Universidad Católica de Santa María

Facultad de Arquitectura e Ingenierías Civil y del Ambiente

Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental

Evaluación de la eficiencia de un humedal artificial de flujo subsuperficial horizontal en configuración de monocultivo y policultivo de *Canna indica* (achira) y *Typha domingensis* (matara) para el tratamiento de lactosuero en la región de Arequipa

Tesis presentada por:

Chirinos Prado, Jose Andre

ORCID: 0009-0002-8722-5909

para optar el Título Profesional de Ingeniero Ambiental

Asesora:

Mg. Benegas Llanos, Rosario Carolina

ORCID: 0000-0002-1728-4949

Arequipa - Perú

2026

UCSM-ERP

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

INGENIERIA AMBIENTAL

TITULACIÓN CON TESIS

DICTAMEN APROBACIÓN DE BORRADOR

Arequipa, 03 de Julio del 2026

Dictamen: 015151-C-EPIA-2026

Visto el borrador del expediente 015151, presentado por:

2019221381 - CHIRINOS PRADO JOSE ANDRE

Titulado:

EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA DE UN HUMEDAL ARTIFICIAL DE FLUJO SUBSUPERFICIAL HORIZONTAL EN CONFIGURACIÓN DE MONOCULTIVO Y POLICULTIVO DE CANNA INDICA (ACHIRA) Y TYPHA DOMINGENSIS (MATARA) PARA EL TRATAMIENTO DE LACTOSUERO EN LA REGIÓN DE AREQUIPA

Nuestro dictamen es:

APROBADO

Titulo Profesional/Titulo de Segunda Especialidad/Grado Académico a optar:

INGENIERO AMBIENTAL

29611452 - ARENAZAS RODRIGUEZ ARMANDO JACINTO
DICTAMINADOR



46769238 - CHANOVE MANRIQUE ANDREA MARIETA
DICTAMINADOR



72384055 - MEDINA RAMOS ROBERT JOAQUIN
DICTAMINADOR



EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA DE UN HUMEDAL ARTIFICIAL DE FLUJO SUBSUPERFICIAL HORIZONTAL EN CONFIGURACIÓN DE MONOCULTIVO Y POLICULTIVO DE CANNA INDICA (ACHIRA) Y TYPHA DOMINGENSIS (MATARA) PARA EL TRAT

INFORME DE ORIGINALIDAD

12%	12%	4%	3%
INDICE DE SIMILITUD	FUENTES DE INTERNET	PUBLICACIONES	TRABAJOS DEL ESTUDIANTE

FUENTES PRIMARIAS

1	repositorio.ucsm.edu.pe Fuente de Internet	2%
2	Submitted to Universidad Católica de Santa María Trabajo del estudiante	1%
3	hdl.handle.net Fuente de Internet	<1%
4	rinacional.tecnm.mx Fuente de Internet	<1%
5	dspace.unach.edu.ec Fuente de Internet	<1%
6	repositorio.unc.edu.pe Fuente de Internet	<1%
7	dgsa.uaeh.edu.mx:8080 Fuente de Internet	<1%
8	repositorio.udec.cl Fuente de Internet	<1%
9	www.coursehero.com Fuente de Internet	<1%
10	www.scribd.com Fuente de Internet	<1%
11	dspace.unitru.edu.pe Fuente de Internet	<1%
12	repositorio.unaj.edu.pe Fuente de Internet	<1%
13	repositorio.unemi.edu.ec Fuente de Internet	<1%
14	repositorioacademico.upc.edu.pe Fuente de Internet	<1%

Dedicatoria

Dedico este trabajo a mis padres, por ser mi apoyo incondicional, por creer en mí y acompañarme en cada paso de este camino. Cada sacrificio y cada palabra de aliento me ayudaron a llegar hasta aquí.

Y especialmente a Rex, mi gran amigo y compañero de vida. A ti, que me enseñaste a valorar cada momento, a mirar la vida de otra manera y a seguir adelante incluso en los días más difíciles. Sigue cuidándome y acompañándome hasta que nos volvamos a encontrar.

Agradecimientos

De manera muy especial, quiero dedicar estas palabras a mi gran amigo Rex, quien ocupa y siempre ocupará un lugar especial en mi corazón. Agradezco cada momento que compartimos, cada día a su lado y cada instante de compañía que hizo más especiales mis días. Me enseñó a valorar las cosas sencillas, a disfrutar más de cada momento y, sobre todo, me cambio la visión de la vida.

En momentos en los que necesitaba una razón para seguir adelante, su compañía fue una de las mayores fuerzas que tuve. Aunque hoy ya no pueda compartir físicamente esos momentos conmigo, todo lo que vivimos juntos permanece en mi alma y en mi corazón. Este logro se lo dedico a él, con todo mi amor y gratitud, por todo lo que aprendí a su lado, por la persona que me ayudó a ser y por la fuerza que me sigue dando en todo momento.

Finalmente, agradezco a todas las personas que, de una u otra manera, contribuyeron a mi formación y me acompañaron durante este proceso. Cada consejo y cada muestra de apoyo hicieron posible llegar a la culminación de esta etapa. A todos ellos, les expreso mi sincera gratitud por haber formado parte de este camino y por haber dejado, de alguna manera, una enseñanza y un recuerdo que llevaré conmigo en las siguientes etapas de mi vida.

RESUMEN

La industria láctea genera grandes volúmenes de lactosuero, un subproducto con una elevada carga orgánica (superior a 40,000 mg/L de DBO_5) que representa un significativo desafío ambiental. Esta investigación evaluó la eficiencia de un humedal artificial de flujo subsuperficial horizontal (HAFSSH) para el tratamiento de lactosuero, comparando el desempeño de monocultivos de Canna indica y Typha domingensis frente a una configuración en policultivo, bajo tiempos de retención hidráulica (TRH) de 10 y 5 días. Se implementó un sistema piloto con tres unidades paralelas para determinar la capacidad de remoción de carga orgánica y la estabilidad fisicoquímica del efluente. Los resultados demostraron que la configuración en policultivo (T3) fue la más eficiente y resiliente. Exhibió una remoción casi total de la carga orgánica biodegradable, disminuyendo la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO_5) de 40,687.5 mg/L a solo 9.1 mg/L (99.98% de eficiencia), y la DQO en un 99.93%.Asimismo, logró la mayor eficiencia en la remoción de Turbidez (99.30%) y TDS (83.03%). Notablemente, el monocultivo de *Typha domingensis* resultó inestable a 5 días de TRH, provocando una drástica acidificación del efluente (pH 5.72), mientras que el policultivo mantuvo su estabilidad. Canna indica fue la especie más productiva en biomasa, aunque su crecimiento individual fue menor en el policultivo, sugiriendo competencia interespecífica. Se concluye que el HAFSSH en configuración de policultivo es la alternativa más recomendable por su alta eficiencia y, fundamentalmente, por su superior resiliencia y estabilidad en el tratamiento del lactosuero de alta carga.

Palabras clave: humedales artificiales, lactosuero, fitorremediación.

ABSTRACT

The dairy industry generates large volumes of whey, a by-product with a high organic load (exceeding 40,000 mg/L BOD) that poses a significant environmental challenge. This research aimed to evaluate the efficiency of a horizontal subsurface flow constructed wetland (HSSF-CW) for whey treatment, comparing the performance of Canna indica and Typha domingensis in monoculture configurations, and a polyculture of both species, under Hydraulic Retention Times (HRT) of 10 and 5 days. A pilot system with three parallel experimental units was implemented, monitoring the removal of BOD, COD, Turbidity, Total Dissolved Solids (TDS), the variation of pH and Dissolved Oxygen (DO), and macrophyte adaptation. The results showed that the polyculture configuration (T3) was the most efficient and resilient. It exhibited a near-total removal of organic matter, achieving 99.98% for BOD (reducing the load to 9.1 mg/L) and 99.93% for COD. Furthermore, it achieved the highest removal efficiencies for Turbidity (99.30%) and TDS (83.03%).

Notably, the *Typha domingensis* monoculture proved to be unstable at a 5-day HRT, causing a drastic acidification of the effluent (pH 5.72), while the polyculture maintained stability. *Canna indica* was the most productive species in terms of biomass, although its individual growth was lower in the polyculture, suggesting interspecific competition. It is concluded that the HSSF-CW in a polyculture configuration is the most recommended alternative due to its high efficiency and, fundamentally, its superior resilience and stability in treating high-strength whey.

Keywords: constructed wetlands, cheese whey, phytoremediation.

INDICE

DEDICATORIA

AGRADECIMIENTOS

RESUMEN

ABSTRACT

INTRODUCCIÓN 1

CAPÍTULO I 3

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA 3

1.1. Problemática de la Investigación 3

1.2. Justificación de la Investigación 6

1.2.1. Justificación Ambiental 6

1.2.2. Justificación Social 7

1.2.3. Justificación Económica 8

1.2.4. Justificación Tecnológica 8

1.3. Hipótesis 9

1.4. Objetivos de la Investigación 10

1.4.1. Objetivo General 10

1.4.2. Objetivos Específicos 10

1.5. Variables e Indicadores 11

CAPÍTULO II 12

2. FUNDAMENTO TEÓRICO 12

2.1. Antecedentes de la Investigación 12

2.2. Marco Teórico Conceptual 16

2.2.1. El Lactosuero: Problemática y Caracterización 16

2.2.2. Humedales Artificiales (HA) como Sistemas de Tratamiento 17

2.2.3. Fitorremediación Aplicada a Humedales Artificiales 20

2.2.4. Macrófitas Seleccionadas para el Estudio y su Potencial en Policultivo 21

2.3. Marco Legal 23

2.3.1. Normativa Internacional 23

2.3.2. Normativa Nacional (Perú) 23

2.3.3. Normativa Regional (Arequipa) y Local 24

CAPÍTULO III 25

3. METODOLOGÍA 25

3.1. Tipo y nivel de investigación 25

3.2. Diseño de investigación 25

3.3. Métodos de la investigación 28

3.3.1. Materiales y equipos 28

3.3.2. Procedimiento Metodológico 29
CAPÍTULO IV 42
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN 42
4.1 Caracterización del Afluente 42
4.2 Diseño y Construcción del Sistema Piloto de Tratamiento 44
4.3 Eficiencia del Tratamiento y Variación de Parámetros 47
4.3.1 Estadísticas Descriptivas del Rendimiento de los Tratamientos 47
4.3.2 Análisis de Varianza (ANOVA) y Validación del Modelo 53
4.3.3 Análisis de Efectos Principales e Interacción 55
4.3.4 Comparación de Medias (Prueba de Tukey) 59
4.3.5 Resumen Visual del Desempeño por Condición Experimental 63
4.4 Adaptación y Desarrollo de las Macrófitas 64
4.4.1. Análisis Cualitativo y Semicuantitativo del Estado Fitosanitario y Vigor de las Plantas 64
4.4.2. Análisis Cuantitativo del Crecimiento Vegetativo 66
CAPÍTULO V 72
5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES 72
5.1. Conclusiones 72
5.2. Recomendaciones 73
REFERENCIAS 75

