción del suelo. Asimismo, se identificó que los humedales de flujo subsuperficial presentan mejor desempeño en la reducción de nutrientes y menor generación de olores. La investigación concluyó que los humedales construidos representan una alternativa sostenible, económica y ambientalmente eficiente para el tratamiento de aguas residuales, especialmente en zonas rurales y regiones con limitaciones de infraestructura sanitaria.

García (2020) en su investigación titulada: “*Evaluación de calidad de agua para riego en zona Centro norte de Chile y desarrollo de un proceso preliminar costo efectivo, para disminuir excesos que incumplan la NCh 1333”*, presentada ante la Universidad de Concepción, Chile, con la finalidad de optar el grado de Magíster en Ingeniería Agrícola con mención en Recursos Hídricos, la investigación tuvo como propósito central analizar la calidad del agua en cuencas ubicadas en la zona centro-norte de Chile, así como diseñar un proceso de bajo costo orientado a la disminución de contaminantes presentes en el agua de riego, de modo que se adecue a lo establecido en la Norma 1333. El procedimiento metodológico de este estudio se inició con el levantamiento y sistematización de información, junto con la identificación de los

principales contaminantes presentes en cuencas representativas del centro-norte del país, específicamente en las cuencas del río Choapa, río Maipo y río Rapel, para posteriormente, plantear el desarrollo de fundamentos preliminares para la implementación de un proceso económico basado en el uso de arcillas, orientado a la reducción de la carga iónica del agua destinada al riego, en la que, para el diseño del proceso de adsorción de iones sobre arcillas se empleó modelación computacional, apoyándose en el análisis de literatura científica relacionada con la adsorción iónica en superficies mediante simulaciones computacionales y la aplicación de principios de dinámica molecular, donde a partir de este análisis, se adaptó una metodología que permitió cuantificar la adsorción superficial de metales pesados presentes en las cuencas evaluadas, especialmente aquellos que exceden los límites permitidos por la normativa vigente, en la cual el diseño del equipo destinado a la aplicación de los depresantes en el sistema de riego se orientó bajo un enfoque de bajo costo, en tal efecto, se optó por un sedimentador de geometría rectangular, debido a su adecuada eficiencia operativa y menores costos de mantenimiento en comparación con los sedimentadores circulares, donde estos últimos presentan una mayor eficiencia hidráulica, su elevado costo de implementación y la complejidad de su control operativo los hacen menos apropiados para los objetivos del proyecto y los sedimentadores rectangulares, en cambio, permiten el tratamiento de grandes volúmenes de agua y reducen las perturbaciones en los sistemas de entrada y salida.Los resultados obtenidos evidenciaron que diversos elementos, entre ellos boro, cadmio, mercurio y molibdeno, superaron ampliamente los valores máximos permitidos en la mayoría de las estaciones de monitoreo, de igual modo, la salinidad evaluada mediante la conductividad eléctrica, los niveles de sulfatos y manganeso, así como la relación de absorción de sodio, también excedieron los límites normativos, aunque en menor magnitud, pero el pH del agua se mantuvo dentro de los rangos establecidos en todas las cuencas analizadas, donde la presencia excesiva de distintos elementos y compuestos químicos, tales como cloro, cobre, hierro, manganeso, mercurio metálico y sodio, en relación con los valores permitidos por la normativa de riego (NCh 1333), genera efectos adversos en los cultivos, ya que entre estos impactos se incluyen restricciones en el crecimiento vegetal, deformaciones foliares, clorosis y necrosis, incremento de enfermedades fúngicas y marchitez, así como la inhibición de la

germinación y del desarrollo del polen, ocasionando pérdidas significativas en la producción agrícola.

2.1.2. Nacionales

Inga et al. (2024) en su tesis titulada: “Tratamiento de aguas residuales domésticas mediante humedales artificiales mejorados con rizobacterias del vertimiento N.º 8 - Parra del Riego - El Tambo - Huancayo”, presentada a la Universidad Continental para optar el título profesional de Ingeniero Ambiental, tuvieron como objetivo determinar la eficiencia de los humedales artificiales con y sin rizobacterias de Typha domingensis (totora) en la disminución de materia orgánica y sólidos suspendidos presentes en aguas residuales domésticas. La investigación fue de tipo aplicada, con diseño experimental en bloques completamente al azar, donde se evaluó el tratamiento del agua residual mediante sistemas de humedales artificiales considerando variables como proporción de grava y arena, así como el tiempo de contacto del efluente dentro del sistema. Para el estudio se caracterizó inicialmente el agua residual doméstica del vertimiento N.º 8, registrándose concentraciones elevadas de DQO, DBO5 y sólidos suspendidos totales, las cuales superaban los límites máximos permisibles establecidos para efluentes domésticos. Posteriormente, se aplicaron tratamientos con humedales artificiales convencionales y humedales mejorados con rizobacterias, evaluando la eficiencia de remoción de los contaminantes mediante análisis fisicoquímicos en laboratorio. Los resultados evidenciaron que el humedal artificial sin rizobacterias alcanzó eficiencias de remoción de 77,27 % para DQO, 76,93 % para DBO5 y 85,83 % para sólidos suspendidos totales. Sin embargo, al incorporar rizobacterias se incrementó significativamente la eficiencia del sistema, obteniéndose porcentajes de remoción de 96,68 % en DQO, 96,67 % en DBO5 y 94,88 % en sólidos suspendidos, logrando reducir las concentraciones finales hasta valores dentro de los límites máximos permisibles. Asimismo, se determinó que la proporción óptima del sustrato fue de grava y arena en relación 1:2, con un tiempo de contacto de cinco días. Concluyó que los humedales artificiales mejorados con rizobacterias de Typha domingensis constituyen una alternativa eficiente y sostenible para el tratamiento de aguas residuales domésticas, al permitir la reducción significativa de la carga orgánica y de sólidos suspendidos hasta niveles aceptables para su disposición

final o posible reutilización, evidenciando su potencial aplicación en contextos similares de tratamiento descentralizado.

Tokunaga (2024), desarrollo la investigación "*Evaluación de la eficiencia de un humedal artificial prototipo para la remoción de materia orgánica alimentado con agua residual para fines de uso agrícola, Tacna 2024*", con el objetivo de evaluar la eficiencia de un humedal artificial de flujo superficial para el tratamiento de aguas residuales destinadas al riego agrícola. El estudio incluyó el diseño, construcción, implementación y evaluación del prototipo, considerando análisis de muestras iniciales y finales en laboratorios certificados y ensayos periódicos con equipos especializados. La investigación analizó distintos indicadores de la calidad del agua, observándose disminuciones sustanciales en la Demanda Biológica de Oxígeno, que se redujo de 70 a 9,4 mg/L, alcanzando una eficiencia de remoción del 86,57 %, de igual modo, la Demanda Química de Oxígeno descendió de 248 a 25,5 mg/L, lo que representa una remoción del 89,72 %, donde, en cuanto a los parámetros microbiológicos, los coliformes termotolerantes se redujeron de 920 000 a 220 NMP/100 mL, logrando una eficiencia del 99,98 %, mientras que los coliformes totales disminuyeron de 2 400 000 a 1 700 NMP/100 mL, con una remoción del 99,93 %, como también, el nitrógeno total presentó una reducción de 67 a 4,8 mg/L, correspondiente a una eficiencia del 92,62 %, y el fósforo total disminuyó de 5,3 a 0,9 mg/L, con un porcentaje de remoción del 81,94 %, en la que, el parámetro de aceites y grasas, por su parte, se mantuvo sin variaciones significativas durante el proceso de tratamiento. Los resultados obtenidos mostraron que el prototipo de humedal artificial representa una alternativa eficiente para la remoción de materia orgánica presente en aguas residuales destinadas al uso agrícola, ya que cumple con las directrices establecidas para el reúso del agua, de igual modo, se destaca su potencial como una tecnología sostenible, de bajo impacto ambiental y con posibilidades de replicación para la gestión eficiente de los recursos hídricos en contextos similares.

Cortez (2024), elaboro la investigación "*Eficiencia de un humedal artificial en el tratamiento de agua grises domésticas en una vivienda de la comunidad de tartar chico- Baños del Inca-2023",* en la Universidad Privada del Norte, con el fin de evaluar la eficiencia de un sistema de tratamiento aplicado a aguas residuales con la

finalidad de mejorar su calidad para posibles usos posteriores, mediante el análisis de parámetros fisicoquímicos y microbiológicos antes y después del proceso de tratamiento. La investigación se desarrolló bajo un enfoque experimental, considerando el diseño e implementación de un sistema piloto y la recolección de muestras representativas sometidas a evaluación en laboratorio mediante técnicas estandarizadas para determinar indicadores de contaminación orgánica y presencia bacteriológica. Se analizaron parámetros como Demanda Bioquímica de Oxígeno, Demanda Química de Oxígeno, sólidos suspendidos y coliformes, aplicando un tratamiento basado en procesos de depuración biológica y filtración natural. Los resultados evidenciaron reducciones significativas en la carga contaminante, demostrando mejoras sustanciales en la calidad del efluente tratado respecto a las condiciones iniciales. Asimismo, los valores finales obtenidos mostraron cumplimiento con criterios de calidad ambiental establecidos para usos agrícolas y reúso de agua bajo condiciones controladas. Se concluyó que el sistema evaluado constituye una alternativa viable, eficiente y ambientalmente sostenible para la reducción de materia orgánica y microorganismos presentes en aguas residuales, contribuyendo a la gestión eficiente del recurso hídrico y al aprovechamiento seguro del agua tratada en actividades productivas.

Caracela y Tapia (2022) en su investigación titulada: "*Tratamiento de las aguas de riego del río Surco mediante radiación ultravioleta*", presentada a la Universidad Nacional del Callao, para obtener el título profesional de Ingeniero Químico, tuvo como objetivo general reducir la contaminación de las aguas de riego del río Surco mediante el tratamiento de radiación ultravioleta. El trabajo se llevó a cabo a nivel experimental, donde se realizaron muestreos del río Surco en el ingreso al distrito de Lince. Durante el proceso de caracterización, se evaluaron cinco parámetros: coliformes termo tolerantes (CT), Escherichia coli (E. coli), huevos de helmintos (HH), sólidos suspendidos totales (SST) y turbidez. La medición de los microorganismos, como coliformes termo tolerantes y E. coli, se realizó utilizando la técnica de tubos múltiples, que permite estimar la concentración de bacterias presentes en la muestra de agua. Para la identificación y cuantificación de huevos de helmintos (parásitos), se empleó un método específico diseñado para este propósito. Los sólidos suspendidos totales (SST) se cuantificaron mediante el método gravimétrico, que

implica filtrar la muestra de agua y pesar los sólidos retenidos en el filtro. Por último, la turbidez del agua se midió utilizando un turbidímetro, un equipo diseñado para determinar la cantidad de partículas suspendidas en el agua, lo que proporciona una indicación de la claridad del agua. Estos métodos permitieron obtener información detallada sobre la calidad del agua del río Surco en el ingreso al distrito de Lince, lo que es fundamental para evaluar su idoneidad para diversos usos, así como para identificar posibles problemas de contaminación y establecer medidas de gestión adecuadas. Como parte de los resultados obtenidos, la evaluación de los parámetros de calidad del agua evidenció concentraciones elevadas de coliformes termotolerantes (CT) y Escherichia coli, registrándose valores de 70 000 NMP/100 mL para ambos indicadores microbiológicos, ya que en relación con los huevos de helmintos, el análisis determinó una concentración inferior a 1 huevo/L, en la que, estos resultados ponen de manifiesto que los parámetros microbiológicos mencionados no cumplen con los ECA para agua, categoría 3, correspondientes al uso en riego no restringido (ECA-Agua), conforme a lo establecido en el Decreto Supremo N.° 004-2017 emitido por el Ministerio del Ambiente, por ende , con el propósito de disminuir la carga de contaminantes biológicos, se diseñó e implementó un sistema de tratamiento a escala piloto basado en la aplicación de radiación ultravioleta (RUV). La aplicación de este método a las muestras iniciales permitió obtener resultados altamente satisfactorios, alcanzándose reducciones superiores al 99,75 % en coliformes termotolerantes y mayores al 99,81 % en Escherichia coli, concluyendo que la radiación ultravioleta constituye una alternativa eficaz para la reducción de contaminantes biológicos presentes en aguas superficiales. Este resultado respalda la viabilidad y efectividad del uso de la RUV como una tecnología de tratamiento adecuada para mejorar la calidad del agua y garantizar el cumplimiento de los estándares ambientales vigentes para su uso en riego

Medina y Vega (2021) en su investigación: "*Tratamiento del agua contaminada del canal de riego Surco, con la intervención de la lombriz Eisenia foetida"*, presentada a la Universidad César Vallejo, para obtener el título profesional de Ingeniero ambiental; tuvo como objetivo principal evaluar el tratamiento del agua contaminada del canal de riego Surco con la intervención de la lombriz Eisenia foetida. La investigación es de tipo aplicada, lo que significa que busca abordar un problema

específico del mundo real y encontrar soluciones prácticas para mejorar una situación concreta. En este caso, la necesidad de mejorar la calidad del agua contaminada que se vierte al ecosistema es el problema que motiva la investigación. El diseño experimentalmente puro implica que se lleva a cabo un estudio controlado y sistemático, donde se manipulan deliberadamente variables para observar su efecto sobre el resultado. En este estudio se aplicó el sistema Tohá empleando diferentes densidades de lombrices durante periodos específicos, con la finalidad de mejorar la calidad de agua contaminada, en la que, el procedimiento experimental consideró la recolección de muestras en intervalos temporales definidos, específicamente a los 15, 30 y 45 días posteriores a la implementación del sistema, ya que dichas muestras fueron trasladadas al laboratorio para su análisis, con el propósito de evaluar los efectos del tratamiento sobre la calidad del agua y determinar la eficiencia del método aplicado. Los resultados mostraron que el sistema Tohá alcanzó eficiencias superiores al 45 % en la reducción de los parámetros de Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO_5), Demanda Química de Oxígeno (DQO) y coliformes termotolerantes, en la cual, estos permitieron cumplir con los Límites Máximos Permisibles (LMP) establecidos para la categoría 3: riego de vegetales y bebida de animales, de acuerdo con lo dispuesto en el Decreto Supremo N.° 004-2017 del Ministerio del Ambiente, done, en relación con la temperatura, esta se mantuvo constante durante todo el proceso, dado que el funcionamiento del sistema Tohá requiere condiciones ambientales estables. Respecto al parámetro de turbiedad, este no resulta aplicable para la categoría de calidad de agua evaluada, ya que, estos hallazgos demuestran que el sistema Tohá constituye una alternativa eficiente, convencional, ecológica y de bajo costo para el tratamiento de aguas contaminadas destinadas a canales de riego y bebida de animales, para que al final mediante el procesamiento estadístico de los datos usando el software SPSS y el análisis de los resultados correspondientes a cada parámetro, considerando las distintas densidades de lombrices y los periodos de tratamiento de 15, 30 y 45 días, se aceptó la hipótesis alterna, en la cual, esta hipótesis plantea que la lombriz Eisenia foetida presenta la capacidad de tratar eficientemente el agua contaminada del canal de riego Surco., por ende, la confiabilidad de esta conclusión se estableció en un nivel del 95 %, lo que muestra un alto grado de certeza

en los resultados obtenidos y respalda la efectividad del tratamiento biológico aplicado para mejorar la calidad del agua.

Vargas (2021) en su investigación titulada: "*Propuesta de diseño estructural del sistema Wetland (humedal) para el tratamiento de aguas ácidas, para el cierre de minas de la unidad minera Anabi S.A.C. en el distrito de Quiñota, Cusco"*, presentada a la Universidad Privada del Norte, para optar el título profesional de Ingeniero Civil; tuvo como objetivo principal diseñar la propuesta estructural del sistema Wetland para optimizar el tratamiento de aguas ácidas del proceso de cierre de mina de la unidad minera Anabi S.A.C. El estudio se desarrolló bajo un enfoque descriptivo, con un diseño no experimental y de corte transversal, orientado a la observación y caracterización de la problemática sin manipulación de variables. La investigación se llevó a cabo en la Unidad Minera Anabi S.A.C., ubicada en el distrito de Quiñota, centrando el análisis en el área del tajo abierto Huisamarca, lo que permitió focalizar la evaluación en una zona representativa de la operación minera, dando, como resultado, la propuesta de un diseño del sistema de tratamiento tipo Wetland compuesto por dos desarenadores y un humedal artificial, en la que, el primer desarenador cuenta con una capacidad de almacenamiento de 4 016,23 m^3, el segundo con 5 138,94 m^3, mientras que el humedal presenta un volumen efectivo de 9 504,00 m^3 y un área útil de 13 771,21 m^2, donde, este sistema fue concebido con el objetivo de reducir la acidez y remover metales presentes en las aguas ácidas generadas por la actividad minera, en la cual, los cálculos teóricos estimaron una eficiencia de remoción del 57,8 % en la supresión de acidez, así como porcentajes del 82,7 % y 75,3 % para la eliminación de hierro (Fe) y manganeso (Mn), respectivamente, ya que, estos valores se obtuvieron a partir de promedios reportados por experiencias previas de empresas mineras en el tratamiento de aguas ácidas, donde, en conjunto, los resultados evidencian que el sistema Wetland propuesto presenta viabilidad técnica y un potencial adecuado para la mejora de la calidad del agua en contextos mineros similares.

2.1.3. Local

Zamora (2024) en su investigación titulada: "Tratamiento final del agua residual mediante el Sistema Wetland en el distrito de Santa Rosa, Ayacucho*"*, presentada a la Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga, para optar el

grado de Maestro en Ciencias de la Ingeniería, mención en Gerencia de Proyectos y Medio Ambiente; tuvo como objetivo general determinar el grado de eficiencia del sistema de tratamiento Wetland para el tratamiento final de las aguas residuales en los afluentes domésticos en el centro poblado de la Rinconada Baja. Se empleó una metodología cuantitativa y experimental en el estudio, donde se estableció un grupo de control y un grupo de experimento. En este tipo de metodología, se recopilan datos numéricos para analizar y realizar inferencias sobre fenómenos específicos. Además, al ser un estudio experimental, se manipularon deliberadamente variables para observar su efecto sobre otras variables. El grupo de control se utilizó como referencia y no se le aplicó ningún tratamiento, mientras que al grupo experimental se le aplicó el tratamiento o intervención que se estaba evaluando. Esta configuración permite comparar los resultados entre los dos grupos y determinar si el tratamiento tuvo algún efecto significativo. Este enfoque experimental proporciona una sólida base para establecer relaciones causa-efecto y determinar la eficacia de intervenciones específicas. Los resultados generados en la presente investigación fueron evaluados por el laboratorio Química Proximal, a partir de lo cual se propuso la implementación de un sistema pasivo de tratamiento final, destinado a sustituir el pozo de absorción existente y orientado a la disminución de la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO_5), con el proposito de que la descarga de efluentes cumpla con los valores exigidos por los Límites Máximos Permisibles (LMP). La evaluación se enfocó en la caracterización del agua residual proveniente de un sistema de pozo de percolación–tanque séptico, mediante el análisis de parámetros fisicoquímicos con el fin de verificar su cumplimiento con los Límites Máximos Permisibles (LMP) establecidos en la normativa ambiental peruana, donde, los resultados iniciales evidenciaron que, antes de la aplicación del sistema Wetland, el agua residual no cumplía con los LMP , en la cual tras la implementación del sistema experimental de humedales, se registraron mejoras significativas en los parámetros físicos del agua tratada, destacando la estabilización del pH en un valor de 8 y la reducción de los sólidos suspendidos totales a 0,82 mg/L, lo que favorece su posible reutilización, pero, los análisis químicos posteriores revelaron concentraciones de metales pesados, como cromo, plomo y cadmio, que superaron los límites permisibles, lo cual pone en evidencia la necesidad de optimizar el proceso de tratamiento, llegando a la

conclusión, que los resultados evidenciaron que el sistema Wetland es eficaz para disminuir la carga orgánica y regular el pH del agua residual en un corto periodo, pero se requiere un tratamiento complementario para asegurar la remoción de contaminantes químicos y garantizar la eficiencia del sistema a largo plazo

2.2. Bases teóricas

2.2.1. Tratamiento de agua para riego

El tratamiento de agua para riego es un tema crucial en la gestión hídrica y agrícola, y ha sido abordado por numerosos autores, instituciones y entidades expertas en el campo del agua y la agricultura. El tratamiento de agua para riego se refiere al proceso de purificación y mejora de la calidad del agua destinada a la irrigación de cultivos agrícolas. Este proceso es fundamental para garantizar que el agua utilizada en la agricultura sea segura tanto para los cultivos como para el medio ambiente circundante. El tratamiento del agua para riego implica la eliminación de contaminantes como sedimentos, nutrientes en exceso, microorganismos patógenos, metales pesados y compuestos químicos indeseables (Xiang et al., 2019).

Según la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), "el tratamiento del agua para riego es esencial para asegurar la salud de los cultivos y evitar la contaminación del suelo y los recursos hídricos" (FAO, 2016). La FAO destaca la importancia de implementar prácticas de tratamiento adecuadas para garantizar la sostenibilidad de la agricultura y la seguridad alimentaria. Además, autores como Gleick (2003) señalan que "el tratamiento adecuado del agua para riego es crucial para maximizar el rendimiento de los cultivos y minimizar los impactos ambientales negativos asociados con la agricultura intensiva". Gleick enfatiza la necesidad de utilizar tecnologías de tratamiento avanzadas y sostenibles para abordar los desafíos relacionados con la calidad del agua en la agricultura.

Por otro lado, la investigación de Li et al. (2018) demuestra que "los sistemas de tratamiento de agua para riego basados en procesos naturales, como los humedales construidos y los sistemas de filtración vegetal, pueden ser altamente efectivos para eliminar contaminantes y mejorar la calidad del agua utilizada en la agricultura". Estos

autores resaltan la eficacia y la viabilidad técnica y económica de estas soluciones basadas en la naturaleza.

Existe otros aspectos importantes a considerar en el tratamiento de agua para riego:

Legislación y Normativas: Las leyes y regulaciones gubernamentales juegan un papel crucial en la gestión del agua y la calidad del agua para riego. Instituciones como la Agencia de Protección Ambiental (EPA) en Estados Unidos, el Ministerio de Agricultura y Riego en Perú, y otras autoridades locales establecen normativas y estándares de calidad del agua para su uso en la agricultura.

Tecnologías de Tratamiento: Existen diversas tecnologías y métodos de tratamiento de agua para riego, que van desde sistemas convencionales como la filtración, la desinfección con cloro y la ósmosis inversa, hasta enfoques más innovadores como los humedales construidos, la fitodepuración y la biofiltración. Cada tecnología tiene sus propias ventajas, desventajas y aplicaciones específicas según las necesidades locales y la disponibilidad de recursos.

Investigación y Desarrollo: La investigación continua y el desarrollo de nuevas tecnologías y enfoques de tratamiento son fundamentales para mejorar la eficiencia, la rentabilidad y la sostenibilidad del tratamiento de agua para riego. Instituciones académicas, centros de investigación y empresas privadas realizan investigaciones para avanzar en este campo y abordar los desafíos emergentes relacionados con la calidad del agua y la agricultura.

Educación y Capacitación: La capacitación y la educación de agricultores, técnicos y otros actores involucrados en la gestión del agua son cruciales para garantizar la correcta implementación y mantenimiento de los sistemas de tratamiento de agua para riego. Programas de capacitación, talleres y materiales educativos pueden ayudar a mejorar la comprensión y la aplicación de prácticas adecuadas de tratamiento de agua.

En conjunto, estos aspectos contribuyen a una gestión eficaz y sostenible del agua para riego, que es fundamental para la seguridad alimentaria, la protección del medio ambiente y el desarrollo agrícola.

A. Canal de riego

El canal de riego constituye una infraestructura hidráulica destinada a conducir agua desde una fuente de abastecimiento, como ríos o reservorios, hacia las zonas agrícolas donde es utilizada para la irrigación de los cultivos, en la que este sistema de distribución hídrica resulta esencial para la actividad agrícola, debido a que garantiza el suministro de agua requerido para el desarrollo vegetal y favorece el incremento de la productividad agrícola (Stefanakis et al., 2018).

Según Bates et al. (2008), "los canales de riego han sido utilizados durante siglos como una forma eficiente de llevar agua a las tierras de cultivo, especialmente en regiones áridas y semiáridas donde la lluvia es escasa". Este autor destaca la importancia histórica y la funcionalidad de los canales de riego en la agricultura.

Además, la FAO señala que "los sistemas de riego, incluidos los canales de riego, desempeñan un papel crucial en la mejora de la seguridad alimentaria y el aumento de la producción agrícola en todo el mundo" (FAO, 2016). La FAO resalta la importancia de mantener y gestionar adecuadamente los canales de riego para garantizar un suministro confiable de agua para la agricultura.

En cuanto a la gestión y mantenimiento de los canales de riego, autores como Smith et al. (2010) destacan que "la eficiencia en el diseño, la construcción y la operación de los canales de riego es fundamental para maximizar la disponibilidad y el uso eficiente del agua en la agricultura". Estos autores resaltan la necesidad de implementar prácticas de gestión adecuadas para garantizar el buen funcionamiento de los canales de riego.

Otros aspectos importantes a considerar en relación con los canales de riego incluyen la infraestructura de control, como compuertas y válvulas, la regulación del flujo de agua, la prevención de fugas y pérdidas, y la participación comunitaria en la gestión y mantenimiento de los canales.

Los canales de riego son una parte vital de la infraestructura agrícola, que proporciona el agua necesaria para el riego de cultivos y contribuye al desarrollo agrícola y la seguridad alimentaria. Su diseño, construcción y gestión adecuados son fundamentales para garantizar un suministro confiable y eficiente de agua para la agricultura (Vymazal, 2011).

2.2.2. Sistema Wetland

El Sistema Wetland, también conocido como humedales construidos, es una tecnología de tratamiento de aguas residuales que utiliza procesos naturales y biológicos para purificar el agua. Consiste en la creación de áreas húmedas artificiales que imitan los procesos de depuración que ocurren en los humedales naturales, donde las plantas, los microorganismos y el sustrato juegan un papel clave en la eliminación de contaminantes del agua.

Según Vymazal (2011), "los humedales construidos son una opción atractiva y sostenible para el tratamiento de aguas residuales, ya que son eficaces en la eliminación de nutrientes, metales pesados y otros contaminantes del agua, y al mismo tiempo proporcionan beneficios ambientales y sociales adicionales". Este autor destaca la eficacia y la versatilidad de los sistemas de humedales construidos en el tratamiento de aguas residuales. Según Vymazal (2011) y Wu et al. (2015), los humedales construidos presentan ventajas significativas en términos de bajo consumo energético, facilidad de mantenimiento y adaptación a contextos rurales, lo cual resulta especialmente relevante en zonas agrícolas donde los recursos técnicos y económicos son limitados. En este sentido, su implementación no solo responde a una necesidad ambiental, sino también a criterios de sostenibilidad y accesibilidad tecnológica.

Además, la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA) afirma que "los humedales construidos son una tecnología probada y eficaz para el tratamiento de aguas residuales municipales e industriales, así como para la restauración de ecosistemas acuáticos degradados" (EPA, 2019). La EPA resalta la capacidad de los sistemas de humedales construidos para mejorar la calidad del agua y restaurar hábitats acuáticos.

En cuanto a la aplicación de los sistemas de Wetland en el ámbito agrícola, autores como Kadlec y Knight (1996) señalan que "los humedales construidos pueden ser utilizados de manera efectiva para el tratamiento de aguas residuales agrícolas, incluyendo el agua de riego contaminada, proporcionando una solución rentable y ambientalmente sostenible para mejorar la calidad del agua utilizada en la agricultura". Estos autores resaltan el potencial de los sistemas de Wetland para abordar los problemas de contaminación del agua en la agricultura.

A. Proceso del Sistema Wetland:

El Sistema Wetland se basa en la creación de humedales artificiales que imitan los procesos de depuración natural que ocurren en los humedales naturales. Estos humedales artificiales consisten en varias capas, que incluyen grava, arena y sustratos orgánicos, sobre los cuales se plantan especies de plantas acuáticas. El agua contaminada se hace circular a través de estas capas, donde ocurren una serie de procesos físicos, químicos y biológicos que eliminan los contaminantes (Vymazal, 2011).

Filtración física: La primera etapa del proceso implica la filtración física, donde las partículas suspendidas en el agua se retienen en los sustratos del humedal.

Procesos químicos: A medida que el agua pasa a través del humedal, ocurren procesos químicos, como la adsorción y la precipitación, que ayudan a eliminar los contaminantes químicos disueltos en el agua.

Degradación biológica: Las raíces de las plantas acuáticas y los microorganismos presentes en el sustrato del humedal descomponen los contaminantes orgánicos, como los compuestos de nitrógeno y fósforo, mediante procesos de biodegradación (Saeed y Sun, 2012).

Filtración final: Finalmente, el agua tratada sale del humedal, habiendo pasado por un proceso de purificación natural, y puede ser utilizada para riego u otros fines.

B. Características del Sistema Wetland:

- **Sostenibilidad:** Utiliza procesos naturales y no requiere el uso de productos químicos, lo que lo hace respetuoso con el medio ambiente y económicamente viable a largo plazo.

- **Flexibilidad:** Puede adaptarse a diferentes condiciones y tipos de contaminantes, lo que lo hace adecuado para una variedad de entornos y aplicaciones.

- **Bajo mantenimiento:** Una vez establecido, el sistema requiere un mantenimiento mínimo, lo que lo convierte en una opción práctica para áreas rurales o remotas.

- **Beneficios ambientales adicionales:** Además de tratar el agua contaminada, los humedales construidos proporcionan hábitats para la vida silvestre y contribuyen a la conservación de la biodiversidad.

2.2.3. Interpretación de Resultados para el Sistema Wetland:

La interpretación de los resultados del tratamiento de agua mediante el Sistema Wetland se basa en la comparación de los niveles de contaminantes antes y después del tratamiento. Por ejemplo, si se observa una reducción significativa en los niveles de coliformes fecales después de pasar por el humedal, esto indica una eficacia en la eliminación de microorganismos patógenos. Además, se pueden realizar análisis químicos para determinar la concentración de nutrientes como nitrógeno y fósforo, así como metales pesados y otros contaminantes químicos. Si se observa una disminución en estas concentraciones por debajo de los límites establecidos por las regulaciones ambientales, se considera que el tratamiento ha sido exitoso (Lui et al., 2018).

Los resultados pueden mostrar una reducción del 95% en la concentración de coliformes fecales y una disminución del 80% en los niveles de nitratos en el agua tratada en comparación con el agua cruda. Esto indica que el Sistema Wetland ha sido efectivo en la eliminación de contaminantes biológicos y químicos, lo que hace que el agua sea apta para el riego de cultivos.

Otros aspectos importantes a considerar en relación con los sistemas de Wetland incluyen el diseño y la construcción adecuados, la selección de plantas y

microorganismos adecuados para el tratamiento de contaminantes específicos, y la gestión y mantenimiento continuos para garantizar la eficacia a largo plazo del sistema.

2.2.4. Tratamiento de agua de canal de riego mediante el Sistema Wetland

El tratamiento de agua de canal de riego mediante el Sistema Wetland es una técnica que utiliza procesos naturales para purificar y mejorar la calidad del agua que se utiliza en sistemas de riego agrícola. Este sistema se basa en la creación de humedales artificiales, que imitan el funcionamiento de los humedales naturales, para filtrar y limpiar el agua (Almuktar et al. (2022).

El proceso comienza con la captación del agua del canal de riego, que puede contener diversos contaminantes, como sedimentos, nutrientes en exceso, microorganismos patógenos y otros compuestos indeseables. Esta agua se dirige hacia una serie de zonas delimitadas, llamadas celdas o lechos, que contienen una combinación de sustratos naturales como grava, arena, arcilla y plantas acuáticas.

En estas celdas, el agua atraviesa lentamente el sustrato y las raíces de las plantas, lo que permite la remoción de los contaminantes. Durante este proceso, se producen diversas reacciones físicas, químicas y biológicas que contribuyen a la depuración del agua. Por ejemplo, las plantas acuáticas absorben nutrientes como el nitrógeno y el fósforo, mientras que las bacterias presentes en el sustrato realizan procesos de descomposición que ayudan a eliminar materia orgánica y microorganismos patógenos.

A medida que el agua atraviesa el sistema Wetland, va mejorando su calidad, hasta alcanzar niveles adecuados para su uso en riego agrícola. Una vez purificada, el agua puede ser devuelta al canal de riego para su reutilización en los cultivos. El Sistema Wetland ofrece varias ventajas, incluyendo su bajo costo de construcción y mantenimiento, su eficacia en la remoción de contaminantes, su capacidad para integrarse con el entorno natural y su versatilidad para adaptarse a diferentes condiciones y necesidades locales.

2.2.5. Dimensiones para el tratamiento de agua para riego de plantas de tallo bajo mediante el sistema Wetland

Después de revisar toda la información recopilada y luego de sistematizarla, para abordar los aspectos éticos relacionados con el tratamiento del agua de canal de riego mediante el Sistema Wetland, se pueden considerar las siguientes dimensiones:

A. **Eficiencia de Tratamiento:** Esta dimensión se refiere a la capacidad del Sistema Wetland para reducir contaminantes y mejorar la calidad del agua de riego. Implica la evaluación del rendimiento del sistema en la eliminación de diversos contaminantes, incluyendo materia orgánica, sólidos suspendidos, nutrientes y metales pesados (Tanner, 2001). Una alta eficiencia de tratamiento garantiza que el agua de riego cumple con los estándares de calidad, protegiendo así la salud de las plantas, el suelo y, en última instancia, los consumidores de los productos agrícolas.

Indicador de reducción de contaminantes (DBO5, DQO, sólidos suspendidos, nitratos, fosfatos): Medición de la disminución de contaminantes específicos en el agua después del tratamiento.

Porcentaje de eliminación de metales pesados y otros contaminantes específicos: Evaluación de la efectividad del sistema en eliminar metales pesados, garantizando que los niveles estén por debajo de los límites permitidos (Maine et al., 2021).

Niveles de mejora en la calidad del agua de salida en comparación con el agua de entrada: Comparación de los parámetros de calidad del agua antes y después del tratamiento para determinar la eficiencia general del sistema.

B. **Sostenibilidad Ambiental:** Esta dimensión se enfoca en el impacto ambiental del Sistema Wetland, tanto en términos de su implementación como de su operación continua. Incluye la evaluación de la conservación de la biodiversidad, la reducción de la contaminación en el entorno y el uso de recursos naturales y materiales sostenibles (Ning et al., 1997). La sostenibilidad ambiental asegura que el sistema no solo trate el agua de manera efectiva, sino que también contribuye a

la conservación del ecosistema local, promoviendo prácticas agrícolas sostenibles y protegiendo el medio ambiente.

Impacto en la biodiversidad local (aumento de especies vegetales y animales): Monitoreo de la diversidad y abundancia de especies en y alrededor del sistema Wetland.

Reducción de la contaminación del suelo y el agua circundantes: Evaluación de la disminución de la contaminación en el entorno inmediato del sistema Wetland.

Uso de recursos naturales y materiales locales en la construcción y mantenimiento del sistema: Análisis del origen y sostenibilidad de los materiales utilizados para asegurar un mínimo impacto ambiental.

C. **Costos y Viabilidad Económica:** Esta dimensión analiza los aspectos financieros del Sistema Wetland, incluyendo los costos de instalación, operación y mantenimiento. También evalúa la rentabilidad en comparación con otros métodos de tratamiento y los beneficios económicos a largo plazo. La viabilidad económica es esencial para asegurar que el sistema sea asequible y sostenible a largo plazo. Un análisis financiero completo ayuda a determinar si el Sistema Wetland es una inversión viable que proporciona beneficios económicos significativos a la comunidad (Betanzo et al., 2025).