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Operacionalización de variables 11
Tabla 2 Materiales y equipos principales 28
Tabla 3 Caracterización Fisicoquímica del Afluente (Lactosuero Crudo) 42
Tabla 4 Especificaciones Técnicas del Sistema Piloto de HAFSSH Construido 46
Tabla 5 Estadísticas Descriptivas de las Variables de Respuesta por Tratamiento y Tiempo de Retención Hidráulica (TRH) 48
Tabla 6 Eficiencia de Remoción de Materia Orgánica (y) por Tratamiento (DBO5 y DQO) 49
Tabla 7 Resumen de Significancia Estadística y Potencia de los Factores (ANOVA) 55
Tabla 8 Agrupación De Tukey Para La Interacción En Eficiencia De Turbidez 61
Tabla 9 Agrupación De Tukey Para La Interacción En Eficiencia De TDS 62
Tabla 10 Agrupación De Tukey Para La Interacción En Ph Final 63
Tabla 11 Agrupación De Tukey Para La Interacción En OD Final 64
Tabla 12 Evaluación del Índice de Vigor Visual (IVV) basado en Descriptores de Salud Vegetal 70
Tabla 13 Evolución de la Altura Promedio (cm) de las Macrófitas en cada Tratamiento 71
Tabla 14 Evolución del Número Promedio de Tallos/Vástagos por Unidad Experimental 73
Tabla 15 Biomasa Total Individual (g) Cosechada (Peso Seco en gramos) por Componente para cada Tratamiento 74
Tabla 16 Análisis De Varianza Para Eficiencia De Turbidez 100
Tabla 17 Análisis De Varianza Para Eficiencia De TDS 101
Tabla 18 Análisis De Varianza Para Ph Final 102
Tabla 19 Análisis De Varianza Para OD Final 103
Tabla 20 Escala de Estimación Visual de Vigor Fitosanitario (Índice de Vigor Visual - IVV) 104

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Caracterización fisicoquímica del lactosuero 30
Figura 2 Sistema configurado 34
Figura 3 Diagrama del sistema configurado 34
Figura 4 Evaluación de eficiencia - Remoción Materia Orgánica y Sólidos 38
Figura 5 Metodología Experimental- Flujo general 41
Figura 6 Abatimiento de la Carga orgánica por tratamiento 50
Figura 7 Comparación de eficiencia de remoción de DBO_5 (%) 52
Figura 8 Gráficas Factoriales Para Eficiencia De Turbidez 55
Figura 9 Gráficas Factoriales Para Eficiencia De TDS 56
Figura 10 Gráficas Factoriales Para pH Final 57
Figura 11 Gráficas Factoriales Para OD Final 58
Figura 12 Gráfica De Intervalos De Todas Las Variables 63

Figura 13 Curvas de crecimiento en altura (cm) de las macrófitas a lo largo del periodo experimental.
67
Figura 14 Distribución de la biomasa final seca (aérea y subterránea) por tratamiento 70
Figura 15 Preparación inicial y acondicionamiento de macrófitas de Canna indica 87
Figura 16 Detalle del sistema de salida del efluente de una unidad experimental. 87
Figura 17 Monocultivo de Canna indica (T1) en operación, mostrando alto vigor vegetativo.
. 88
Figura 18 Monocultivo de Typha domingensis (T2) en operación. 88
Figura 19 Detalle de desarrollo de nuevo brote en Canna indica 89
Figura 20 Biomasa subterránea (rizomas y raíces) de Canna indica cosechada del monocultivo (T1).
89
Figura 21 Biomasa subterránea de Canna indica cosechada del policultivo (T3). 90
Figura 22 Monocultivo de Typha domingensis (T2) antes de la cosecha 90
Figura 23 Informe de ensayo 91
Figura 24 Gráficas De Residuos Para Eficiencia De Turbidez 96
Figura 25 Gráficas De Residuos Para Eficiencia De TDS 96
Figura 26 Gráficas De Residuos Para pH Final 97
Figura 27 Gráficas De Residuos Para OD Final 98

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1 Panel Fotográfico del Proceso Experimental 92
Anexo 2 Informe de Ensayo de Laboratorio (SGS) - DBO_5 y DQO 96
Anexo 3 Base de Datos de Parámetros Fisicoquímicos 98
Anexo 4 Registro de Datos Biométricos (Crecimiento Vegetativo) **99**
Anexo 5 Verificación de Biomasa Total Individual (g) Seca Individual (Post-Cosecha) **100**
Anexo 6 Validación Estadística y Análisis de Varianza 100
Anexo 7 Escala de Estimación Visual de Vigor Fitosanitario y Salud Vegetal de Kadlec & Wallace (2008) 104

INTRODUCCIÓN

La industria láctea, un pilar de la seguridad alimentaria y la economía global, enfrenta un desafío ambiental de considerable magnitud: la gestión del lactosuero. Este subproducto líquido, resultante de la elaboración de quesos, constituye entre el 80% y el 90% del volumen total de leche procesada (Torres Martínez, 2020). A nivel mundial, se estima que casi la mitad de los 115 millones de toneladas de lactosuero producidas anualmente son desechadas al ambiente sin tratamiento previo (Grajales & Garay, 2023).

Esta problemática se replica en el Perú, donde el impacto contaminante del suero sin tratar es significativo (Medida Portugal & De La Torre Aranda, 2019) , y de manera particular en la región de Arequipa, uno de los principales centros de producción lechera del país (Centro Nacional de Planeamiento Estratégico, 2023). El potencial contaminante del lactosuero reside en su composición, caracterizada por una elevada carga de materia orgánica, con valores que pueden superar los 37 g/L en Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO_5) y los 68 g/L en Demanda Química de Oxígeno (DQO) (Sánchez-Rangel et al., 2023). El vertido de este efluente sin tratar provoca un rápido agotamiento del oxígeno disuelto, generando condiciones de hipoxia y la mortandad de la vida acuática (Sánchez-Rangel et al., 2023).

A pesar de la existencia de tecnologías de tratamiento convencionales, como los lodos activados, su implementación es a menudo inviable para las pequeñas y medianas empresas (PYMES) lácteas debido a los altos costos de inversión, operación y la complejidad técnica que requieren (Sánchez-Rangel et al., 2023). Esta barrera económica perpetúa el problema ambiental, haciendo imperativa la búsqueda de alternativas sostenibles. En este contexto, los humedales artificiales (HA) emergen como una ecotecnología prometedora, caracterizada por su bajo costo de construcción y operación, simplicidad de manejo y alta resiliencia ante variaciones de carga (HUPANAM, 2022).

La eficiencia de los HA se basa en la fitorremediación, utilizando macrófitas como *Canna*

indica y *Typha domingensis*. Sin embargo, el desempeño comparativo de estas especies, especialmente en configuraciones de policultivo frente a monocultivo para tratar efluentes de alta carga como el lactosuero, representa una brecha en el conocimiento actual.

La presente investigación busca abordar esta brecha. Se parte de la hipótesis de que un sistema de humedal artificial de flujo subsuperficial horizontal (HAFSSH) en configuración de policultivo con *Canna indica* y *Typha domingensis* exhibirá una eficiencia de remoción y una

estabilidad operativa significativamente mayores en comparación con los sistemas en monocultivo. Para verificar esta hipótesis, el objetivo general de este estudio fue evaluar la eficiencia de un HAFSSH en el tratamiento de lactosuero, comparando el desempeño de las macrófitas mencionadas en configuraciones de monocultivo y policultivo, bajo diferentes tiempos de retención hidráulica. Para alcanzar este fin, se plantearon los siguientes objetivos específicos: 1) caracterizar fisicoquímicamente el lactosuero para establecer la calidad del afluente; 2) diseñar y construir un sistema piloto de HAFSSH con las tres configuraciones de vegetación; 3) evaluar la eficiencia de cada configuración en la remoción de turbidez y TDS, así como la variación de pH y OD, bajo TRH de 10 y 5 días ; y 4) evaluar la adaptación y desarrollo de las macrófitas como indicador de su resiliencia.

CAPÍTULO I

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1. Problemática de la Investigación

La industria láctea, un sector de indiscutible importancia económica y alimentaria a nivel global, enfrenta un significativo desafío ambiental derivado de la generación de lactosuero. Este subproducto líquido, resultante principalmente de la elaboración de quesos, constituye entre el 80% y el 90% del volumen total de leche procesada (Torres Martínez, 2020). La producción mundial de leche y sus derivados ha experimentado un crecimiento constante, como lo demuestran las cifras de la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO), que reportó 887 millones de toneladas métricas de leche producidas en 2021, con estimaciones de crecimiento continuo en los próximos años. Este aumento en la producción láctea inevitablemente conlleva un incremento en la generación de lactosuero, estimándose que a nivel mundial, aproximadamente el 47% de los 115 millones de toneladas de lactosuero producidas anualmente son desechadas al ambiente sin tratamiento previo (Grajales & Garay, 2023).

En el Perú, el consumo de leche y sus derivados forma parte esencial de la canasta básica familiar, lo que impulsa un aumento continuo en su producción. Esta realidad agrava la problemática asociada al manejo del lactosuero; se ha reportado que el 90% de una producción de 400,000 litros diarios de lactosuero sin tratar puede generar un impacto contaminante equivalente al de 1,250,000 habitantes (Medida Portugal & De La Torre Aranda, 2019).

La región de Arequipa, en particular, se posiciona entre los tres principales departamentos productores de leche a nivel nacional, junto con Lima y Cajamarca, lo que subraya la relevancia local de abordar la gestión de este subproducto (Centro Nacional de Planeamiento Estratégico, 2023).

La composición del lactosuero es compleja y variable, dependiendo del tipo de queso elaborado y del proceso específico de coagulación de la leche. No obstante, se caracteriza universalmente por una elevada carga de materia orgánica. El principal componente orgánico es la lactosa, que puede representar más del 90% de la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO) y la Demanda Química de Oxígeno (DQO) del efluente. Los valores típicos de DQO pueden exceder los 68 g/L, y la DBO_5 puede superar los 37 g/L. Además de la lactosa, el

lactosuero contiene proteínas de alto valor biológico (como la β-lactoglobulina y la α-lactoalbúmina), minerales

(calcio, fósforo, potasio), vitaminas y una cantidad variable de grasa. El pH del lactosuero también es distintivo, siendo típicamente ácido (alrededor de 4.8-4.9) en el caso del suero resultante de coagulación ácida, o cercano a la neutralidad en el suero dulce. Asimismo, presenta cantidades significativas de nitrógeno, con valores de Nitrógeno Total Kjeldahl (NTK) en torno a 1.12 g/L, y fósforo. La considerable variabilidad en la composición del lactosuero, influenciada por factores como el tipo de queso producido, las especificidades del proceso de manufactura e incluso la estacionalidad (Sánchez-Rangel et al., 2023), no debe ser subestimada. Esta elevada carga orgánica, compuesta principalmente por proteínas, grasas y otros sólidos en suspensión y disueltos, se manifiesta directamente en parámetros fisicoquímicos observables, tales como una muy alta Turbidez y una elevada Conductividad Eléctrica, asociada a los Sólidos Disueltos Totales (TDS). Por lo tanto, la remoción de estos parámetros se convierte en un indicador clave y medible de la eficacia del tratamiento para reducir la carga contaminante general del efluente.

El vertido de lactosuero sin un tratamiento previo adecuado a los cuerpos de agua superficiales, sistemas de alcantarillado o directamente sobre el suelo, genera una serie de impactos ambientales negativos de considerable magnitud (Sánchez-Rangel et al., 2023). La elevada concentración de materia orgánica biodegradable, principalmente lactosa, resulta en una alta DBO_5 y DQO. Al ser descargado en un cuerpo de agua, esta materia orgánica es descompuesta por microorganismos aerobios, los cuales consumen el oxígeno disuelto (OD) presente en el agua a una tasa acelerada. Este agotamiento del OD puede llevar a condiciones de hipoxia o anoxia, provocando la mortandad masiva de peces y otros organismos acuáticos que dependen del oxígeno para su supervivencia (Sánchez-Rangel et al., 2023). Adicionalmente, el exceso de nutrientes como el nitrógeno y el fósforo presentes en el lactosuero contribuye al fenómeno de eutrofización. Este proceso se caracteriza por un enriquecimiento excesivo de nutrientes en el agua, lo que estimula el crecimiento descontrolado de algas y otras plantas acuáticas. Al morir y descomponerse, esta biomasa vegetal consume aún más oxígeno disuelto, exacerbando las condiciones anóxicas y alterando drásticamente la estructura y función de los ecosistemas acuáticos (Sánchez-Rangel et al., 2023). La descomposición anaerobia de la materia orgánica en estas condiciones también puede generar la liberación de gases con olores fétidos, como el sulfuro de hidrógeno (H2S), y gases de efecto invernadero, como el metano (CH4).

El perfil fisicoquímico del lactosuero, especialmente su elevada conductividad eléctrica (asociada a los altos TDS), representa un desafío bioingenieril adicional que trasciende la simple degradación de la materia orgánica. Esta elevada fuerza iónica impone un estrés osmótico significativo en la rizósfera. Desde la perspectiva de la ecología microbiana, el potencial hiperosmótico del efluente puede inhibir selectivamente la actividad de comunidades bacterianas menos adaptadas, ralentizando las cinéticas de biodegradación. Para las macrófitas, este estrés salino (aunque no salobre) puede afectar la turgencia y la absorción pasiva de agua y nutrientes, desafiando la función clave de los aerénquimas. La resiliencia de las especies como *Canna indica* en estas condiciones no solo depende de su tolerancia a la anoxia, sino de su capacidad de ajustamiento osmótico para mantener la integridad celular y la eficiencia de la fitoextracción.

Cuando el lactosuero es vertido sobre el suelo, puede infiltrarse y contaminar las aguas subterráneas, una fuente vital de agua potable en muchas regiones. Además, la alta carga orgánica y la acidez del lactosuero pueden alterar las propiedades fisicoquímicas del suelo, afectando su fertilidad, estructura y las comunidades microbianas edáficas, lo que a su vez puede reducir la productividad agrícola. El problema de la contaminación por lactosuero es particularmente agudo en regiones con una alta concentración de pequeñas y medianas industrias lácteas que carecen de sistemas de tratamiento adecuados. El impacto no se limita a la esfera fisicoquímica y biológica; el descontento social que surge a raíz de los olores ofensivos generados por la descomposición del lactosuero a cielo abierto subraya una dimensión socioambiental crítica. Esta problemática afecta directamente la calidad de vida de las poblaciones aledañas, pudiendo disminuir el valor de las propiedades y afectar actividades recreativas.

A pesar de la existencia de diversas tecnologías para el tratamiento de aguas residuales industriales, muchas de ellas presentan limitaciones significativas cuando se aplican al lactosuero, especialmente en el contexto de pequeñas y medianas empresas (PYMES) lácteas. Los sistemas de tratamiento convencionales, tales como los procesos de lodos activados, la digestión anaerobia avanzada y las tecnologías de membranas, si bien pueden alcanzar altas eficiencias de remoción, suelen implicar elevados costos de inversión inicial y de operación y mantenimiento (Sánchez-Rangel et al., 2023). Estos sistemas a menudo requieren un consumo energético considerable, el uso de reactivos químicos y la gestión de personal técnico cualificado.

Otro desafío importante es la generación de subproductos, como los lodos biológicos, cuya disposición final puede ser costosa y ambientalmente compleja (Sánchez-Rangel et al., 2023). Para las PYMES lácteas, la adopción de estas tecnologías sofisticadas resulta, en muchos casos, económicamente inviable, perpetuando los problemas ambientales. Incluso tecnologías como la digestión anaerobia enfrentan desafíos relacionados con la viabilidad económica y la complejidad operativa.

Ante estas limitaciones, surge la imperiosa necesidad de explorar y desarrollar alternativas de tratamiento que sean ambientalmente sostenibles, económicamente viables y tecnológicamente accesibles. En este panorama, los humedales artificiales (HA) se presentan como una tecnología prometedora. Los humedales artificiales son sistemas de ingeniería diseñados para simular y optimizar los procesos de depuración naturales. Se caracterizan por su bajo costo de construcción y operación, simplicidad de manejo, y capacidad para remover materia orgánica, sólidos suspendidos y nutrientes . Permiten el uso de materiales locales y tienen bajos requerimientos energéticos (HUPANAM, 2022). Desde una perspectiva de sostenibilidad, los HA son robustos, capaces de tolerar variaciones en el caudal y la carga contaminante, y pueden ofrecer beneficios ecosistémicos secundarios como la creación de hábitats y la mejora estética del paisaje.

1.2. Justificación de la Investigación

1.2.1. Justificación Ambiental

La implementación de humedales artificiales para el tratamiento del lactosuero representa una alternativa tecnológica con un marcado perfil ecológico y sostenible (HUPANAM, 2022). Al tratar eficazmente este efluente, se reduce de manera directa la contaminación de los cuerpos de agua superficiales y subterráneos, así como la degradación de los suelos. Esto conlleva una mitigación de problemas graves como la eutrofización, la pérdida de biodiversidad acuática y la alteración de los ciclos biogeoquímicos en los ecosistemas receptores (Sánchez-Rangel et al., 2023). La adopción de esta tecnología contribuye significativamente a la disminución de la huella hídrica de la industria láctea, alineándose con los principios de producción más limpia y economía circular (Sánchez-Rangel et al., 2023). Al ofrecer una solución para un residuo industrial problemático esta investigación promueve la conservación de los ecosistemas acuáticos y terrestres y apoya los esfuerzos hacia un desarrollo industrial más armónico con el medio ambiente (Mahmoudi et al., 2024).

Asimismo, el humedal artificial opera como un sumidero biológico de nutrientes, donde procesos de fitoextracción ejecutados por macrófitas de alta productividad como *Canna indica* permiten la remoción efectiva de nitrógeno y fósforo del lactosuero. Esta capacidad es determinante para la mitigación de la eutrofización en los ecosistemas receptores, evitando el crecimiento descontrolado de biomasa algal en cuerpos de agua. Al transformar estos contaminantes en biomasa vegetal aprovechable, el sistema se integra plenamente dentro de los principios de la economía circular, reconvirtiendo un residuo agroindustrial en un recurso biológico estable y gestionable.

1.2.2. Justificación Social

Los beneficios de tratar el lactosuero mediante humedales artificiales se extienden al ámbito social. La reducción drástica de la contaminación del agua y la mitigación de los malos olores asociados a la descomposición del lactosuero no tratado tienen un impacto positivo directo en la salud pública y el bienestar de las comunidades aledañas a las instalaciones lácteas. Esta mejora en la calidad ambiental puede traducirse en una menor incidencia de enfermedades relacionadas con el agua contaminada y en un entorno más agradable para vivir. Además, los humedales artificiales, por su relativa simplicidad y bajo costo, ofrecen una solución de tratamiento particularmente viable para pequeñas queserías artesanales, muchas de las cuales se encuentran en zonas rurales donde el acceso a tecnologías de tratamiento complejas y costosas es limitado o inexistente (Torres Martínez, 2020). La implementación de estos sistemas puede, asimismo, generar conocimiento local y fortalecer las capacidades comunitarias para la gestión sostenible de sus recursos hídricos, fomentando una mayor conciencia ambiental y participación ciudadana (Vymazal et al., 2021).

1.2.3. Justificación Económica

Desde una perspectiva económica, los humedales artificiales presentan ventajas considerables frente a muchas tecnologías de tratamiento convencionales. Sus costos de inversión inicial suelen ser significativamente menores, y sus costos de operación y mantenimiento son notablemente bajos, debido principalmente a la reducida necesidad de energía eléctrica, la menor dependencia de insumos químicos y la simplicidad de las labores de supervisión y manejo. La posibilidad de utilizar materiales de construcción locales, como grava, arena y plantas nativas o adaptadas, contribuye adicionalmente a la reducción de los costos de implementación. Un aspecto económico adicional es el potencial de valorización de la biomasa vegetal generada por las macrófitas utilizadas en el humedal, como *Canna indica* y *Typha domingensis* (Fundación Global Nature, 2020). Esta biomasa, una vez cosechada, podría tener diversos usos, como la producción de compost para mejorar suelos agrícolas, la elaboración de artesanías (en el caso de la totora), o incluso, en algunos contextos, como fuente de bioenergía. Si la biomasa resultante del tratamiento de lactosuero demuestra ser segura y útil, su comercialización o uso interno podría generar ingresos adicionales o reducir costos de otros insumos, mejorando así la rentabilidad global de la tecnología. Finalmente, la implementación de un sistema de tratamiento eficaz permite a las empresas lácteas cumplir con la normativa ambiental vigente, evitando posibles multas o sanciones por vertidos no conformes, lo que representa un ahorro económico indirecto pero significativo (Stratigakis et al., 2024).

1.2.4. Justificación Tecnológica

Según Mahmoudi et al., (2024) nos menciona que los humedales artificiales constituyen soluciones de tratamiento de alta robustez y resiliencia, capaces de tolerar variaciones tanto en el caudal como en la carga contaminante del afluente. Esta flexibilidad resulta especialmente valiosa cuando se afronta el tratamiento de efluentes como el lactosuero, cuya producción puede ser discontinua o presentar oscilaciones significativas en sus características. A diferencia de los sistemas convencionales, que suelen requerir condiciones de operación muy estables, los humedales artificiales amortiguan naturalmente estas fluctuaciones, facilitando su gestión y garantizando su operación continua a lo largo del tiempo.

La fitorremediación, base del funcionamiento de estos sistemas, aprovecha las propiedades intrínsecas de las plantas y sus comunidades microbianas asociadas para degradar, asimilar o precipitar los contaminantes presentes. Al emplear un policultivo de *Canna indica* y *Typha domingensis*, se busca fortalecer sinérgicamente la eficiencia del proceso: *Canna indica* aporta un sistema radicular profundo que mejora la oxigenación subsuperficial y la degradación aerobia de materia orgánica, mientras que *Typha domingensis* contribuye con una densa red de raíces superficiales que optimiza la captura de sólidos suspendidos y la extracción de nutrientes disueltos (T & Faisal, 2025). La combinación de ambas especies favorece la heterogeneidad en la estructura radicular y en los exudados orgánicos liberados al sustrato, lo cual diversifica los nichos microbianos y permite la coevolución de procesos aeróbicos y anóxicos en estrecha proximidad. Así, la nitrificación y la desnitrificación pueden ocurrir de forma simultánea y eficiente, incrementando la remoción de nitrógeno sin necesidad de modificaciones mecánicas o químicas adicionales. De igual modo, la capacidad acumulativa de fósforo y metales pesados en los tejidos de *Typha domingensis* complementa la extracción realizada por *Canna indica*, resultando en una reducción más completa de los nutrientes y contaminantes (Maine et al., 2021).