Costos iniciales de instalación y costos operativos continuos: Análisis financiero de los gastos necesarios para la implementación y mantenimiento del sistema.

Comparación de costos entre el sistema Wetland y otros métodos de tratamiento de agua: Estudio comparativo para determinar la rentabilidad del sistema Wetland en relación con alternativas.

Evaluación del retorno de inversión y beneficios económicos a largo plazo para la comunidad: Análisis de los beneficios económicos a largo plazo derivados de la implementación del sistema Wetland, incluyendo ahorros en costos de tratamiento y mejoras en la productividad agrícola.

D. Calidad del agua para el riego

La calidad del agua para riego se refiere a la idoneidad del agua utilizada en la irrigación agrícola, teniendo en cuenta su composición física, química y biológica. Este concepto abarca la evaluación de diversos parámetros, como pH, salinidad, contenido de nutrientes, presencia de metales pesados, materia orgánica, microorganismos patógenos, entre otros. Un agua de riego de alta calidad es fundamental para garantizar el crecimiento saludable de los cultivos, prevenir la acumulación de sales en el suelo y promover la sostenibilidad ambiental (Inga et al., 2024).

Food and Agriculture Organization (FAO), proporciona directrices y recomendaciones sobre la calidad del agua para riego en su publicación "Directrices para el uso del agua en la agricultura" (FAO Irrigation and Drainage). Este documento ofrece criterios técnicos y metodologías para evaluar la idoneidad del agua para riego. Por ejemplo, la FAO establece que la calidad del agua para riego debe cumplir con ciertos estándares para garantizar la salud de los cultivos y evitar la salinización del suelo. Además, la FAO proporciona herramientas para el monitoreo y la evaluación de la calidad del agua en sistemas de riego.

United States Department of Agriculture (USDA), ha desarrollado el "Informe de calidad del agua para la agricultura" que aborda los requisitos de calidad del agua para diferentes usos agrícolas, incluido el riego. Proporciona información detallada sobre los parámetros de calidad del agua y sus efectos en los cultivos. Por ejemplo, el USDA establece límites para la concentración de sales y metales pesados en el agua de riego, ya que niveles elevados pueden afectar negativamente el crecimiento de las plantas y la calidad de los productos agrícolas.

El Instituto Nacional de Investigación Agraria (INIA), suele realizar investigaciones sobre la calidad del agua para riego en diferentes regiones. Sus estudios contribuyen al conocimiento de las características del agua y sus implicaciones para la agricultura. Por ejemplo, el INIA puede evaluar la presencia de contaminantes orgánicos e inorgánicos en el agua de riego y su impacto en la salud de los cultivos y del suelo.

Numerosos estudios académicos han abordado la calidad del agua para riego desde diversas perspectivas. Autores como Smith et al. (2016) en su artículo "Impacto del agua de riego en la producción agrícola" exploran los efectos de la calidad del agua en la productividad de los cultivos y en la salud del suelo. Estos estudios suelen utilizar técnicas avanzadas de análisis y modelado para evaluar el impacto de diferentes parámetros de calidad del agua en la agricultura.

2.2.6. Plantas de tallo bajo

Las plantas de tallo bajo, también conocidas como plantas de porte bajo o rastreras, son aquellas cuya altura es relativamente baja en comparación con otras especies vegetales. Estas plantas son comunes en diversos ecosistemas, desde praderas hasta selvas tropicales, y desempeñan roles importantes en la ecología y la agricultura (Almuktar et al., 2022).

Las plantas de tallo bajo, caracterizadas por su altura reducida, raíces superficiales y capacidad de propagación vegetativa, desempeñan un papel crucial en diversos ámbitos, desde la agricultura hasta la restauración de ecosistemas degradados. En la agricultura, estas plantas se utilizan como cultivos de cobertura para mejorar la estructura del suelo, fijar nitrógeno atmosférico y proteger los cultivos principales contra plagas y enfermedades. Además, en la jardinería y el paisajismo, se emplean como cubiertas de suelo para controlar la erosión, mejorar la estética del paisaje y reducir la necesidad de mantenimiento (Almuktar et al., 2022).

La propagación y establecimiento de estas plantas implica diversas prácticas, como la siembra directa de semillas, la plantación de esquejes y la gestión adecuada del suelo y el agua. En sistemas agrícolas, pueden ser sembradas en asociación con cultivos principales para proporcionar servicios ecosistémicos, como la fijación de nitrógeno y la supresión de malas hierbas. Además, en la restauración de ecosistemas degradados, las plantas de tallo bajo son fundamentales para rehabilitar áreas afectadas por actividades humanas, como la minería y la tala (Almuktar et al., 2022).

Autores y entidades como Smith et al. (2018), el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA) y el Centro de Investigación en Ecología (CIE) han

destacado la importancia de estas plantas en la agricultura sostenible y la conservación del medio ambiente. Sus investigaciones y proyectos han contribuido al conocimiento y la aplicación de prácticas que promueven el uso y la gestión adecuada de las plantas de tallo bajo en diversos contextos agrícolas y ambientales.

FAO (Food and Agriculture Organization): Aunque la FAO no tiene una publicación específica sobre plantas de tallo bajo, sus informes técnicos a menudo incluyen información sobre especies vegetales utilizadas en la agricultura. Por ejemplo, en el informe "El cultivo de cobertura como práctica de conservación del suelo", la FAO destaca el uso de leguminosas de porte bajo, como Trifolium repens (trébol blanco), como cultivos de cobertura debido a su capacidad para fijar nitrógeno y mejorar la estructura del suelo.

Herrero, M. (2007). Manual de Plantas de Bajo Crecimiento: En este manual, Herrero describe plantas de tallo bajo como aquellas cuya altura no supera los 30 centímetros. Ejemplos comunes incluyen especies de la familia Poaceae, como Festuca rubra (festuca roja), utilizada como césped ornamental en jardinería, y especies de la familia Fabaceae, como Trifolium pratense (trébol rojo), cultivado como forraje en sistemas agrícolas.

Gómez, M. (2015). Guía Ilustrada de Plantas de Tallo Bajo: En esta guía, Gómez presenta imágenes y descripciones detalladas de diversas plantas de tallo bajo, incluyendo su hábitat natural, sus características morfológicas y su uso en la jardinería y la agricultura. Por ejemplo, se destacan plantas tapizantes como Sedum acre (siempreviva amarilla), ampliamente utilizada para cubrir suelos desnudos en paisajismo.

Revista Horticultura: En artículos recientes de esta revista, se ha discutido el cultivo de especies de tallo bajo en sistemas de agricultura urbana y periurbana. Autores como García et al. (2020) han explorado el potencial de plantas rastreras como Fragaria vesca (fresa silvestre) y Mentha spicata (menta verde) para la producción de alimentos frescos en entornos urbanos.

Centro de Investigación Agrícola (CIA): El CIA ha llevado a cabo estudios sobre el uso de plantas de tallo bajo en la restauración de ecosistemas degradados. Investigaciones como el proyecto "Revegetación con especies de porte bajo en áreas afectadas por incendios forestales" han demostrado la eficacia de especies como Baccharis pilularis (arbusto coyote) para estabilizar suelos y promover la sucesión vegetal en áreas quemadas.

Asi mismo Tanner (2001), menciona que el carrizo es la plantas actúan como ingenieros ecosistémicos, ya que modifican las condiciones físicas y químicas del medio, favoreciendo la oxigenación del sustrato y el desarrollo de comunidades microbianas. Además, el sistema radicular del carrizo facilita la filtración del agua y la retención de partículas, contribuyendo a la remoción de contaminantes, asi mismo Stefanakis (2018) destaca que esta especie presenta alta resistencia a condiciones adversas y una notable capacidad de adaptación, lo que la convierte en una opción eficiente para el tratamiento de aguas residuales en entornos agrícolas.

A. Calidad del agua para el riego de plantas de tallo bajo

La calidad del agua para el riego de plantas de tallo bajo es un aspecto fundamental en la agricultura, ya que el agua utilizada puede afectar significativamente el crecimiento, la salud y la productividad de estos cultivos. Esta calidad se evalúa mediante una serie de parámetros físicos, químicos y microbiológicos que determinan si el agua es apta para su uso en el riego sin causar daños a las plantas o al suelo (Francini et al., 2018).

B. Proceso de Evaluación:

- **Análisis Físico-Químico:** Se realizan pruebas para medir el pH, la conductividad eléctrica, la salinidad, la dureza del agua, la presencia de metales pesados y otros contaminantes químicos que puedan ser perjudiciales para las plantas.

- **Análisis Microbiológico:** Se evalúa la presencia de microorganismos patógenos, como bacterias, virus y parásitos, que pueden causar enfermedades en las plantas o contaminar los productos agrícolas.

- **Interpretación de Resultados:** Los resultados de los análisis se comparan con los estándares y regulaciones establecidos para la calidad del agua para riego, determinando si el agua es adecuada para su uso en la irrigación de cultivos de tallo bajo.

2.2.7. Características Deseables del Agua:

- pH Adecuado: Un pH dentro del rango óptimo, es crucial para garantizar la disponibilidad de nutrientes en el suelo y prevenir problemas de toxicidad o deficiencia de minerales en las plantas.

- Baja Salinidad: Un contenido de sales soluble en agua bajo es preferible para evitar problemas de acumulación de sales en el suelo, lo que puede causar estrés hídrico en las plantas.

- Libre de Contaminantes: El agua debe estar libre de contaminantes químicos y biológicos que puedan afectar la salud de las plantas, la calidad de los productos agrícolas o el medio ambiente.

A. Características físicas, químicas y biológicas del agua tratada para riego

El agua para riego tratada presenta una serie de características físicas, químicas y biológicas que la hacen adecuada para su uso en la agricultura. Estas características pueden variar según el proceso de tratamiento utilizado y las condiciones específicas de la fuente de agua (Francini et al., 2018). A continuación, se describen algunas de estas características:

B. Características Físicas:

- **Turbidez:** La turbidez se refiere a la claridad del agua y está relacionada con la presencia de partículas en suspensión. El agua para riego tratada suele tener una baja turbidez, lo que mejora su calidad y facilita su aplicación a los cultivos.

- **Color:** El color del agua puede deberse a la presencia de materia orgánica disuelta o suspendida. El tratamiento del agua para riego busca reducir el color para que sea más transparente y estéticamente aceptable.

- **Temperatura:** La temperatura del agua tratada puede variar según la fuente de agua y el proceso de tratamiento. Es importante que la temperatura del agua no sea extremadamente alta o baja, ya que puede afectar el crecimiento de los cultivos y la actividad biológica en el suelo.

C. Características Químicas:

- **pH:** El pH del agua tratada debe estar dentro de un rango óptimo para garantizar su compatibilidad con los suelos y los cultivos. Se busca que el pH sea ligeramente ácido o neutro para evitar problemas de toxicidad o precipitación de minerales.

- **Conductividad eléctrica (CE):** La CE del agua indica la cantidad de sales disueltas y minerales presentes. Un nivel adecuado de CE es importante para evitar problemas de salinidad en el suelo y garantizar un suministro equilibrado de nutrientes a las plantas.

- **Contaminantes:** El agua tratada debe estar libre de contaminantes químicos como metales pesados, pesticidas y compuestos orgánicos nocivos. Los procesos de tratamiento, como la filtración y la desinfección, se utilizan para eliminar o reducir la presencia de estos contaminantes.

D. Características Biológicas:

- **Microorganismos:** El agua para riego tratada debe estar libre de microorganismos patógenos que puedan causar enfermedades en las plantas o contaminar los cultivos. Los procesos de desinfección, como la cloración o la irradiación ultravioleta, se utilizan para eliminar bacterias, virus y otros microorganismos no deseados.

- **Nutrientes:** El agua tratada puede contener nutrientes beneficiosos para los cultivos, como nitrógeno, fósforo y potasio. Estos nutrientes pueden provenir de fertilizantes orgánicos disueltos en el agua durante el tratamiento.

E. Estándares de calidad ambiental para agua de riego

Según el D.S. 004-2017 MINAM, sobre los estándares de calidad ambiental, menciona los límites para la calidad del agua destinada al riego, inmersos en la

categoría 3 (riego de vegetales y bebida de animales), sub categoría D1 (riego de vegetales) específicamente en "agua para riego no restringido", donde, se entiende por esta categoría a las aguas cuya calidad es adecuada para su utilización en el riego de cultivos alimentarios que se consumen crudos, tales como hortalizas y plantas frutales de bajo porte; así como en el riego por aspersión de árboles y arbustos frutales, en los que el fruto o las partes comestibles pueden entrar en contacto directo con el agua, incluso en especies de tallo alto, de igual modo, comprende su uso en parques públicos, campos deportivos, áreas verdes, plantas ornamentales y otros tipos de cultivos, donde, los valores límite establecidos pueden variar según el parámetro evaluado; a continuación, se presentan los estándares (MINAM, 2017).

Tabla 3

Límites Máximos Permisibles (LMP) de parámetros físico-químicos para agua destinada al riego de vegetales (Categoría D1 – MINAM)

Parámetro	Unidad	Agua para riego no restringido
Aceites y grasas	mg/L	5
Bicarbonatos	mg/L	518
Cianuro WAD	mg/L	0,1
Cloruros	mg/L	500
Color	Color verdadero (Escala Pt/Co)	100
Conductividad	µS/cm	2 500
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO_5)	mg/L	15
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	mg/L	40
Detergentes (SAAM)	mg/L	0,2
Fenoles	mg/L	0,002
Fluoruros	mg/L	1
Nitratos (NO_3^--N) + Nitritos (NO_2^--N)	mg/L	100
Nitritos (NO_2^--N)	mg/L	10
Oxígeno disuelto (valor mínimo)	mg/L	≥ 4
Potencial de hidrógeno (pH)	Unidad de pH	6,5 – 8,5
Sulfatos	mg/L	1 000
Temperatura	°C	Δ 3

Nota. Adaptado de los Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para Agua – Categoría 3: Riego de vegetales y bebida de animales, Ministerio del Ambiente (MINAM), Perú.

Tabla 4

Límites Máximos Permisibles (LMP) de metales para agua destinada al riego de vegetales (Categoría D1 – MINAM).

Parámetro	Unidad	Agua para riego no restringido
Arsénico	mg/L	0,1
Bario	mg/L	0,7
Berilio	mg/L	0,1
Boro	mg/L	1
Cadmio	mg/L	0,01
Cobre	mg/L	0,2
Cobalto	mg/L	0,05
Cromo total	mg/L	0,1
Hierro	mg/L	5
Litio	mg/L	2,5
Magnesio	mg/L	**
Manganeso	mg/L	0,2
Mercurio	mg/L	0,001
Níquel	mg/L	0,2
Plomo	mg/L	0,05
Selenio	mg/L	0,02
Zinc	mg/L	2

Nota. Adaptado de los Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para Agua – Categoría 3: Riego de vegetales y bebida de animales, Ministerio del Ambiente (MINAM).

Tabla 5

Límites Máximos Permisibles (LMP) de compuestos orgánicos, plaguicidas y parámetros microbiológicos para agua destinada al riego de vegetales (Categoría D1 – MINAM)

Parámetro	Unidad	Agua para riego no restringido	Agua para riego restringido
Compuestos orgánicos			
Bifenilos Policlorados (PCB)	µg/L	0,04	0,045
Plaguicidas			
Paratión	µg/L	35	35
Aldrín	µg/L	0,004	0,7
Clordano	µg/L	0,006	7
Dicloro Difenil Tricloroetano (DDT)	µg/L	0,001	30
Dieldrín	µg/L	0,5	0,5
Endosulfán	µg/L	0,01	0,01
Endrín	µg/L	0,004	0,2
Heptacloro y Heptacloro Epóxido	µg/L	0,01	0,03
Lindano	µg/L	4	4
Carbamatos			
Aldicarb	µg/L	1	11
Parámetros microbiológicos y parasitológicos			
Coliformes termotolerantes	NMP/100 mL	1 000	2 000
Escherichia coli	NMP/100 mL	1 000	**
Huevos de helmintos	Huevo/L	1	1

Nota. Adaptado de los Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para Agua – Categoría 3: Riego de vegetales y bebida de animales, Ministerio del Ambiente (MINAM).

F. Dimensiones de evaluación específica para la calidad del agua para el riego de plantas de tallo bajo

Características físicas - químicas

Las características físico-químicas del agua son los parámetros físicos y químicos medibles que determinan la calidad del agua y su aptitud para usos específicos como el riego agrícola, incluyendo variables como el potencial de hidrógeno (pH), la conductividad eléctrica (CE), los sólidos disueltos totales y la concentración de iones químicos que pueden influir en la salinidad, sodicidad y toxicidad del medio, donde estos parámetros se comparan con valores establecidos en los ECA para agua, para evaluar su idoneidad (MINAM, 2017).

Características de los metales

Los metales pesados en el agua de riego, como el arsénico, cadmio, plomo y mercurio, son componentes peligrosos que pueden contaminar el suelo y los cultivos, afectando tanto la salud humana como la de los ecosistemas, en la cual, estos metales son tóxicos incluso en bajas concentraciones y pueden bioacumularse en los tejidos vegetales, representando un riesgo para la cadena alimentaria, donde el ECA establece límites para la concentración de estos metales en el agua de riego con el fin de evitar la contaminación del suelo y los alimentos (MINAM, 2017).

Características de los plaguicidas

Los plaguicidas en el agua para riego son sustancias químicas utilizadas para controlar plagas en los cultivos, ya que, la presencia de residuos de plaguicidas en el agua puede ser perjudicial tanto para la salud de las plantas como para el medio ambiente, ya que estos compuestos pueden acumularse en el suelo y en los productos agrícolas, afectando su calidad y seguridad, donde el ECA, establece los niveles de plaguicidas en el agua para riego, que deben mantenerse por debajo de ciertos límites para garantizar la salud pública y la sostenibilidad de los ecosistemas (MINAM, 2017).

Características componentes microbiológicos y parasitológicos

Los componentes microbiológicos y parasitológicos en el agua para riego son cruciales para evaluar la calidad del agua, ya que su presencia puede representar riesgos para la salud humana, animal y la vegetación, donde los principales contaminantes microbiológicos se encuentran las bacterias patógenas como Escherichia coli y Salmonella, que muestran contaminación fecal, así como virus, huevos de helmintos y protozoos como Giardia y Cryptosporidium, que pueden ser transmitidos a los cultivos y al consumidor final (MINAM, 2017).

2.3. Términos básicos

a. Calidad del agua

La calidad del agua comprende las características físicas, químicas, biológicas y microbiológicas que determinan su aptitud para un uso específico, como el riego agrícola, considerando que dichas propiedades deben cumplir con estándares establecidos para proteger la salud humana y el ambiente (Ministerio del Ambiente [MINAM], 2017).

b. Sistema Wetland

Un sistema Wetland es una tecnología de tratamiento basada en procesos naturales que utiliza vegetación, microorganismos y un medio filtrante para remover contaminantes presentes en el agua residual, permitiendo mejorar su calidad mediante procesos físicos, químicos y biológicos (Kadlec & Wallace, 2009).

c. Flujo subsuperficial horizontal

El flujo subsuperficial horizontal corresponde a un tipo de humedal construido en el que el agua circula horizontalmente a través de un lecho poroso debajo de la superficie, favoreciendo la eliminación de materia orgánica, nutrientes y microorganismos patógenos (Vymazal, 2018).

d. Remoción de contaminantes

La remoción de contaminantes es el proceso mediante el cual se reduce la concentración de sustancias físicas, químicas o biológicas presentes en el agua hasta alcanzar niveles aceptables para un uso determinado (Metcalf & Eddy, 2014).

e. Nitratos (NO_3^-)

Los nitratos son compuestos nitrogenados altamente solubles que forman parte del ciclo del nitrógeno y cuya presencia en concentraciones elevadas puede afectar la calidad del agua y favorecer procesos de eutrofización (Organización Mundial de la Salud [OMS], 2022).

f. Nitritos (NO_2^-)

Los nitritos constituyen una forma intermedia del nitrógeno durante los procesos de nitrificación y desnitrificación; su presencia elevada en el agua representa un indicador de contaminación y puede generar efectos adversos para la salud (OMS, 2022).

g. Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO)

La Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO) es un indicador que expresa la cantidad de oxígeno requerida por los microorganismos para degradar la materia orgánica biodegradable presente en el agua durante un periodo determinado (Metcalf & Eddy, 2014).

h. Parámetros microbiológicos

Los parámetros microbiológicos son indicadores utilizados para evaluar la contaminación biológica del agua mediante la presencia de microorganismos patógenos o indicadores fecales, como Escherichia coli y huevos de helmintos (Organización Mundial de la Salud, 2022).

i. Riego agrícola

El riego agrícola consiste en la aplicación artificial de agua a los cultivos con

el propósito de satisfacer sus requerimientos hídricos y mantener un adecuado desarrollo y productividad agrícola (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura [FAO], 2021).

j. Eficiencia de remoción

La eficiencia de remoción es el porcentaje de reducción de la concentración de un contaminante obtenido después de un proceso de tratamiento, siendo uno de los principales indicadores para evaluar el desempeño de tecnologías de tratamiento de aguas (Kadlec & Wallace, 2009).

CAPÍTULO III
METODOLOGÍA

3.1. Tipo y nivel de investigación

3.1.1. Tipo de investigación

La investigación es de tipo aplicada con enfoque cuantitativo, caracterizado por su metodología específica y la aplicación de pruebas a hipótesis y teorías establecidas. Siguiendo la perspectiva de Hernández y Mendoza (2018), este tipo de investigación se distingue por su uso de datos numéricos y análisis estadísticos rigurosos, de igual modo buscar una solución a un problema.

En cuanto a su finalidad, la presente investigación se clasifica como sustantiva, según el marco conceptual de Sánchez y Reyes (2006), donde este tipo de estudio se enfoca en describir, explicar, predecir o retro decir la realidad, con el objetivo de identificar principios y leyes generales que contribuyan a la construcción de una teoría científica sólida y coherente.

De esta manera, la investigación cuantitativa sustantiva adopta un enfoque sistemático y objetivo para explorar fenómenos, recopilar datos numéricos y analizarlos estadísticamente, con el propósito de generar conocimiento válido y generalizable sobre la realidad estudiada.

3.1.2. Nivel de investigación

El propósito de este estudio abarca tanto la descripción detallada como el análisis exhaustivo de las relaciones entre las variables en estudio. Por lo tanto, se clasifica como un estudio de nivel descriptivo y explicativo. Según Hernández y Mendoza (2018), las investigaciones explicativas tienen como objetivo identificar las causas subyacentes de los eventos, establecer conexiones causales entre diversas variables o fenómenos, y proporcionar un análisis comprehensivo de los problemas en consideración.

En este contexto, el enfoque descriptivo permite una presentación detallada y sistemática de las características y comportamientos de las variables estudiadas. Por

otro lado, el enfoque explicativo busca comprender las relaciones causales entre estas variables, explorando las razones detrás de los fenómenos observados.

Por lo tanto, este estudio busca no solo describir fenómenos, sino también comprender las razones y relaciones que subyacen a ellos, lo que implica un análisis más profundo y una interpretación de los resultados en un contexto más amplio.

3.2. Diseño de la investigación

El estudio adoptó un diseño experimental del tipo preexperimental, según lo descrito por Hernández y Mendoza (2018), en la cual, este diseño se emplea para evaluar el efecto de una intervención o tratamiento en una variable dependiente, aunque sin la presencia de un grupo de control equivalente.

En un diseño preexperimental típico, se lleva a cabo una única intervención o tratamiento en un grupo de participantes, y luego se observa el efecto en una variable dependiente, donde este diseño implica la medición inicial de la variable dependiente antes de la intervención (pre test), la administración de la intervención y, finalmente, una medición posterior para evaluar cualquier cambio en la variable dependiente (pos test).

La figura que se muestra a continuación representa el esquema de diseño de este estudio, el cual refleja la secuencia de eventos descrita anteriormente y cómo se relacionan entre sí en el contexto de la investigación.

GE: O_1 - X - O_2

Donde:

GE: Grupo experimental (agua de canal de riego).

O_1: Pre test, medición de la calidad del agua, antes de aplicar el sistema Wetland.

O_2: Pos test, medición de la calidad del agua, después de aplicar el sistema Wetland.

X: Aplicación del sistema Wetland.

3.3. Método de investigación

3.3.1. Método inductivo

El método inductivo parte del análisis de hechos particulares para establecer conclusiones de carácter general. En la presente investigación, este enfoque se aplicó mediante la evaluación de los parámetros físico-químicos y microbiológicos del agua destinada al riego antes y después de su tratamiento con un sistema Wetland de flujo subsuperficial horizontal. A partir de los resultados obtenidos en los análisis de laboratorio, se identificaron los cambios en la concentración de los contaminantes y el comportamiento de los diferentes indicadores de calidad del agua. Con base en esta evidencia, se formularon conclusiones generales acerca de la eficacia del sistema Wetland para mejorar la calidad del agua de riego y su potencial aplicación como una alternativa sostenible para el tratamiento de aguas en zonas rurales.

3.3.2. Método deductivo

El método deductivo consiste en partir de una hipótesis general para comprobar su validez mediante el análisis de evidencias obtenidas durante la investigación. En el presente estudio, este enfoque permitió verificar la eficacia del sistema Wetland de flujo subsuperficial horizontal a partir de los resultados obtenidos en los análisis físico-químicos y microbiológicos del agua de riego.

Formulación de la hipótesis:

La investigación partió de la hipótesis de que el sistema Wetland de flujo subsuperficial horizontal mejora significativamente la calidad físico-química y microbiológica del agua destinada al riego de cultivos de tallo bajo, mediante la reducción de la concentración de contaminantes hasta alcanzar valores compatibles con los estándares de calidad ambiental para agua de riego.

Comprobación de la hipótesis:

La hipótesis fue evaluada mediante la comparación de los resultados obtenidos antes y después del tratamiento (pretest y postest), utilizando análisis de laboratorio para determinar las variaciones en los parámetros físico-químicos y microbiológicos

del agua. Posteriormente, los datos fueron analizados estadísticamente para establecer si las diferencias observadas eran significativas y atribuibles al funcionamiento del sistema Wetland.

Conclusión:

Con base en la evidencia obtenida, se aceptó o rechazó la hipótesis planteada, permitiendo determinar el nivel de eficacia del sistema Wetland en la mejora de la calidad del agua para riego agrícola. Los resultados obtenidos proporcionaron sustento científico para responder al problema de investigación y aportar conocimientos sobre la aplicación de tecnologías naturales para el tratamiento de aguas en zonas rurales.

En conjunto, la aplicación de los métodos inductivo y deductivo permitió desarrollar la investigación de manera integral. Mediante el método inductivo se identificaron los cambios y tendencias observados en la calidad del agua a partir de los datos experimentales, mientras que el método deductivo posibilitó comprobar la hipótesis formulada y establecer conclusiones científicas respecto a la eficacia del sistema Wetland de flujo subsuperficial horizontal como alternativa sostenible para el tratamiento de aguas destinadas al riego agrícola.

3.4. Procedimiento de recolección de datos, población y muestra

3.4.1. Población

Según Hernández y Mendoza (2018), la población en una investigación científica se define como el conjunto total de elementos, unidades o casos que comparten características específicas y que constituyen el universo sobre el cual se desea realizar inferencias, de igual modo, la población es el conjunto de todos los casos que concuerdan con determinadas especificaciones, delimitados por criterios espaciales, temporales y conceptuales establecidos por el investigador, en tal efecto, la población representa la totalidad del fenómeno de estudio y constituye el marco de referencia del cual se extrae la muestra, permitiendo que los resultados obtenidos puedan generalizarse dentro de los límites previamente definidos.

En la presente investigación, la población estuvo conformada por el volumen total de agua proveniente del canal de riego donde se implementó el sistema Wetland.

3.4.2. Muestra

Según Hernández y Mendoza (2018), la muestra es el subconjunto de la población seleccionado para obtener información específica que permita analizar el fenómeno de estudio y establecer conclusiones válidas dentro del marco de la investigación, donde, en los diseños experimentales, especialmente en estudios preexperimentales, la muestra se selecciona considerando criterios técnicos, operativos y de viabilidad, asegurando coherencia con los objetivos y el procedimiento metodológico planteado.

En la presente investigación, la muestra estuvo conformada por 12 muestras de agua de riego recolectadas durante el periodo de estudio, distribuidas en 6 muestras antes de la implementación del sistema Wetland (pretest) y 6 muestras después del tratamiento (postest), con una frecuencia de muestreo mensual, en la que, las muestras fueron tomadas en los puntos de entrada y salida del sistema, siguiendo protocolos técnicos de monitoreo de calidad de agua.

3.5. Técnicas e instrumentos de recolección de datos

La investigación planteada se sustentó en la técnica de la observación científica, según lo señalado por Barriga (2008), la cual se concibe como un procedimiento ordenado, intencional y selectivo que permite al investigador recolectar información pertinente para dar respuesta al problema de investigación, en la que, esta técnica se orienta a la descripción y comprensión de grupos o colectivos, a partir del análisis de las experiencias, comportamientos y fenómenos que estos desarrollan en su contexto.

En cuanto a los instrumentos de recolección de datos, según Abanto (2013), estos son medios que facilitan la obtención de información, donde, este estudio, se empleará las fichas de ensayos de laboratorio antes y después de aplicar el Sistema

Wetland. donde, estas fichas de ensayos permitirán registrar de manera estructurada y detallada las observaciones realizadas durante el estudio, lo que facilitará el análisis posterior de los datos recopilados.

3.6. Análisis y procesamiento de datos

Primeramente, se realizó la ejecución del tratamiento del Sistema Wetland, de la siguiente manera:

Cálculo del tamaño y capacidad humedal

El humedal artificial diseñado tiene como objetivo tratar un volumen de agua suficiente para el riego de plantas de tallo bajo, en la cual, el caudal de agua necesario para este riego se calcula considerando que cada planta de tallo bajo requiere aproximadamente 4 litros de agua al día, donde con 1000 plantas a regar, se obtiene un total de 4000 litros/día (4 m^3/día) de agua a tratar.

Para dimensionar el humedal, se emplea la siguiente formula básica:

$$A = \frac{Q}{C}$$

Donde:

A : área del humedal (m^2).

Q : caudal de agua a tratar (m^3/día).

C : capacidad de tratamiento por metro cuadrado del humedal (m^3/m^2/día).

Con una capacidad de tratamiento de 0.25 m^3/m^2/día, se calcula el siguiente valor:

Para mejorar la eficiencia del tratamiento, el lecho del humedal ha sido diseñado con 24 m^2, ya que se ha aumentado la longitud del lecho a 6 metros para favorecer un mayor tiempo de contacto del agua con las raíces de las plantas.

$$A = \frac{4m^3}{0.25\ m^3/m^2/dia} \equiv 16m^2$$

Para mejorar la eficiencia del tratamiento, el lecho del humedal ha sido diseñado con 24 m², ya que se ha aumentado la longitud del lecho a 6 metros para favorecer un mayor tiempo de contacto del agua con las raíces de las plantas.

Tiempo de retención hidráulica

El tiempo de retención hidráulica con la siguiente fórmula:

$$TRH = \frac{V}{Q}$$

Datos:

V= Volumen efectivo del humedal (m3)

Q= Caudal de entrada

Cálculo del volumen total del humedal

$$Vtotal = \text{Área } x \text{ Profundidad}$$

$$Vtotal = 24m2 \; x \; 0.60m$$

$$Vtotal = 14.4m3$$

Volumen efectivo

El coeficiente de porosidad (n) está entre 0.30 y 0.40, se va considerar 0.30

$$Vefectivo = Vtotal \times n$$

$$Vtotal = 14.4 \times 0.35$$

$$Vtotal = 5.04m3$$

El tiempo de retención hidráulica es:

$$TRH = \frac{5.04}{4} \qquad TRH = 1.26 \; dias = 30.24 \; horas$$

3.6.1. Criterios de diseño

El diseño del humedal se basa en los siguientes criterios clave:

A. **Clima local:** La Comunidad de Compañía Baja, en el distrito de Pacaycasa, tiene un clima templado, con lluvias moderadas y temperaturas que varían entre 15°C y 25°C. Estas condiciones influyen en la disponibilidad de agua para el riego y en la capacidad del humedal para filtrar contaminantes.

B. **Tipo de suelo:** El suelo en la zona es predominantemente arenoso, lo que favorece el drenaje, pero requiere un sustrato adicional para asegurar que el agua no se escape rápidamente y pueda ser filtrada eficazmente.

C. **Caudal de agua:** Se ha determinado que el caudal de agua necesario para el riego de las 1000 plantas es de 4000 litros/día, lo que define el tamaño y la capacidad de tratamiento del humedal.

D. **Requerimientos de riego:** Se ha diseñado el humedal para asegurar que el agua tratada sea suficiente para el riego continuo de las plantas de tallo bajo, manteniendo la calidad del agua a lo largo del tiempo.

E. **Plantas:** El carrizo ha sido elegido por su capacidad para mejorar la calidad del agua a través de la absorción de nutrientes y contaminantes, de igual manera el carrizo tiene un crecimiento rápido y es altamente adaptable a diversas condiciones climáticas.

    a. **Densidad de plantación:** Se plantará 3 plantas por metro cuadrado en un espacio de 30-40 cm entre cada planta.

    b. **Crecimiento:** El carrizo creció de manera vertical y horizontal, cubriendo el lecho del humedal y promoviendo la filtración de agua

F. **Sistema de drenaje:** Se instalarán tuberías perforadas en la parte inferior del lecho del humedal para permitir el drenaje controlado del agua, donde estas tuberías están diseñadas para mantener un flujo uniforme de agua a través del sustrato y

evitar el estancamiento. El sistema de drenaje se ubicará a una profundidad de 5-10 cm del fondo del lecho.

3.6.2. Dimensionamiento del lecho del humedal:

El lecho del humedal ha sido diseñado con las siguientes dimensiones:

Largo: 6 metros

Ancho: 4 metros

Área total: 24 m²

Profundidad: 60 cm

Gradiente de flujo: 0.5%, para asegurar un flujo lento y controlado.

A nivel de laboratorio, se llevó a cabo la caracterización del agua de riego, lo cual implico determinar los componentes orgánicos volátiles, junto con todas las características biológicas, físicas y químicas pertinentes, donde, las muestras de agua se recolectarán en la Comunidad de Compañía Baja del distrito de Pacaycasa, provincia de Huamanga, concretamente del canal de riego ubicado en dicha zona, donde stas muestras fueron transportadas al laboratorio en Ayacucho para su análisis detallado.

Después de la recolección de los resultados obtenidos del análisis de laboratorio fueron sistematizados en una base de datos elaborada en Microsoft Excel, donde se organizó la información por cada parámetro evaluado, consignando la concentración inicial del agua (antes del tratamiento), la concentración final (después del tratamiento en el Sistema Wetland) y el valor de referencia establecido en los Estándares de Calidad Ambiental para Agua destinados al riego agrícola, en la que, esta estructuración permitió realizar una comparación directa entre los valores iniciales y finales respecto a los límites permisibles, verificando el grado de cumplimiento normativo antes y después del tratamiento.

Luego, se procedió al cálculo del porcentaje de remoción de cada parámetro contaminante con la finalidad de cuantificar la eficiencia del sistema, empleando la expresión matemática:

$$\%\ Remoción = \left\{\frac{(Ci - Cf)}{Ci}\right\} x100$$

Donde Ci representa la concentración inicial y Cf la concentración final del parámetro evaluado, en la que, este cálculo fue ejecutado en Excel mediante la aplicación de la fórmula correspondiente en cada fila de la base de datos, permitiendo obtener el nivel de reducción porcentual de los contaminantes vigentes.

3.7. Aspectos éticos de la investigación

Para recoger la información de la muestra dada, se ha tenido el consentimiento de la Comunidad de Compañía Baja del distrito de Pacaycasa, provincia de Huamanga, se adjuntará las respectivas constancias de autorización y aplicación de los mismos.