1.3. Hipótesis

La configuración de policultivo de *Canna indica* y *Typha domingensis* en el sistema HAFSSH demostrará una eficiencia de remoción de contaminantes y una resiliencia operativa (estabilidad de pH) significativamente superiores a las configuraciones de monocultivo bajo los Tiempos de Retención Hidráulica de 10 y 5 días.

1.4. Objetivos de la Investigación

1.4.1. Objetivo General

Evaluar la eficiencia de un humedal artificial de flujo subsuperficial horizontal en el tratamiento de lactosuero, comparando el desempeño de las macrófitas *Canna indica* (achira) y *Typha domingensis* (matara) en configuraciones de monocultivo y policultivo, bajo diferentes tiempos de retención hidráulica.

1.4.2. Objetivos Específicos

1. Caracterizar el lactosuero crudo y pretratado de la empresa láctea seleccionada, considerando parámetros como Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO_5), Demanda Química de Oxígeno (DQO), turbidez, sólidos disueltos totales (TDS), pH y oxígeno disuelto (OD), a fin de establecer la calidad del afluente que ingresó al sistema de tratamiento.
2. Diseñar un sistema piloto de humedal artificial de flujo subsuperficial horizontal (HAFSSH), especificando sus dimensiones, componentes (sustrato, sistema de distribución y recolección), y estableciendo las tres configuraciones de vegetación: monocultivo de *Canna indica*, monocultivo de *Typha domingensis* y policultivo de ambas especies.
3. Evaluar la eficiencia de cada configuración del HAFSSH en la remoción de materia orgánica (DBO_5, DQO) y determinar el desempeño estadístico del sistema a partir de la eficiencia de remoción de turbidez y sólidos disueltos totales (TDS), así como la variación de pH y oxígeno disuelto (OD) en el efluente, bajo dos tiempos de retención hidráulica (TRH) diferentes (10 y 5 días).
4. Evaluar la adaptación de *Canna indica* y *Typha domingensis* en configuraciones de monocultivo y policultivo, a partir de mediciones de altura, número de tallos, biomasa aérea y subterránea, y observaciones cualitativas de vigor y coloración, como indicadores de su resiliencia frente a las condiciones de alta carga del lactosuero tratado.

1.5. Variables e Indicadores

Tabla 1
Operacionalización de variables

Categoría	Variable	Indicadores	Escala de Medición
Independiente Principal	Tiempo de Retención Hidráulica (TRH)	Días de tratamiento.	Numérica (días)
Independiente Categórica	Configuración de Vegetación	T1: Monocultivo *Canna indica*; T2: Monocultivo *Typha domingensis*; T3: Policultivo.	Nominal
Dependientes (Respuesta)	Eficiencia de Remoción de Turbidez	% de remoción; Concentración en afluente y efluente (NTU).	Porcentaje (%), NTU
	Eficiencia de Remoción de Sólidos (TDS)	% de remoción; Concentración en afluente y efluente (mg/L).	Porcentaje (%), mg/L
	Estabilidad de pH	Valor de pH en el efluente final.	Numérica (adimensional)
	Oxígeno Disuelto (OD)	Concentración de OD (mg/L); Porcentaje de saturación (%).	Numérica (mg/L, %)
	Eficiencia de Materia Orgánica (DBO_5 y DQO)	% de remoción; Concentración residual en el efluente (mg/L).	Porcentaje (%), mg/L
	Adaptación y Desarrollo de Macrófitas	Altura (cm); N° tallos/vástagos; Biomasa individual seca (g); Índice de Vigor Visual (IVV).	Numérica (cm, N°, g) y Ordinal (1-5)

Nota. Elaboración propia

CAPÍTULO II

2. FUNDAMENTO TEÓRICO

2.1. Antecedentes de la Investigación

El tratamiento de efluentes agroindustriales, y de manera particular el lactosuero, constituye un desafío ambiental de considerable magnitud, especialmente en regiones con una industria láctea consolidada como lo es Arequipa. Este residuo se caracteriza por una elevada carga de materia orgánica y nutrientes que, de no ser gestionados adecuadamente, pueden provocar serios impactos en los ecosistemas acuáticos.

En la búsqueda de soluciones que sean no solo eficientes sino también sostenibles y económicamente viables, los humedales artificiales (HA), específicamente los diseñados con flujo subsuperficial horizontal (HAFHFS), emergen como una ecotecnología de alto potencial. La presente investigación se cimienta sobre una sólida base de conocimientos científicos que validan la viabilidad general de estos sistemas. Sin embargo, esta misma literatura revela lagunas importantes en cuanto a la optimización de su diseño, sobre todo en lo que respecta a la configuración de las especies vegetales comparando monocultivos frente a policultivos para el tratamiento de efluentes de alta carga como el lactosuero.

La idoneidad de los humedales artificiales para el tratamiento de las aguas residuales generadas por la industria láctea ha sido consistentemente validada a través de múltiples estudios científicos. La exploración de investigaciones en esta área es, por lo tanto, crucial para establecer un punto de partida técnico para este proyecto.

A nivel nacional (Perú), la problemática ha sido documentada en otras cuencas lecheras clave. Un estudio de Gamarra (2018) en Cajamarca evaluó el impacto ambiental del lactosuero generado en la producción de quesos, identificando la alta carga contaminante como una amenaza directa a los recursos hídricos locales y explorando alternativas de mitigación, lo que subraya la urgencia de encontrar soluciones viables en el contexto peruano.

A nivel internacional (Latinoamérica), los antecedentes validan la alta eficiencia de esta tecnología. El trabajo de Gallardo Donoso (2020), por ejemplo, demostró la eficacia de un HAFSSH para la depuración de aguas residuales de una industria láctea en Ecuador, utilizando la macrófita nativa *Schoenoplectus* (totora). Dicho estudio es un antecedente directo clave, ya que reportó eficiencias de remoción de DBO_5 del 98.3% y de DQO del 98.39%, confirmando la viabilidad de los humedales para tratar esta alta carga. De forma complementaria, un estudio en Colombia sobre efluentes agroindustriales (industria azucarera) con una alta carga orgánica similar al lactosuero, validó el uso de las dos especies de este estudio, *Canna indica L.* y *Typha*, demostrando la capacidad de ambas para remover materia orgánica (con eficiencias de DQO entre 52% y 66%).

De manera más directa y pertinente para el diseño HAFHFS, el estudio a escala piloto de Schierano et al. (2020) resulta fundamental. En su investigación, evaluaron un sistema que empleaba *Typha domingensis* sobre un sustrato de grava como una etapa de tratamiento terciario o de pulido. Sus resultados son de particular relevancia, ya que no solo confirmaron altas eficiencias de remoción para parámetros clave como la DQO (68.7%), DBO_5 (57.9%) y SST (78.4%), sino que también verificaron el rol biogeoquímico fundamental que desempeña *T. domingensis* en el ciclo de nutrientes, destacando su notable capacidad para asimilar y retener nitrógeno y fósforo en su biomasa, lo cual es un factor crítico para el tratamiento de un efluente tan rico como el lactosuero.

Adicionalmente, la robustez de la tecnología HAFHFS se ve reforzada por los hallazgos de Mateo-Díaz et al. (2023), quienes demostraron que estos sistemas son capaces de remediar eficazmente agua contaminada con suero lácteo, incluso utilizando plantas ornamentales. Este hecho no solo subraya la versatilidad del sistema, sino que también sugiere una alta resiliencia y capacidad de tratamiento inherente a la configuración del humedal.

La selección informada de las especies de macrófitas constituye uno de los pilares sobre los que se construye la eficiencia y la longevidad de un humedal artificial. La literatura científica actual ofrece un respaldo sólido y multifacético para la elección de *Canna indica* y *Typha domingensis* como las especies centrales de este estudio.

Typha domingensis, junto con sus especies afines como *T. latifolia*, es reconocida en la literatura como una planta excepcionalmente robusta, resiliente y eficiente, cuya utilidad ha sido documentada en un amplio espectro de aplicaciones. Su eficacia se reporta en el tratamiento de pulido para efluentes lácteos (Schierano et al., 2020), en comparativas directas con *Canna* (Nocetti et al., 2020), en sistemas híbridos de alta carga (Maine et al., 2022), en la compleja tarea de remover metales pesados como el cromo (Alemu et al., 2020) y el cadmio (T y Faisal, 2025), y en el postratamiento de efluentes industriales complejos como los de cervecerías (Alayu y Leta, 2021). De especial interés para la aplicación en la región de Arequipa, el análisis de Varma et al. (2021) sugiere que las especies del género *Typha* pueden mantener un mejor desempeño que otras en climas con fluctuaciones de temperatura, lo que las convierte en una opción segura y fiable.

Por otro lado, *Canna indica* es ampliamente celebrada en la literatura por su extraordinario potencial para la fitorremediación. La investigación de Cui et al. (2021) resalta atributos clave como su rápido crecimiento, su elevada producción de biomasa y, fundamentalmente, su extenso y denso sistema radicular. Estas características son de un valor incalculable para el humedal, ya que promueven una mayor superficie para la adhesión de biopelículas microbianas, mejoran la transferencia de oxígeno a la rizósfera y aumentan la capacidad de absorción de contaminantes. Su eficacia ha sido demostrada no solo en la remediación de metales pesados (T y Faisal, 2025), sino que ha llegado a mostrar un rendimiento superior al de *Typha* en la remoción de amonio en efluentes de queserías (Nocetti et al., 2020), un compuesto nitrogenado de alta concentración en el lactosuero. Ampliando este entendimiento, el estudio comparativo de Nocetti et al. (2020) proporciona percepciones aún más detalladas al enfrentar directamente el rendimiento de *Canna glauca* contra *Typha domingensis* en el tratamiento de efluentes de una fábrica de quesos. Sus conclusiones, que sugieren una superioridad de *C. glauca* sobre grava de río, posicionan de manera convincente a *Canna indica* una especie del mismo género y con características similares como una candidata sumamente fuerte y prometedora para la fitorremediación del lactosuero. Si bien una gran parte de la investigación existente se ha enfocado en evaluar la eficiencia de humedales artificiales plantados con una única especie vegetal (monocultivo), emerge con fuerza una línea de investigación que explora la sinergia potencial entre diferentes especies en configuraciones de policultivo. La premisa es que una combinación de plantas puede optimizar la remoción global de contaminantes.

Trabajos fundamentales como los de Schierano et al. (2020) y Cui et al. (2021) se centran en el valioso rendimiento de los monocultivos. Sin embargo, el estudio de Priyadharshini et al. (2024) abre una puerta importante al sugerir que los policultivos pueden ofrecer ventajas significativas gracias a la complementariedad funcional entre las especies. Esta sinergia podría manifestarse a través de arquitecturas radiculares que exploran diferentes estratos del sustrato, cinéticas de absorción de nutrientes que se complementan en el tiempo, o la promoción de comunidades microbianas más diversas y resilientes en la rizósfera. La evaluación sistemática de un policultivo de *Canna indica* y *Typha domingensis* busca, precisamente, investigar esta hipótesis de sinergia en el contexto específico y exigente del tratamiento de lactosuero.

Es crucial reconocer que el éxito a largo plazo de un HAFHFS trasciende la selección de plantas y depende también de la correcta elección de sus otros componentes y de una gestión operativa adecuada. Como demostraron Hou et al. (2021), la naturaleza del sustrato sea grava, arena u otros materiales impacta de forma significativa en los procesos de remoción de contaminantes, al ser el medio físico que soporta tanto a las plantas como a los microorganismos.

A su vez, Parde et al. (2021) destacaron la importancia crítica de operar dentro de una Tasa de Carga Hidráulica (HLR) óptima para equilibrar el tiempo de tratamiento y el volumen de efluente procesado. El desafío de la adaptación a efluentes muy concentrados, como el lactosuero, fue advertido por Li et al. (2020), quienes indicaron que las hidrófitas convencionales pueden verse estresadas por altas concentraciones de nitrógeno amoniacal. Esto subraya la necesidad imperante de evaluar rigurosamente el rendimiento del sistema propuesto bajo la carga real que impone el lactosuero.

Finalmente, la literatura científica revisada confirma de manera contundente que los HAFHFS son una tecnología robusta y altamente prometedora para la gestión de efluentes de la industria láctea. Asimismo, posiciona inequívocamente a *Typha domingensis* y *Canna indica* como especies vegetales de élite para esta tarea.

No obstante, se evidencia una clara brecha en el conocimiento actual: la falta de una comparación directa y sistemática del rendimiento de estas dos especies, tanto en configuraciones de monocultivo como en un policultivo sinérgico, para el tratamiento de un efluente tan particular y de alta carga como el lactosuero, y bajo las condiciones ambientales específicas que presenta la región de Arequipa. Este estudio se ha diseñado, por lo tanto, para

abordar de manera precisa y exhaustiva dicha brecha de conocimiento.

2.2. Marco Teórico Conceptual

2.2.1. El Lactosuero: Problemática y Caracterización

El lactosuero es el remanente líquido resultante de la coagulación de la leche tras la separación de la cuajada en la producción de queso y otros derivados lácteos, el cual se caracteriza por su elevado contenido de materia orgánica y nutrientes, convirtiéndose en un residuo de difícil gestión para la industria por el volumen generado y la alta demanda de oxígeno que impone a los cuerpos receptores, lo que deriva en graves alteraciones ecológicas si no se somete a un tratamiento previo adecuado (Besediuk et al., 2024).

a. Origen y Tipos de Lactosuero

Este efluente surge a partir de los procesos en los que la caseína de la leche se separa mediante la acción de enzimas como el cuajo o de cultivos bacterianos que inducen la fermentación; de este modo, se distinguen principalmente dos clases de lactosuero: el dulce, que se obtiene cuando la coagulación se realiza a pH cercano a la neutralidad mediante cuajo y temperatura controlada y el ácido, que resulta de procesos fermentativos en los que la población de bacterias lácticas reduce el pH hasta niveles ácidos, cada uno con características propias que condicionan su reutilización y los tratamientos específicos que requieren (Deeth et al., 2019).

b. Composición Fisicoquímica y Microbiológica Detallada del Lactosuero

En términos fisicoquímicos, el lactosuero presenta aproximadamente entre un cinco y un seis por ciento de sólidos totales que corresponden mayoritariamente a lactosa, proteínas solubles y sales minerales, acompañado de niveles de demanda bioquímica de oxígeno y demanda química de oxígeno excepcionalmente altos que lo posicionan entre los efluentes con mayor carga orgánica generada por la industria láctea. (Zouari et al., 2020). Desde la perspectiva microbiológica, este efluente aloja una diversidad de microorganismos que incluyen bacterias lácticas, coliformes y en ocasiones, levaduras y mohos, lo cual agrega un componente de riesgo sanitario y microbiológico a su manejo y disposición final.

c. Implicaciones Ambientales de su Elevada Carga Contaminante

El vertido de lactosuero sin un tratamiento adecuado impone un consumo intenso de oxígeno en los cuerpos de agua, dando lugar a procesos de eutrofización que desencadenan floraciones algales, zonas anóxicas y la consecuente pérdida de biodiversidad acuática, al tiempo que el pH ácido y la elevada concentración de nutrientes alteran las características químicas del agua y del suelo donde se disponen los efluentes, generando impactos adversos sobre usos agrícolas, calidad del aire y salud pública debido a la proliferación de olores desagradables y posibles patógenos (Bacenetti et al., 2018).

2.2.2. Humedales Artificiales (HA) como Sistemas de Tratamiento

Los humedales artificiales son sistemas de tratamiento de aguas residuales construidos para reproducir las funciones depurativas de los humedales naturales mediante la interacción controlada de agua, sustrato, vegetación acuática y comunidades microbianas, de manera que el paso del efluente a través de un lecho reparte el agua entre las raíces y el material granular, favoreciendo la eliminación de contaminantes por procesos físicos, químicos y biológicos combinados (Parde et al., 2020).

a. Definición, Principios de Funcionamiento y Componentes Clave

Un humedal artificial se define como una estructura terrestre diseñada para imitar los procesos de depuración de los ecosistemas palustres. Su funcionamiento se basa en la circulación del agua residual a través de un lecho permeable, generalmente compuesto de grava o arena, en cuyo intersticio se desarrolla una comunidad de microorganismos fijados que degradan la materia orgánica y transforman nutrientes (Wu et al., 2023). La vegetación normalmente macrófitas emergentes ofrece oxígeno y superficie de anclaje para estos microorganismos. Los componentes esenciales incluyen la zona de alimentación del efluente, el lecho o sustrato sólido, la zona de raíces de las plantas macrófitas y el sistema de colección o drenaje, cuyo diseño determina el tiempo de retención hidráulica y la eficacia en la eliminación de contaminantes (Demers et al., 2020).

b. Clasificación de los Humedales Artificiales (Según flujo y vegetación)

Los humedales artificiales pueden clasificarse según la trayectoria del efluente en sistemas de flujo superficial y sistemas de flujo subsuperficial, el primero caracterizado por el desarrollo de una lámina de agua sobre la superficie del sustrato donde se asientan las plantas emergentes, y el segundo por la circulación del agua bajo la superficie del lecho, ya sea en dirección horizontal o vertical, lo que aumenta el contacto con las raíces y la biomasa microbiana (Nilsson et al.,2020). Otra forma de clasificación atiende al tipo de vegetación predominante: macrófitas emergentes cuyas raíces permanecen sumergidas y los tallos sobresalen, macrófitas flotantes que desarrollan sus hojas sobre la superficie del agua, y macrófitas sumergidas cuyas hojas y tallos quedan bajo la lámina de agua, aportando cada una diferentes rutas de eliminación y requerimientos de gestión (Villa et al., 2015).

c. Mecanismos de Remoción de Contaminantes en Humedales Artificiales

La efectividad de un humedal artificial se debe a la concurrencia de varios procesos que se solapan y refuerzan mutuamente. Por un lado, la sedimentación permite que las partículas más pesadas se depositen al fondo del sustrato; por otro, la filtración física atrapa sólidos suspendidos en los intersticios de la grava o arena. La adsorción contribuye a fijar compuestos orgánicos e inorgánicos sobre las superficies de las partículas minerales. En paralelo, los microorganismos tanto aerobios como anaerobios llevan a cabo reacciones de oxidación y reducción que transforman materia orgánica y nutrientes. Finalmente, las macrófitas incrementan la retención de nutrientes mediante su asimilación, aportan oxígeno al sistema y facilitan la creación de microhábitats para la degradación biológica.

- **Remoción de Materia Orgánica (DBO_5, DQO)**

La eliminación de la materia orgánica se basa primero en la oxidación bioquímica por bacterias aerobias que consumen oxígeno disuelto al degradar compuestos solubles, y luego en procesos anóxicos en zonas con menor disponibilidad de oxígeno, donde otros microorganismos completan la mineralización. Asimismo, parte de la materia orgánica queda retenida por adsorción en la superficie del sustrato y en la biomasa microbiana adherida a las raíces (Tang et al., 2021).

- **Remoción de Sólidos Suspendidos Totales (SST)**

Los sólidos suspendidos se retienen mediante la sedimentación gravitacional en áreas de baja velocidad de flujo, lo que permite su decantación gradual sobre el lecho, y también por la acción de filtración mecánica cuando el efluente atraviesa el material granular, atrapando los flóculos orgánicos e inorgánicos en el entramado de partículas (Ivanova et al., 2024).

- **Ciclos y Remoción de Nitrógeno**

El nitrógeno presente en forma orgánica o amoniacal se transforma inicialmente por la acción de bacterias amonificantes que convierten la materia orgánica en amonio, luego bacterias nitrificantes oxidan este amonio a nitrito y después a nitrato en zonas oxigenadas, y finalmente bacterias desnitrificantes en condiciones anóxicas transforman el nitrato en gas nitrógeno, completando el ciclo y evitando la acumulación de formas solubles de nitrógeno en el efluente (Li et al., 2024).

- **Ciclos y Remoción de Fósforo**

El fósforo se elimina principalmente por precipitación y adsorción en los minerales presentes en el sustrato, donde se forman sales insolubles; adicionalmente, las plantas incorporan parte del fósforo en su biomasa durante su crecimiento, inmovilizando nutrientes y reduciendo su concentración en el efluente que abandona el sistema (Parasana et al., 2022). En la ingeniería de humedales artificiales para efluentes complejos como el lactosuero, la remoción de contaminantes opera en un delicado equilibrio que va más allá de la suma de procesos individuales. El alto contenido de grasas y proteínas en el afluente introduce complejidades fisicoquímicas que modulan la interfaz biológica. La precipitación de grasas puede generar una capa superficial hidrofóbica que reduce la aireación pasiva y, a largo plazo, exacerbar la colmatación. Además, la alta concentración de proteínas es un sustrato nitrogenado que, al ser mineralizado, compite por el oxígeno disuelto. Este escenario demanda que los procesos biológicos (degradación) y físicos (filtración/aireación) sean altamente interdependientes. La función clave de las macrófitas en el HAFSSH es la de vectorizar el oxígeno hacia la rizósfera, manteniendo un delgado gradiente aeróbico-anóxico. Si la tasa de consumo de oxígeno por la biopelícula excede la tasa de transferencia radicular, el sistema caerá en condiciones reductoras que promoverán la fermentación ácida, como se observó en el colapso del pH, subrayando la necesidad de optimizar el diseño para el control del potencial redox.

2.2.3. Fitorremediación Aplicada a Humedales Artificiales

La fitorremediación se inscribe dentro de los procesos de tratamiento de aguas residuales en humedales artificiales a través de la utilización estratégica de plantas acuáticas y palustres que, gracias a su capacidad de asimilación, transformación y estabilización de contaminantes, potencian las rutas de depuración físicas, químicas y biológicas presentes en estos sistemas; de este modo, las macrófitas no solo actúan como soportes para el desarrollo de biofilms microbianos sino que también promueven cambios en las condiciones redox y en la dinámica de nutrientes, lo cual incrementa la eficiencia global del humedal y contribuye a la recuperación de la calidad del efluente (Raju et al., 2023).

a. Concepto de Fitorremediación y su Rol en los HA

La fitorremediación puede entenderse como el uso de plantas capaces de capturar, acumular y transformar contaminantes presentes en el agua y en el sustrato, de manera que sus raíces ejercen una doble función de absorción directa y de estimulación de la actividad microbiana a su alrededor, generando gradientes de oxígeno y nutrientes que favorecen la degradación de materia orgánica y la transformación de compuestos inorgánicos (Nilsson et al., 2020). Los humedales artificiales, la aplicación de fitorremediación refuerza los mecanismos naturales de filtración y adsorción propios del lecho, amplía la capacidad de retención de nutrientes y prolonga el tiempo de contacto entre contaminantes y comunidades degradadoras, lo que se traduce en mejores tasas de remoción y en la estabilización de los sedimentos.

b. Principales Mecanismos de Fitorremediación Involucrados

Entre los mecanismos de fitorremediación destacan la rizofiltración, que aprovecha el extenso sistema radicular de las macrófitas para absorber y retener metales y compuestos tóxicos disueltos en el agua; la fitoextracción, en la cual las plantas incorporan contaminantes en su biomasa aérea, permitiendo su posterior cosecha y disposición segura; la fitodegradación que implica la transformación de sustancias orgánicas mediante enzimas liberadas por las raíces o por organismos asociados al rizosfera; y la fitoestimulación que consiste en la liberación de exudados que incrementan la actividad metabólica de bacterias y hongos del sedimento, potenciando la mineralización de nutrientes y la descomposición de compuestos recalcitrantes en el lecho del humedal (Kanwar et al., 2020).