CAPÍTULO IV
RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Caracterización del agua para riego de la entrada y salida del sistema Wetland

Primeramente, los procesos que pasaron para el tratamiento del agua para riego fueron los siguientes, como se muestra en la figura:

Figura 1

Procesos del tratamiento de agua de riego



Nota. Elaboración propia a partir de la información sobre el sistema Wetland extraído de Vymazal (2011).

El sistema Wetland con carrizo es un método natural de tratamiento de agua de canal de riego que inicia con la captación del agua contaminada y su conducción hacia celdas o lechos artificiales compuestos por grava, arena y otros sustratos donde se encuentra sembrado el carrizo; en la cual a medida que el agua fluye lentamente a través del sistema, se producen procesos de filtración física que retienen sedimentos, así como procesos biológicos y químicos en los que los microorganismos degradan la materia orgánica y el carrizo absorbe nutrientes como nitrógeno y fósforo, reduciendo

la carga de contaminantes y mejorando progresivamente la calidad del agua hasta hacerla apta para su reutilización en riego agrícola.

4.1.1. Resultados de los parámetros fisicoquímicos del tratamiento con sistema Wetland.

Tabla 6

Parámetros fisicoquímicos del agua de la comunidad de Compañía Baja.

PARÁMETROS	UNIDAD DE MEDIDA	AGUA PARA RIEGO	
FÍSICOS QUÍMICOS		**PRE-TEST**	**POST-TEST**
Aceites y Grasas	mg/L	6.5	3.4
Bicarbonatos	mg/L	520	519
Cianuro Wad	mg/L	0,05	0,045
Cloruros	mg/L	450	420
Conductividad	(µS/cm)	2 100	2000
DBO	mg/L	15	<3
Detergentes (SAAM)	mg/L	0,32	0,01
Fenoles	mg/L	0,005	0,001
Fluoruros	mg/L	0.98	0.92
Nitratos (NO3-N)	mg/L	150	10
Nitratos (NO2-N)			
Nitratos (NO2-N)	mg/L	18	NC
Oxígeno Disuelto (Valor Mínimo)	mg/L	3.5	3.1
Potencial de Hidrógeno (pH)	Unidad de pH	7.2	6.8
Sulfatos	mg/L	1200	200
Temperatura	°C	20	19

Nota: Datos obtenidos a través del análisis de laboratorio Ingeosoft-2024

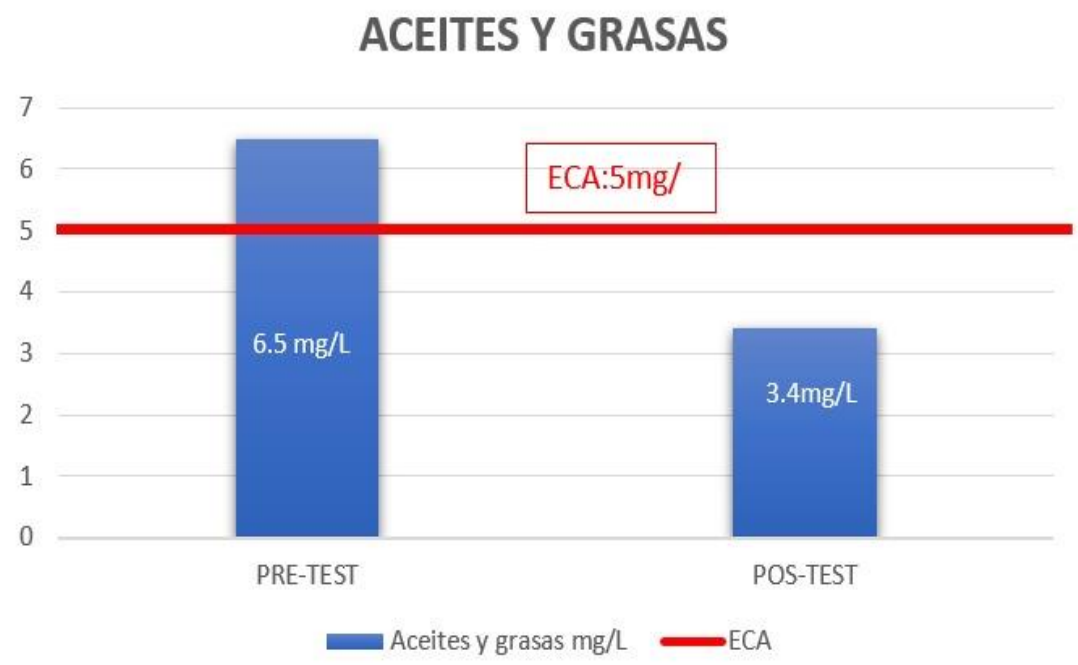
El agua presenta características fisicoquímicas que evidencian contaminación moderada por compuestos orgánicos y sales disueltas, lo cual puede afectar la

productividad de plantas de tallo bajo y la calidad del suelo agrícola a mediano plazo. Aunque parámetros como el pH y la temperatura se encuentran dentro de rangos adecuados, la elevada conductividad eléctrica, los altos niveles de bicarbonatos y cloruros, así como la presencia de detergentes y aceites, justifican la implementación del sistema Wetland como alternativa de tratamiento natural para mejorar la calidad del agua destinada al riego.

Los resultados de pos-test al tratamiento mediante el sistema Wetland evidencian una calidad de agua mejorada, caracterizada por bajas concentraciones de metales pesados y niveles controlados de elementos traza. Estas condiciones sugieren que el agua tratada es más segura para el riego de plantas de tallo bajo, reduciendo riesgos de toxicidad, bioacumulación y degradación del suelo agrícola. Asimismo, algunos elementos como el hierro, zinc y cobre se encuentran en concentraciones que pueden aportar beneficios nutricionales en cantidades controladas, siempre que se mantenga un monitoreo continuo para evitar acumulaciones a largo plazo.

Figura 2

Aceites y grasas (mg/L)

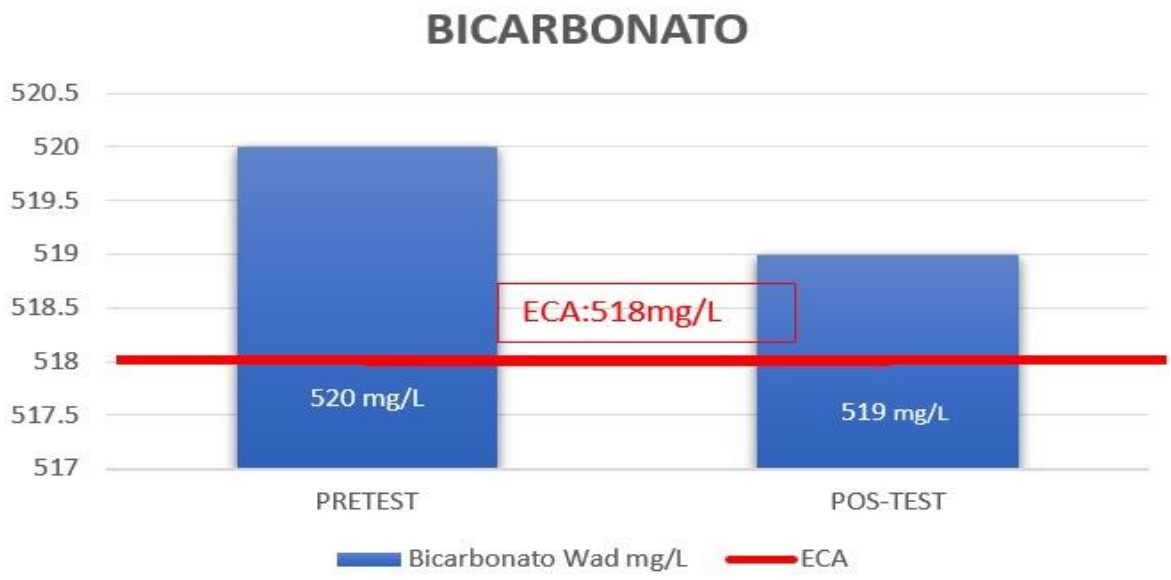


Nota: Datos obtenidos a través del análisis de laboratorio Ingeosoft-2024.

En la figura 2, se muestra que en el pre-test la concentración de aceites y grasas fue de 6.5 mg/L, valor que supera el ECA de 5 mg/L, indicando inicialmente el incumplimiento de la normativa ambiental, pero en el post-test la concentración se redujo a 3.4 mg/L, situándose por debajo del límite permitido, lo cual representa una disminución de 3.1 mg/L, lo que demuestra que la intervención o tratamiento aplicado fue eficaz, logrando cumplir con el estándar ambiental establecido.

Figura 3

Bicarbonato (mg/L)

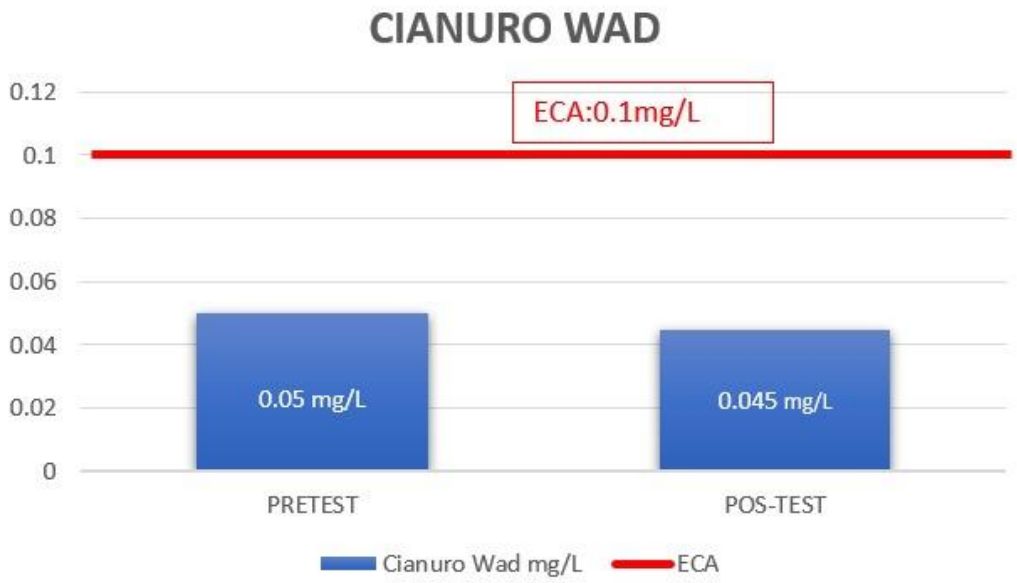


Nota: Datos obtenidos a través del análisis de laboratorio Ingeosoft-2024.

En la figura 3 muestra que la concentración de bicarbonatos en el pre-test fue de 520 mg/L, valor que supera ligeramente el ECA para agua de riego 518 mg/L, lo que indica incumplimiento del estándar en la evaluación inicial, y en el post test la concentración se redujo a 519 mg/L, evidenciando una mejora; sin embargo, este valor aún se mantiene 1 mg/L por encima del límite permitido, por lo que todavía no se cumple completamente con el ECA, por ende, aunque existe una disminución en la concentración de bicarbonatos, el parámetro requiere un ajuste adicional para alcanzar el cumplimiento normativo.

Figura 4

Cianuro Wad (mg/L)

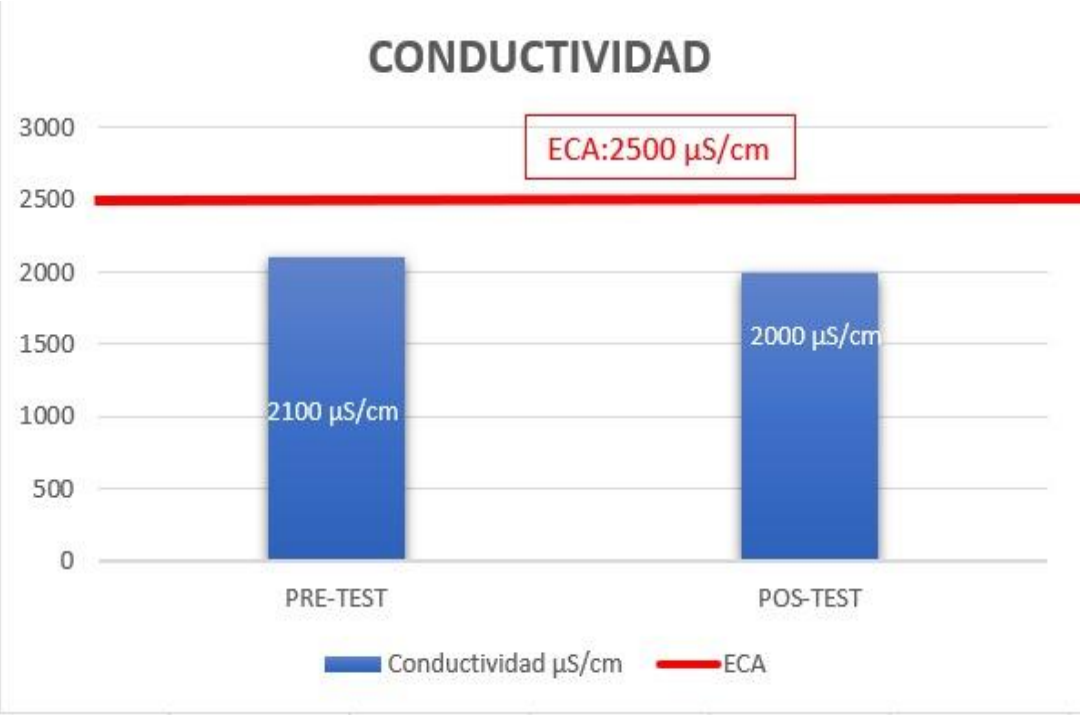


Nota: Datos obtenidos a través del análisis de laboratorio Ingeosoft-2024.

La figura 4 muestra que la concentración de Cianuro WAD en el pre-test fue de 0.05 mg/L, valor que se encuentra por debajo del ECA para agua de riego 0.1 mg/L, por lo que cumple con el estándar ambiental, y en el post-test, la concentración disminuyó a 0.045 mg/L, manteniéndose igualmente dentro del límite permitido y evidenciando una ligera mejora en la calidad del agua, por ende este parámetro cumple con la normativa tanto antes como después de la intervención, aunque se observa una reducción favorable en la medición final.

Figura 5

Conductividad eléctrica (µS/cm)

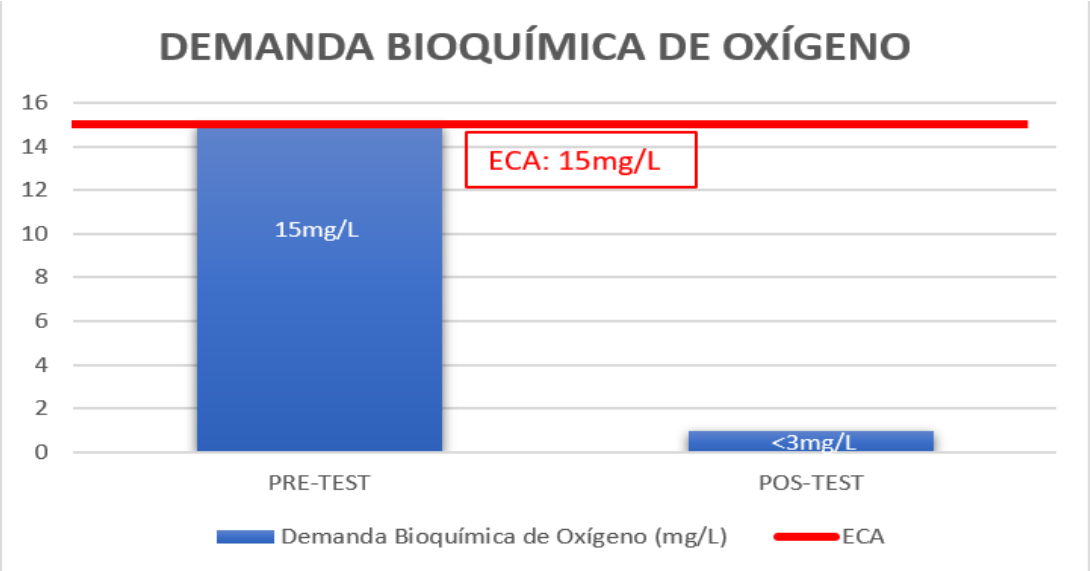


Nota: Datos obtenidos a través del análisis de laboratorio Ingeosoft-2024.

La figura 5 indica que la conductividad eléctrica en el pre-test fue de 2100 µS/cm, valor que se encuentra por debajo del ECA para agua de riego (2500 µS/cm), por lo que cumple con el estándar establecido, pero en el post-test, la conductividad disminuyó a 2000 µS/cm, evidenciando una mejora adicional en la calidad del agua y manteniéndose dentro del límite permisible, por lo cual, este parámetro cumple con la normativa ambiental en ambas evaluaciones, mostrando además una reducción favorable tras la intervención.

Figura 6

Demanda Bioquímica de Oxigeno

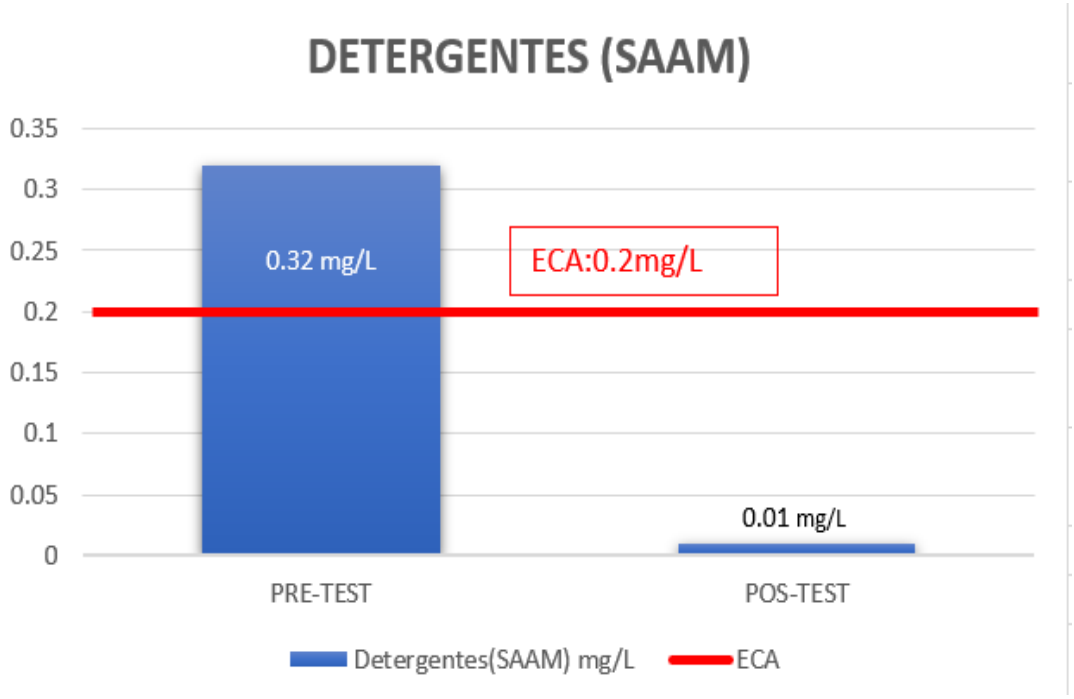


Nota: Datos obtenidos a través del análisis de laboratorio Ingeosoft-2024.

La figura 6 muestra que la Demanda Bioquímica de Oxígeno en el pre-test era de 15 mg/L, que coincide con el ECA de 15 mg/L, y después del tratamiento Post-Test, la DBO disminuyó a menos de 3 mg/L, lo que indica una mejora significativa en la calidad del agua, mostrando la efectividad del tratamiento al reducir la carga orgánica y cumplir con los estándares de calidad ambiental.

Figura 7

Detergentes (SAAM) mg/L

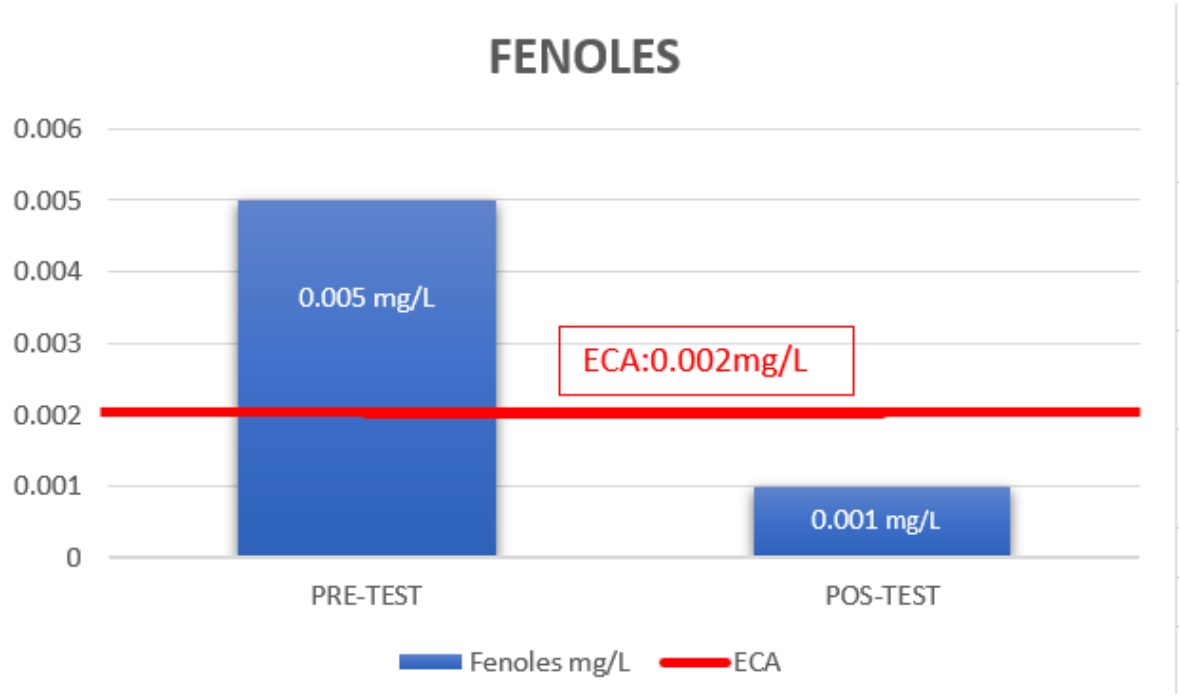


Nota: Datos obtenidos a través del análisis de laboratorio Ingeosoft-2024.

La figura 6 muestra que la concentración de detergentes (SAAM) en el pre-test fue de 0.32 mg/L, valor que supera el ECA para agua de riego (0.2 mg/L), evidenciando incumplimiento del estándar en la evaluación inicial, pero en el post-test la concentración se redujo significativamente a 0.01 mg/L, situándose muy por debajo del límite permitido, por ende, esta disminución muestra una mejora sustancial en la calidad del agua, logrando el cumplimiento del ECA tras la intervención aplicada.

Figura 8

Fenoles (mg/L)

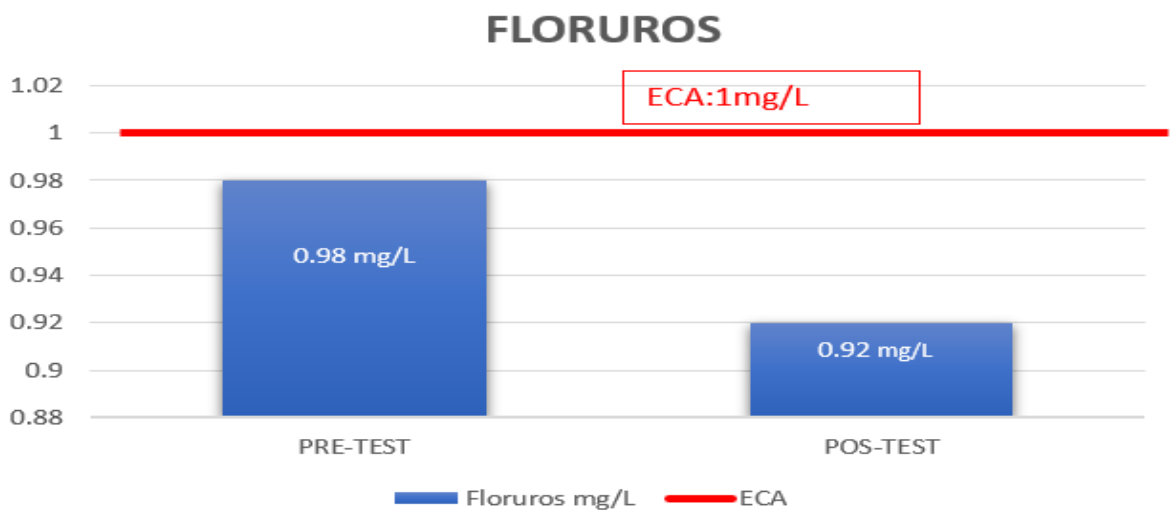


Nota: Datos obtenidos a través del análisis de laboratorio Ingeosoft-2024.

La figura 8 muestra que la concentración de fenoles en el pre-test fue de 0.005 mg/L, valor que supera el ECA para agua de riego (0.002 mg/L), evidenciando incumplimiento del estándar en la evaluación inicial, pero en el post-test, la concentración disminuyó a 0.001 mg/L, situándose por debajo del límite permitido, en la cual esta reducción significativa demuestra que la intervención aplicada fue efectiva, logrando que el parámetro cumpla con la normativa ambiental establecida para agua de riego.

Figura 9

Floruros (mg/L)

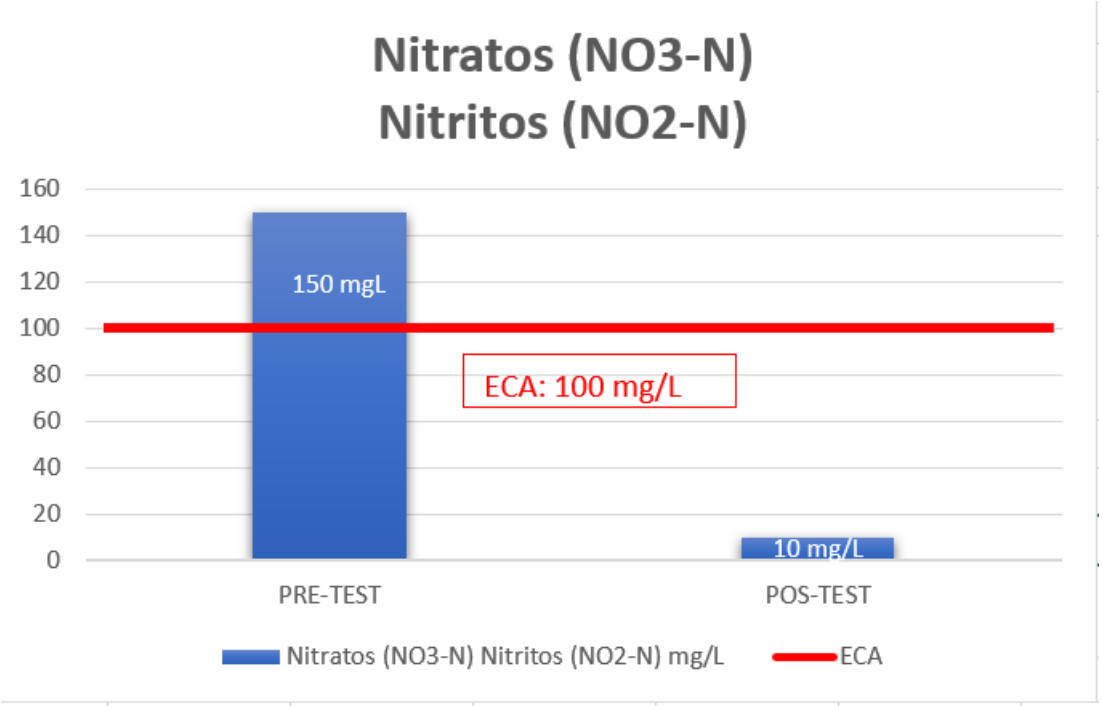


Nota: Datos obtenidos a través del análisis de laboratorio Ingeosoft-2024.

La figura 9 muestra que la concentración de fluoruros en el pre-test fue de 0.98 mg/L, valor que se encuentra por debajo del ECA para agua de riego (1 mg/L), por lo que cumple con el estándar establecido, pero en el post-test, la concentración disminuyó a 0.92 mg/L, manteniéndose igualmente dentro del límite permitido y evidenciando una ligera mejora en la calidad del agua, por ende este parámetro cumple con la normativa ambiental en ambas evaluaciones, mostrando una reducción favorable tras la intervención aplicada.

Figura 10

Nitratos (NO3-N) Nitritos (NO2-N)

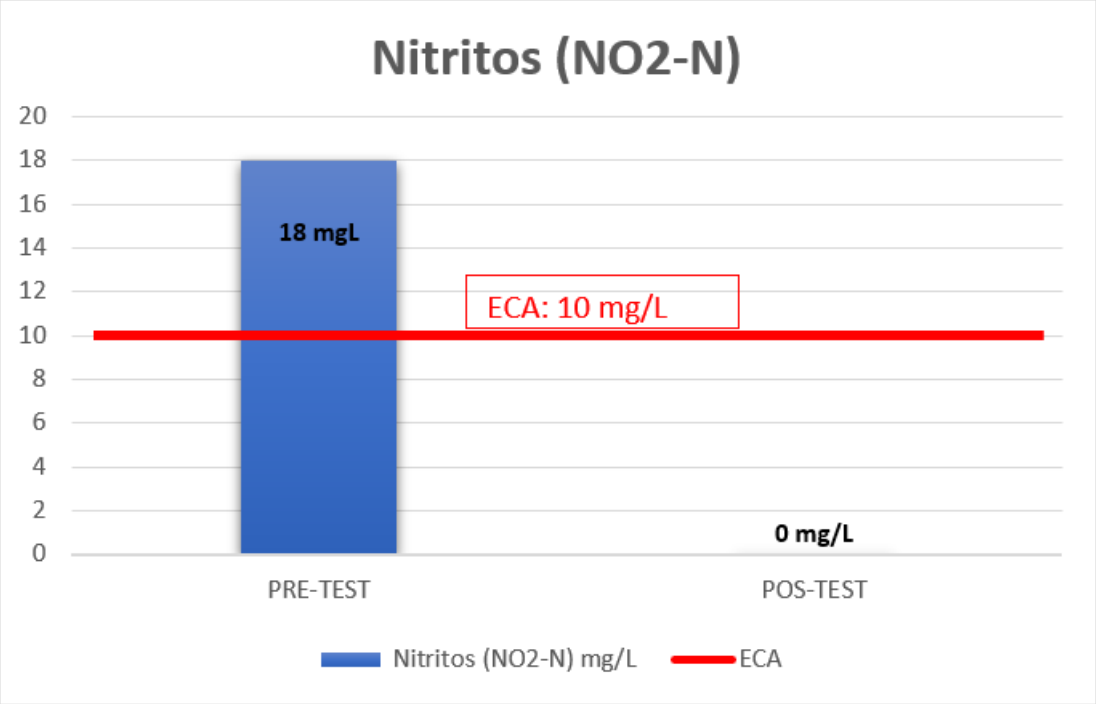


Nota: Datos obtenidos a través del análisis de laboratorio Ingeosoft-2024.

La figura 10 muestra la concentración de nitratos (NO_3-N) y nitritos (NO_2-N) en el pre-test y post-test en comparación con el ECA, observando que en el pre-test se registró un valor de 150 mg/L, el cual supera el límite permitido y evidencia incumplimiento de la normativa ambiental, pero en el post-test la concentración se redujo a 10 mg/L, ubicándose muy por debajo del ECA.

Figura 11

Nitritos (NO2-N)

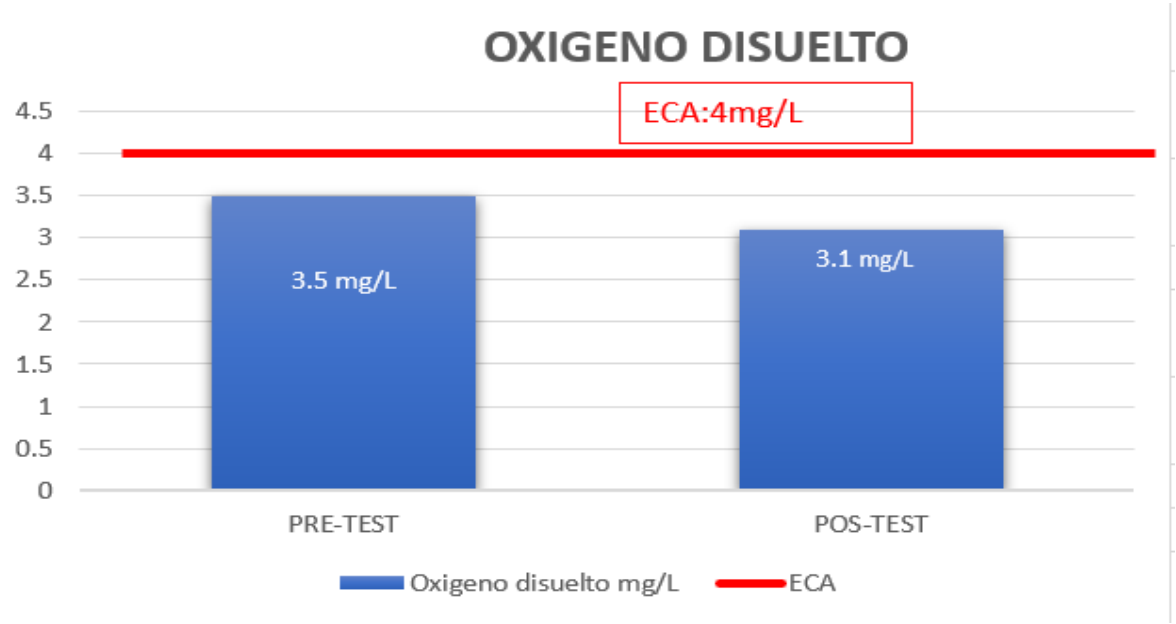


Nota: Datos obtenidos a través del análisis de laboratorio Ingeosoft-2024.

La figura 11 muestra la concentración de nitritos (NO_2-N) en el pre-test y post-test comparada con el ECA 10 mg/L, la cual evidencia que en el pre-test se registró un valor de 18 mg/L, el cual supera el límite permitido y por tanto no cumple con la normativa ambiental, pero en el post-test la concentración fue de 0 mg/L, cumpliendo ampliamente con el ECA.

Figura 12

Oxígeno disuelto (mg/L)

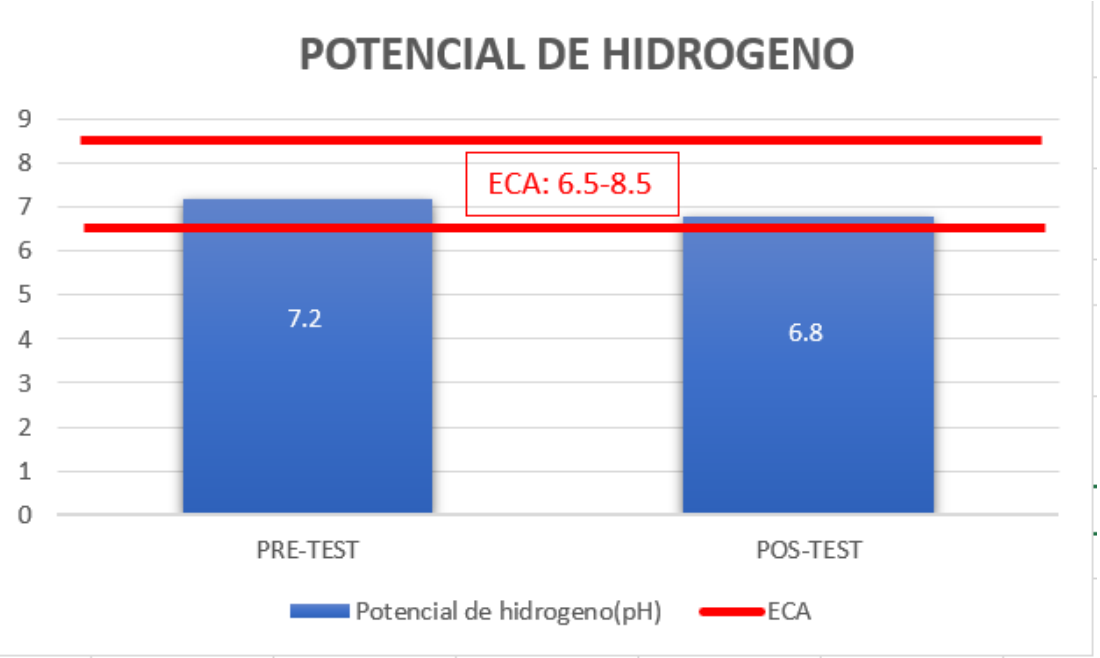


Nota: Datos obtenidos a través del análisis de laboratorio Ingeosoft-2024.