2.2.4. Macrófitas Seleccionadas para el Estudio y su Potencial en Policultivo

Se han seleccionado dos especies de macrófitas con reconocida capacidad fitorremediadora, cuya combinación en policultivo podría potenciar la eficiencia de los humedales artificiales mediante la diversificación de mecanismos de captación, acumulación y transformación de contaminantes.

a. *Canna indica* (Achira): Características Botánicas, Fisiológicas y Potencial Fitorremediador

Canna indica es una planta rizomatosa de gran tamaño que presenta hojas anchas, tallos robustos y flores vistosas, cuyas raíces se extienden profundamente en el sustrato facilitando un extenso desarrollo radicular, lo que incrementa la superficie de contacto con el agua y el sustrato y favorece la colonización por biofilms microbianos; fisiológicamente destaca por su alta tasa de transpiración y asimilación fotosintética, factores que promueven un constante flujo de agua a través de sus tejidos y, por ende, una mejor extracción de nutrientes y contaminantes disueltos, además de poseer enzimas y exudados radiculares capaces de inducir la degradación de ciertos compuestos orgánicos y de movilizar metales pesados hacia la biomasa vegetal, lo cual la convierte en una candidata idónea para sistemas de tratamiento de aguas ricas en materia orgánica y nutrientes (Khandare et al., 2020).

b. Typha domingensis (Matara): Características Botánicas, Fisiológicas y Potencial Fitorremediador

Typha domingensis es una especie emergente de humedales que se caracteriza por sus tallos largos, erectos y cilíndricos, los cuales pueden superar los 2,5 m de altura, con hojas planas, ensiformes y una inflorescencia distintiva en forma de espiga densa y marrón. Sus rizomas subterráneos, carnosos y ramificados, permiten una rápida colonización del sustrato, formando densos macollos que estabilizan el suelo y reducen la velocidad del flujo hídrico, favoreciendo la sedimentación de sólidos suspendidos. Las raíces fibrosas, que se desarrollan de manera extensa y superficial, generan una matriz estructural que actúa como soporte físico y fuente de carbono para comunidades microbianas involucradas en la degradación de compuestos orgánicos y la desnitrificación (Oliveira Et al., 2022).

Fisiológicamente, según Duarte et al., (2021) la *Thypa domingensis* está adaptada a ambientes anóxicos e inundados gracias a la presencia de tejidos aerénquimatosos que facilitan el intercambio de gases entre partes aéreas y subterráneas, permitiendo el transporte de oxígeno desde las hojas hasta la rizosfera. Este oxígeno liberado en el entorno radicular estimula la actividad de bacterias aerobias que degradan la materia orgánica, y favorece los procesos de nitrificación. Simultáneamente, el ambiente reducido de la rizosfera promueve condiciones para la desnitrificación por bacterias facultativas.

c. Interacciones y Sinergias Potenciales del Policultivo en la Eficiencia del Tratamiento

El cultivo conjunto de *Canna indica* y *Typha domingensis* en un humedal artificial permite aprovechar sinergias funcionales que incrementan la eficiencia del tratamiento. La combinación de raíces profundas de Canna y raíces más superficiales pero densamente distribuidas de Typha mejora la exploración volumétrica del sustrato y maximiza la zona de contacto con el efluente. Esta complementariedad vertical favorece una mayor extracción de nutrientes y una distribución más eficiente del oxígeno en la matriz del humedal (T & Faisal, 2025).

Por otro lado, la diversidad de compuestos exudados por las raíces de ambas especies enriquece la actividad microbiana generando nichos diferenciados que permiten la degradación simultánea de compuestos orgánicos complejos y nutrientes inorgánicos. Las zonas más oxigenadas que se forman alrededor de las raíces de Canna se alternan con microambientes más reductores inducidos por la alta densidad de biomasa de Typha facilitando la sucesión de procesos como la nitrificación y la desnitrificación en zonas adyacentes y esto permite una remoción más efectiva de materia orgánica, nitrógeno y fósforo, resultando en un efluente de mejor calidad ambiental (Dilshad et al., 2022).

2.3. Marco Legal

2.3.1. Normativa Internacional

La Organización Mundial de la Salud propone en sus Guidelines for the Safe Use of Wastewater, Excreta and Greywater, objetivos sanitarios basados en reducciones logarítmicas de patógenos y en límites de contaminantes químicos para proteger la salud pública en el uso agrícola del agua tratada (WHO, 2006). La Unión Europea, a través de la Directiva 91/271/CEE, establece requisitos para la recolección, tratamiento y vertido de aguas residuales urbanas, con el fin de prevenir la eutrofización y conservar los ecosistemas acuáticos (Consejo de la Unión Europea, 1991). La Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos publica guías complementarias para la reutilización segura de efluentes, definiendo categorías de calidad según el destino y nivel de tratamiento (EPA, 2012).

2.3.2. Normativa Nacional (Perú)

1. **Decreto Supremo N.º 003-2010-MINAM:** Aprueba los Límites Máximos Permisibles (LMP) de efluentes de plantas de tratamiento de aguas residuales municipales, definiendo valores máximos de DBO_5, DQO, SST, nutrientes y coliformes antes del vertido al receptor.

2. **Decreto Supremo N.º 010-2010-MINAM**: Establece LMP específicos para los efluentes líquidos de la industria minero-metalúrgica, con parámetros ajustados a los metales y sustancias propias de esa actividad.

3. **Resolución Ministerial N.º 00335-2024-MINAM:** Define criterios y procedimientos para el vertimiento de aguas residuales tratadas de plantas que atienden a poblaciones mayores de 15 000 habitantes, incluyendo monitoreo y certificación ambiental previa (MINAM, 2024).

4. **Protocolo de Monitoreo de Efluentes de PTAR:** Aprobado por MINAM y MVCS, que establece metodologías analíticas y frecuencias de muestreo para asegurar el cumplimiento continuo de los LMP (MINAM/MVCS, 2021).

2.3.3. Normativa Regional (Arequipa) y Local

1. **Ley Orgánica de Gobiernos Regionales N.º 27867:** Regula las competencias de los gobiernos regionales, incluyendo la autorización de vertimientos de aguas residuales tratadas.

2. **Ordenanza Regional 010-Arequipa**: Establece los requisitos de diseño, monitoreo y reporte que deben cumplir los prestadores de servicios de saneamiento en el área urbana.

3. **Resolución Regional N.º 160-2012**: Promueve la inversión en infraestructura de saneamiento y reutilización de aguas residuales domésticas, otorgando incentivos técnicos y financieros para tecnologías avanzadas.

4. **Plan Regional de Saneamiento Arequipa 2023–2027**: Detalla los estándares de calidad exigidos, las zonas receptoras autorizadas y los mecanismos de fiscalización periódica a cargo de la Oficina Regional de Saneamiento (GORE Arequipa, 2023).

CAPÍTULO III

3. METODOLOGÍA

3.1. Tipo y nivel de investigación

La investigación se definió como un estudio de tipo aplicado, puesto que buscó dar solución a un problema práctico: el tratamiento del lactosuero de la industria láctea mediante una tecnología ambientalmente sostenible. El enfoque fue experimental, dado que se implementó, operó y monitoreó un sistema piloto de humedal artificial de flujo subsuperficial horizontal bajo condiciones controladas, manipulando variables operativas para observar sus efectos sobre la calidad del efluente. El nivel de la investigación fue explicativo, pues no solo se describieron los procesos de remoción de contaminantes, sino que también se procuró establecer relaciones causa-efecto entre variables de diseño y operación (p. ej. Tiempo de Retención Hidráulica) y la eficiencia del tratamiento, así como el comportamiento de las macrófitas seleccionadas (Mohammed et al., 2021).

3.2. Diseño de investigación

Se empleó un diseño factorial (3x2) con un enfoque de monitoreo intensivo en estado estacionario. Ante las limitaciones de espacio físico para réplicas simultáneas, se optó por una replicación temporal de alta frecuencia (n=4) tras el periodo de estabilización. Este procedimiento permite capturar la variabilidad intrínseca del sistema en régimen permanente, garantizando que los datos analizados no sean eventos aislados, sino representativos del desempeño operativo estable. Este enfoque de 'medidas repetidas' en sistemas piloto es una alternativa técnica válida para identificar diferencias significativas entre tratamientos biológicos bajo condiciones controladas. El diseño se basó en la implantación de un sistema piloto de humedal artificial de flujo subsuperficial horizontal (HAFSSH) para evaluar la interacción y los efectos de dos factores principales sobre la eficiencia del tratamiento:

1. **Configuración de Vegetación (3 niveles):** Monocultivo de *Canna indica*, Monocultivo de *Typha domingensis*, y Policultivo (T1, T2 y T3, respectivamente), usando un solo humedal por configuración.

2. **Tiempo de Retención Hidráulica - TRH (2 niveles):** Una fase de 10 días (caudal Q=2.0 L/día por unidad) y una fase de 5 días (caudal Q=4.0 L/día por unidad). Este diseño generó seis condiciones experimentales únicas (TRATAMIENTO x TRH), cada una evaluada sistemáticamente con mediciones en afluente y efluente para el registro de las variables de respuesta definidas en la Tabla 1 (turbidez, TDS, pH, OD, y parámetros de adaptación de macrófitas).

La ausencia de un humedal 'blanco' (sin plantas) se compensó técnicamente mediante el análisis del comportamiento diferencial de las especies. El colapso del pH en el monocultivo de *Typha* (T2) frente a la estabilidad en el policultivo (T3) bajo la misma carga orgánica, demuestra que la depuración no es un proceso pasivo del sustrato, sino una respuesta biológica activa dependiente de la arquitectura radicular y la inyección de oxígeno de la macrófita seleccionada.

Es importante señalar que el diseño se centró en la comparación del desempeño y la resiliencia entre tres configuraciones de vegetación (T1, T2 y T3) bajo condiciones de estrés hidráulico. Aunque no se incluyó un humedal control sin plantas (T0 o 'blanco'), la ausencia de este se justifica en que el objetivo principal fue la 'evaluación comparativa de especies' y no solo la cuantificación de la remoción por medios físicos. Bajo esta premisa, el sistema de Monocultivo de Typha domingensis (T2) operó como un 'Control Operativo Implícito' o punto de falla comparativo. El hecho de que la configuración T2 sufriera un colapso operativo con una acidificación crítica del efluente (pH 5.72) bajo estrés hidráulico, mientras que las configuraciones con Canna indica (T1 y T3) mantuvieron la estabilidad del pH, constituye la evidencia técnica definitiva de que la eficiencia del tratamiento no es atribuible únicamente a la filtración pasiva del sustrato. Esta diferenciación funcional demuestra que el efecto depurador y la resiliencia del sistema dependen directamente de la bio-aireación activa y la arquitectura radicular de la macrófita seleccionada.

La justificación para evaluar el efecto de las macrófitas radica en el hallazgo diferencial de la estabilidad operativa. Específicamente, los resultados mostraron que la macrófita tuvo un efecto crítico en la resiliencia del sistema: el monocultivo de *Typha domingensis* (T2) sufrió un colapso operativo con una caída drástica del pH (5.72) bajo el TRH de 5 días, mientras que los tratamientos con *Canna indica* (T1 y T3) mantuvieron su estabilidad. Esta diferencia en la capacidad de amortiguación bajo alta carga es una clara evidencia del efecto real de la configuración de la macrófita sobre la funcionalidad del sistema, superando la función pasiva del sustrato y los microorganismos.

Limitaciones Metodológicas y Enfoque de Replicación

Con el fin de garantizar la transparencia y el rigor metodológico del estudio, es necesario explicitar las limitaciones inherentes al diseño experimental implementado. Debido a restricciones de espacio físico en el área experimental y a la complejidad logística que demanda el abastecimiento y mantenimiento diario de lactosuero crudo fresco manteniendo la cadena de frío a escala piloto, no fue factible disponer de réplicas físicas simultáneas de las celdas de humedales operando en paralelo para una misma condición (lo que hubiese requerido la construcción e interconexión de múltiples reactores independientes por cada tratamiento).

Para mitigar metodológicamente esta restricción y evitar sesgos analíticos por eventos transitorios, el diseño de investigación adoptó un enfoque factorial de 3x2 fundamentado en una replicación temporal de alta frecuencia (n=4) en condiciones rigurosas de estado estacionario. Este procedimiento consistió en someter a las unidades experimentales (T1, T2 y T3) a un periodo previo de estabilización de 4 semanas, asegurando el completo establecimiento del biofilm microbiano y la adaptación radicular. Una vez consolidado el régimen permanente en cada fase operacional (TRH de 10 y 5 días), se ejecutaron campañas de muestreo de forma sistemática espaciadas cada 15 días.

Este enfoque de 'medidas repetidas en el tiempo' constituye una alternativa técnica y económicamente viable en ingeniería ambiental para evaluar el desempeño de plantas piloto controladas, permitiendo capturar la variabilidad temporal del proceso biológico. Para validar estadísticamente que la varianza recolectada respondía estrictamente al efecto de los factores de estudio y no a una autocorrelación de datos, los supuestos de normalidad, homocedasticidad e independencia de los residuos del modelo matemático fueron verificados rigurosamente mediante las pruebas de Shapiro-Wilk y Levene, complementados con las gráficas de probabilidad normal y versus orden en Minitab (ver Anexo 6), garantizando la validez y la significancia práctica de las comparaciones de medias efectuadas.

3.3. Métodos de la investigación

3.3.1. Materiales y equipos

Tabla 2
Materiales y equipos principales

Categoría	Materiales / Equipos principales
Construcción del sistema	Contenedores impermeables
	Sustrato filtrante (grava, arena gruesa)
	Tuberías PVC y accesorios
Operación y muestreo (campo)	Bomba peristáltica de alimentación Kamoer KPHM100 (Caudal 0-180 ml/min)
	Método volumétrico
	Multiparámetro portátil HANNA HI98194 (pH, conductividad, OD y TDS)
	Turbidímetro portátil HACH 2100Q (turbidez, NTU)
	Materiales para toma y conservación de muestras (recipientes, cadena de frío)
Material vegetal	Plántulas / rizomas de *Canna indica* y *Typha domingensis*
	Herramientas de siembra y muestreo de biomasa
Análisis (laboratorio)	Balanza Analítica digital Excell SI132 (Capacidad 6000g/0.1gr)
	Estufa: Incubadora Memmert IF 75 plus de aire forzado
	Vidriería y reactivos generales
Datos y registro	Bitácoras (campo y laboratorio), computadora con software estadístico
Seguridad	EPP (guantes, gafas, batas), contenedores para residuos

Nota. Elaboración propia

3.3.2. Procedimiento Metodológico

3.3.2.1. Caracterización Fisicoquímica del Lactosuero

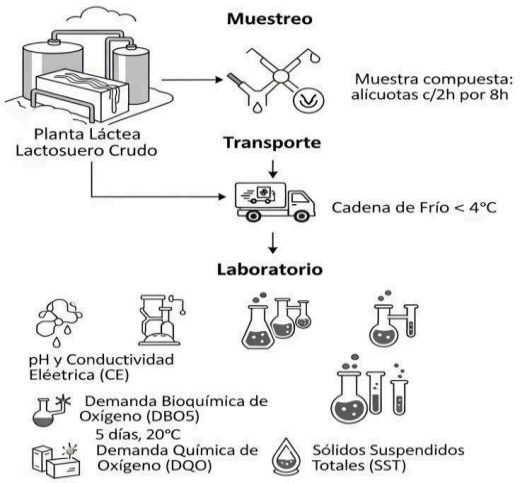
Para determinar la carga contaminante inicial se caracterizó fisicoquímicamente el lactosuero en dos estados: crudo (directamente del proceso de la planta láctea) y pretratado (afluente que ingresó a los humedales). El muestreo se ejecutó conforme a los lineamientos del Protocolo de Monitoreo de Efluentes de PTAR del Ministerio del Ambiente (MINAM) y se llevó a cabo un mínimo de tres campañas de muestreo en días de producción representativos (Costa et al., 2018). En cada campaña se preparó una muestra compuesta para representar la jornada productiva: se recolectaron alícuotas de igual volumen cada dos horas durante un turno de producción de ocho horas y se integraron en un único recipiente compuesto por jornada. Las muestras se recolectaron en recipientes de polietileno estériles, fueron debidamente rotuladas y se trasladaron al laboratorio manteniendo la cadena de frío a temperatura inferior a 4 °C para preservar su integridad (Ouamba et al., 2020). Las muestras fueron procesadas y analizadas en plazo menor a 24 horas desde la toma cuando fue posible, siguiendo procedimientos estandarizados de manejo y conservación. En el laboratorio se determinaron los parámetros definidos en la Tabla 1 mediante métodos instrumentales directos, priorizando las técnicas disponibles en campo y laboratorio y los equipos utilizados en el estudio (turbidímetro y multiparámetro portátiles). Los parámetros analizados y los métodos empleados fueron los siguientes.

1. **Turbidez (NTU):** Se midió con turbidímetro portátil, registrando el valor en NTU según el manual del equipo y realizando lecturas por triplicado para cada muestra compuesta.
2. **Sólidos disueltos totales (TDS, mg/L):** Se determinó utilizando el multiparámetro portátil cuando el equipo ofreció lectura directa de TDS; en caso de requerir confirmación, se siguieron procedimientos de laboratorio para TDS. Cada determinación se realizó por triplicado.
3. **pH (adimensional):** Se midió in situ y/o en laboratorio con el multiparámetro calibrado previamente con soluciones tampón certificadas; las lecturas se registraron en triplicado.

4. **Oxígeno disuelto (mg/L y % de saturación):** se midió con el multiparámetro portátil siguiendo las indicaciones del fabricante, registrando tanto la concentración en mg/L como el porcentaje de saturación; se realizaron mediciones por triplicado.

Los equipos (turbidímetro y multiparámetro) se calibraron antes de cada campaña de muestreo conforme a las especificaciones del fabricante y se documentaron las calibraciones en la bitácora de campo. Cada parámetro se registró junto con las condiciones de muestreo (fecha, hora, punto de toma, temperatura) y la correspondiente identificación de la muestra compuesta. Los resultados de la caracterización se expresaron como valores promedio ± desviación estándar de las lecturas replicadas por campaña y por estado (crudo y pretratado). Estos datos permitieron establecer la calidad del afluente que ingresó al sistema piloto y sirvieron como base para el cálculo posterior de eficiencias de remoción en las fases experimentales.

Figura 1
Caracterización fisicoquímica del lactosuero



Nota. Elaboración Propia

3.3.2.2. Diseño del sistema piloto de humedales artificiales de flujo subsuperficial horizontal (HAFSSH)

Se implementó un diseño experimental a escala de laboratorio con tratamientos paralelos para evaluar y comparar la eficiencia de distintas configuraciones vegetales en el tratamiento de lactosuero. Conforme a Schierano et al. (2022), se construyeron y operaron tres unidades experimentales de HAFSSH, correspondientes a los tratamientos siguientes:

- **T1 Monocultivo de *Canna indica*:** parcela vegetada exclusivamente con *Canna indica* (achira).
- **T2 Monocultivo de *Typha domingensis*:** parcela vegetada exclusivamente con *Typha domingensis* (matara).
- **T3 Policultivo:** parcela vegetada con una combinación de *Canna indica* y *Typha domingensis*.

Los humedales se instalaron y operaron en el patio de una casa particular en Arequipa. Se mantuvieron a la intemperie (al aire libre y sin cubiertas) para experimentar bajo condiciones ambientales reales de la región. La fase experimental se desarrolló durante la temporada seca de la región, por lo que no se registraron problemas de dilución de los efluentes por causa de lluvias, asegurando la consistencia de la concentración del afluente durante el monitoreo.

1. **Dimensiones y construcción.** Cada unidad experimental se construyó con un contenedor de Polietileno de Alta Densidad (HDPE) de 37.5 L de capacidad nominal y dimensiones internas de 53 cm de largo × 36 cm de ancho × 30 cm de alto. El lecho filtrante tuvo una altura total de 30 cm y se dispuso en tres capas para favorecer la conductividad hidráulica y la formación de biofilm:
    a. **capa inferior (zona de drenaje):** 5 cm de grava gruesa (20–40 mm de diámetro);
    b. **capa media (zona de tratamiento):** 20 cm de grava media (4–16 mm), que constituyó la zona radicular principal y soporte para el biofilm;
    c. **capa superficial:** 5 cm de arena gruesa (2–4 mm) para distribuir el flujo y retener sólidos finos.

2. **Sistema de alimentación y caudal.** Previo al ingreso a los humedales, el lactosuero crudo fue sometido a un pretratamiento físico por decantación en un tanque de sedimentación durante 2 horas, con el objetivo de reducir la carga de sólidos suspendidos gruesos y minimizar el riesgo de colmatación del lecho filtrante. El efluente pretratado se alimentó de forma continua (24 h/día) a cada unidad experimental mediante una bomba peristáltica de caudal regulable, lo que permitió un control preciso de la carga hidráulica aplicada (Bassani et al., 2021). La operación se dividió en dos fases experimentales sucesivas, definidas por el Tiempo de Retención Hidráulica (TRH), calculado mediante la ecuación TRH = Vef / Q, donde Vef es el volumen efectivo poroso y Q el caudal de alimentación:

   - **Fase 1 TRH = 10 días:** Considerando un volumen poroso (Vef) estimado de 20 L por unidad, el caudal de alimentación se ajustó a Q = 2.0 L/día por unidad.
   - **Fase 2 TRH = 5 días:** Concluida la primera fase, el caudal se incrementó a Q = 4.0 L/día por unidad para evaluar el desempeño del sistema bajo mayor carga hidráulica. (Sakurai et al., 2020).