La figura 12 muestra que el oxígeno disuelto en el pre-test fue de 3.5 mg/L, valor que se encuentra por debajo del ECA para agua de riego 4 mg/L, lo que indica incumplimiento del estándar ambiental, ya que en el post-test, el valor disminuyó a 3.1 mg/L, alejándose aún más del límite mínimo requerido, en la cual este parámetro no cumple con la normativa en ninguna de las dos evaluaciones y, además, evidencia una ligera reducción en la concentración de oxígeno disuelto, lo que podría afectar la calidad del agua para su uso en riego.

Figura 13

Potencial de hidrogeno (pH).

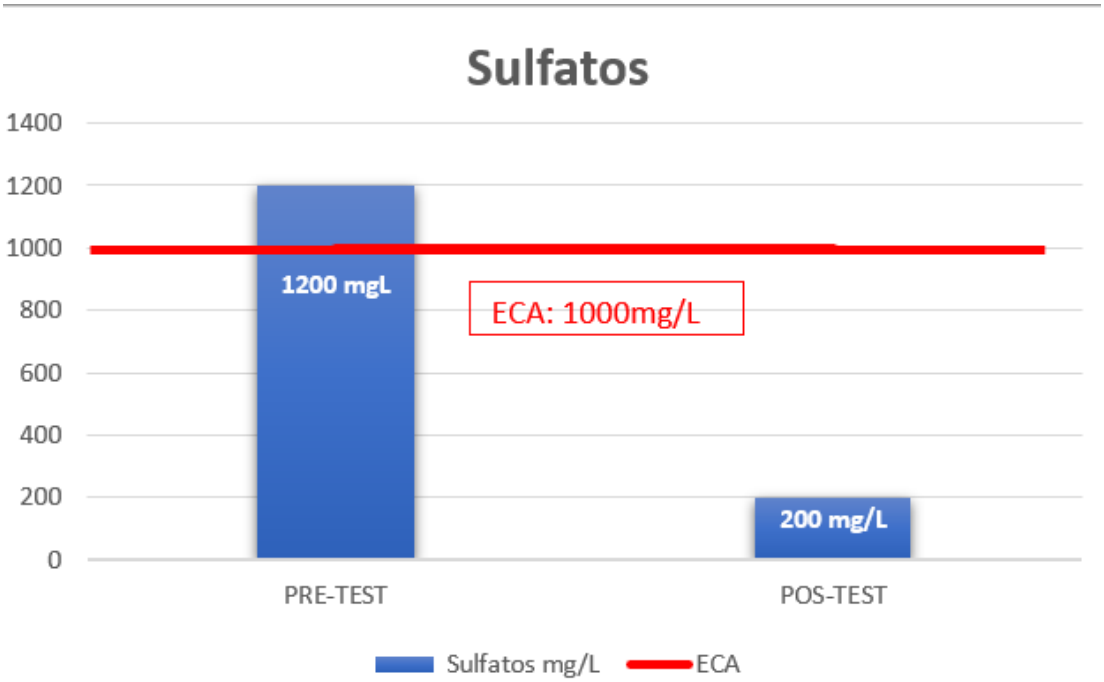


Nota: Datos obtenidos a través del análisis de laboratorio Ingeosoft-2024.

La figura 13 muestra que el potencial de hidrógeno (pH) en el pre-test fue de 7.2 y en el post-test de 6.8, valores que se encuentran dentro del rango establecido por el ECA para agua de riego (6.5 – 8.5, lo cual indica que el parámetro cumple con la normativa ambiental en ambas evaluaciones, de igual modo se observa una ligera disminución en el post-test, el agua mantiene, condiciones adecuadas de neutralidad, favorables para su uso en riego agrícola.

Figura 14

Sulfatos (mg/L)

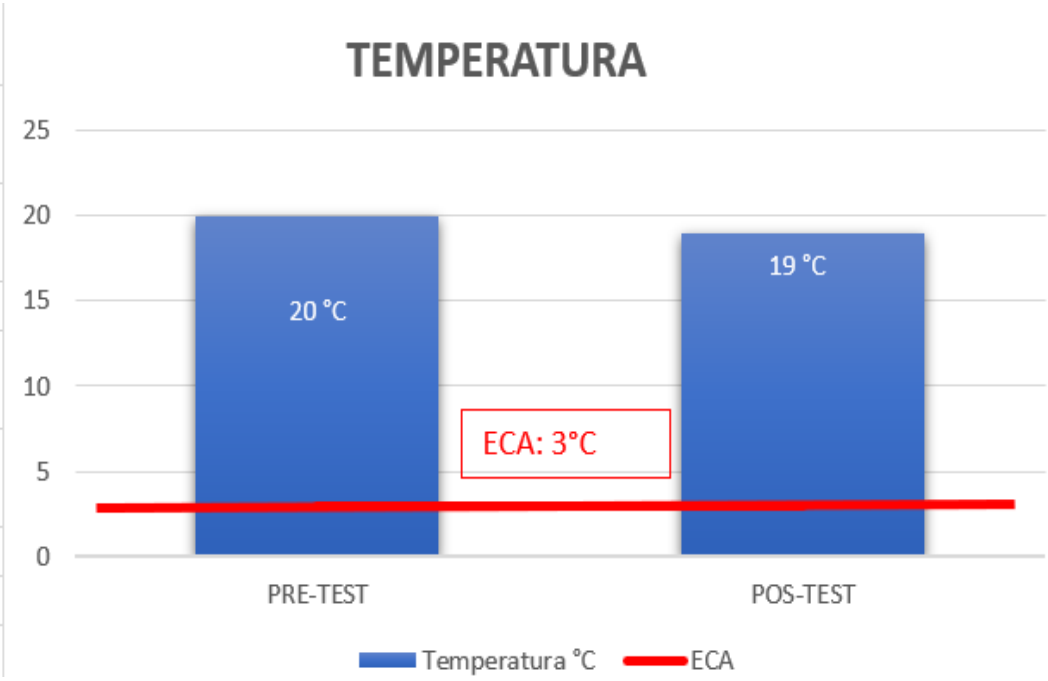


Nota: Datos obtenidos a través del análisis de laboratorio Ingeosoft-2024.

La figura muestra la concentración de sulfatos en el pre-test y post-test en comparación con el ECA 100 mg/L, donde se observa, que en el pre-test se registró un valor de 1200 mg/L, el cual supera el límite permitido y evidencia incumplimiento de la normativa ambiental, pero en el post-test la concentración se redujo a 200 mg/L, ubicándose muy por debajo del ECA.

Figura 15

Temperatura (°C)



Nota: Datos obtenidos a través del análisis de laboratorio Ingeosoft-2024.

La figura 15 muestra que la temperatura disminuyó ligeramente de 20 °C en el pre-test a 19 °C en el pos-test, lo que representa una reducción de 1 °C; pero en relación con el valor de referencia o ECA establecido en 3 °C, ambos valores se mantienen muy por encima de este criterio.

4.1.2. Resultados de las características de los plaguicidas

Tabla 7

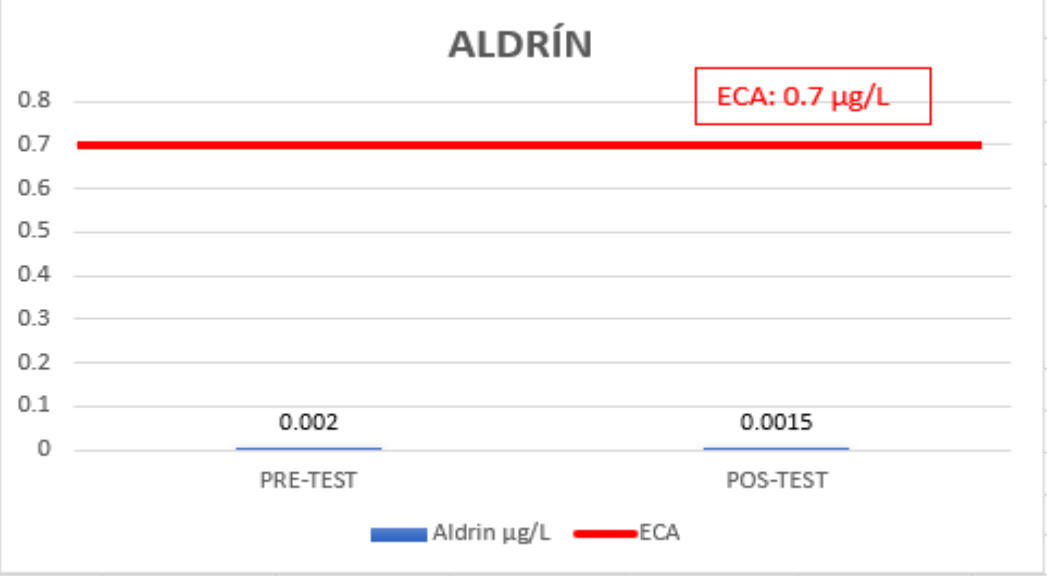
Características de los plaguicidas de la comunidad de Compañía Baja

Parámetros	Unidad de medida	Agua para riego	
Organoclorados		**PRE-TEST**	**POST-TEST**
Aldrín	µg/L	0.002	0.0015
Clordano	µg/L	0.003	0.0025
Endosulfán	µg/L	0.008	0.0072
Endrin	µg/L	0.001	0.0012
Heptacloro y Heptacloro Epóxido	µg/L	0.008	0.007
Lindano	µg/L	3.2	3.1
Carbmato			
Aldicarb	µg/L	0.5	0.5
Huevos de Helmintos	Huevo/L	3	1.8

Nota: Datos obtenidos a través del análisis de laboratorio Ingeosoft-2024.

Figura 16

Aldrín (µg/l)

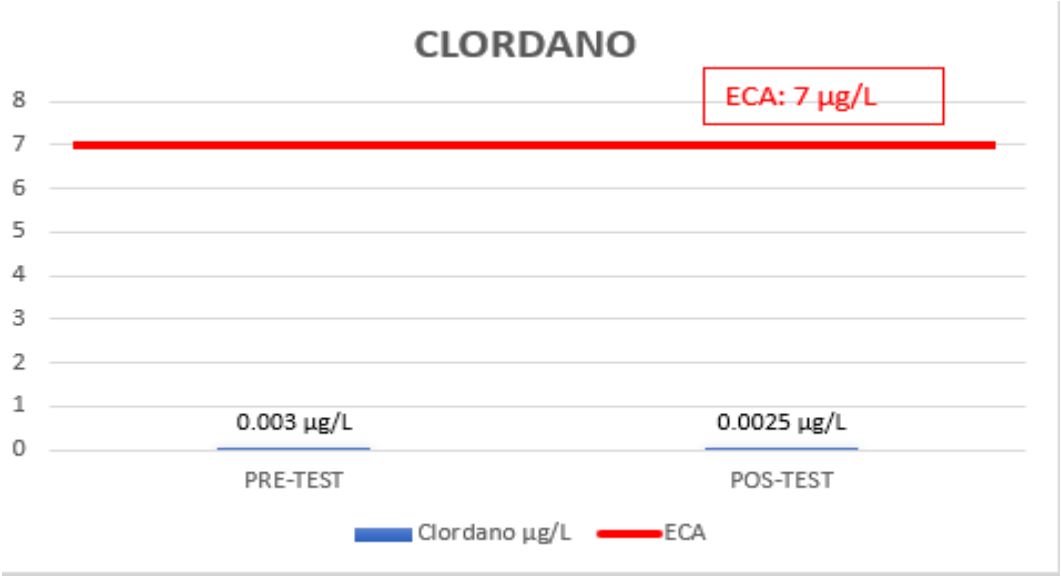


Nota: Datos obtenidos a través del análisis de laboratorio Ingeosoft-2024.

La figura 15 muestra que la concentración de aldrín disminuyó ligeramente de 0.002 µg/L en el pre-test a 0.0015 µg/L en el pos-test, evidenciando una reducción mínima del contaminante; de igual modo, ambos valores se encuentran muy por debajo del ECA establecido en 0.7 µg/L, lo que revela que las concentraciones registradas cumplen ampliamente con el estándar de calidad ambiental, sin embargo este resultado puede estar ligado a que estos contaminantes pueden permanecer durante años en ambientes acuáticos y requieren tratamientos complementarios como oxidación avanzada o adsorción especializada para lograr una eliminación eficiente.

Figura 17

Clordano (µg/l)

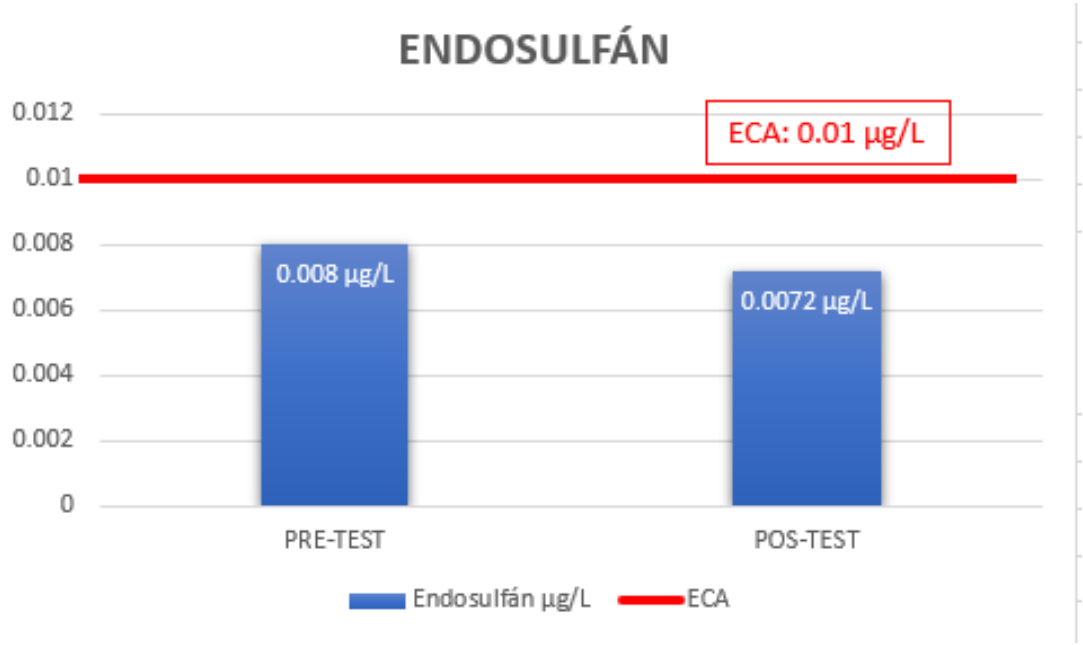


Nota: Datos obtenidos a través del análisis de laboratorio Ingeosoft-2024.

La figura 17 muestra que la concentración de clordano pasó de 0.003 µg/L en el pre-test a 0.0025 µg/L en el pos-test, evidenciando una ligera disminución; ambos valores se encuentran muy por debajo del Estándar de Calidad Ambiental (ECA) establecido en 7 µg/L, lo que indica cumplimiento de la normativa y ausencia de superación del límite permitido.

Figura 18

Endosulfán (µg/l)

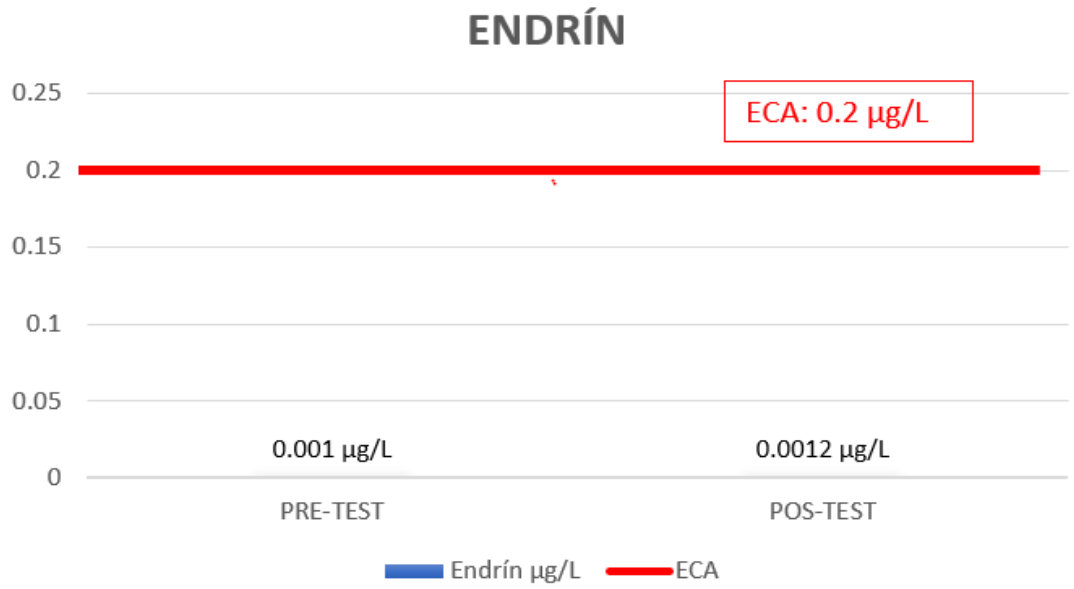


Nota: Datos obtenidos a través del análisis de laboratorio Ingeosoft-2024.

La figura 18 muestra que la concentración de endosulfán disminuyó ligeramente de 0.008 µg/L en el pre-test a 0.0072 µg/L en el pos-test; ambos valores se encuentran por debajo del ECA establecido en 0.01 µg/L, lo que muestra cumplimiento de la normativa vigente y ausencia de superación del límite permitido.

Figura 19

Endrín (µg/l)

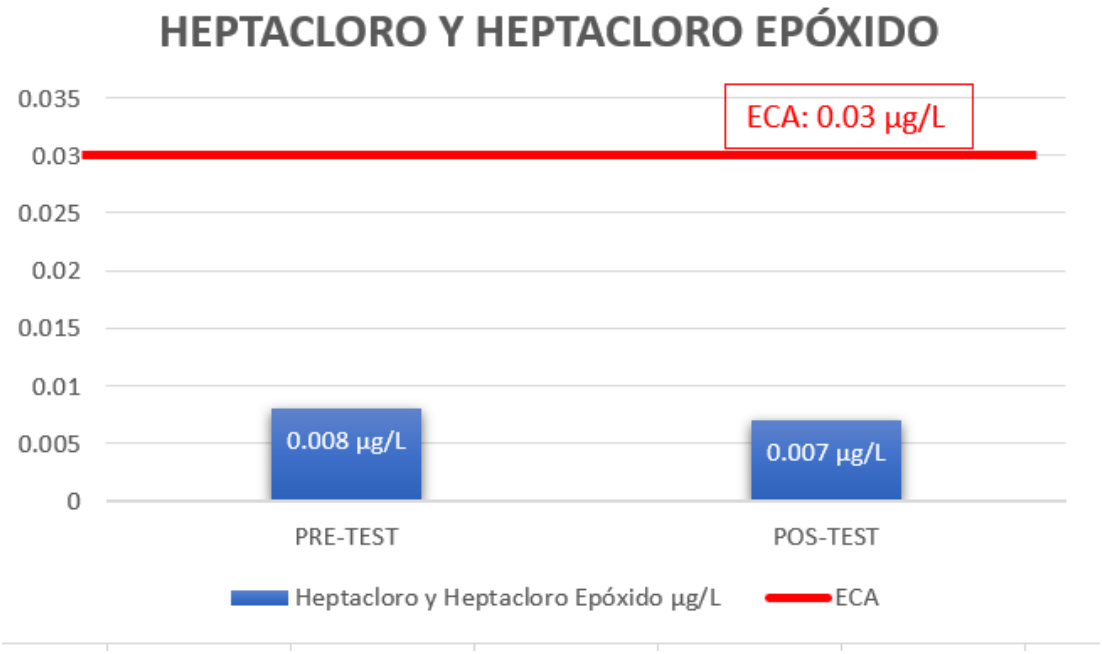


Nota: Datos obtenidos a través del análisis de laboratorio Ingeosoft-2024.

La figura 19 muestra que la concentración de endrín aumentó ligeramente de 0.001 µg/L en el pre-test a 0.0012 µg/L en el pos-test;, pero, ambos valores se encuentran muy por debajo del ECA establecido en 0.2 µg/L, lo cual muestra cumplimiento de la normativa y ausencia de superación del límite permitido.

Figura 20

Heptacloro y heptacloro epóxido (µg/l)

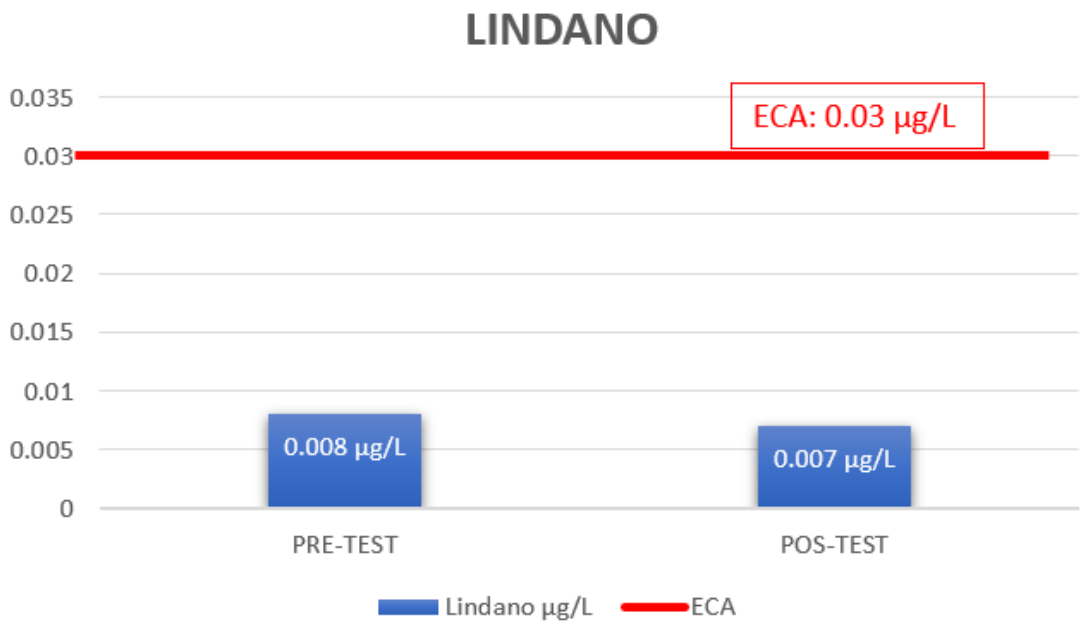


Nota: Datos obtenidos a través del análisis de laboratorio Ingeosoft-2024.

La figura 20 indica que la concentración de heptacloro y heptacloro epóxido disminuyó de 0.008 µg/L en el pre-test a 0.007 µg/L en el pos-test, evidenciando una leve reducción; asimismo, ambos valores se encuentran por debajo del Estándar de Calidad Ambiental (ECA) establecido en 0.03 µg/L, lo que demuestra cumplimiento de la normativa vigente y ausencia de superación del límite permitido

Figura 21

Lindano (µg/l)

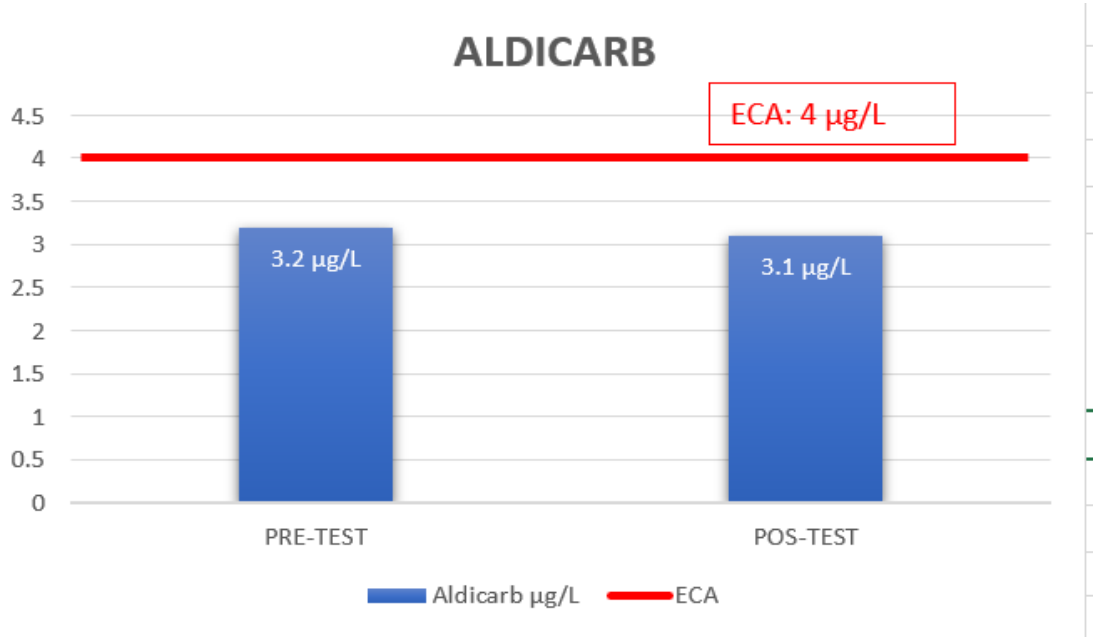


Nota: Datos obtenidos a través del análisis de laboratorio Ingeosoft-2024.

La figura 21 muestra que la concentración de lindano disminuyó de 0.008 µg/L en el pre-test a 0.007 µg/L en el pos-test, evidenciando una ligera reducción; además, ambos valores se encuentran por debajo del ECA establecido en 0.03 µg/L, lo que muestra el cumplimiento del ECA y ausencia de superación del límite permitido.

Figura 22

Aldicarb (µg/l)



Nota: Datos obtenidos a través del análisis de laboratorio Ingeosoft-2024.

La figura 22 muestra que la concentración de aldicarb disminuyó ligeramente de 3.2 µg/L en el pre-test a 3.1 µg/L en el pos-test; ambos valores se mantienen por debajo del ECA establecido en 4 µg/L, lo cual muestra cumplimiento del ECA y ausencia de superación del límite permitido.

4.1.3. Resultados de las características de metales

Tabla 8

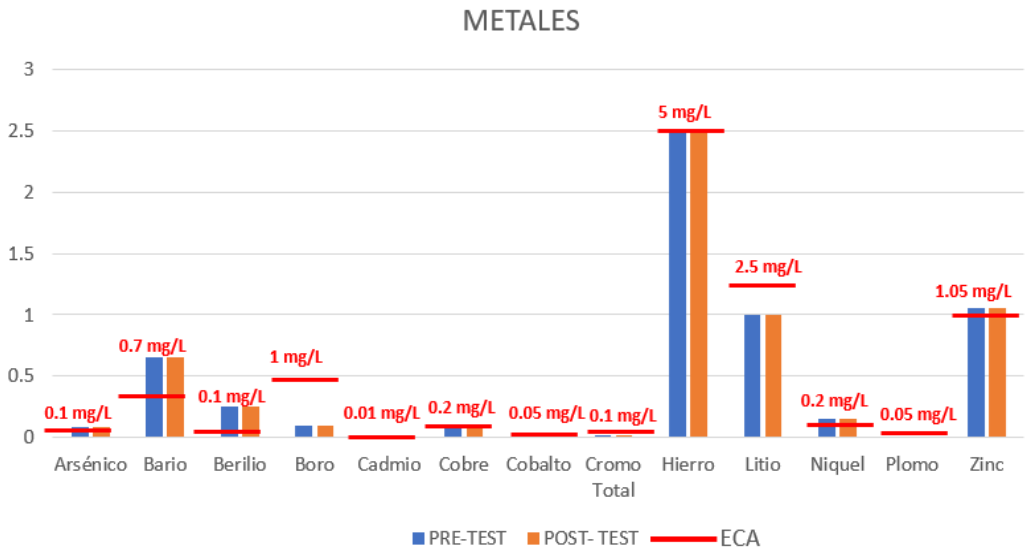
Características de los metales de la comunidad de Compañía Baja.

		Agua para riego Compañía	
Parámetros de los metales	**Unidad de medida**		
		PRE-TEST	**POST-TEST**
Arsénico	mg/L	0,08	0,08
Bario	mg/L	0,65	0,65
Berilio	mg/L	0,25	0,25
Boro	mg/L	0.10	0.10
Cadmio	mg/L	0,001	0,001
Cobre	mg/L	0,08	0,08
Cobalto	mg/L	0,01	0,01
Cromo Total	mg/L	0,02	0,02
Hierro	mg/L	2.5	2.5
Litio	mg/L	1.0	1.0
Niquel	mg/L	0,15	0,15
Plomo	mg/L	0,01	0,01
Zinc	mg/L	1.05	1.05

Nota: Datos obtenidos a través del análisis de laboratorio Ingeosoft-2024.

Figura 23

Metales mg/L



Nota: Datos obtenidos a través del análisis de laboratorio Ingeosoft-2024.

En la tabla 4 y figura 23, se revela que al respecto a los parámetros inorgánicos, se evidencia que no existe variación alguna en las concentraciones evaluadas, manteniéndose los mismos valores antes y después de la aplicación del Sistema Wetlandy con relación al c cumplimiento del ECA para agua de riego, la mayoría de los parámetros analizados cumplen con los límites máximos permisibles establecidos por la normativa vigente, a excepción del berilio que presenta una concentración de 0,25 mg/L, superando el valor ECA de 0,1 mg/L, lo que indica el incumplimiento normativo, del mismo modo el sistema Wetland probablemente presentó una baja capacidad de intercambio catiónico, limitando la adsorción de metales sobre su superficie. Asimismo, el tiempo de retención hidráulica (TRH) pudo haber sido insuficiente para permitir que ocurran mecanismos como precipitación, sedimentación o adsorción, procesos fundamentales en la inmovilización de metales pesados dentro de humedales artificiales.

4.1.4. Resultados de los parámetros microbiológicos y parasitológicos.

Tabla 9

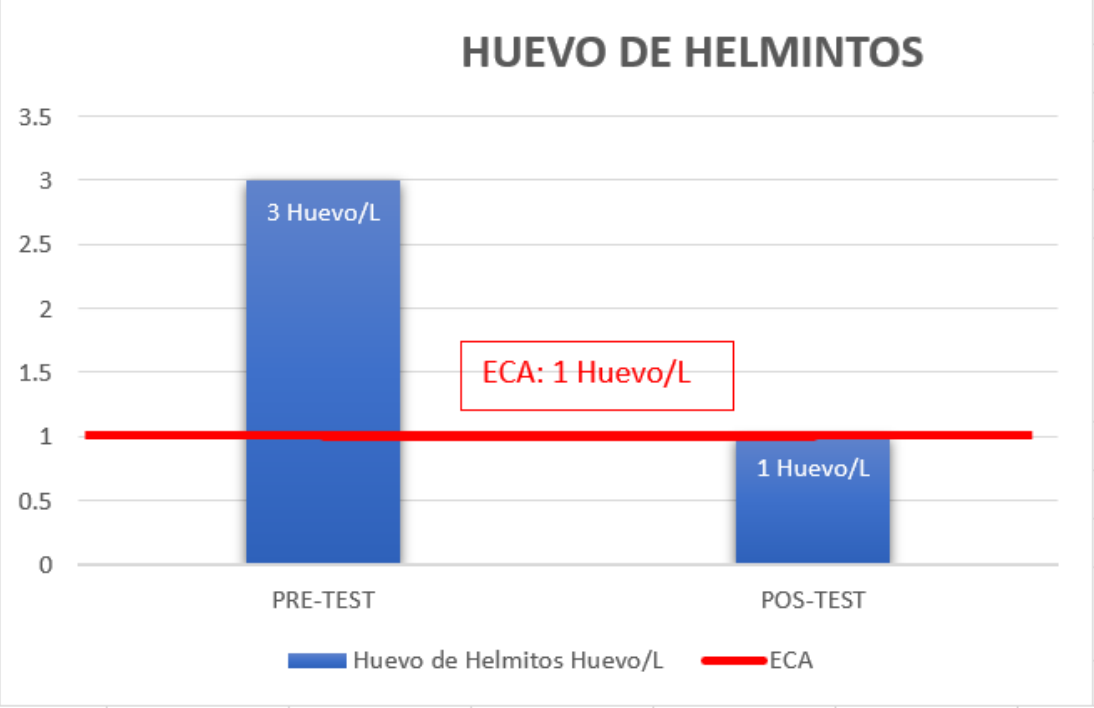
Características de los parámetros microbiológicos y parasitológicos de la comunidad de Compañía Baja.

Parámetros	Unidad de medida	Agua para riego Compañía	
MICROBIOLÓGICOS Y PARASITOLÓGICOS		**PRE-TEST**	**POST -TEST**
Huevos de Helmintos	Huevo/L	3	1

Nota: Datos obtenidos a través del análisis de laboratorio Ingeosoft-2024.

Figura 24

Huevo de helmintos (Huevo/L)



Nota: Datos obtenidos a través del análisis de laboratorio Ingeosoft-2024.

En la figura 24, se muestra que el Sistema Wetland, en el pre-test, la concentración de huevos de helmintos es de 3 huevos/L, lo que supera significativamente el límite recomendado por el ECA, indicando una mala calidad del agua, pero después del tratamiento (pos-test), la concentración disminuye a 1 huevo/L, cumpliendo con el ECA, sin embargo no alcanzando el límite máximo, donde, aun logrando una mejora, idealmente la concentración debería estar en la inexistencia de estos para garantizar que la calidad del agua esté dentro de los parámetros más seguros y saludables. La eliminación incompleta de huevos de helmintos puede atribuirse a varios factores, sien uno de estos que estos organismos presentan una alta resistencia estructural, debido a que poseen una cubierta multicapa extremadamente robusta que les permite sobrevivir en ambientes adversos, incluso frente a cambios de pH.

4.2. Tratamiento de agua para riego de plantas de tallo bajo y la mejora de calidad de agua, mediante el Sistema Wetland.

4.2.1. Eficiencia del Sistema Wetland en la mejora los parámetros físico-químicos

Tabla 10

Eficiencia del Sistema Wetland en la mejora los parámetros físico - químicas

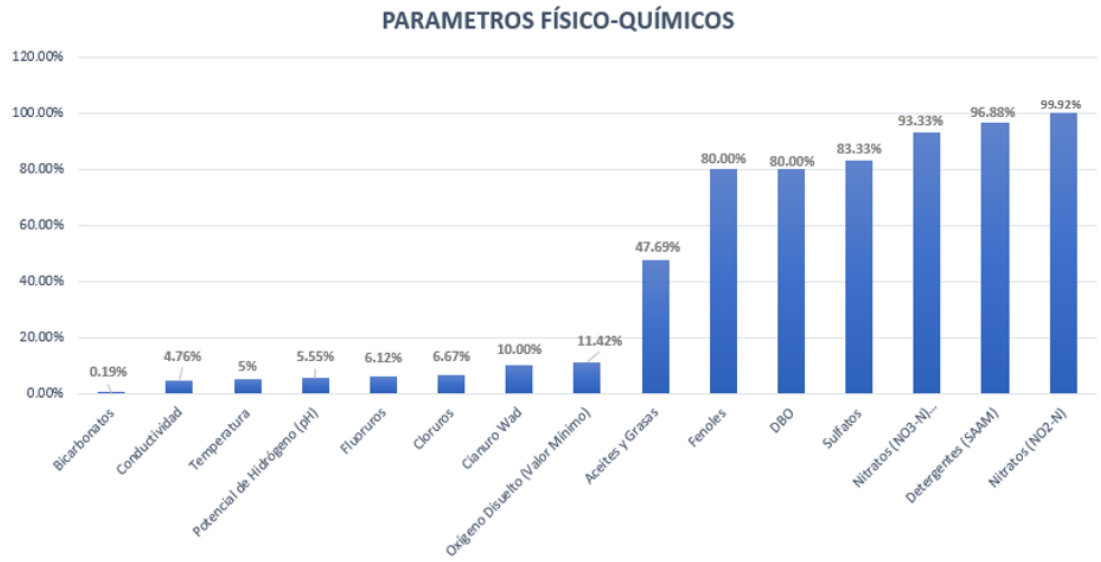
Parámetros	Unidad de medida	Pre Test	Post Test	% Remoción
Aceites y Grasas	mg/L	6.5	3.4	47.69%
Bicarbonatos	mg/L	520	519	0.19%
Cianuro Wad	mg/L	0,05	0,045	10.00%
Cloruros	mg/L	450	420	6.67%
Conductividad	(µS/cm)	2 100	2000	4.76%

DBO	mg/L	15	<3	80.00%
Detergentes (SAAM)	mg/L	0,32	0,01	96.88%
Fenoles	mg/L	0,005	0,001	80.00%
Fluoruros	mg/L	0.98	0.92	6.12%
Nitratos (NO3-N)	mg/L	150	10	93.33%
Nitratos (NO2-N)				
Nitratos (NO2-N)	mg/L	18	0	99.92%
Oxígeno Disuelto (Valor Mínimo)	mg/L	3.5	3.1	11.42%
Potencial de Hidrógeno (pH)	Unidad de pH	7.2	6.8	5.55%
Sulfatos	mg/L	1200	200	83.33%
Temperatura	°C	20	19	5%

Nota: Datos obtenidos a través del análisis de laboratorio Ingeosoft-2024.

Figura 25

Características de los parámetros físico-químicos



Nota: Datos obtenidos a través del análisis de laboratorio Ingeosoft-2024.

En la tabla 4 y figura 25 el análisis comparativo entre el pre test y el post test demuestra que el Sistema Wetland genera una mejora en la calidad físico-química del agua para riego, evidenciada principalmente en la reducción significativa de contaminantes orgánicos como los nitratos (99.92%), los detergentes (96.88%), los fenoles (80%) y los aceites y grasas (47.69%), lo cual muestra una alta capacidad de remoción en compuestos asociados a carga orgánica y sustancias tensioactivas, de igual manera, se observa una disminución moderada en parámetros como cloruros, cianuro WAD, fluoruros y conductividad, reflejando un efecto depurador parcial sobre componentes inorgánicos disueltos, pero algunos parámetros presentan variaciones poco significativas, como los bicarbonatos (0.19%), y el oxígeno disuelto disminuye ligeramente, lo cual sugiere que el sistema no mejora de manera homogénea en todos los parámetros evaluados.

4.2.2. Eficiencia del Sistema Wetland en la mejora las características de los metales

Tabla 11

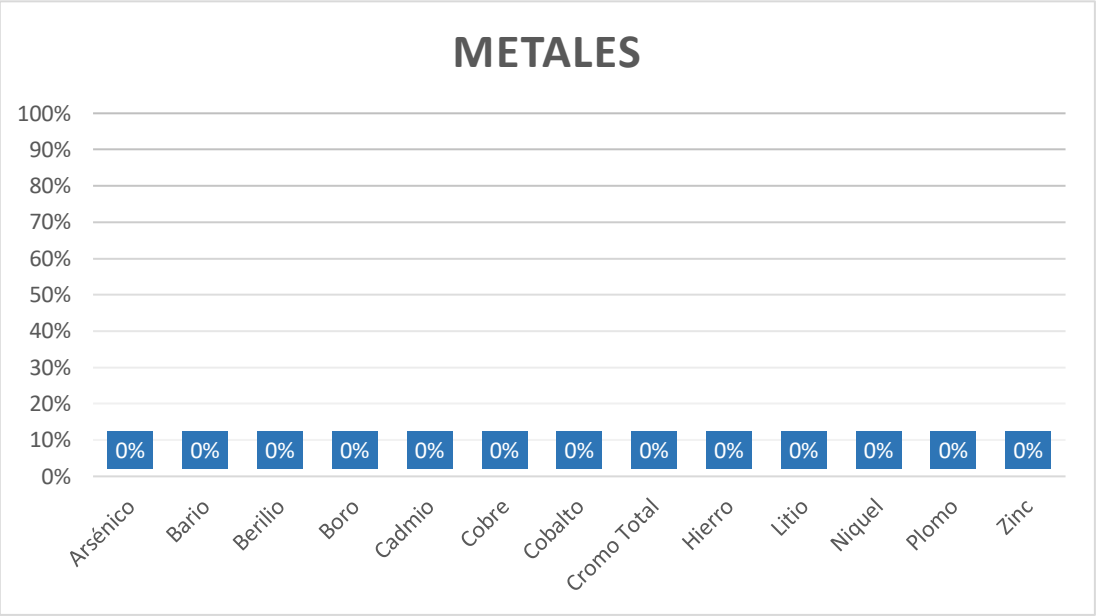
Eficiencia del Sistema Wetland en la mejora las características de los metales

Parámetros	Unidad de medida	Pre Test	Post Test	% Remoción
Arsénico	mg/L	0,08	0,08	0%
Bario	mg/L	0,65	0,65	0%
Berilio	mg/L	0,25	0,25	0%
Boro	mg/L	0.10	0.10	0%
Cadmio	mg/L	0,001	0,001	0%
Cobre	mg/L	0,08	0,08	0%
Cobalto	mg/L	0,01	0,01	0%
Cromo Total	mg/L	0,02	0,02	0%
Hierro	mg/L	2.5	2.5	0%
Litio	mg/L	1.0	1.0	0%
Niquel	mg/L	0,15	0,15	0%
Plomo	mg/L	0,01	0,01	0%
Zinc	mg/L	1.05	1.05	0%

Nota: Datos obtenidos a través del análisis de laboratorio Ingeosoft-2024.

Figura 26

Eficiencia del Sistema Wetland en la mejora las características de los metales.



Nota: Datos obtenidos a través del análisis de laboratorio Ingeosoft-2024.

En la tabla 7 y figura 26 evidencian que el sistema wetland no generó reducción en las concentraciones de metales presentes en el agua de riego, manteniéndose valores constantes entre el pre test y el post test, lo cual sugiere que el tratamiento implementado tuvo un impacto limitado en la remoción de metales pesados, lo cual puede atribuirse a factores como la baja concentración inicial de estos elementos, el tipo de sustrato utilizado, el diseño hidráulico del sistema o el tiempo de retención del agua dentro del humedal, pero la estabilidad de las concentraciones también indica que el sistema no incrementó la carga metálica del agua, manteniendo condiciones químicas estables para su uso agrícola.

4.2.3. Eficiencia del Sistema Wetland en la mejora las características de las plaguicidas.

Tabla 12

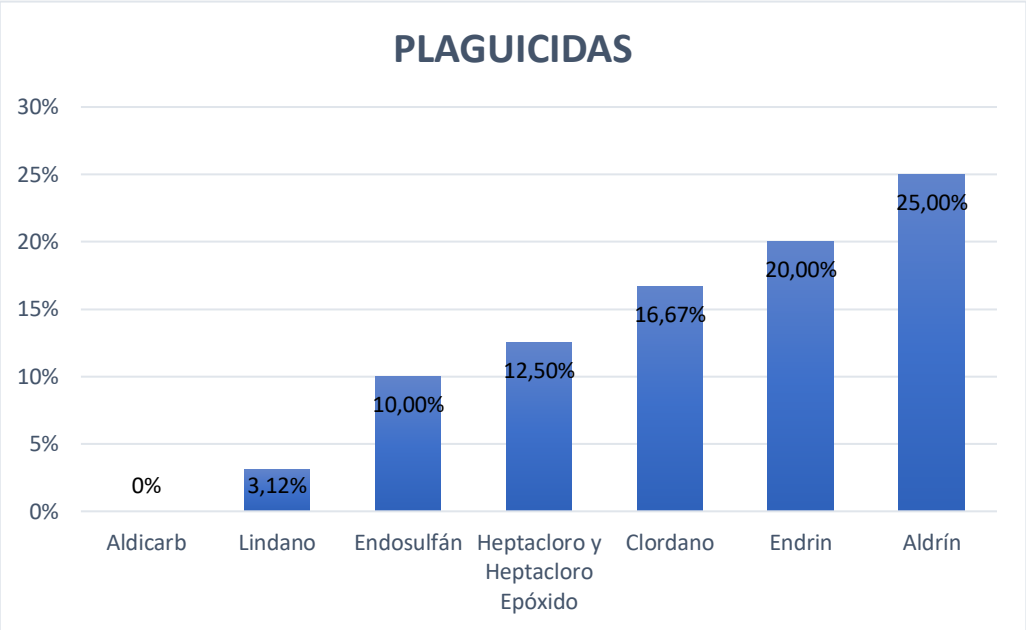
Eficiencia del Sistema Wetland en la mejora las características de los paguicidas.

Parámetros	Unidad de medida	Pre Test	Post Test	% Remoción
Organoclorados				
Aldrín	µg/L	0.002	0,0015	25.00%
Clordano	µg/L	0.003	0,0025	16.67%
Endosulfán	µg/L	0.008	0,0072	10.00%
Endrin	µg/L	0.001	0,0012	20.00%
Heptacloro y Heptacloro Epóxido	µg/L	0.008	0,007	12.50%
Lindano	µg/L	3.2	3.1	3.12%
Carbmato				
Aldicarb	µg/L	0.5	0.5	0%

Nota: Datos obtenidos a través del análisis de laboratorio Ingeosoft-2024.

Figura 27

Eficiencia del Sistema Wetland en la mejora las características de los plaguicidas.



Nota: Datos obtenidos a través del análisis de laboratorio Ingeosoft-2024.

La tabla 8 y figura 27 se muestra que los resultados muestran que el sistema Wetland tuvo una eficiencia limitada en la remoción de plaguicidas organoclorados, alcanzando reducciones moderadas únicamente en algunos compuestos como aldrín y clordano, mientras que en otros casos la disminución fue mínima o inexistente. La persistencia química y baja biodegradabilidad de estos contaminantes explica la baja eficiencia observada. Asimismo, el incremento detectado en endrin sugiere procesos de liberación interna o variabilidad experimental, evidenciando la necesidad de optimizar el diseño del humedal o complementar el tratamiento con tecnologías adicionales si el objetivo es la eliminación de pesticidas persistentes.

4.2.4. Eficiencia del Sistema Wetland en la mejora los parámetros microbiológicos y parasitológicos

Tabla 13

Eficiencia del Sistema Wetland en la mejora los parámetros microbiológicos y parasitológicos.

Parámetros	Unidad de medida	Pre Test	Post Test	% Remoción
MICROBIOLÓGICOS Y PARASITOLÓGICOS				
Huevos de Helmintos	Huevo/L	3	1	66.67%

Nota: Datos obtenidos a través del análisis de laboratorio Ingeosoft-2024.

En la tabla 9, se muestra que sistema Wetland demostró ser una alternativa efectiva para la reducción parcial de contaminantes microbiológicos y parasitológicos, alcanzando una remoción del 66.67 % de huevos de helmintos, donde este resultado confirma la capacidad del humedal artificial para mejorar la calidad sanitaria del agua de riego mediante procesos naturales de filtración y sedimentación, aunque evidencia también la necesidad de mejoras en el diseño o manejo del sistema para lograr niveles más altos de eliminación.

4.3.Discusión de resultados

El sistema Wetland de flujo subsuperficial horizontal (HSSF) implementado en la comunidad de Compañía Baja, distrito de Pacaycasa, provincia de Huamanga, evidenció una eficiencia diferencial en la remoción de contaminantes presentes en el agua destinada al riego de cultivos de tallo bajo, observándose una mayor capacidad de tratamiento sobre compuestos orgánicos y microbiológicos, y una eficiencia limitada frente a contaminantes inorgánicos persistentes como sales disueltas, metales pesados y determinados plaguicidas organoclorados.

En relación con los parámetros fisicoquímicos, los resultados del pre-test y post-test mostraron elevadas eficiencias de remoción para detergentes (96.88%), fenoles (80%), DBO (80%), sulfatos (83.33%) y aceites y grasas (47.69%), evidenciando una adecuada capacidad del sistema para reducir la carga orgánica del afluente. Estos resultados son similares a los reportados por Zamora (2024), quien observó mejoras significativas en parámetros fisicoquímicos, especialmente en sólidos suspendidos y pH, así como por Inga et al. (2024), quienes registraron alta eficiencia en la remoción de materia orgánica mediante humedales artificiales. De igual manera, Vymazal (2021) sostiene que estos sistemas presentan elevada capacidad para remover compuestos orgánicos debido a la intensa actividad microbiológica desarrollada en la rizósfera. Teóricamente, este comportamiento puede atribuirse a la interacción entre filtración física, adsorción sobre el lecho granular, degradación biológica y actividad metabólica microbiana asociada al sistema radicular del Scirpus spp., donde los biofilms adheridos al sustrato favorecen la oxidación de materia orgánica y la transformación de contaminantes complejos en compuestos más simples (Kadlec y Wallace, 2009).

Respecto a los metales pesados, no se evidenció remoción entre el pre-test y post-test, registrándose una eficiencia del 0% para arsénico, cadmio, cobre, plomo, hierro y zinc, entre otros, este resultado parece contradecir estudios como los de Maine (2021), quien reporta que los humedales pueden remover metales mediante adsorción, precipitación y absorción vegetal; asimismo, Stefanakis (2018) señala que estos sistemas presentan potencial para la inmovilización metálica cuando se diseñan adecuadamente. Sin embargo, teóricamente este resultado puede explicarse por las condiciones operativas del sistema evaluado, en primer lugar, la grava utilizada como medio filtrante posee baja capacidad de intercambio catiónico, lo que limita la adsorción de iones metálicos sobre su superficie, en segundo lugar, el tiempo de retención hidráulica de 30.24 horas probablemente fue insuficiente para permitir procesos lentos como precipitación química, coprecipitación o adsorción superficial, los cuales requieren tiempos prolongados de contacto; según Stefanakis (2018), estos mecanismos suelen optimizarse en periodos superiores a 72 horas, finalmente, existe la posibilidad de que el sustrato haya alcanzado rápidamente un estado de saturación de sitios activos, perdiendo capacidad de retención metálica, fenómeno descrito por Maine et al. (2021) como una limitante frecuente en sistemas con materiales inertes como grava, por tanto,

el problema no radica en que el humedal “no remueva metales”, sino en que las condiciones específicas de diseño y operación de este sistema no favorecieron dicho mecanismo.

Con respecto a los nitratos, los resultados del análisis fisicoquímico evidencian una reducción sustancial en la concentración de nitratos, registrándose valores de 150mg/L en el pretratamiento y 10 mg/L en el postratamiento, lo que representa una eficiencia de remoción del 93.3%; este comportamiento indica un alto desempeño del sistema Wetland implementado bajo un tiempo de retención TRH de 30.24 horas, utilizando como vegetación Phragmites australis (carrizo). Estos resultados son consistentes con lo reportado en la literatura científica sobre humedades construidos, en particular Vymazal (2021) señala que los humedales con macrófitos emergentes pueden alcanzar eficiencias superiores al 80% en condiciones óptimas, de igual forma Kadlec y Wallace (2009) reportan que sistemas Wetland con tiempos de retención inferiores a 2 días pueden lograr remociones superiores al 70% de nitrógeno total, siempre que exista una adecuada interacción entre sustrato, microbiota y vegetación; en este sentido, la eficiencia de 93.3% obtenida en el presente estudio supera el promedio reportado en muchos sistemas similares, lo cual sugiere condiciones altamente favorables para la remoción de nitratos. Teóricamente, la alta eficiencia en la remoción de nitratos observada puede explicarse mediante procesos biogeoquímicos característicos de los humedales artificiales, en primer lugar, la desnitrificación microbiana la cual constituye el principal mecanismo de eliminación de nitratos, proceso mediante el cual las bacterias heterótrofas convierten el NO3 en gases como N2 y N2O en condiciones anoxias presentes en el sustrato del humedal, de igual forma la asimilación vegetal por parte del carrizo contribuye a la reducción de nitrógeno disuelto; el TRH de 30.24 horas permite el tiempo suficiente para que ocurran procesos simultáneos de nitrificación-desnitrificación; y finalmente, los factores de temperatura y pH ligeramente neutros generan condiciones óptimas para la actividad biológica, lo cual contribuye al alto rendimiento del sistema.

Respecto a los nitritos los resultados evidenciaron una reducción total de la concentración de nitritos, registrándose valores de 18 mg/L en el pretratamiento y niveles no cuantificables (NC) en el postratamiento, lo cual indica una eficiencia de

remoción del 99.92% y demuestra un desempeño altamente eficiente del sistema Wetland bajo un tiempo de retención hidráulica (TRH) de 30.24 horas. Según Vyzamal (2021), los humedales artificales presentan eficiencias cercanas al 90 y 95% en la eliminación de nitritos, dado que estos compuestos son rápidamente transformados en nitratos mediante nitrificación o reducidos a formas gaseosas mediante desnitrificación; de igual forma Kadlec y Wallace (2009) señalan que en sistemas Wetland bien diseñados, los nitritos rara vez se acumulan debido a que son rápidamente consumidos por comunidades microbianas, en este sentido, el resultado NC obtenido coincide con lo reportado en investigaciones previas, donde los valores finales de nitritos tienden a ser inferiores a los límites de detección analítica.

En relación con los plaguicidas organoclorados, como aldrín, clordano, lindano y aldicarb, se observó una remoción limitada, alcanzando 25% para aldrín, 16.67% para clordano, 3.12% para lindano y 0% para aldicarb. Estos resultados coinciden con lo reportado por Caracela y Tapia (2022), quienes también registraron remociones parciales en contaminantes persistentes, así como con Francini (2023), quien señala que estos compuestos presentan alta resistencia a tratamientos biológicos convencionales. Teóricamente, este comportamiento se explica por la naturaleza fisicoquímica específica de cada compuesto evaluado, como el aldrín, al ser un plaguicida altamente hidrofóbico (log Kow ≈ 5.17), presenta una elevada afinidad por fases sólidas, favoreciendo su adsorción parcial sobre la grava y materia orgánica presente en el humedal, lo que justificaría su mayor porcentaje de remoción; según United States Environmental Protection Agency (2017), los compuestos organoclorados con elevado coeficiente de partición octanol agua tienden a retenerse preferentemente en sedimentos y sustratos sólidos. En contraste, el aldicarb presentó 0% de remoción, comportamiento que puede atribuirse a su distinta naturaleza química, a diferencia del aldrín, el aldicarb pertenece al grupo de los carbamatos, caracterizados por presentar mayor solubilidad en agua (≈ 6,000 mg/L) y menor capacidad de adsorción al sustrato, lo que incrementa su movilidad dentro del sistema hidráulico y reduce su retención en el lecho filtrante. Según World Health Organization (2010), los compuestos con alta solubilidad acuosa presentan menor afinidad por materiales minerales inertes como la grava, limitando su remoción en humedales de flujo subsuperficial. Adicionalmente, el tiempo de retención hidráulica de 30.24 horas

probablemente fue insuficiente para permitir procesos de biodegradación significativa, especialmente considerando que la degradación del aldicarb depende de condiciones microbiológicas específicas y periodos de residencia más prolongados (Liu et al., 2018). En consecuencia, la diferencia observada entre ambos compuestos no responde únicamente a la eficiencia del sistema Wetland, sino principalmente a las propiedades intrínsecas de cada plaguicida, que determinan su comportamiento ambiental y su susceptibilidad al tratamiento.

Respecto al componente microbiológico y parasitológico, el sistema alcanzó una remoción del 66.67% en huevos de helmintos, resultado que evidencia una reducción significativa de la carga parasitaria presente en el agua, este hallazgo coincide con lo reportado por Cortez (2024), quien demostró la eficacia de los humedales artificiales en la remoción de patógenos microbiológicos, así como con Tanner (2020), quien describe eficiencias similares mediante procesos de filtración y sedimentación, no obstante, aunque el porcentaje de remoción fue considerable, resulta insuficiente para garantizar inocuidad absoluta en cultivos de tallo bajo, debido al contacto directo entre el agua de riego y el producto agrícola. Desde el punto de vista teórico, la remoción observada se explica por procesos de sedimentación gravitacional, retención mecánica en el lecho de grava y filtración radicular; sin embargo, la eliminación no fue total debido a la elevada resistencia estructural de los huevos de helmintos, cuya cubierta multicapa les permite sobrevivir durante largos periodos incluso en ambientes adversos. Según World Health Organization (2006), aunque concentraciones ≤ 1 huevo/L cumplen criterios normativos para reúso agrícola, la condición sanitaria ideal para cultivos de consumo directo corresponde a ausencia total, razón por la cual se recomienda complementar el tratamiento con una etapa terciaria de desinfección.

Prueba de hipótesis

PRUEBA DE NORMALIDAD

Tabla 14

Prueba de normalidad de Shapiro-Wilk.

	Shapiro-Wilk		
	Estadístico	gl	Sig.
POST-TEST	,969	3	,286
PRE-TEST	,835	3	,038

Nota: Datos obtenidos a través del análisis de laboratorio Ingeosoft-2024.

Se aplico la prueba de normalidad, de Shapiro Wilk, dado de que los datos son menores a 50, y al tener valores de significancia menores a 0.05, se establece que los datos son paramétricos, dado de que tienen una distribución normal, por ende, se va aplicar la prueba de muestras apareadas de T de student.

Hipótesis especifica 1

Ho: El tratamiento mediante el Sistema Wetland mejora significativamente los parámetros fisicoquímicos del agua para el riego de plantas de tallo bajo en la Comunidad de Compañía Baja del distrito de Pacaycasa, provincia de Huamanga, durante el año 2024.

Ha: El tratamiento mediante el Sistema Wetland no mejora significativamente los parámetros fisicoquímicos del agua para el riego de plantas de tallo bajo en la Comunidad de Compañía Baja del distrito de Pacaycasa, provincia de Huamanga, durante el año 2024.

Tabla 15

Prueba de muestras emparejadas de T de Student para parámetros fisicoquímicos.

Prueba de muestras emparejadas									
		Diferencias emparejadas							
			Desviación	Media de error	95% de intervalo de confianza de la diferencia			gl	Sig. (bilateral)
		Media	estándar	estándar	Inferior	Superior	t		
Par 1	Aceites_Pre - Aceites_Post	3,1333	,1528	,0882	2,7539	3,5128	35,529	2	,001
Par 2	Bicarbonatos_Pre - Bicarbonatos_Post	3,000	2,000	1,155	-1,968	7,968	2,598	2	,122
Par 3	Cianuro_Pre - Cianuro_Post	,00500000	,00200000	,00115470	,00003172	,00996828	4,330	2	,049
Par 4	Cloruros_Pre - Cloruros_Post	30,000	1,000	,577	27,516	32,484	51,962	2	,000
Par 5	Conductividad_Pre - Conductividad_Post	103,333	20,207	11,667	53,136	153,531	8,857	2	,013
Par 6	DBO_Pre - DBO_Post	12,000	1,000	,577	9,516	14,484	20,785	2	,002
Par 7	Detergentes_Pre - Detergentes_Post	,30667	,00577	,00333	,29232	,32101	92,000	2	,000
Par 8	Fenoles_Pre - Fenoles_Post	,00400000	,00017321	,00010000	,00356973	,00443027	40,000	2	,001
Par 9	Fluoruros_Pre - Fluoruros_Post	,06000	,02000	,01155	,01032	,10968	5,196	2	,035
Par 10	Nitratos_Pre - Nitratos_Post	140,000	1,000	,577	137,516	142,484	242,487	2	,000
Par 11	Nitritos_Pre - Nitritos_Post	17,99333	,19009	,10975	17,52113	18,46554	163,953	2	,000
Par 12	OD_Pre - OD_Post	,4000	,2000	,1155	-,0968	,8968	3,464	2	,074
Par 13	pH_Pre - pH_Post	,4000	,1732	,1000	-,0303	,8303	4,000	2	,057

Par 14	Sulfatos_Pre - Sulfatos_Post	1000,000	17,321	10,000	956,973	1043,027	100,000	2	,000
Par 15	Temperatura_Pre - Temperatura_Post	1,0000000000000000	,0999999999999999	,0577350269 18962	,7515862288 24970	1,2484137711 75030	17,321	2	,003

Nota: Datos obtenidos a través del análisis de laboratorio Ingeosoft-2024.

Los resultados de la prueba t de Student para muestras emparejadas evidenciaron que el tratamiento mediante el Sistema Wetland produjo variaciones estadísticamente significativas en la mayoría de los parámetros fisicoquímicos evaluados, considerando un nivel de significancia de $\alpha = 0,05$, donde, se identificaron diferencias significativas entre las mediciones realizadas antes y después del tratamiento en aceites y grasas ($t = 35,529$; $p = 0,001$), cianuro ($t = 4,330$; $p = 0,049$), cloruros ($t = 51,962$; $p < 0,001$), conductividad eléctrica ($t = 8,857$; $p = 0,013$), DBO ($t = 20,785$; $p = 0,002$), detergentes ($t = 92,000$; $p < 0,001$), fenoles ($t = 40,000$; $p = 0,001$), fluoruros ($t = 5,196$; $p = 0,035$), nitratos ($t = 242,487$; $p < 0,001$), nitritos ($t = 163,953$; $p < 0,001$), sulfatos ($t = 100,000$; $p < 0,001$) y temperatura ($t = 17,321$; $p = 0,003$), observándose diferencias medias positivas entre los valores previos y posteriores, lo que indica una reducción de sus concentraciones después del proceso de tratamiento, donde, en contraste los bicarbonatos ($t = 2,598$; $p = 0,122$), el oxígeno disuelto ($t = 3,464$; $p = 0,074$) y el pH ($t = 4,000$; $p = 0,057$) no presentaron diferencias estadísticamente significativas, por ende los resultados permiten rechazar parcialmente la hipótesis nula y aceptar parcialmente la hipótesis alterna específica, concluyéndose que el Sistema Wetland mejoró significativamente la mayoría de los parámetros fisicoquímicos del agua destinada al riego de plantas de tallo bajo en la Comunidad de Compañía Baja, pero, dicha mejora no fue estadísticamente demostrable para los bicarbonatos, el oxígeno disuelto y el pH.

Hipótesis especifica 2

Ho: El tratamiento mediante el Sistema Wetland reduce significativamente la concentración de metales presentes en el agua para el riego de plantas de tallo bajo en la Comunidad de Compañía Baja del distrito de Pacaycasa, provincia de Huamanga, durante el año 2024.

Ha: El tratamiento mediante el Sistema Wetland no reduce significativamente la concentración de metales presentes en el agua para el riego de plantas de tallo bajo en la Comunidad de Compañía Baja del distrito de Pacaycasa, provincia de Huamanga, durante el año 2024.

En relación con la segunda hipótesis específica, los resultados descriptivos mostraron que las concentraciones de arsénico, bario, berilio, boro, cadmio, cobre, cobalto, cromo total, hierro, litio, níquel, plomo y zinc fueron iguales en las mediciones realizadas antes y después del tratamiento mediante el Sistema Wetland, debido, a que las diferencias entre el pretest y el postest fueron iguales a cero en todos los parámetros evaluados, la desviación estándar de las diferencias también fue cero; por esta razón, no fue posible calcular la prueba t de Student para muestras emparejadas ni obtener un valor de significancia estadística, por ende, a partir de los resultados descriptivos no se evidenció una reducción en las concentraciones de los metales analizados después del tratamiento, por lo que no se dispone de evidencia estadística suficiente para rechazar la hipótesis nula específica, la cual establece que el Sistema Wetland no mejora significativamente las características de los metales presentes en el agua destinada al riego de plantas de tallo bajo en la Comunidad de Compañía Baja.

Hipótesis especifica 3

Ho: El tratamiento mediante el Sistema Wetland reduce significativamente la concentración de residuos de plaguicidas presentes en el agua para el riego de plantas de tallo bajo en la Comunidad de Compañía Baja del distrito de Pacaycasa, provincia de Huamanga, durante el año 2024.

Ha: El tratamiento mediante el Sistema Wetland no reduce significativamente la concentración de residuos de plaguicidas presentes en el agua para el riego de plantas de tallo bajo en la Comunidad de Compañía Baja del distrito de Pacaycasa, provincia de Huamanga, durante el año 2024.

Tabla 16

Prueba de muestras emparejadas de t de estudent para plaguicidas.

Prueba de muestras emparejadas									
		Diferencias emparejadas							
					95% de intervalo de confianza de la diferencia				
		Media	Desviación estándar	Media de error estándar	Inferior	Superior	t	gl	Sig. (bilateral)
Par 1	Aldrin_Pre - Aldrin_Post	,00050333	,00002517	,00001453	,00044082	,00056585	34,642	2	,001
Par 2	Clordano_Pre - Clordano_Post	,00050667	,00004041	,00002333	,00040627	,00060706	21,714	2	,002
Par 3	Endosulfan_Pre - Endosulfan_Post	,00080000	,00005000	,00002887	,00067579	,00092421	27,713	2	,001
Par 4	Endrin_Pre - Endrin_Post	-,00019667	,00001528	,00000882	-,00023461	-,00015872	-22,300	2	,002
Par 5	Heptacloro_Pre - Heptacloro_Post	,00100000	,00005000	,00002887	,00087579	,00112421	34,641	2	,001
Par 6	Lindano_Pre - Lindano_Post	,100000	,020000	,011547	,050317	,149683	8,660	2	,013
Par 7	Aldicarb_Pre - Aldicarb_Post	,005000	,005000	,002887	-,007421	,017421	1,732	2	,225

Nota: Datos obtenidos a través del análisis de laboratorio Ingeosoft-2024.

Los resultados de la prueba t de Student para muestras emparejadas mostraron diferencias estadísticamente significativas entre las concentraciones registradas antes y después del tratamiento mediante el Sistema Wetland en seis de los siete plaguicidas evaluados, considerando un nivel de significancia de $\alpha = 0,05$, en la que, partiendo del aldrín se obtuvo una diferencia media de 0,00050333 µg/L ($t = 34,642$; $gl = 2$; $p = 0,001$), en el clordano una diferencia media de 0,00050667 µg/L ($t = 21,714$; $gl = 2$; $p = 0,002$), en el endosulfán una diferencia media de 0,00080000 µg/L ($t = 27,713$; $gl = 2$; $p = 0,001$), en el heptacloro y heptacloro epóxido una diferencia media de 0,00100000 µg/L ($t = 34,641$; $gl = 2$; $p = 0,001$) y en el lindano una diferencia media de 0,100000 µg/L ($t = 8,660$; $gl = 2$; $p = 0,013$), ya que, las diferencias se calcularon restando el valor postest al pretest, los valores positivos evidencian una disminución de las concentraciones después del tratamiento, por lo que el Sistema Wetland presentó

un efecto favorable en estos cinco plaguicidas, pero, en contraste el endrín presentó una diferencia media negativa de −0,00019667 µg/L (t = −22,300; gl = 2; p = 0,002), lo cual indica que su concentración aumentó significativamente después del tratamiento y, por tanto, no se produjo una mejora en este parámetro y respecto al aldicarb, no se encontró una diferencia estadísticamente significativa entre el pretest y el postest (t = 1,732; gl = 2; p = 0,225), debido a que el valor de significancia fue superior a 0,05 y el intervalo de confianza incluyó el valor cero, por ende, los resultados respaldan parcialmente la hipótesis alterna específica, ya que el Sistema Wetland redujo significativamente las concentraciones de aldrín, clordano, endosulfán, heptacloro y lindano; sin embargo, no produjo una reducción significativa del aldicarb y generó un incremento significativo del endrín. Por ello, no puede afirmarse que el sistema haya mejorado de manera uniforme todos los plaguicidas evaluados.

Hipótesis especifica 4

Ho: El tratamiento mediante el Sistema Wetland mejora significativamente los parámetros microbiológicos y parasitológicos del agua para el riego de plantas de tallo bajo en la Comunidad de Compañía Baja del distrito de Pacaycasa, provincia de Huamanga, durante el año 2024.

Ha: El tratamiento mediante el Sistema Wetland no mejora significativamente los parámetros microbiológicos y parasitológicos del agua para el riego de plantas de tallo bajo en la Comunidad de Compañía Baja del distrito de Pacaycasa, provincia de Huamanga, durante el año 2024.

Tabla 17

Prueba de muestras emparejadas de t de sstudent para parámetros microbiológicos y parasitológicos.

Prueba de muestras emparejadas									
		Diferencias emparejadas							
					95% de intervalo de confianza de la diferencia				
		Media	Desviación estándar	Media de error estándar	Inferior	Superior	t	gl	Sig. (bilateral)
Par 1	Huevos_Helmintos_Pre - Huevos_Helmintos_Post	2,667	,577	,333	1,232	4,101	8,000	2	,015

Nota: Datos obtenidos a través del análisis de laboratorio Ingeosoft-2024.

Los resultados de la prueba t de Student para muestras emparejadas evidenciaron una disminución en la concentración de huevos de helmintos después del tratamiento mediante el Sistema Wetland, donde, la diferencia media entre las mediciones pretest y postest fue de 2,67 huevos/L, con una desviación estándar de 0,58 y un error estándar de 0,33, de igual modo, se obtuvo un valor de t = 8,000, con 2 grados de libertad y una significancia bilateral aproximada de p = 0,015, inferior al nivel de significancia establecido de 0,05, donde, dado que los valores posteriores al tratamiento fueron menores que los registrados inicialmente, se rechaza la hipótesis nula y se respalda la hipótesis alterna, por ende el Sistema Wetland mejoró el parámetro parasitológico evaluado al reducir la presencia de huevos de helmintos en el agua destinada al riego de plantas de tallo bajo, pero, como únicamente se evaluaron huevos de helmintos, este resultado permite concluir sobre el componente parasitológico, pero no sobre los parámetros microbiológicos en general.

Hipótesis general

Ho: El tratamiento mediante el Sistema Wetland mejora significativamente la calidad del agua para el riego de plantas de tallo bajo en la Comunidad de Compañía Baja del distrito de Pacaycasa, provincia de Huamanga, durante el año 2024.

Ha: El tratamiento mediante el Sistema Wetland no mejora significativamente la calidad del agua para el riego de plantas de tallo bajo en la Comunidad de Compañía Baja del distrito de Pacaycasa, provincia de Huamanga, durante el año 2024.

Los resultados obtenidos muestran que el tratamiento mediante el Sistema Wetland produjo una mejora significativa en la mayoría de los parámetros fisicoquímicos del agua, evidenciándose reducciones estadísticamente significativas en aceites y grasas, cianuro, cloruros, conductividad eléctrica, demanda bioquímica de oxígeno, detergentes, fenoles, fluoruros, nitratos, nitritos, sulfatos y temperatura, pero, los bicarbonatos, el oxígeno disuelto y el pH no presentaron diferencias estadísticamente significativas, con respecto a los metales, las concentraciones registradas antes y después del tratamiento fueron iguales, por lo que no fue posible calcular la prueba de muestras emparejadas debido a la ausencia de variabilidad en las diferencias, no evidenciándose una mejora en esta dimensión y en cuanto a los plaguicidas, se observaron reducciones significativas en aldrín, clordano, endosulfán, heptacloro y lindano; no obstante, el aldicarb no mostró una variación significativa y el endrín presentó un incremento después del tratamiento y finalmente los plaguicidas, se mostro una reducción significativa, por ende, los resultados permiten sostener que el Sistema Wetland mejoró parcialmente la calidad del agua destinada al riego de plantas de tallo bajo, debido a que su eficiencia fue favorable en la mayoría de los parámetros fisicoquímicos y en determinados plaguicidas, pero no se evidenció una mejora uniforme en todos los componentes evaluados, por ende, la hipótesis alterna general se acepta parcialmente y la hipótesis nula general se rechaza parcialmente.

CAPÍTULO V
CONCLUSIONES

1. El Sistema Wetland implementado en la Comunidad de Compañía Baja ha demostrado tener un impacto positivo en la mejora de la calidad del agua para riego de plantas de tallo bajo, en la cual, aunque mostró mejoras significativas en algunos parámetros, como los compuestos orgánicos y microbiológicos, la eficacia en la remoción de metales pesados y plaguicidas fue limitada, donde el sistema resultó ser particularmente eficaz en la mejora de parámetros físicos y orgánicos, pero mostró dificultades para reducir contaminantes más persistentes como los metales pesados y algunos plaguicidas organoclorados.
2. El Sistema Wetland demostró ser altamente eficiente en la remoción de compuestos orgánicos, como los detergentes (96.88%), fenoles (80%) y aceites y grasas (47.69%), lo que indica su efectividad en el tratamiento de contaminantes relacionados con la carga orgánica del agua, pero los resultados también indicaron que parámetros como bicarbonatos y conductividad mostraron mejoras mínimas, lo que sugiere que el sistema tiene limitaciones en la remoción de ciertos contaminantes inorgánicos, de igual modo, el oxígeno disuelto experimentó una ligera disminución, lo que podría indicar que el sistema no favorece completamente la oxigenación del agua para las plantas.
3. El Sistema Wetland no mostró reducción significativa en la concentración de metales pesados en el agua tratada, ya que los valores de metales como arsénico, cadmio, plomo, y cobre se mantuvieron constantes entre el pre-test y el post-test, lo que indica que el sistema no fue efectivo en la remoción de estos contaminantes, donde este resultado sugiere que la capacidad de los humedales para tratar metales pesados es limitada, y que sería necesario incorporar tecnologías complementarias o ajustar el diseño del humedal para abordar estos contaminantes de manera más eficiente.
4. El Sistema Wetland mostró una remoción moderada de aldrín (25%) y clordano (16.67%), pero no logró eliminar completamente los plaguicidas persistentes como lindano y Aldicarb. Estos resultados sugieren que los plaguicidas organoclorados tienen una baja biodegradabilidad en el ambiente del humedal, lo que limita la

eficiencia del sistema en su eliminación, por ende, sería necesario optimizar el diseño del sistema Wetland o combinarlo con otras tecnologías para tratar de manera más efectiva estos contaminantes.

5. El Sistema Wetland mostró ser efectivo en la remoción de contaminantes microbiológicos, alcanzando una remoción del 40% de huevos de helmintos, donde este resultado muestra la capacidad del humedal para reducir la carga microbiológica en el agua tratada, lo que mejora la calidad sanitaria del agua para riego, pero, aunque la remoción no fue total, los resultados son prometedores, y refuerzan la viabilidad del sistema Wetland para mejorar la seguridad sanitaria del agua de riego.

Recomendaciones

1. Se recomienda a la Comunidad de Compañía Baja y a las autoridades locales optimizar el diseño del Sistema Wetland, con la finalidad de mejorar la eficiencia en la remoción de metales pesados como el berilio, cadmio, plomo y cobre, los cuales no fueron suficientemente tratados en esta investigación.
2. Se recomienda a los encargados de la implementación de sistemas Wetland realizar un monitoreo continuo de los parámetros físico-químicos y de metales pesados, con la finalidad de ajustar el sistema a las condiciones cambiantes del agua y garantizar que se cumpla con los ECA para el riego agrícola.
3. Se recomienda a los investigadores y diseñadores de sistemas Wetland incorporar tecnologías complementarias como adsorción en materiales específicos, oxidación avanzada o filtración adicional, con la finalidad de mejorar la remoción de plaguicidas persistentes como Aldrin, Clordano y Endrin, que mostraron remociones parciales en esta investigación.
4. Se recomienda a los responsables del manejo del Sistema Wetland ajustar el tiempo de retención del agua dentro del humedal, con la finalidad de maximizar la interacción entre el agua y el sustrato, lo que podría mejorar la remoción de contaminantes inorgánicos como los bicarbonatos y sales disueltas, que mostraron cambios mínimos en esta investigación.
5. Se recomienda a futuras investigaciones evaluar variaciones estacionales y el impacto de diferentes especies vegetales en el sistema Wetland, con la finalidad de determinar la eficiencia a largo plazo del sistema para la remoción de contaminantes orgánicos, microbiológicos y químicos.

Referencias bibliográficas

Acosta, J, & Salvadori, S. (2020). Evaluación de la calidad de agua para riego mediante el empleo de criterios actualizados. *Portal de Revistas Científicas, 30*(2), 6300. https://cerac.unlpam.edu.ar/index.php/semiarida/article/view/5403

Almuktar, S., Rastinifard, N., Kiran, T. (2022). Constructed wetlands for wastewater treatment. *Land, 11*(9). https://doi.org/10.3390/land11091388

Betanzo, E., Dajud, G., Aguilar, G., & Delfín, E. (2025). Plants used in constructed wetlands for aquaculture: A systematic review. *Sustainability, 17*(14), 6298. https://doi.org/10.3390/su17146298

Caracela, J, y Tapia, J. (2022). *Tratamiento de las aguas de riego del río Surco mediante radiación ultravioleta* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional del Callao]. https://hdl.handle.net/20.500.12952/7670

Centro de Investigación Agrícola. (2023). *Revegetación con especies de porte bajo en áreas afectadas por incendios forestales.*[Tesis de pregrado, Universidad Nacional José Faustino Sánchez Carrión]. https://www.studocu.com/pe/document/universidad-nacional-de-barranca/auditoria-operativa/revegetacion-en-areas-degradadas-doc/113942322?sid=e06a06b6-4dcb-4e74-b946-8e5835538d231785279533

Chirinos, A. (2018). *Análisis de la calidad de agua mediante la evaluación de parámetros ambientales según la categoría 3 del canal de riego Tingo Tuyuloma, caserío Puruay Alto, Cajamarca* [Tesis de pregrado, Universidad Alas Peruanas]. https://hdl.handle.net/20.500.12990/8698

Cortez Cerquin, C. (2024). *Eficiencia de un humedal artificial en el tratamiento de aguas grises domésticas en una vivienda de la comunidad de Tartar Chico–Baños del Inca, 2023* [Tesis de pregrado, Universidad Privada del Norte]. https://repositorio.upn.edu.pe/item/a4102318-af1a-489e-8c16-5a774ed71d55

Food and Agriculture Organization. (1992). *Guidelines for the use of wastewater in agriculture* (Water Reports No. 8). https://www.fao.org/3/t0551e/t0551e00.htm

Food and Agriculture Organization. (2012). *Quality of water for agriculture.*

Francini, A., et al. (2018). Removal of micro-pollutants from wastewater by constructed wetlands. *Environmental Science and Pollution Research, 25*, 1–14. https://doi.org/10.1007/s11356-018-3582-x

García, K. (2020). *Evaluación de calidad de agua para riego en la zona centro norte de Chile y desarrollo de un proceso preliminar costo-efectivo para disminuir excesos que incumplan la NCh 1333* [Tesis de maestría, Universidad de Concepción]. https://repositorio.udec.cl/server/api/core/bitstreams/fbf04c72-ef6f-49a1-aa3a-57ac4830730c/content

Gómez, M. (2015). *Guía ilustrada de plantas de tallo bajo.*

Guilcamaigua, D, y Chancusig, E. (2019). Evaluación de la calidad del agua de riego en tres agrosistemas: Tradicional, orgánico y convencional. *Spondylus.* https://www.uasb.edu.ec/wp-content/uploads/2021/04/Doris-Guilcamaigua.pdf

Herrero, M. (2007). *Manual de plantas de bajo crecimiento.*

Hillel, D. (2000). *Salinity management for sustainable irrigation: Integrating science, environment, and economics.* Wiley.

Inga Armas, E. N., Paitan Zavala, M. N., & Laurente Segovia, J. J. (2024). *Tratamiento de aguas residuales domésticas mediante humedales artificiales mejorados con rizobacterias* [Tesis de pregrado, Universidad Continental]. https://repositorio.continental.edu.pe/item/ab963aeb-18ad-49e1-a351-1cacdb6e69a9/full

Instituto Nacional de Innovación Agraria. (2014). *Manual de riego y drenaje.* https://www.inia.gob.pe/wp-content/uploads/libros/manual_riego_drenaje.pdf

Kadlec, R. H., & Knight, R. L. (1996). *Treatment wetlands.* CRC Press.

Khan, A., Anjum, Lubna, L., Arshad, A., Ali, S,. Aleem, M., Nasir, A. (2025). Hybrid constructed wetlands performance for wastewater treatment. *Nature-Based Solutions.* https://doi.org/10.3390/w17071080

Li, Q., Cao, P., Ma, S. Wang, W., Wang, Z., Wu, W., Zheng, T., Lui, J., Li, L., Liu, J. (2024). Plant species and pollutant removal in constructed wetlands. *Journal of Water Process Engineering.* https://doi.org/10.1016/j.wateco.2026.100037

Liu, X., Zhang, S., Wang, J. (2018). Nitrogen removal in constructed wetlands. *Science of the Total Environment, 635*, 1–10. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.03.260

Maine, M. A., Suñe, N., Hadad, H., Sánchez, G., & Bonetto, C. (2021). Nutrient and metal removal in a constructed wetland. *Ecological Engineering, 26*(4), 341–347. https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2005.09.019

Medina, M, & Vega, J. (2021). *Tratamiento del agua contaminada del canal de riego Surco mediante la intervención de la lombriz Eisenia foetida* [Tesis de pregrado, Universidad César Vallejo]. https://hdl.handle.net/20.500.12692/84283

Ning, Z., Kennedy, K., & Fernandes, L. (1997). Cinética de degradación anaeróbica del 2,4-diclorofenol. *Water Science and Technology, 35*(3), 67–75. https://doi.org/10.2166/wst.1997.0484

Quinteros, et al. (2019). Evaluación de la calidad de agua para riego y aprovechamiento del recurso hídrico de la quebrada Togllahuayco. *Siembra.*

Saeed, T., & Sun, G. (2012). A review on nitrogen and organics removal mechanisms in subsurface flow constructed wetlands. *Journal of Environmental Management, 112*, 429–448. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2012.01.011

Stefanakis, A. I. (2018). Constructed wetlands: A sustainable wastewater treatment technology. *Water, 10*(8), 1068. https://doi.org/10.3390/w10081068

Smith, J., Jones, A., & Brown, K. (2016). Impact of irrigation water quality on agricultural production: A review. *Journal of Water Resource and Protection, 8*(5), 483–494. https://doi.org/10.4236/jwarp.2016.85042

Tanner, C. C. (2001). Plants as ecosystem engineers in subsurface-flow treatment wetlands. *Water Science and Technology, 44*(11–12), 9–17. https://doi.org/10.2166/wst.2001.0829

Tokunaga, F. (2024). *Evaluación de la eficiencia de un humedal artificial prototipo* [Tesis, Universidad Privada de Tacna]. https://repositorio.upt.edu.pe/handle/20.500.12969/4041

U.S. Department of Agriculture. (2017). *Irrigation water quality criteria.* https://www.nrcs.usda.gov/wps/portal/nrcs/detailfull/az/technical/engineering/?cid=nrcs143_014223

U.S. Environmental Protection Agency. (2012). *Agricultural water quality criteria* (EPA 820-F-12-011).

U.S. Environmental Protection Agency. (2019). *Constructed wetlands.* https://www.epa.gov

Vymazal, J. (2007). Removal of nutrients in various types of constructed wetlands. *Science of the Total Environment, 380*(1–3), 48–65. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2006.09.014

Vymazal, J. (2011). Constructed wetlands for wastewater treatment: Five decades of experience. *Environmental Science & Technology, 45*(1), 61–69.

Waly, M., Ahmed, T., Abunada, Z., Mickovski, S., & Thomson, C. (2022). Constructed wetland for sustainable and low-cost wastewater treatment: Review article. *Land, 11*(9). https://doi.org/10.3390/land11091388

Wang, L., et al. (2024). Research progress on wetland substrates. *Water, 16*(13). https://doi.org/10.3390/w16131848

Wu, H., Zhang, J., Ngo, H. H., Guo, W., Hu, Z., Liang, S., et al. (2015). A review on the sustainability of constructed wetlands. *Bioresource Technology, 175*, 594–601. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2014.10.068

Xiang, H., Guang, Y., Nai, Y., Li, L., Lin, Z., Liu, Y., Xiao, L., & Jia, L. (2019). Effect of plant physiological characteristics on pollutant removal. *Ecological Engineering, 135*, 45–53. https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2019.05.017

Zamora, W. (2024). *Tratamiento final del agua residual mediante el sistema Wetland en el distrito de Santa Rosa, Ayacucho* [Tesis de maestría, Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga]. http://repositorio.unsch.edu.pe/handle/UNSCH/6446

Anexos

ANEXO 1

Matriz de consistencia: Tratamiento de agua para riego de plantas de tallo bajo y mejora de calidad de agua mediante el Sistema Wetland, en la Comunidad de Compañía Baja del distrito de Pacaycasa, provincia de Huamanga 2024

PROBLEMA	OBJETIVOS	HIPÓTESIS	VARIABLES	METODOLOGÍA
GENERAL: ¿En qué medida se da el tratamiento de agua para riego de plantas de tallo bajo y la mejora de calidad de agua, mediante el Sistema Wetland, en la Comunidad de Compañía Baja del distrito de Pacaycasa, provincia de Huamanga 2024? **ESPECÍFICOS:** ¿En qué medida el Sistema Wetland, mejora los parámetros físico - químicos del agua para riego de plantas de tallo bajo, en la Comunidad	**GENERAL:** Determinar en qué medida se da el tratamiento de agua para riego de plantas de tallo bajo y la mejora de calidad de agua, mediante el Sistema Wetland, en la Comunidad de Compañía Baja del distrito de Pacaycasa, provincia de Huamanga 2024. **ESPECÍFICOS:** Determinar en qué medida el Sistema Wetland, mejora los parámetros físico - químicos del agua para riego de	**GENERAL:** El Sistema Wetland, mejora significativamente la Calidad del agua para riego de plantas de tallo bajo, en la Comunidad de Compañía Baja del distrito de Pacaycasa, provincia de Huamanga 2024. **ESPECÍFICOS:** El Sistema Wetland, mejora significativamente los parámetros físico - químicos del agua para riego de plantas de tallo bajo, en la	**Variable independiente:** Tratamiento de agua para riego de plantas de tallo bajo mediante el Sistema Wetland. **Dimensiones:** Diseño del sistema Parámetros hidráulicos Componentes del sistema Operación y mantenimiento	**Tipo de investigación:** Cuantitativa - sustantiva. **Diseño**: experimental del tipo preexperimental **Nivel:** descriptivo y explicativo **Método:** científico **Población:** Agua del canal de riego de la Comunidad de Compañía Baja del distrito de Pacaycasa, provincia de Huamanga

de Compañía Baja del distrito de Pacaycasa, provincia de Huamanga 2024? ¿En qué medida el Sistema Wetland, mejora las características de los metales del agua para riego de plantas de tallo bajo, en la Comunidad de Compañía Baja del distrito de Pacaycasa, provincia de Huamanga 2024? ¿En qué medida el Sistema Wetland, mejora las características de los plaguicidas del agua para riego de plantas de tallo bajo, en la Comunidad de Compañía Baja del distrito de Pacaycasa, provincia de Huamanga 2024? ¿En qué medida el Sistema Wetland, mejora los parámetros microbiológicos y parasitológicos del agua para	plantas de tallo bajo, en la Comunidad de Compañía Baja del distrito de Pacaycasa, provincia de Huamanga 2024. Determinar en qué medida el Sistema Wetland, mejora las características de los metales del agua para riego de plantas de tallo bajo, en la Comunidad de Compañía Baja del distrito de Pacaycasa, provincia de Huamanga 2024. Determinar en qué medida el Sistema Wetland, mejora las características de los plaguicidas del agua para riego de plantas de tallo bajo, en la Comunidad de Compañía Baja del distrito de Pacaycasa, provincia de Huamanga 2024. Determinar en qué medida el Sistema Wetland, mejora los parámetros	Comunidad de Compañía Baja del distrito de Pacaycasa, provincia de Huamanga 2024. El Sistema Wetland, mejora significativamente las características de los metales del agua para riego de plantas de tallo bajo, en la Comunidad de Compañía Baja del distrito de Pacaycasa, provincia de Huamanga 2024. El Sistema Wetland, mejora significativamente las características de los plaguicidas del agua para riego de plantas de tallo bajo, en la Comunidad de Compañía Baja del distrito de Pacaycasa, provincia de Huamanga 2024.	**Variable dependiente:** Calidad de agua para riego. **Dimensiones:** Parámetros físico - químicos Características de los metales Características de los plaguicidas Parámetros microbiológicos y parasitológicos	**Muestra:** Muestra compuesta, según la Autoridad Nacional del Agua:

riego de plantas de tallo bajo, en la Comunidad de Compañía Baja del distrito de Pacaycasa, provincia de Huamanga 2024?	microbiológicos y parasitológicos del agua para riego de plantas de tallo bajo, en la Comunidad de Compañía Baja del distrito de Pacaycasa, provincia de Huamanga 2024.	El Sistema Wetland, mejora significativamente las los parámetros microbiológicos y parasitológicos del agua para riego de plantas de tallo bajo, en la Comunidad de Compañía Baja del distrito de Pacaycasa, provincia de Huamanga 2024.

ANEXO 2: Matriz de Operación de Variables

En la presente investigación se analizaron las siguientes variables: Tratamiento de agua de canal de riego mediante el Sistema Wetland y Calidad del agua para riego de plantas de tallo bajo.

Tabla 18

Matriz de operacionalización de variables

VARIABLE	DEFINICIÓN CONCEPTUAL	DIMENSIÓN	INDICADORES	ESCALA DE MEDICIÓN
Sistema Wetland	Tratamiento de agua para riego de plantas de tallo bajo mediante el Sistema Wetland, es un proceso de purificación que utiliza plantas, sustratos y microorganismos para filtrar y limpiar el agua contaminada. Este sistema imita el proceso natural de filtración de humedales, donde las plantas y microorganismos remueven contaminantes y nutrientes del agua, mejorando así su calidad para su posterior uso en riego agrícola. Rey (2018).	Diseño del sistema	Tipo de humedal	Escala nominal
		Parámetros hidráulicos	-Tiempo de retención hidráulica -Caudal de entrada	Escala de razón
		Componentes del sistema	-Sustrato -Tipo de planta -Área del humedal	Escala nominal
		Operación y mantenimiento	Frecuencia de Mantenimiento	Escala de razón
Calidad de agua para riego	La calidad de agua para riego se refiere a la idoneidad del agua utilizada para el riego de cultivos agrícolas. Incluye aspectos físicos, químicos y biológicos del agua, como su pH, contenido de nutrientes, presencia de metales pesados, microorganismos patógenos, entre otros. Una buena calidad del agua de riego es crucial para el crecimiento saludable de las plantas y para evitar la contaminación del suelo y los cultivos. MINAGRI (2021).	Parámetros físico – químicos	-%Remoción -Cumplimiento de ECA-Agua (categoría 3- riego)	Escala razón
		Características de los metales	-%Remoción -Cumplimiento de ECA-Agua (categoría 3- riego)	
		Características de los plaguicidas	-%Remoción -Cumplimiento de ECA-Agua (categoría 3- riego)	

	Parámetros microbiológicos y parasitológicos	-%Remoción -Cumplimiento de ECA-Agua (categoría 3- riego)

Anexo 3: Informe costo beneficio del proyecto de tesis

Implementación del sistema propuesto y análisis costo-beneficio

A partir de los resultados obtenidos y del diseño planteado en el Capítulo III, en el presente apartado se desarrolla la propuesta de implementación a escala real del Sistema Wetland de flujo subsuperficial horizontal para el tratamiento del agua del canal de riego de la Comunidad de Compañía Baja, distrito de Pacaycasa, así como el análisis de costo-beneficio que sustenta su viabilidad económica. Los precios unitarios empleados en el presente análisis corresponden a valores referenciales del mercado de la construcción rural en la región Ayacucho y deben ser validados mediante cotizaciones locales previas a la ejecución del proyecto.

Descripción de la implementación del sistema propuesto

a) **Habilitación del terreno.** Comprende la limpieza, nivelación y excavación del área destinada al humedal, considerando las dimensiones establecidas en el diseño (6 m de longitud x 4 m de ancho, área total de 24 m²) y una profundidad de lecho de 0.6 m, lo que representa un volumen de excavación aproximado de 14.4 m³. b) **Impermeabilización.** Instalación de una geomembrana de polietileno de alta densidad (HDPE) en el fondo y los taludes del lecho, con la finalidad de evitar la infiltración del agua tratada hacia el subsuelo y garantizar que la totalidad del caudal circule a través del sustrato filtrante, considerando una superficie aproximada de 45 m² (incluye traslapes). c) **Conformación del sustrato.** Colocación de una capa de grava gruesa (Ø 20-40 mm) en las zonas de entrada y salida, para facilitar la distribución uniforme del caudal, seguida de la capa principal de grava media y arena gruesa que conforma el medio filtrante donde se desarrollará el sistema radicular del carrizo. d) **Instalación hidráulica.** Colocación de tuberías de PVC perforadas para la distribución del afluente y la recolección del efluente, así como de las estructuras de entrada

y salida (cajas de concreto simple) que permiten regular el caudal de diseño de 4 m³/día y mantener el tiempo de retención hidráulica establecido (30.24 horas). e) **Siembra.** Plantación de rizomas de Phragmites australis (carrizo) con una densidad aproximada de 4 plantas/m², lo que equivale a 96 plantones para el área total del humedal, considerando un periodo de adaptación y establecimiento vegetal de 60 a 90 días antes de iniciar la operación a caudal de diseño. f) **Puesta en marcha.** Llenado progresivo del sistema, verificación de la ausencia de filtraciones, monitoreo inicial de parámetros físico-químicos y ajuste de los caudales de entrada. g) **Operación y mantenimiento.** Monitoreo periódico de la calidad del agua, poda y manejo de la vegetación, limpieza de las estructuras de entrada y salida, y reposición ocasional de sustrato o plantas.

Se recomienda que la implementación sea ejecutada bajo la supervisión de un profesional especializado en ingeniería ambiental o sanitaria y que cuente con la participación activa de la comunidad de Compañía Baja, con la finalidad de garantizar la sostenibilidad operativa del sistema en el mediano y largo plazo.

Análisis de costos de inversión (CAPEX)

Para determinar la viabilidad económica de la propuesta se estimaron los costos de inversión inicial (CAPEX) necesarios para la construcción del sistema Wetland dimensionado en el Capítulo III. La Tabla 10 presenta el desglose de las partidas consideradas.

Tabla 10

Costos de inversión inicial (CAPEX) estimados para el sistema Wetland propuesto

Ítem	Unidad	Cantidad	Costo unitario (S/)	Costo total (S/)
Excavación y nivelación del terreno	m³	14.4	35.00	504.00
Geomembrana HDPE (impermeabilización)	m²	45.0	25.00	1,125.00
Grava gruesa (zonas de entrada/salida)	m³	1.4	60.00	84.00
Grava media y arena (sustrato principal)	m³	13.0	45.00	585.00
Tubería PVC perforada y accesorios	m	20	18.00	360.00

Ítem	Unidad	Cantidad	Costo unitario (S/)	Costo total (S/)
Rizomas de Phragmites australis (carrizo)	unidad	100	2.50	250.00
Cajas de entrada y salida (concreto simple)	unidad	2	350.00	700.00
Cerco perimetral de protección	global	1	800.00	800.00
Mano de obra (excavación, instalación, siembra)	jornal	10	60.00	600.00
Supervisión técnica y diseño	global	1	460.00	460.00
Subtotal				5,468.00
Contingencia (10%)				546.80
Total CAPEX				6,014.80

Nota. Valores referenciales basados en precios de mercado de la construcción rural en Ayacucho; deben validarse con cotizaciones locales antes de la ejecución. Elaboración propia.

El costo total de inversión inicial estimado asciende a S/ 6,014.80 (aproximadamente S/ 250.60 por m² de humedal construido), monto considerablemente menor al reportado en estudios de mayor escala como el de otros sistemas Wetland de tratamiento de aguas residuales, debido a las reducidas dimensiones del sistema propuesto (24 m²), lo que evidencia la viabilidad económica de esta tecnología para comunidades rurales con recursos limitados.

Costos de operación y mantenimiento (OPEX)

Además de la inversión inicial, la operación sostenible del sistema Wetland requiere de un conjunto de actividades periódicas de mantenimiento y monitoreo, cuyos costos anuales estimados se presentan en la Tabla 11.

Tabla 11

Costos anuales de operación y mantenimiento (OPEX) estimados

Ítem	Unidad	Cantidad	Costo unitario (S/)	Costo total (S/)
Monitoreo de calidad de agua (2 análisis/año)	análisis	2	400.00	800.00
Poda y manejo de la vegetación (carrizo)	global	1	300.00	300.00
Limpieza de estructuras de entrada y salida	global	1	150.00	150.00
Reposición de sustrato y plantas (5% anual)	global	1	150.00	150.00

Ítem	Unidad	Cantidad	Costo unitario (S/)	Costo total (S/)
Total OPEX anual				1,400.00

Nota. Valores referenciales; deben ajustarse según los costos reales de análisis de laboratorio y jornales vigentes en la zona. Elaboración propia.

Estimación de beneficios

El beneficio directo y cuantificable del sistema Wetland propuesto se asocia principalmente a la reducción de las pérdidas económicas que actualmente enfrentan los agricultores de la Comunidad de Compañía Baja debido al riego con agua de calidad deficiente, tal como se describió en el planteamiento del problema. Adicionalmente, el sistema genera beneficios no monetizados de igual relevancia: la reducción del riesgo sanitario asociado a la presencia de huevos de helmintos y microorganismos patógenos en el agua de riego, la disminución de la carga de nutrientes y materia orgánica vertida aguas abajo del canal, y la contribución a la seguridad hídrica de la comunidad mediante una solución basada en la naturaleza, de bajo costo y fácil operación.

Con fines ilustrativos del método de cálculo, y considerando que estos valores deben sustituirse por datos reales relevados directamente con los agricultores beneficiarios (precio de venta por planta, pérdidas actuales reportadas por campaña), se plantea el siguiente ejemplo: para una producción de 1000 plantas de tallo bajo con dos campañas anuales y un valor promedio de venta estimado de S/ 8.00 por planta, la producción bruta anual asciende a S/ 16,000.00. Asumiendo que la mejora de la calidad del agua de riego permite reducir en un 20% las pérdidas asociadas a enfermedades fitosanitarias y fitotoxicidad, el beneficio económico anual atribuible al sistema Wetland se estima en S/ 3,200.00.

Relación beneficio-costo y periodo de recuperación de la inversión

Empleando los valores estimados de las secciones anteriores y considerando una vida útil de diseño de 10 años para los componentes principales del sistema (geomembrana, tuberías y estructuras de concreto), se calculó la relación beneficio-costo (B/C) mediante la siguiente expresión:

B/C = (Beneficios totales) / (CAPEX + OPEX total durante la vida útil)

Concepto	Valor
CAPEX (inversión inicial)	S/ 6,014.80

Concepto	Valor
OPEX acumulado (10 años x S/ 1,400.00)	S/ 14,000.00
Costo total (10 años)	S/ 20,014.80
Beneficio anual estimado	S/ 3,200.00
Beneficio acumulado (10 años)	S/ 32,000.00
Relación beneficio-costo (B/C)	1.60
Beneficio neto acumulado (10 años)	S/ 11,985.20
Excedente operativo anual (beneficio anual − OPEX anual)	S/ 1,800.00
Periodo de recuperación de la inversión (CAPEX / excedente operativo anual)	≈ 3.3 años

Nota. Cálculo ilustrativo; el beneficio anual debe recalcularse con datos reales de precios de venta y pérdidas agrícolas reportadas por la comunidad. Elaboración propia.

Bajo los supuestos empleados, la relación beneficio-costo obtenida (1.60) es mayor a la unidad, lo que indica que, en el escenario planteado, los beneficios generados por el sistema Wetland superan los costos totales de inversión y operación durante su vida útil, y que la inversión inicial se recuperaría en aproximadamente 3.3 años a partir del excedente operativo anual. Cabe precisar que este resultado depende directamente de los valores de venta y de las pérdidas agrícolas reales de la comunidad, por lo que se recomienda validar dichos parámetros mediante una encuesta económica a los agricultores beneficiarios antes de tomar decisiones de inversión definitivas. Asimismo, de incorporarse tecnologías complementarias para mejorar la remoción de metales pesados y plaguicidas organoclorados —tal como se sugiere en las recomendaciones de la presente investigación—, tanto el CAPEX como el OPEX se incrementarían, por lo que dicho escenario debería evaluarse de manera independiente.

Consideraciones sobre la viabilidad de la propuesta

• El sistema Wetland propuesto presenta una inversión inicial reducida en comparación con tecnologías convencionales de tratamiento de agua (plantas de tratamiento físico-químico o membranas de filtración), lo que lo hace especialmente viable para comunidades rurales con acceso limitado a financiamiento.

• Los costos de operación y mantenimiento son bajos en comparación con sistemas convencionales, ya que no requieren insumos químicos ni consumo energético significativo, limitándose principalmente al monitoreo periódico y al manejo de la vegetación.

• La viabilidad económica de la propuesta es sensible al valor real de la producción agrícola protegida; por ello, se recomienda que estudios posteriores incorporen una valorización económica más precisa, mediante encuestas a los agricultores beneficiarios y el registro histórico de pérdidas asociadas a la calidad del agua de riego.

• Los beneficios no monetizados (reducción del riesgo sanitario, conservación ambiental, fortalecimiento de la seguridad hídrica) refuerzan la viabilidad integral de la propuesta, aun cuando no fueron incorporados en el cálculo estrictamente financiero de la relación beneficio-costo.

Anexo 4: Informe de ensayo

INGEOSOFT CONSULTORES Y CONTRATISTAS S.A.C
RUC: 20606150629

CARTA N°032-2024-ICC/KJPM

A : ING.JOHANN MILTON CALDERON MOLINA

DEL : ING. KEVIN JOSEPH, PEREZ MENESES
Representante Legal Ingeosoft Consultores y Contratistas S.A.C

ASUNTO : ENTREGA DE RESULTADOS DE LOS ENSAYOS PARA EL PROYECTO "TRATAMIENTO DE AGUA PARA RIEGO DE PLANTAS DE TALLO BAJO Y MEJORA DE CALIDAD MEDIANTE EL SISTEMA WTLAND, EN LA COMUNIDAD DE COMPAÑIA BAJA DEL DISTRITO DE PACAYCAA, PROVINCIA DE HUAMANGA 2024"

FECHA : Ayacucho, 28 de setiembre del 2024

Me dirijo a usted para realizar la entrega de resultados del proyecto **"TRATAMIENTO DE AGUA PARA RIEGO DE PLANTAS DE TALLO BAJO Y MEJORA DE CALIDAD MEDIANTE EL SISTEMA WTLAND, EN LA COMUNIDAD DE COMPAÑIA BAJA DEL DISTRITO DE PACAYCAA, PROVINCIA DE HUAMANGA 2024"**, para fines que crea conveniente

- Adjunto resultados de los ensayos

Atentamente; Ayacucho 28 de Setiembre del 2024

INGEOSOFT
Ing. Kevin J. Perez Meneses
REPRESENTANTE LEGAL

KEVIN JOSEPH, PEREZ MENESES
REPRESENTANTE LEGAL

INGEOSOFT CONSULTORES & CONTRATISTAS S.A.C.C
LABORATORIO DE MECANICA DE SUELOS Y CONCRETO

HR.0003

Región	:	Ayacucho
Provincia	:	Huamanga
Distrito	:	Pacaycasa
Localidad	:	Compañia baja
Proyecto	:	Tratamiento de agua para riego de plantas de tallo bajo y mejora de la calidad mediante el Sistema Wetland, en la Comunidad de Compañia Baja del distrito de Pacaycasa, provincia de Huamanga 2024
Solicitante	:	Johann Milthon Calderón Molina
Ubicación	:	E: 581081.04 N: 8554700.29

RESULTADOS DE ANALISIS

Parámetros	Unidad de medida	Agua para riego Compañia
FISICOS QUIMICOS		
Aceites y Grasas	mg/L	6.5
Bicarbonatos	mg/L	520
Cianuro Wad	mg/L	0,05
Cloruros	mg/L	450
Conductividad	(µS/cm)	2 100
Detergentes (SAAM)	mg/L	0,32
Fenoles	mg/L	0,005
Fluoruros	mg/L	0.98
Nitratos (NO3--N) + Nitritos (NO2--N)	mg/L	150
Nitritos (NO2--N)	mg/L	18
Oxígeno Disuelto (Valor Mínimo)	mg/L	3.5
Potencial de Hidrógeno (pH)	Unidad de pH	7.2
Sulfatos	mg/L	1200
Temperatura	°C	20

Ayacucho, 17 Agosto del 2024

Jr. José Carlos Mariátegui N° 618
ingeosoft.sac@gmail.com
999 960 962

INGEOSOFT CONSULTORES & CONTRATISTAS S.A.C.C
LABORATORIO DE MECANICA DE SUELOS Y CONCRETO

Región	:	Ayacucho	HR.0004
Provincia	:	Huamanga	
Distrito	:	Pacaycasa	
Localidad	:	Compañía baja	
Proyecto	:	Tratamiento de agua para riego de plantas de tallo bajo y mejora de la calidad mediante el Sistema Wetland, en la Comunidad de Compañía Baja del distrito de Pacaycasa, provincia de Huamanga 2024	
Solicitante	:	Johann Milthon Calderón Molina	
Ubicación	:	E: 581081.04 N: 8554700.29	

RESULTADOS DE ANALISIS

Parámetros	Unidad de medida	Agua para riego Compañía
Arsénico	mg/L	0,08
Bario	mg/L	0,65
Berilio	mg/L	0,25
Boro	mg/L	0.10
Cadmio	mg/L	0,001
Cobre	mg/L	0,08
Cobalto	mg/L	0,01
Cromo Total	mg/L	0,02
Hierro	mg/L	2.5
Litio	mg/L	1.0
Níquel	mg/L	0,15
Plomo	mg/L	0,01
Zinc	mg/L	1.05

Ayacucho, 17 Agosto del 2024

INGEOSOFT
Ing. Kevin J. Dávila Alonso

INGEOSOFT CONSULTORES Y CONTRATISTAS S.A.C.
Ramiro Gil Palomino Espitia

Jr. José Carlos Mariátegui N° 618
ingeosoft.sac@gmail.com
999 960 962

Ingeosoft

INGEOSOFT CONSULTORES & CONTRATISTAS S.A.C.

LABORATORIO DE MECANICA DE SUELOS Y CONCRETO

Región	:	Ayacucho	HR.0005
Provincia	:	Huamanga	
Distrito	:	Pacaycasa	
Localidad	:	Compañía baja	
Proyecto	:	Tratamiento de agua para riego de plantas de tallo bajo y mejora de la calidad mediante el Sistema Wetland, en la Comunidad de Compañía Baja del distrito de Pacaycasa, provincia de Huamanga 2024	
Solicitante	:	Johann Milthon Calderón Molina	
Ubicación	:	E: 581081.04 N: 8554700.29	

RESULTADOS DE ANALISIS

Parámetros	Unidad de medida	Agua para riego Compañía
ORGÁNICO		
Organoclorados		
Aldrin	µg/L	0,002
Clordano	µg/L	0,003
Endosulfán	µg/L	0,008
Endrin	µg/L	0,001
Heptacloro y Heptacloro Epóxido	µg/L	0,008
Lindano	µg/L	3.2
Carbmato		
Aldicarb	µg/L	0.5

Ayacucho, 17 Agosto del 2024

INGEOSOFT CONSULTORES Y CONTRATISTAS S.A.C.

Ing. Roxsan D. Ingaruca Ramos

INGEOSOFT CONSULTORES Y CONTRATISTAS S.A.C.

Roxsan Gil Gabrielino Espinal

INGENIERO CIVIL

CIP N° 193781

AREA DE SUELOS Y CONCRETO

Región	:	Ayacucho	HR.0006
Provincia	:	Huamanga	
Distrito	:	Pacaycasa	
Localidad	:	Compañía baja	
Proyecto	:	Tratamiento de agua para riego de plantas de tallo bajo y mejora de la calidad mediante el Sistema Wetland, en la Comunidad de Compañía Baja del distrito de Pacaycasa, provincia de Huamanga 2024	
Solicitante	:	Johann Milthon Calderón Molina	
Ubicación	:	E: 581081.04 N: 8554700.29	

Parámetros	Unidad de medida	Agua para riego Compañía
MICROBIOLÓGICOS Y PARAITOLÓGICOS		
Huevos de Helmintos	Huevo/L	3

Ayacucho, 17 Agosto del 2024

INGEOSOFT CONSULTORES Y CONTRATISTAS S.A.C.
Ing. Edwin Espinoza
INGENIERO CIVIL
CIP. N° 182861
AREA DE SUELOS Y CONCRETO

INGEOSOFT
Ing. Kevin J. Vilca Alanoca
REPRESENTANTE LEGAL

INGEOSOFT CONSULTORES & CONTRATISTAS S.A.C.
LABORATORIO DE MECANICA DE SUELOS Y CONCRETO

Región	:	Ayacucho	HR.0007
Provincia	:	Huamanga	
Distrito	:	Pacaycasa	
Localidad	:	Compañia baja	
Proyecto	:	Tratamiento de agua para riego de plantas de tallo bajo y mejora de la calidad mediante el Sistema Wetland, en la Comunidad de Compañia Baja del distrito de Pacaycasa, provincia de Huamanga 2024	
Solicitante	:	Johann Milthon Calderón Molina	
Ubicación	:	E: 581081.04 N: 8554700.29	

RESULTADOS DE ANALISIS

Parámetros	Unidad de medida	Agua para riego Compañia
FÍSICOS QUÍMICOS		
Aceites y Grasas	mg/L	3.4
Bicarbonatos	mg/L	519
Cianuro Wad	mg/L	0,045
Cloruros	mg/L	420
Conductividad	(µS/cm)	2000
Detergentes (SAAM)	mg/L	0,01
Fenoles	mg/L	0,001
Fluoruros	mg/L	0.92
Nitratos (NO3--N) + Nitritos (NO2--N)	mg/L	10
Nitritos (NO2--N)	mg/L	NC
Oxígeno Disuelto (Valor Mínimo)	mg/L	3.1
Potencial de Hidrógeno (pH)	Unidad de pH	6.8
Sulfatos	mg/L	200
Temperatura	°C	19

Ayacucho, 28 de setiembre 2024

Jr. José Carlos Mariátegui N° 618
ingeosoft.sac@gmail.com
999 960 962

Región	:	Ayacucho	HR.0008
Provincia	:	Huamanga	
Distrito	:	Pacaycasa	
Localidad	:	Compañía baja	
Proyecto	:	Tratamiento de agua para riego de plantas de tallo bajo y mejora de la calidad mediante el Sistema Wetland, en la Comunidad de Compañía Baja del distrito de Pacaycasa, provincia de Huamanga 2024	
Solicitante	:	Johann Milthon Calderón Molina	
Ubicación	:	E: 581081.04 N: 8554700.29	

RESULTADOS DE ANALISIS

Parámetros	Unidad de medida	Agua para riego Compañía
Arsénico	mg/L	0,08
Bario	mg/L	0,65
Berilio	mg/L	0,25
Boro	mg/L	0.10
Cadmio	mg/L	0,001
Cobre	mg/L	0,08
Cobalto	mg/L	0,01
Cromo Total	mg/L	0,02
Hierro	mg/L	2.5
Litio	mg/L	1.0
Níquel	mg/L	0,15
Plomo	mg/L	0,01
Zinc	mg/L	1.05

Ayacucho, 28 de setiembre 2024

Ing. Kaven J. Pérez Ingaruca
REPRESENTANTE LEGAL

INGEOSOFT CONSULTORES Y CONTRATISTAS S.A.C.
Ruben C. Palomino Espinal
INGENIERO CIVIL
CIP N° 168704
AREA DE SUELOS Y CONCRETO

Región	:	Ayacucho	HR.0009
Provincia	:	Huamanga	
Distrito	:	Pacaycasa	
Localidad	:	Compañia baja	
Proyecto	:	Tratamiento de agua para riego de plantas de tallo bajo y mejora de la calidad mediante el Sistema Wetland, en la Comunidad de Compañía Baja del distrito de Pacaycasa, provincia de Huamanga 2024	
Solicitante	:	Johann Milthon Calderón Molina	
Ubicación	:	E: 581081.04 N: 8554700.29	

RESULTADOS DE ANALISIS

Parámetros	Unidad de medida	Agua para riego Compañia
ORGÁNICO		
Organoclorados		
Aldrin	µg/L	0,0015
Clordano	µg/L	0,0025
Endosulfán	µg/L	0,0072
Endrin	µg/L	0,0012
Heptacloro y Heptacloro Epóxido	µg/L	0,007
Lindano	µg/L	3,1
Carbamato		
Aldicarb	µg/L	0.5

Ayacucho, 28 de setiembre 2024

Región	:	Ayacucho	HR.0010
Provincia	:	Huamanga	
Distrito	:	Pacaycasa	
Localidad	:	Compañía baja	
Proyecto	:	Tratamiento de agua para riego de plantas de tallo bajo y mejora de la calidad mediante el Sistema Wetland, en la Comunidad de Compañía Baja del distrito de Pacaycasa, provincia de Huamanga 2024	
Solicitante	:	Johann Milthon Calderón Molina	
Ubicación	:	E: 581081.04 N: 8554700.29	

Parámetros	Unidad de medida	Agua para riego Compañía
MICROBIOLÓGICOS Y PARAITOLÓGICOS		
Huevos de Helmintos	Huevo/L	1

Ayacucho, 28 de setiembre 2024

Anexo 5:Cadena custodia del análisis de agua antes del tratamiento

CADENA DE CUSTODIA

Proyecto: Tratamiento de Agua mediante Sistema Wetland – Comunidad Compañia Baja – Pacaycasa

Objetivo: Registrar información técnica durante la toma de muestras de agua relevante.

1. DATOS DEL PROYECTO

Nombre del Proyecto:	Tratamiento de Agua mediante Sistema Wetland – Comunidad Compañia Baja – Pacaycasa
Ubicación:	Comunidad Compañia Baja, Pacaycasa, Huamanga
Responsable:	Johann Milthon Calderón Molina

2. IDENTIFICACIÓN DE LA MUESTRA

Código de Muestra:	EW - 160824-01		
Punto de Muestreo:	☒ Entrada del Wetland ☐ Salida del Wetland	**Fecha:**	16/08/24
Fecha:		**Hora:**	9:00am
Tipo de Análisis Solicitado:	☑ Fisico-Químico ☑ Microbiológico y Parasitológico ☑ Metales ☑ Plaguicidas ☐ Otros		

3. PRESERVACIÓN DE LA MUESTRA

Tipo de Envase:	Volumen Recolectado	Conservación: mL	Parámetros Preservados Químicamente:
Frasco Vidrio Ambar	1000 mL	Refrigeración: 4°C.	HNO3 para metales

4. TRANSFERENCIA DE CUSTODIA

Entregado por	Firma	Fecha y Hora	Recibido por	Fecha y Hora
Johann Milthon Calderón Molina		16/08/24 9:00 am		

Número total de frascos/neveras: 6 **Temperatura de llegada (°C):** 20

Anexo 6 Cadena custodia del análisis de agua después del tratamiento

CADENA DE CUSTODIA

Proyecto: Tratamiento de Agua mediante Sistema Wetland – Comunidad Compañia Baja – Pacaycasa

Objetivo: Registrar información técnica durante la toma de muestras de agua relevante.

1. DATOS DEL PROYECTO

Nombre del Proyecto: Tratamiento de Agua mediante Sistema Wetland – Comunidad Compañia Baja – Pacaycasa

Ubicación: Comunidad Compañia Baja, Pacaycasa, Huamanga

Responsable: Johann Milthon Calderón Molina

2. IDENTIFICACIÓN DE LA MUESTRA

Código de Muestra: SW – 240924 –01

Punto de Muestreo: ☐ Entrada del Wetland ☑ Salida del Wetland **Fecha:** 24/09/2024

Fecha: _____ **Hora:** _____

Tipo de Análisis Solicitado: ☑ Fisico-Químico ☑ Microbiológico y Parasitológico ☑ Metales ☑ Plaguicidas ☐ Otros

3. PRESERVACIÓN DE LA MUESTRA

Tipo de Envase:	Volumen Recolectado	Conservación: mL	Parámetros Preservados Químicamente:
Frasco Vidrio Ambar	1000 mL	Refrigeración: 4°C.	HNO3 para metales

4. TRANSFERENCIA DE CUSTODIA

Entregado por	Firma	Fecha y Hora	Recibido por	Fecha y Hora
Johann Milthon Calderón Molina		24/09/24 9:00 am		

Número total de frascos/neveras: 6 **Temperatura de llegada (°C):** 19

Anexo 7 Ficha de observación técnica y registro de operación del Sistema Wetland (Primera visita al campo)

FICHA DE OBSERVACIÓN TÉCNICA Y REGISTRO DE OPERACIÓN DEL SISTEMA WETLAND

Proyecto: Tratamiento de Agua mediante Sistema Wetland

Ubicación: Comunidad Compañía Baja – Pacaycasa **Fecha de evaluación:** 15/03/24

A. FICHA DE OBSERVACIÓN TÉCNICA

I. ESTADO DEL SISTEMA

Indicador	Bueno	Regular	Deficiente	Observaciones
Estado del sustrato (colmatación, compactación)	☑	☐	☐	Crecimiento del carrizo
Presencia de sedimentos superficiales	☑	☐	☐	
Estado de macrófitas (coloración y vigor)	☐	☑	☐	
Densidad de macrófitas	☐ Alta	☐ Media	☑ Baja	
Presencia de marchitez o deterioro	☐ Sí	☑ No		
Uniformidad del flujo hidráulico	☐ Sí	☑ Sí	☐ No	
Presencia de zonas muertas	☐ Sí	☑ No		
Obstrucciones visibles:	☐ Sí	☑ No		

B. REGISTRO DE OPERACIÓN DEL SISTEMA

I. PARÁMETROS HIDRÁULICOS

Indicador		Valor	Unidad	
Caudal de entrada (Qe)	4m3/día	4	m³/día	
Caudal de salida (Qs)	3.8m3/día	3.8	m³	
Volumen efectivo del sistema (V)	14.4m3	14.4	m³	
Tiempo de retención hidráulica (TRH = V/Q)		1.26	días	

II. MANTENIMIENTO DEL SISTEMA

Fecha de último mantenimiento	Tipo de mantenimiento:
15/03/24	☑ Preventivo ☐ Correctivo
Frecuencia de limpieza: Mensual	
Actividades realizadas: Limpieza de canal y eliminación de sedimentos.	

Responsable de Evaluación: Tomas Milton Valdez Mora Firma: _____

Anexo 8: Ficha de observación técnica y registro de operación del Sistema Wetland (Segunda visita al campo)

FICHA DE OBSERVACIÓN TÉCNICA Y REGISTRO DE OPERACIÓN DEL SISTEMA WETLAND

Proyecto: Tratamiento de Agua mediante Sistema Wetland

Ubicación: Comunidad Compañía Baja – Pacaycasa **Fecha de evaluación:** 24/07/24

A. FICHA DE OBSERVACIÓN TÉCNICA

I. ESTADO DEL SISTEMA

Indicador	Bueno	Regular	Deficiente	Observaciones
Estado del sustrato (colmatación, compactación)	☑	☐	☐	
Presencia de sedimentos superficiales	☐	☑	☐	Pocos particulas Estable
Estado de macrófitas (coloración y vigor)	☑	☐	☐	
Densidad de macrófitas	☐ Alta ☐ Media ☑ Baja			
Presencia de marchitez o deterioro	☐ Si ☑ No			
Uniformidad del flujo hidráulico	☑ Si	☑ Si ☐ No		
Presencia de zonas muertas	☐ Si ☑ No			
Obstrucciones visibles:	☐ Si ☑ No			

B. REGISTRO DE OPERACIÓN DEL SISTEMA

I. PARÁMETROS HIDRÁULICOS

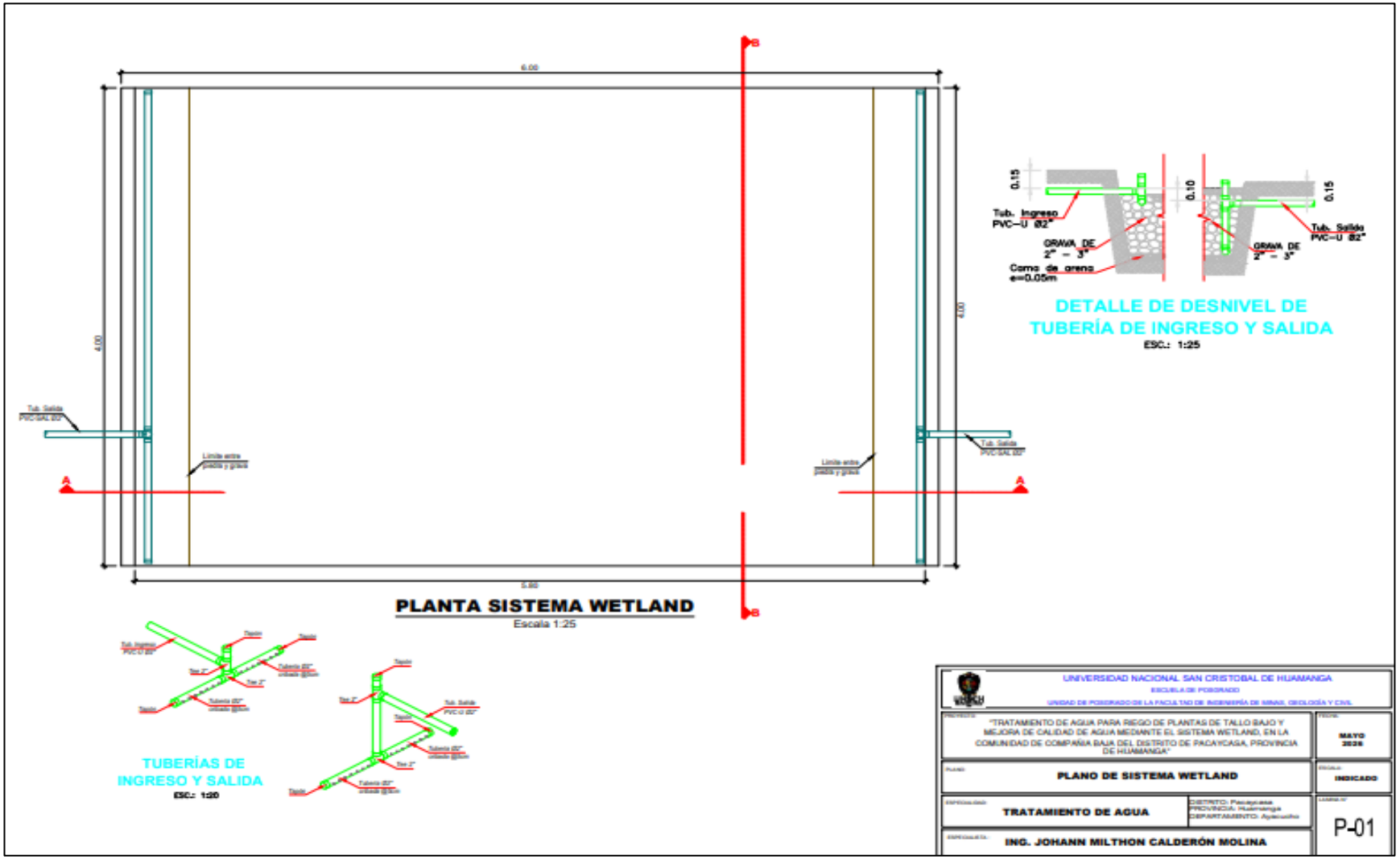
Indicador		Valor	Unidad	
Caudal de entrada (Qe)	4m³/día	4	m³/día	
Caudal de salida (Qs)	4m³/día	4	m³	
Volumen efectivo del sistema (V)	14.4m³	14.4	m³	
Tiempo de retención hidráulica (TRH = V/Q)		1.26	días	

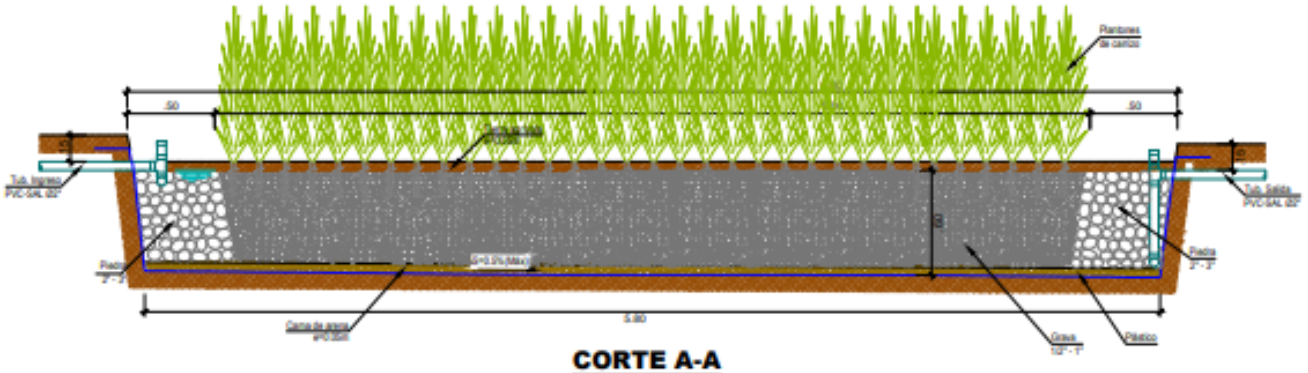
II. MANTENIMIENTO DEL SISTEMA

Fecha de último mantenimiento: 24/07/24	Tipo de mantenimiento: ☑ Preventivo ☐ Correctivo
Frecuencia de limpieza: Mensual	
Actividades realizadas: Limpieza de superficie y revisión de flujo hidraulico	

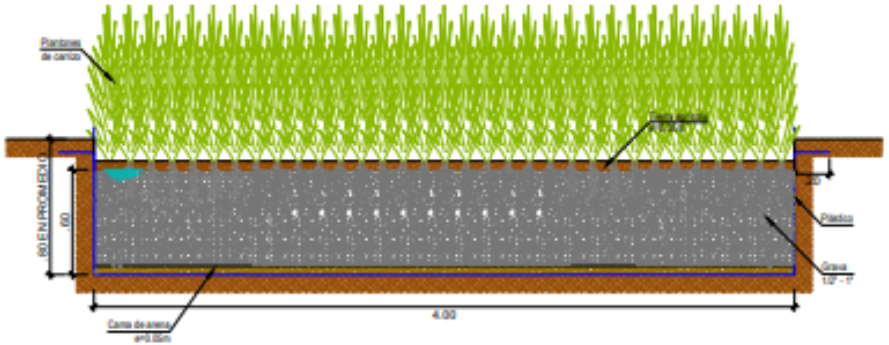
Responsable de Evaluación: Johana Milton Cardozo Molina **Firma:** _____

Anexo 9: Planos del sistema Wetteland implementado





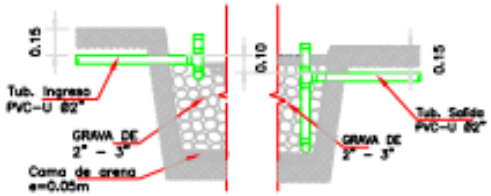
CORTE A-A
Escala 1:25



CORTE B-B
Escala 1:25



TUBERÍAS DE INGRESO Y SALIDA
ESC.: 1:20



DETALLE DE DESNIVEL DE TUBERÍA DE INGRESO Y SALIDA
ESC.: 1:25

ESPECIFICACIONES TÉCNICAS

TUBERÍAS

1. LA TUBERÍA DE DESAGÜE SERÁ DE PVC–U CP DEBIENDO CUMPLIR CON LA NTP "399.003:2015 Y LOS ACCESORIOS SERÁN DE PVC–U DEBIENDO CUMPLIR LA NTP 399.172:2014
2. LAS PENDIENTES DE LA TUBERÍA SERÁ: MÍNIMO 2% PARA DIÁMETROS 3"
3. LAS UNIONES SERÁN DEL TIPO ESPIGA–CAMPANA.
4. LA TUBERÍA Y ACCESORIOS SERÁN UNIDOS CON PEGAMENTO SEGÚN NTP 399.090:202 O SUPERIOR.
   LA TUBERÍA Y ACCESORIOS NO SERÁN EXPUESTOS AL FUEGO
5. REALIZAR PRUEBA HIDRÁULICA ANTES DE LA ENTREGA DE OBRA

FILTRO Y TRATAMIENTO

1. DE AMBOS EXTREMOS DEL HUMEDAL SE COLOCARÁ GRAVA LAVADA DE ENTRE 2" Y 3" PARA FACILITAR EL INGRESO Y LA SALIDA DEL FLUJO. SU COLOCACIÓN SE HARÁ CON ESPECIAL CUIDADO PARA NO DAÑAR LAS TUBERÍAS DE ENTRADA Y SALIDA .
2. EL FILTRO PRINCIPAL ESTARÁ CONSTITUIDO POR GRAVA LAVADA DE ENTRE 1/2" Y 1".
3. PARA EVITAR QUE LAS AGUAS RESIDUALES SALGAN DEL HUMEDAL ANTES DE SER TRATADAS SE COLOCARÁ UNA GEOMEMBRANA DE HDPE ESPESOR 0.75mm (ESPESOR PROMEDIO MÍNIMO (–10%) ASTM D5199 POR ROLLO 6.875mm.) DEBERÁ SER, EN LO POSIBLE, DE UNA SOLA PIEZA; DE LO CONTRARIO DEBERÁ SER PEGADO CON MÉTODOS APROBADOS PARA EFECTUAR LA SOLDADURA Y LAS REPARACIONES, MEDIANTE PROCESOS TÉRMICOS YA SEA SOLDADURA POR EXTRUSIÓN Y POR FUSIÓN; TODO EL EQUIPO DE SOLDADURA O FUSIÓN DEBE TENER INDICADORES DE TEMPERATURA Y VELOCIDAD PARA EFECTUAR LAS MEDICIONES Y CALIBRACIONES.
4. EL SISTEMA SERÁ UN COMPLEMENTO DE LA UNIDAD BÁSICA SANITARIA TIPO COMPOSTERA.
5. LAS PLANTAS A USAR PARA EL TRATAMIENTO BIOLÓGICO SERÁN LAS MACROFITAS QUE EL PROYECTISTA SUSTENTA (TOTORA, CAÑA COMÚN, JUNCO, CARRIZO U OTROS), PUEDEN SER TRANSPLANTADAS. SE RECOMIENDA EL USO DE PLANTONES DE MÍNIMO 0.70M DE ALTURA. SERÁN PLANTADAS EN LA CAPA SUPERFICIAL DE TIERRA AGRÍCOLA, LAS RAÍCES CRECERÁN EN EL SUSTRATO DE GRAVA.

UBICACIÓN Y DIMENSIONES

1. DEBE SER UBICADO DE TAL MANERA QUE RECIBA Y DESCARGUE DIRECTAMENTE POR GRAVEDAD EL FLUJO DE AGUAS RESIDUALES.
2. LA SALIDA DEBE GARANTIZAR EL FLUJO LIBRE Y UNIFORME DE AGUA, EVITANDO LA COLMATACIÓN CON POSIBLES RESIDUOS SÓLIDOS.
3. LA EXPOSICIÓN TOTAL AL SOL ES IDEAL PARA SU CORRECTO FUNCIONAMIENTO.
4. DEBERÁ CONSTRUIRSE EL SISTEMA CON LAS DIMENSIONES INDICADAS; SIN EMBARGO, DEBIDO A LAS DIFICULTADES CON EL ESPACIO REQUERIDO, PODRÁN MODIFICARSE LAS DIMENSIONES DE PLANTA HASTA UNA RELACIÓN MÁXIMA 3:1.
5. EL FONDO DEL HUMEDAL DEBERÁ TENER UNA PENDIENTE MÁXIMA DE 0.5%

UNIVERSIDAD NACIONAL SAN CRISTOBAL DE HUAMANGA
ESCUELA DE POSGRADO
UNIDAD DE POSGRADO DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA DE MINAS, GEOLOGÍA Y CIVIL

PROYECTO: "TRATAMIENTO DE AGUA PARA RIEGO DE PLANTAS DE TALLO BAJO Y MEJORA DE CALIDAD DE AGUA MEDIANTE EL SISTEMA WETLAND, EN LA COMUNIDAD DE COMPAÑIA BAJA DEL DISTRITO DE PACAYCASA, PROVINCIA DE HUAMANGA"

FECHA: MAYO 2020

PLANO: PLANO DE SISTEMA WETLAND

ESCALA: INDICADO

ESPECIALIDAD: TRATAMIENTO DE AGUA

DISTRITO: Pacayccasa
PROVINCIA: Huamanga
DEPARTAMENTO: Ayacucho

LAMINA N°: P-02

ESPECIALISTA: ING. JOHANN MILTHON CALDERÓN MOLINA

Anexo 10: Articulo científico

EVALUACIÓN DEL SISTEMA WETLAND CON PHRAGMITES AUSTRALIS PARA EL TRATAMIENTO DE AGUA PARA RIEGO EN LA COMUNIDAD DE COMPAÑÍA BAJA DEL DISTRITO DE PACAYCASA, PROVINCIA DE HUAMANGA 2024.

EVALUATION OF A PHRAGMITES AUSTRALIS BASED WETLAND SYSTEM FOR IRRIGATION WATER TREATMENT IN THE COMMUNITY OF COMPAÑÍA BAJA, PACAYCASA DISTRICT, HUAMANGA PROVINCE, 2024.

Autor: Johann Milthon Calderon Molina
Escuela de Posgrado de la Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga

Resumen

El presente estudio tuvo como objetivo determinar la eficacia de un sistema Wetland de flujo subsuperficial horizontal en la mejora de la calidad físico química y microbiológica del agua destinada al riego de cultivos de tallo bajo en la comunidad de Compañía Baja, distrito de Pacaycasa-Ayacucho; la metodología adoptada, estructurada bajo el enfoque cuantitativo, con un diseño preexperimental de alcance descriptivo y explicativo, considerando la medición de parámetros antes y después del tratamiento mediante análisis de laboratorio. La población estuvo constituida por el agua del canal de riego de la comunidad de Compañía Baja, distrito de Pacaycasa, provincia de Huamanga, mientras que la muestra estuvo conformada por 12 muestras de agua de riego, distribuidas en 6 muestras pretest y 6 postest, recolectadas con una frecuencia mensual en los puntos de entrada y salida del sistema. Los resultados evidenciaron una elevada eficiencia del sistema en la remoción de contaminantes orgánicos y nutrientes, destacando una reducción del 93.3% en nitratos y la eliminación de nitritos al 99.92%, de igual forma, se registraron mejoras significativas en la Demanda Bioquímica de Oxígeno, detergentes y fenoles, cumpliendo con los estándares de calidad ambiental establecidos para riego, en contraste, la remoción de plaguicidas organoclorados fue limitada, lo cual se atribuye a su alta persistencia y baja biodegradabilidad, a nivel microbiológico, se logró una reducción del 66.67% de huevos de helmintos, evidenciando una mejora parcial en la calidad sanitaria del agua; se concluye que

el sistema Wetland constituye una alternativa sostenibles, eficiente y de bajo costo para el tratamiento de aguas residuales con fines agrícolas, no obstante, requiere procesos de optimización para incrementar la remoción de contaminantes persistentes. El presente estudio aporta evidencia empírica relevante para la gestión de proyectos ambientales, promoviendo la implementación de soluciones basadas en la naturaleza en contextos rurales.

Introducción

De acuerdo con informes internacionales emitidos por la Organización Mundial de la Salud, aproximadamente el 80% de las aguas residuales generadas a nivel mundial no reciben tratamiento adecuado antes de su descarga o reutilización, lo que generan la brecha crítica en la gestión sostenible del recurso hídrico.

Además de ello la limitada cobertura de tratamiento representa un riesgo significativo para la salud pública, la seguridad alimentaria y la estabilidad de los ecosistemas, debido a la presencia de contaminantes orgánicos, microbiológicos y químicos que deterioran la calidad ambiental y comprometen el uso seguro del agua en actividades productivas, particularmente en el sector agrícola, frente a esta problemática global, surge la necesidad urgente de implementar tecnologías de tratamiento eficientes, sostenibles y ambientalmente compatibles, capaces de reducir cargas contaminantes mediante procesos naturales de depuración.

Diversos estudios, han demostrado que los humedales artificiales pueden alcanzar eficiencia superiores al 90% en la remoción de demanda bioquímica de oxígeno (DBO) y demanda química de oxígeno (DQO) en tratamiento de aguas residuales, así mismo también se ha demostrado las reducciones significativas de nitrógeno y fosforo, ello dependiendo de las condiciones hidráulicas y del tipo de sustrato empleado, lo que representa que los humedales presentan ventajas comparativas frente a tecnologías convencionales, debido a su bajo consumo energético, menor costo de operación y mayor sostenibilidad ambiental.

En este contexto, los sistemas Wetland o humedales artificiales se han consolidado como una alternativa tecnológica ecológica que integra procesos físicos, químicos y biológicos, tales como filtración, sedimentación, adsorción y degradación microbiana mediada por especies vegetales, contribuyendo significativamente a la mejora de la calidad del agua. Diversas investigaciones internacionales han

demostrado su alta eficiencia, Inga et al. reportaron que los Wetlands mejorados con rizobacterias alcanzaron eficiencias superiores al 95% en la remoción de demanda bioquímica y química de oxígeno, superando ampliamente los sistemas convencionales cuya eficiencia no excedió el 78%. A nivel nacional, Tokunaga evidenció eficiencias superiores al 85% en la remoción de DBO y DQO, además de reducciones microbiológicas cercanas al 99.98% en coliformes fecales y 99.93% en coliformes termotolerantes. De manera similar, Cortez confirmó eficiencias superiores al 70% en la eliminación de materia orgánica y coliformes totales en el tratamiento de aguas grises mediante sistemas wetland.

Desde una perspectiva científica, Vymazal reconoce a los humedales construidos como una alternativa altamente eficiente para la remoción de nutrientes, materia orgánica y diversos contaminantes, destacando su versatilidad operativa y sus beneficios ecológicos adicionales. En concordancia, la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos considera a estos sistemas como una tecnología probada para el tratamiento de aguas residuales municipales, industriales y agrícolas, evidenciando su capacidad para mejorar la calidad del agua y contribuir a la restauración de ecosistemas acuáticos degradados. Asimismo, Kadlec y Knight enfatizan su aplicabilidad en contextos agrícolas, particularmente en el tratamiento de aguas de riego contaminadas, resaltando su eficiencia, viabilidad económica y sostenibilidad ambiental como alternativa frente a tecnologías convencionales de mayor costo energético.

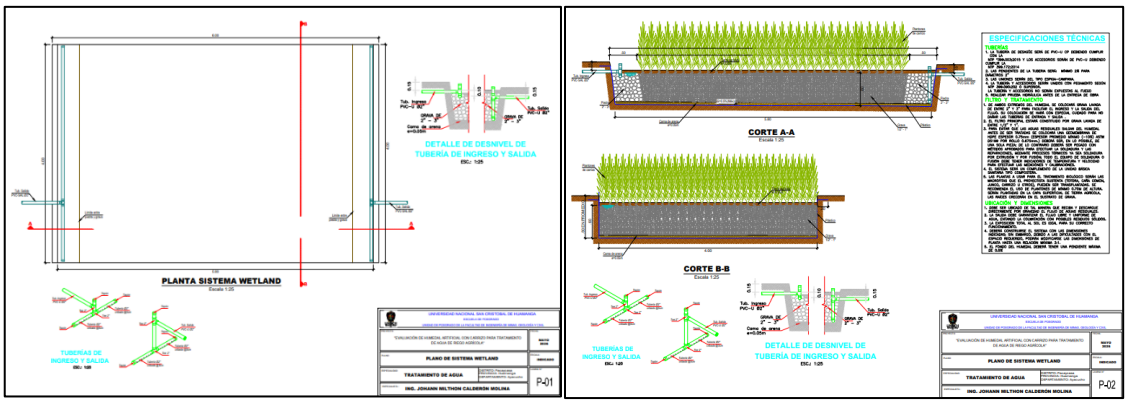
Métodos

La investigación se desarrolló bajo un enfoque cuantitativo, de tipo aplicado y nivel explicativo, con un diseño preexperimental de pretest y postest con un solo grupo, orientado a evaluar la eficiencia de remoción de contaminantes en agua de riego mediante un sistema wetland, la recolección de datos se sustentó en la técnica de observación científica, entendida como un procedimiento sistemático y selectivo para el registro de información relevante del fenómeno estudiado, donde se emplearon fichas de registro de ensayos de laboratorio para documentar los parámetros evaluados antes y después del tratamiento.

El sistema implementado correspondió a un humedal artificial de flujo subsuperficial horizontal, con dimensiones de 6 m de largo, 4 m de ancho y 0.60 m de profundidad,

alcanzando un área total de 24 m². El caudal de diseño fue de 4 m³/día, estimado en función de la demanda hídrica de 1000 plantas de tallo bajo (4 L/día por planta). El dimensionamiento del sistema se realizó considerando una capacidad de tratamiento de 0.25 m³/m²/día. El volumen total del humedal fue de 14.4 m³ y, asumiendo una porosidad del medio del 0.35, se obtuvo un volumen efectivo de 5.04 m³, lo que permitió estimar un tiempo de retención hidráulica de 1.26 días (30.24 horas).

Figura 1. Sistema Wetland implementado



El lecho filtrante estuvo compuesto por material granular y vegetación de carrizo (Phragmites australis), con una densidad de plantación de 3 individuos por metro cuadrado, favoreciendo procesos de filtración, adsorción y degradación biológica. El sistema incluyó un drenaje mediante tuberías perforadas ubicadas en la parte inferior del lecho, garantizando un flujo uniforme y controlado.

Las muestras de agua fueron recolectadas en el canal de riego de la comunidad de Compañía Baja (Ayacucho), en los puntos de entrada y salida del sistema, siguiendo protocolos técnicos de monitoreo. Posteriormente, fueron transportadas al laboratorio para su análisis fisicoquímico, determinación de metales pesados, plaguicidas, así como evaluación microbiológica y parasitológica.

Los datos obtenidos fueron sistematizados en una base de datos y analizados mediante el cálculo del porcentaje de remoción de cada parámetro, utilizando la relación entre la concentración inicial y final. Este procedimiento permitió evaluar la eficiencia del sistema wetland en la mejora de la calidad del agua para uso agrícola, comparando los resultados con los estándares de calidad ambiental establecidos para riego.

Resultados

Se realizaron análisis en laboratorio del montaje de la planta piloto, los resultados evidenciaron una alta eficiencia en la remoción de detergentes y fenoles, lo que indica una intensa actividad microbiana, la remoción de aceites y grasas fue moderada debido a procesos combinados de sedimentación, filtración y biodegradación parcial. Los metales pesados no mostraron reducciones significativas, lo cual se atribuye a la ausencia de sustratos reactivos especializados. Los plaguicidas organoclorados presentaron cambios mínimos debido a su alta persistencia química y resistencia a la degradación biológica.

En la tabla 1 el análisis comparativo entre el pre test y el post test demuestra que el Sistema Wetland genera una mejora en la calidad físico-química del agua para riego, evidenciada principalmente en la reducción significativa de contaminantes orgánicos como los nitratos (100%), los detergentes (96.88%), los fenoles (80%) y los aceites y grasas (47.69%), lo cual muestra una alta capacidad de remoción en compuestos asociados a carga orgánica y sustancias tensioactivas, de igual manera, se observa una disminución moderada en parámetros como cloruros, cianuro WAD, fluoruros y conductividad, reflejando un efecto depurador parcial sobre componentes inorgánicos disueltos, pero algunos parámetros presentan variaciones poco significativas, como los bicarbonatos (0.19%), y el oxígeno disuelto disminuye ligeramente, lo cual sugiere que el sistema no mejora de manera homogénea en todos los parámetros evaluados.

Tabla 1. Eficiencia del Sistema Wetland en la mejora las características físico - químicas

Parámetros	Unidad de medida	Pre Test	Post Test	% Remoción
Aceites y Grasas	mg/L	6.5	3.4	47.69%
Bicarbonatos	mg/L	520	519	0.19%
Cianuro Wad	mg/L	0,05	0,045	10.00%
Cloruros	mg/L	450	420	6.67%
Conductividad	(µS/cm)	2 100	2000	4.76%
DBO	mg/L	15	<3	80.00%
Detergentes (SAAM)	mg/L	0,32	0,01	96.88%
Fenoles	mg/L	0,005	0,001	80.00%
Fluoruros	mg/L	0.98	0.92	6.12%
Nitratos (NO3-N)	mg/L	150	10	93.33%

Nitratos (NO2-N)				
Nitratos (NO2-N)	mg/L	18	0	100%
Oxígeno Disuelto (Valor Mínimo)	mg/L	3.5	3.1	11.42%
Potencial de Hidrógeno (pH)	Unidad de pH	7.2	6.8	5.55%
Sulfatos	mg/L	1200	200	83.33%
Temperatura	°C	20	19	5%

Nota: Datos obtenidos a través del análisis de laboratorio Ingeosoft-2024.

En la Tabla 2 se observa la ausencia total de remoción de metales pesados, lo que indican que el sistema evaluado funciona principalmente como tratamiento secundario enfocado en contaminantes biodegradables, pero no como tecnología adecuada para la eliminación de metales pesados sin modificaciones estructurales adicionales o integración de materiales adsorbentes específicos.

Tabla 2. Eficiencia del Sistema Wetland en la mejora las características de los metales.

Parámetros	Unidad de medida	Pre Test	Post Test	% Remoción
Arsénico	mg/L	0,08	0,08	0%
Bario	mg/L	0,65	0,65	0%
Berilio	mg/L	0,25	0,25	0%
Boro	mg/L	0.10	0.10	0%
Cadmio	mg/L	0,001	0,001	0%
Cobre	mg/L	0,08	0,08	0%
Cobalto	mg/L	0,01	0,01	0%
Cromo Total	mg/L	0,02	0,02	0%
Hierro	mg/L	2.5	2.5	0%
Litio	mg/L	1.0	1.0	0%
Niquel	mg/L	0,15	0,15	0%
Plomo	mg/L	0,01	0,01	0%
Zinc	mg/L	1.05	1.05	0%

Nota: Datos obtenidos a través del análisis de laboratorio Ingeosoft-2024.

La Tabla 3 muestran una remoción limitada de plaguicidas organoclorados y carbamatos, con eficiencias generalmente bajas que oscilan entre 0% y 25%, lo cual evidencia la alta persistencia química y resistencia a la degradación biológica de estos compuestos. La baja eficiencia observada confirma que los procesos naturales del Wetland, basados principalmente en biodegradación y filtración, no

son suficientes para la eliminación efectiva de contaminantes orgánicos persistentes.

Tabla 3. Eficiencia del Sistema Wetland en la mejora las características de los plaguicidas.

Parámetros	Unidad de medida	Pre Test	Post Test	% Remoción
Organoclorados				
Aldrín	µg/L	0.002	0,0015	25.00%
Clordano	µg/L	0.003	0,0025	16.67%
Endosulfán	µg/L	0.008	0,0072	10.00%
Endrin	µg/L	0.001	0,0012	20.00%
Heptacloro y Heptacloro Epóxido	µg/L	0.008	0,007	12.50%
Lindano	µg/L	3.2	3.1	3.12%
Carbmato				
Aldicarb	µg/L	0.5	0.5	0%

Nota: Datos obtenidos a través del análisis de laboratorio Ingeosoft-2024.

La Tabla 4 evidencia una reducción del 66.47% en huevos de helmintos, lo cual refleja una eficiencia microbiológica moderada atribuida principalmente a procesos de filtración física y sedimentación dentro del sustrato del humedal.

Tabla 4. Eficiencia del Sistema Wetland en la mejora las características de los componentes orgánicos.

Parámetros	Unidad de media	Pre-Test	Post Test	% Remoción
Microbiológicos y parasitológicos				
Huevos de Helmintos	Huevo/L	3	1	66.67%

Nota: Datos obtenidos a través del análisis de laboratorio Ingeosoft-2024.

Discusión

El sistema Wetland de flujo subsuperficial horizontal (HSSF) implementado en la comunidad de Compañía Baja, distrito de Pacaycasa, provincia de Huamanga, evidenció una eficiencia diferencial en la remoción de contaminantes presentes en el agua destinada al riego de cultivos de tallo bajo, observándose una mayor capacidad de tratamiento sobre compuestos orgánicos y microbiológicos, y una eficiencia limitada frente a contaminantes inorgánicos persistentes como sales disueltas, metales pesados y determinados plaguicidas organoclorados.

En relación con los parámetros fisicoquímicos, los resultados del pre-test y post-test mostraron elevadas eficiencias de remoción para detergentes (96.88%), fenoles (80%), DBO (80%), sulfatos (83.33%) y aceites y grasas (47.69%), evidenciando una adecuada capacidad del sistema para reducir la carga orgánica del afluente. Estos resultados son similares a los reportados por Zamora (2024), quien observó mejoras significativas en parámetros fisicoquímicos, especialmente en sólidos suspendidos y pH, así como por Inga et al. (2024), quienes registraron alta eficiencia en la remoción de materia orgánica mediante humedales artificiales. De igual manera, Vymazal (2021) sostiene que estos sistemas presentan elevada capacidad para remover compuestos orgánicos debido a la intensa actividad microbiológica desarrollada en la rizósfera. Teóricamente, este comportamiento puede atribuirse a la interacción entre filtración física, adsorción sobre el lecho granular, degradación biológica y actividad metabólica microbiana asociada al sistema radicular del Scirpus spp., donde los biofilms adheridos al sustrato favorecen la oxidación de materia orgánica y la transformación de contaminantes complejos en compuestos más simples (Kadlec y Wallace, 2009).

Respecto a los metales pesados, no se evidenció remoción entre el pre-test y post-test, registrándose una eficiencia del 0% para arsénico, cadmio, cobre, plomo, hierro y zinc, entre otros, este resultado parece contradecir estudios como los de Maine (2021), quien reporta que los humedales pueden remover metales mediante adsorción, precipitación y absorción vegetal; asimismo, Stefanakis (2018) señala que estos sistemas presentan potencial para la inmovilización metálica cuando se diseñan adecuadamente. Sin embargo, teóricamente este resultado puede explicarse por las condiciones operativas del sistema evaluado, en primer lugar, la grava utilizada como medio filtrante posee baja capacidad de intercambio catiónico, lo que limita la adsorción de iones metálicos sobre su superficie, en segundo lugar, el tiempo de retención hidráulica de 30.24 horas probablemente fue insuficiente para permitir procesos lentos como precipitación química, coprecipitación o adsorción superficial, los cuales requieren tiempos prolongados de contacto; según Stefanakis (2018), estos mecanismos suelen optimizarse en periodos superiores a 72 horas, finalmente, existe la posibilidad de que el sustrato haya alcanzado rápidamente un estado de saturación de sitios activos, perdiendo capacidad de retención metálica, fenómeno descrito por Maine et al. (2021) como una limitante

frecuente en sistemas con materiales inertes como grava, por tanto, el problema no radica en que el humedal “no remueva metales”, sino en que las condiciones específicas de diseño y operación de este sistema no favorecieron dicho mecanismo.

Con respecto a los nitratos, los resultados del análisis fisicoquímico evidencian una reducción sustancial en la concentración de nitratos, registrándose valores de 150mg/L en el pretratamiento y 10 mg/L en el postratamiento, lo que representa una eficiencia de remoción del 93.3%; este comportamiento indica un alto desempeño del sistema Wetland implementado bajo un tiempo de retención TRH de 30.24 horas, utilizando como vegetación Phragmites australis (carrizo). Estos resultados son consistentes con lo reportado en la literatura científica sobre humedades construidos, en particular Vymazal (2021) señala que los humedales con macrófitos emergentes pueden alcanzar eficiencias superiores al 80% en condiciones óptimas, de igual forma Kadlec y Wallace (2009) reportan que sistemas Wetland con tiempos de retención inferiores a 2 días pueden lograr remociones superiores al 70% de nitrógeno total, siempre que exista una adecuada interacción entre sustrato, microbiota y vegetación; en este sentido, la eficiencia de 93.3% obtenida en el presente estudio supera el promedio reportado en muchos sistemas similares, lo cual sugiere condiciones altamente favorables para la remoción de nitratos. Teóricamente, la alta eficiencia en la remoción de nitratos observada puede explicarse mediante procesos biogeoquímicos característicos de los humedales artificiales, en primer lugar, la desnitrificación microbiana la cual constituye el principal mecanismo de eliminación de nitratos, proceso mediante el cual las bacterias heterótrofas convierten el NO3 en gases como N2 y N2O en condiciones anoxias presentes en el sustrato del humedal, de igual forma la asimilación vegetal por parte del carrizo contribuye a la reducción de nitrógeno disuelto; el TRH de 30.24 horas permite el tiempo suficiente para que ocurran procesos simultáneos de nitrificación-desnitrificación; y finalmente, los factores de temperatura y pH ligeramente neutros generan condiciones óptimas para la actividad biológica, lo cual contribuye al alto rendimiento del sistema.

Respecto a los nitritos los resultados evidenciaron una reducción total de la concentración de nitritos, registrándose valores de 18 mg/L en el pretratamiento y niveles no cuantificables (NC) en el postratamiento, lo cual indica una eficiencia de

remoción del 99.92% y demuestra un desempeño altamente eficiente del sistema Wetland bajo un tiempo de retención hidráulica (TRH) de 30.24 horas. Según Vyzamal (2021), los humedales artificales presentan eficiencias cercanas al 90 y 95% en la eliminación de nitritos, dado que estos compuestos son rápidamente transformados en nitratos mediante nitrificación o reducidos a formas gaseosas mediante desnitrificación; de igual forma Kadlec y Wallace (2009) señalan que en sistemas Wetland bien diseñados, los nitritos rara vez se acumulan debido a que son rápidamente consumidos por comunidades microbianas, en este sentido, el resultado NC obtenido coincide con lo reportado en investigaciones previas, donde los valores finales de nitritos tienden a ser inferiores a los límites de detección analítica.

En relación con los plaguicidas organoclorados, como aldrín, clordano, lindano y aldicarb, se observó una remoción limitada, alcanzando 25% para aldrín, 16.67% para clordano, 3.12% para lindano y 0% para aldicarb. Estos resultados coinciden con lo reportado por Caracela y Tapia (2022), quienes también registraron remociones parciales en contaminantes persistentes, así como con Francini (2023), quien señala que estos compuestos presentan alta resistencia a tratamientos biológicos convencionales. Teóricamente, este comportamiento se explica por la naturaleza fisicoquímica específica de cada compuesto evaluado, como el aldrín, al ser un plaguicida altamente hidrofóbico (log Kow ≈ 5.17), presenta una elevada afinidad por fases sólidas, favoreciendo su adsorción parcial sobre la grava y materia orgánica presente en el humedal, lo que justificaría su mayor porcentaje de remoción; según United States Environmental Protection Agency (2017), los compuestos organoclorados con elevado coeficiente de partición octanol agua tienden a retenerse preferentemente en sedimentos y sustratos sólidos. En contraste, el aldicarb presentó 0% de remoción, comportamiento que puede atribuirse a su distinta naturaleza química, a diferencia del aldrín, el aldicarb pertenece al grupo de los carbamatos, caracterizados por presentar mayor solubilidad en agua (≈ 6,000 mg/L) y menor capacidad de adsorción al sustrato, lo que incrementa su movilidad dentro del sistema hidráulico y reduce su retención en el lecho filtrante. Según World Health Organization (2010), los compuestos con alta solubilidad acuosa presentan menor afinidad por materiales minerales inertes como la grava, limitando su remoción en humedales de flujo subsuperficial.

Adicionalmente, el tiempo de retención hidráulica de 30.24 horas probablemente fue insuficiente para permitir procesos de biodegradación significativa, especialmente considerando que la degradación del aldicarb depende de condiciones microbiológicas específicas y periodos de residencia más prolongados (Liu et al., 2018). En consecuencia, la diferencia observada entre ambos compuestos no responde únicamente a la eficiencia del sistema Wetland, sino principalmente a las propiedades intrínsecas de cada plaguicida, que determinan su comportamiento ambiental y su susceptibilidad al tratamiento.

Respecto al componente microbiológico y parasitológico, el sistema alcanzó una remoción del 66.67% en huevos de helmintos, resultado que evidencia una reducción significativa de la carga parasitaria presente en el agua, este hallazgo coincide con lo reportado por Cortez (2024), quien demostró la eficacia de los humedales artificiales en la remoción de patógenos microbiológicos, así como con Tanner (2020), quien describe eficiencias similares mediante procesos de filtración y sedimentación, no obstante, aunque el porcentaje de remoción fue considerable, resulta insuficiente para garantizar inocuidad absoluta en cultivos de tallo bajo, debido al contacto directo entre el agua de riego y el producto agrícola. Desde el punto de vista teórico, la remoción observada se explica por procesos de sedimentación gravitacional, retención mecánica en el lecho de grava y filtración radicular; sin embargo, la eliminación no fue total debido a la elevada resistencia estructural de los huevos de helmintos, cuya cubierta multicapa les permite sobrevivir durante largos periodos incluso en ambientes adversos. Según World Health Organization (2006), aunque concentraciones ≤1 huevo/L cumplen criterios normativos para reúso agrícola, la condición sanitaria ideal para cultivos de consumo directo corresponde a ausencia total, razón por la cual se recomienda complementar el tratamiento con una etapa terciaria de desinfección.

Conclusiones

1. El Sistema Wetland implementado en la Comunidad de Compañía Baja ha demostrado tener un impacto positivo en la mejora de la calidad del agua para riego de plantas de tallo bajo, en la cual, aunque mostró mejoras significativas en algunos parámetros, como los compuestos orgánicos y microbiológicos, la

eficacia en la remoción de metales pesados y plaguicidas fue limitada, donde el sistema resultó ser particularmente eficaz en la mejora de parámetros físicos y orgánicos, pero mostró dificultades para reducir contaminantes más persistentes como los metales pesados y algunos plaguicidas organoclorados.

2. El Sistema Wetland demostró ser altamente eficiente en la remoción de compuestos orgánicos, como los detergentes (96.88%), fenoles (80%) y aceites y grasas (47.69%), lo que indica su efectividad en el tratamiento de contaminantes relacionados con la carga orgánica del agua, pero los resultados también indicaron que parámetros como bicarbonatos y conductividad mostraron mejoras mínimas, lo que sugiere que el sistema tiene limitaciones en la remoción de ciertos contaminantes inorgánicos, de igual modo, el oxígeno disuelto experimentó una ligera disminución, lo que podría indicar que el sistema no favorece completamente la oxigenación del agua para las plantas.
3. El Sistema Wetland no mostró reducción significativa en la concentración de metales pesados en el agua tratada, ya que los valores de metales como arsénico, cadmio, plomo, y cobre se mantuvieron constantes entre el pre-test y el post-test, lo que indica que el sistema no fue efectivo en la remoción de estos contaminantes, donde este resultado sugiere que la capacidad de los humedales para tratar metales pesados es limitada, y que sería necesario incorporar tecnologías complementarias o ajustar el diseño del humedal para abordar estos contaminantes de manera más eficiente.
4. El Sistema Wetland mostró una remoción moderada de aldrín (25%) y clordano (16.67%), pero no logró eliminar completamente los plaguicidas persistentes como lindano y Aldicarb. Estos resultados sugieren que los plaguicidas organoclorados tienen una baja biodegradabilidad en el ambiente del humedal, lo que limita la eficiencia del sistema en su eliminación, por ende, sería necesario optimizar el diseño del sistema Wetland o combinarlo con otras tecnologías para tratar de manera más efectiva estos contaminantes.
5. El Sistema Wetland mostró ser efectivo en la remoción de contaminantes microbiológicos, alcanzando una remoción del 40% de huevos de helmintos, donde este resultado muestra la capacidad del humedal para reducir la carga microbiológica en el agua tratada, lo que mejora la calidad sanitaria del agua para riego, pero, aunque la remoción no fue total, los resultados son

prometedores, y refuerzan la viabilidad del sistema Wetland para mejorar la seguridad sanitaria del agua de riego.

Referencias bibliográficas

Acosta, J, & Salvadori, S. (2020). Evaluación de la calidad de agua para riego mediante el empleo de criterios actualizados. Portal de Revistas Científicas, 30(2), 6300. ttps://cerac.unlpam.edu.ar/index.php/semiarida/article/view/5403

Almuktar, S., Rastinifard, N., Kiran, T. (2022). Constructed wetlands for wastewater treatment. Land, 11(9). https://doi.org/10.3390/land11091388

Betanzo, E., Dajud, G., Aguilar, G., & Delfín, E. (2025). Plants used in constructed wetlands for aquaculture: A systematic review. Sustainability, 17(14), 6298. https://doi.org/10.3390/su17146298

Caracela, J, y Tapia, J. (2022). Tratamiento de las aguas de riego del río Surco mediante radiación ultravioleta [Tesis de pregrado, Universidad Nacional del Callao]. https://hdl.handle.net/20.500.12952/7670

Centro de Investigación Agrícola. (2023). Revegetación con especies de porte bajo en áreas afectadas por incendios forestales.[Tesis de pregrado, Universidad Nacional José Faustino Sánchez Carrión]. https://www.studocu.com/pe/document/universidad-nacional-de-barranca/auditoria-operativa/revegetacion-en-areas-degradadas-doc/113942322?sid=e06a06b6-4dcb-4e74-b946-8e5835538d231785279533

Chirinos, A. (2018). Análisis de la calidad de agua mediante la evaluación de parámetros ambientales según la categoría 3 del canal de riego Tingo Tuyuloma, caserío Puruay Alto, Cajamarca [Tesis de pregrado, Universidad Alas Peruanas]. https://hdl.handle.net/20.500.12990/8698

Cortez Cerquin, C. (2024). Eficiencia de un humedal artificial en el tratamiento de aguas grises domésticas en una vivienda de la comunidad de Tartar Chico–Baños del Inca, 2023 [Tesis de pregrado, Universidad Privada del Norte]. https://repositorio.upn.edu.pe/item/a4102318-af1a-489e-8c16-5a774ed71d55

Food and Agriculture Organization. (1992). Guidelines for the use of wastewater in agriculture (Water Reports No. 8). https://www.fao.org/3/t0551e/t0551e00.htm

Food and Agriculture Organization. (2012). Quality of water for agriculture.

Francini, A., et al. (2018). Removal of micro-pollutants from wastewater by constructed wetlands. Environmental Science and Pollution Research, 25, 1–14. https://doi.org/10.1007/s11356-018-3582-x

García, K. (2020). Evaluación de calidad de agua para riego en la zona centro norte de Chile y desarrollo de un proceso preliminar costo-efectivo para disminuir excesos que incumplan la NCh 1333 [Tesis de maestría, Universidad de Concepción]. https://repositorio.udec.cl/server/api/core/bitstreams/fbf04c72-ef6f-49a1-aa3a-57ac4830730c/content

Gómez, M. (2015). Guía ilustrada de plantas de tallo bajo.

Guilcamaigua, D, y Chancusig, E. (2019). Evaluación de la calidad del agua de riego en tres agrosistemas: Tradicional, orgánico y convencional. Spondylus. https://www.uasb.edu.ec/wp-content/uploads/2021/04/Doris-Guilcamaigua.pdf

Inga Armas, E. N., Paitan Zavala, M. N., & Laurente Segovia, J. J. (2024). Tratamiento de aguas residuales domésticas mediante humedales artificiales mejorados con rizobacterias [Tesis de pregrado, Universidad Continental]. https://repositorio.continental.edu.pe/item/ab963aeb-18ad-49e1-a351-1cacdb6e69a9/full

Khan, A., Anjum, Lubna, L., Arshad, A., Ali, S,. Aleem, M., Nasir, A. (2025). Hybrid constructed wetlands performance for wastewater treatment. Nature-Based Solutions. https://doi.org/10.3390/w17071080

Li, Q., Cao, P., Ma, S. Wang, W., Wang, Z., Wu, W., Zheng, T., Lui, J., Li, L., Liu, J. (2024). Plant species and pollutant removal in constructed wetlands. Journal of Water Process Engineering. https://doi.org/10.1016/j.wateco.2026.100037

Liu, X., Zhang, S., Wang, J. (2018). Nitrogen removal in constructed wetlands. Science of the Total Environment, 635, 1–10. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.03.260

Maine, M. A., Suñe, N., Hadad, H., Sánchez, G., & Bonetto, C. (2021). Nutrient and metal removal in a constructed wetland. Ecological Engineering, 26(4), 341–347. https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2005.09.019

Medina, M, & Vega, J. (2021). Tratamiento del agua contaminada del canal de riego Surco mediante la intervención de la lombriz Eisenia foetida [Tesis de pregrado, Universidad César Vallejo]. https://hdl.handle.net/20.500.12692/84283

Ning, Z., Kennedy, K., & Fernandes, L. (1997). Cinética de degradación anaeróbica del 2,4-diclorofenol. Water Science and Technology, 35(3), 67–75. https://doi.org/10.2166/wst.1997.0484

Saeed, T., & Sun, G. (2012). A review on nitrogen and organics removal mechanisms in subsurface flow constructed wetlands. Journal of Environmental Management, 112, 429–448. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2012.01.011

Stefanakis, A. I. (2018). Constructed wetlands: A sustainable wastewater treatment technology. Water, 10(8), 1068. https://doi.org/10.3390/w10081068

Smith, J., Jones, A., & Brown, K. (2016). Impact of irrigation water quality on agricultural production: A review. Journal of Water Resource and Protection, 8(5), 483–494. https://doi.org/10.4236/jwarp.2016.85042

Tanner, C. C. (2001). Plants as ecosystem engineers in subsurface-flow treatment wetlands. Water Science and Technology, 44(11–12), 9–17. https://doi.org/10.2166/wst.2001.0829

Tokunaga, F. (2024). Evaluación de la eficiencia de un humedal artificial prototipo [Tesis, Universidad Privada de Tacna]. https://repositorio.upt.edu.pe/handle/20.500.12969/4041

Vymazal, J. (2007). Removal of nutrients in various types of constructed wetlands. Science of the Total Environment, 380(1–3), 48–65. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2006.09.014

Vymazal, J. (2011). Constructed wetlands for wastewater treatment: Five decades of experience. Environmental Science & Technology, 45(1), 61–69.

Waly, M., Ahmed, T., Abunada, Z., Mickovski, S., & Thomson, C. (2022). Constructed wetland for sustainable and low-cost wastewater treatment: Review article. Land, 11(9). https://doi.org/10.3390/land11091388

Wang, L., et al. (2024). Research progress on wetland substrates. Water, 16(13). https://doi.org/10.3390/w16131848

Wu, H., Zhang, J., Ngo, H. H., Guo, W., Hu, Z., Liang, S., et al. (2015). A review on the sustainability of constructed wetlands. Bioresource Technology, 175, 594–601. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2014.10.068

Xiang, H., Guang, Y., Nai, Y., Li, L., Lin, Z., Liu, Y., Xiao, L., & Jia, L. (2019). Effect of plant physiological characteristics on pollutant removal. Ecological Engineering, 135, 45–53. https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2019.05.017

Zamora, W. (2024). Tratamiento final del agua residual mediante el sistema Wetland en el distrito de Santa Rosa, Ayacucho [Tesis de maestría, Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga]. http://repositorio.unsch.edu.pe/handle/UNSCH/6446

ESCUELA DE
POSGRADO
UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN CRISTÓBAL DE HUAMANGA

CONSTANCIA DE ORIGINALIDAD N°0136-2026-UNSCH-EPG/KBA

El que suscribe; responsable verificador de originalidad de trabajo de tesis de Posgrado en segunda instancia para la **Escuela de Posgrado – UNSCH**; en cumplimiento a la Resolución Directoral Nº002-2026-UNSCH-EPG/D, Reglamento de Originalidad de trabajos de Investigación de la UNSCH, otorga lo siguiente:

CONSTANCIA DE ORIGINALIDAD

AUTOR	Bach. JOHANN MILTHON CALDERON MOLINA
DENOMINACIÓN DEL PROGRAMA DE ESTUDIOS	MAESTRÍA EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA
GRADO ACADÉMICO QUE OTORGA	MAESTRO
DENOMINACIÓN DEL GRADO ACADÉMICO	MAESTRO(A) EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA, MENCIÓN GERENCIA DE PROYECTOS Y MEDIO AMBIENTE
TÍTULO DE TESIS	Tratamiento de agua para riego de plantas de tallo bajo y mejora de calidad de agua mediante el Sistema Wetland, en la Comunidad de Compañía Baja del distrito de Pacaycasa provincia de Huamanga 2024
EVALUACIÓN DE ORIGINALIDAD	14% de similitud
N° DE TRABAJO	3029049628
FECHA	10 de setiembre de 2026

Por tanto, según los artículos 12, 13 y 17 del Reglamento de Originalidad de Trabajos de Investigación, es procedente otorgar la constancia de originalidad con depósito.

Se expide la presente constancia a solicitud del interesado para los fines que crea conveniente.

10 de setiembre de 2026.

UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN CRISTÓBAL DE HUAMANGA
ESCUELA DE POSGRADO
Mg. Kelvis BERROCAL ARGUMEDO
Sub Director de Investigación

CC.
Archivo
KBA/

Tratamiento de agua para riego de plantas de tallo bajo y mejora de calidad de agua mediante el Sistema Wetland, en la Comunidad de Compañía Baja del distrito de Pacaycasa provincia de Huamanga 2024

por Johann Milthon CALDERON MOLINA

Fecha de entrega: 10-sept-2026 11:49p. m. (UTC-0500)
Identificador de la entrega: 3029049628
Nombre del archivo: Johann_Milthon_CALDERON_MOLINA_T.docx (1.08M)
Total de palabras: 26573
Total de caracteres: 152224

Tratamiento de agua para riego de plantas de tallo bajo y mejora de calidad de agua mediante el Sistema Wetland, en la Comunidad de Compañía Baja del distrito de Pacaycasa provincia de Huamanga 2024

INFORME DE ORIGINALIDAD

14%	15%	14%	6%
INDICE DE SIMILITUD	FUENTES DE INTERNET	PUBLICACIONES	TRABAJOS DEL ESTUDIANTE

FUENTES PRIMARIAS

1	dspace.ups.edu.ec Fuente de Internet	1%
2	hdl.handle.net Fuente de Internet	1%
3	Lucía Margoth Moreno Tapia, Erika Gissela Espinosa Moreno, Cristian Gonzalo Caisachana Ortiz. "Recaudación de impuestos y creación de valor empresarial en las empresas manufactureras de Cotopaxi", Pacha. Revista de Estudios Contemporáneos del Sur Global, 2023 Publicación	1%
4	Submitted to Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga Trabajo del estudiante	<1%
5	repositorio.unh.edu.pe Fuente de Internet	<1%
6	repositorio.uancv.edu.pe Fuente de Internet	<1%
7	repositorio.unjfsc.edu.pe Fuente de Internet	<1%
8	repositorio.udec.cl Fuente de Internet	<1%
9	Submitted to Universidad Continental Trabajo del estudiante	<1%
10	Submitted to uncedu Trabajo del estudiante	<1%
11	repositorio.unsaac.edu.pe Fuente de Internet	<1%
12	AMBIENTE Y DESARROLLO SOSTENIBLE SOCIEDAD ANONIMA CERRADA - AMBIDES S.A.C.. "EIA-SD del Proyecto Infraestructura de Disposición Final de Residuos Sólidos No Municipales Peligrosos y No Peligrosos - Relleno de Seguridad La Joya-IGA0017851", R.D. N° 00037-2022-SENACE-PE/DEIN, 2022	<1%

	Publicación	
13	Submitted to Universidad Cesar Vallejo Trabajo del estudiante	<1 %
14	repositorio.upt.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
15	alicia.concytec.gob.pe Fuente de Internet	<1 %
16	Submitted to Organismo de Evaluación y Fiscalización Trabajo del estudiante	<1 %
17	repositorio.upn.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
18	sinia.minam.gob.pe Fuente de Internet	<1 %
19	repositorio.unap.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
20	repositorio.upla.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
21	repositorio.unheval.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
22	repositorio.undac.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
23	hupanam.com Fuente de Internet	<1 %
24	ECOFLUIDOS INGENIEROS S.A.. "DAAC Granja Atena A-IGA0018746", R.D.G. N° 078-2019-MINAGRI-DVDIAR-DGAAA, 2022 Publicación	<1 %
25	repositorio.uladech.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
26	Submitted to Universidad Andina Nestor Caceres Velasquez Trabajo del estudiante	<1 %
27	VICEVERSA CONSULTING S.A.. "Actualización de la MEIA Tambojasa-IGA0019651", R.D. N° 00064-2021-SENACE-PE/DEAR, 2022 Publicación	<1 %
28	repositorio.unac.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
	repositorio.unfv.edu.pe	

29	Fuente de Internet	<1 %
30	#N/A. "Segundo ITS del Proyecto Antapaccay Expansión Tintaya para Ampliar la Planta Concentradora Tintaya, Adición de Componentes para la Planta Antapaccay entre otros Componentes Auxiliares-IGA0000799", R.D. Nº 501-2015-MEM-DGAAM, 2020 Publicación	<1 %
31	Submitted to unisinu Trabajo del estudiante	<1 %
32	cdn.www.gob.pe Fuente de Internet	<1 %
33	repositorio.unc.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
34	sapfnidbinvestrm.blob.core.windows.net Fuente de Internet	<1 %
35	Submitted to Universidad Politécnica del Perú Trabajo del estudiante	<1 %
36	repositorio.uleam.edu.ec Fuente de Internet	<1 %
37	Submitted to Universidad Catolica de Trujillo Trabajo del estudiante	<1 %
38	repositorio.uns.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
39	ria.utn.edu.ar Fuente de Internet	<1 %
40	hwbdocuments.env.nm.gov Fuente de Internet	<1 %
41	repositorio.unaj.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
42	Submitted to Universidad Nacional de Cajamarca Trabajo del estudiante	<1 %
43	bibdigital.epn.edu.ec Fuente de Internet	<1 %
44	es.scribd.com Fuente de Internet	<1 %
	repositorio.unach.edu.pe	

45	Fuente de Internet	<1 %
46	repositorio.unsch.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
47	repositorio.ucv.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
48	repositorio.pucp.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
49	apirepositorio.unh.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
50	repositorio.ulasalle.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
51	repositorio.unah.edu.pe Fuente de Internet	<1 %

Excluir citas	Activo	Excluir coincidencias	< 30 words
Excluir bibliografía	Activo		

ESCUELA DE
POSGRADO
UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN CRISTÓBAL DE HUAMANGA

ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS PARA OPTAR
EL GRADO ACADÉMICO DE MAESTRO(A) EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA, MENCIÓN GERENCIA DE PROYECTOS Y MEDIO AMBIENTE
RESOLUCIÓN DIRECTORAL N°00685-2026-UNSCH-EPG/D.

Siendo las 02:00 p.m. del 20 de julio de 2026 se reunieron en el auditórium de la Escuela de Posgrado de la Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga, el Jurado Examinador y Calificador de Tesis, presidido por el **Mg. KELVIS BERROCAL ARGUMEDO** Director (e) de la Escuela de Posgrado, el **Mg. EDMUNDO CANCHARI GUTIERREZ** Director de la Unidad de Posgrado de la Facultad de Ingeniería de Minas, Geología y Civil, e integrado por los siguientes miembros: **Dr. ANDRES PORTUGAL PAZ** y el **Dr. HEMERSON LIZARBE ALARCON**; para la sustentación oral y pública de la tesis titulada: **TRATAMIENTO DE AGUA PARA RIEGO DE PLANTAS DE TALLO BAJO Y MEJORA DE CALIDAD DE AGUA MEDIANTE EL SISTEMA WETLAND, EN LA COMUNIDAD DE COMPAÑÍA BAJA DEL DISTRITO DE PACAYCASA PROVINCIA DE HUAMANGA 2024,** presentado por el **Bach. JOHANN MILTHON CALDERON MOLINA.** Teniendo como asesor al **Mg. JAIME LEONARDO BENDEZU PRADO.**

Acto seguido se procedió a la exposición de la tesis, con el fin de optar el Grado Académico de **MAESTRO(A) EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA, MENCIÓN GERENCIA DE PROYECTOS Y MEDIO AMBIENTE.** Formuladas las preguntas, éstas fueron absueltas por el graduando.

A continuación, el Jurado Examinador y Calificador de Tesis procedió a la votación, la que dio como resultado el siguiente calificativo: Dieciseis (16).

CALIFICACION (x)	
Aprobado(a) por Unanimidad.	X
Aprobado(a) por Mayoría.	
Desaprobado(a) por Unanimidad.	
Desaprobado(a) por Mayoría.	

Marcar con un aspa (x).

Luego, el presidente del Jurado recomienda que la Escuela de Posgrado proponga que se le otorgue al **Bach. JOHANN MILTHON CALDERON MOLINA,** el Grado Académico de **MAESTRO(A) EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA, MENCIÓN GERENCIA DE PROYECTOS Y MEDIO AMBIENTE.** Siendo las 3:40 p.m. hrs. se levanta la sesión.

Se extiende el acta en la ciudad de Ayacucho, a las 3:55 p.m. hrs. del 20 de julio de 2026.

Mg. KELVIS BERROCAL ARGUMEDO
Director (e) de la Escuela de Posgrado.

Mg. EDMUNDO CANCHARI GUTIERREZ
Director de la UPG-FIMGC.

Dr. ANDRES PORTUGAL PAZ
Miembro.

Dr. HEMERSON LIZARBE ALARCON
Miembro.

Dr. ENRIQUE JAVIER AGUILAR FELICES
Secretario Docente.

Observaciones:

.....