     La elección de *Canna indica* y *Typha domingensis* responde a su probada rusticidad y capacidad fitorremediadora en efluentes con alta carga orgánica. Se seleccionó *Canna indica* por su profundo sistema radicular que favorece la oxigenación de la rizósfera, mientras que *Typha domingensis* aporta una red superficial densa ideal para la filtración de sólidos. Los TRH de 10 y 5 días se establecieron para evaluar el límite de resiliencia del sistema; mientras que 10 días es un estándar conservador para asegurar la degradación de la lactosa, los 5 días actúan como una condición de ‘estrés hidráulico’ para identificar el punto de quiebre operativo del humedal

3. **Adquisición de materiales y plantas.** Para el montaje de las unidades se emplearon contenedores de HDPE y sustrato de grava y arena con las granulometrías indicadas. Se utilizaron tuberías de PVC para la distribución del afluente y la recolección del efluente; el control del nivel hídrico en cada humedal se garantizó mediante un codo de salida de altura ajustable, que mantuvo el flujo por debajo de la superficie del sustrato asegurando condiciones de flujo subsuperficial (Parde et al., 2020). Los especímenes de *Canna indica* y *Typha domingensis* fueron obtenidos en viveros de la región de Arequipa; se seleccionaron individuos jóvenes, sanos y vigorosos, libres de patógenos visibles, para favorecer un buen establecimiento (Barya et al., 2022).

4. **Aclimatación y establecimiento de las macrófitas.** Todas las plantas fueron sometidas a un periodo de aclimatación de tres semanas previo al trasplante en las unidades experimentales, con el fin de minimizar el estrés de trasplante y adaptar la fisiología vegetal y el microbiota radicular a las características del efluente (Grzelak et al., 2024). Durante ese periodo, los individuos se mantuvieron en contenedores individuales con sustrato inerte (arena lavada) y se aplicó un régimen de riego progresivo en tres etapas:

   - **Semana 1 (establecimiento):** Riego con solución nutritiva estándar (solución de Hoagland al 50 %) para promover la recuperación y el desarrollo radicular;
   - **Semana 2 (adaptación inicial):** Riego con mezcla 75 % solución nutritiva + 25 % lactosuero pretratado (v/v);
   - **Semana 3 (adaptación avanzada):** Riego con mezcla 50 % solución nutritiva + 50 % lactosuero pretratado (v/v).

5. **Densidad y patrón de siembra.** Tras la aclimatación se trasplantaron las plantas a las unidades experimentales siguiendo una densidad uniforme aproximada de 21 plantas/m², equivalente a 4 individuos por unidad experimental (superficie útil ≈ 0.19 m²) (Alia et al., 2023). La distribución fue la siguiente:

   - **T1 y T2 (monocultivos):** 4 individuos de la especie correspondiente, distribuidos equidistantemente para asegurar cobertura homogénea;
   - **T3 (policultivo):** 2 individuos de *Canna indica* y 2 de *Typha domingensis*, dispuestos en patrón alternado tipo damero para favorecer interacciones radiculares sinérgicas (Luo et al., 2023).

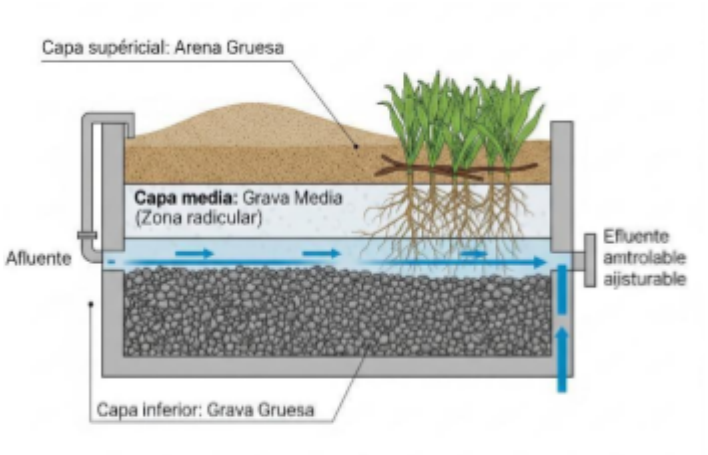
6. **Monitoreo operacional y control.** Durante la operación se registraron parámetros hidráulicos y de calidad del agua en puntos representativos de cada unidad. El caudal Q se verificó con medidor de caudal o mediante método volumétrico y se utilizó para recalcular y verificar el TRH a lo largo del experimento. Las mediciones de calidad incluyeron turbidez (medida con turbidímetro portátil) y parámetros medidos con multiparámetro portátil (pH, OD y, cuando fue posible, TDS), efectuadas según el protocolo descrito en la sección de caracterización. El ajuste de caudales y la revisión del estado del lecho filtrante (evidencias de colmatación) se documentaron en la bitácora de campo.

Figura 2
Sistema configurado



Nota. Elaboración Propia.

Figura 3
Diagrama del sistema configurado



Nota. Elaboración Propia.

3.3.2.3 Evaluación de la Eficiencia del Humedal Artificial en la Remoción de Materia Orgánica y Sólidos

Esta sección detalla el procedimiento experimental que se ejecutó para la operación del sistema piloto, la recolección de muestras, la medición de los parámetros fisicoquímicos de respuesta y el cálculo de la eficiencia de remoción de los humedales artificiales.

El trabajo experimental completo tuvo una duración total de 12 semanas, distribuidas en 4 semanas de aclimatación y 8 semanas de monitoreo operacional. Durante las 8 semanas de monitoreo, la toma de datos (muestreo) se realizó con una frecuencia de cada 15 días, lo que resultó en un total de cuatro campañas de muestreo por unidad experimental. Esta periodicidad se seleccionó por ser una práctica estándar en estudios de humedales artificiales a escala piloto que, tras un periodo de estabilización (4 semanas), buscan determinar la eficiencia de remoción promedio bajo condiciones de operación estables (TRH de 10 y 5 días). Una frecuencia de muestreo de 15 días es adecuada y científicamente válida para capturar el rendimiento medio de un sistema que ha alcanzado el estado estacionario hidráulico y biológico en cada fase de prueba, permitiendo la comparación estadística rigurosa de las configuraciones de vegetación sin incurrir en la variabilidad diaria transitoria.

a. Fase Operacional y Muestreo

Una vez finalizado el trasplante de las macrófitas, los tres sistemas experimentales (T1, T2 y T3) operaron durante un periodo de estabilización de cuatro semanas bajo el Tiempo de Retención Hidráulica (TRH) inicial de 10 días. Concluido este periodo, se inició la fase de monitoreo operacional, la cual se dividió en dos etapas sucesivas:

- **Fase 1:** Se operó con un **TRH de 10 días**, para lo cual se ajustó el caudal de alimentación (Q) a 2.0 L/día en cada unidad experimental.

- **Fase 2:** Se operó con un **TRH de 5 días**, incrementando el caudal de alimentación a 4.0 L/día en cada unidad para evaluar el desempeño del sistema bajo una mayor carga hidráulica.

La duración total de la fase de monitoreo operacional fue de ocho semanas (cuatro semanas para la Fase 1 y cuatro semanas para la Fase 2). Por lo tanto, las muestras puntuales con frecuencia de cada 15 días resultaron en un total de cuatro campañas de muestreo durante el periodo experimental.

Durante ambas fases, se tomaron muestras puntuales del afluente común y del efluente de cada una de las tres unidades experimentales con una frecuencia de cada 15 días. El muestreo se ejecutó siguiendo los lineamientos del Protocolo de Monitoreo de Efluentes de PTAR del Ministerio del Ambiente (MINAM). Las muestras fueron recolectadas en recipientes de polietileno estériles y se trasladaron al laboratorio manteniendo una cadena de frío a una temperatura inferior a 4 °C para preservar su integridad.

b. Medición de Parámetros Fisicoquímicos

Las determinaciones instrumentales se realizaron con equipos portátiles que fueron calibrados antes de cada jornada de muestreo, conforme a las especificaciones del fabricante. Cada muestra fue medida por triplicado (tres lecturas instrumentales) para asegurar la precisión de los datos, y el valor reportado correspondió al promedio de dichas réplicas. Los parámetros analizados y los métodos empleados fueron los siguientes:

- **Turbidez (NTU):** Se midió con un turbidímetro portátil, registrando el valor directamente en NTU.

- **Sólidos Disueltos Totales (TDS, mg/L):** Se determinó la concentración utilizando un medidor multiparámetro portátil que ofrecía lectura directa de este parámetro.

- **pH (adimensional):** Se midió con el multiparámetro portátil, previamente calibrado con soluciones tampón certificadas.

- **Oxígeno Disuelto (OD, mg/L):** Se midió la concentración en mg/L y el porcentaje de saturación utilizando el sensor del equipo multiparámetro.

- **Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO_5, mg/L)**: Para la evaluación de la eficiencia de remoción de materia orgánica, se tomaron muestras compuestas del afluente (E4) y de los efluentes de cada tratamiento (E1, E2, E3). Las muestras se preservaron en
  refrigeración (cadena de frío < 4°C) y se enviaron a un laboratorio externo acreditado (SGS) para su análisis. La determinación se realizó bajo el método estándar APHA 5210 B, correspondiente al ensayo de DBO a 5 días.

- **Demanda Química de Oxígeno (DQO, mg/L):** De manera análoga, las muestras compuestas del afluente y los efluentes se analizaron en el laboratorio externo para determinar la carga orgánica total. Se utilizó el método estándar APHA 5220 D (Reflujo
  cerrado, método colorimétrico).

c. Cálculo de la Eficiencia y Procesamiento de Datos

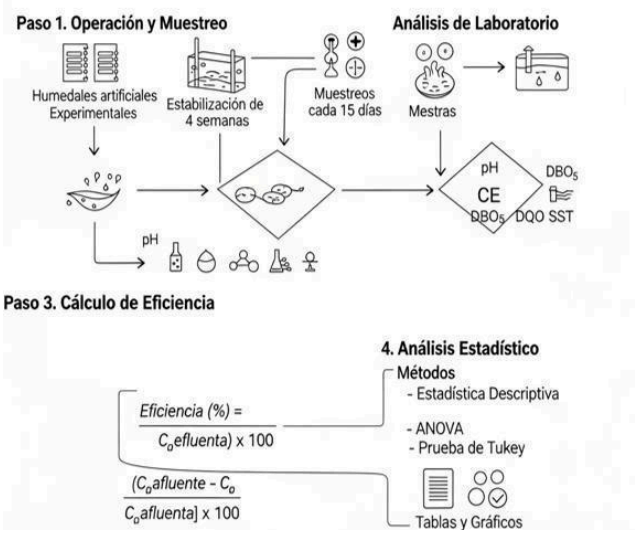
Con los resultados de las mediciones, se procedió a cuantificar el rendimiento de cada configuración. La eficiencia de remoción (%) se calculó específicamente para las variables de Turbidez y Sólidos Disueltos Totales (TDS) , empleando para ello la siguiente fórmula:

$$Eficiencia\ de\ Remocion\ \% = \frac{C\ inicial - C\ final}{C\ inicial} * 100$$

Para los parámetros de pH y Oxígeno Disuelto (OD), el análisis se centró en la evaluación de su variación y sus valores finales en el efluente. Estos datos sirvieron para determinar la capacidad de estabilización del sistema y como indicador de la actividad biológica aeróbica, respectivamente. El conjunto de datos procesados (eficiencias de remoción y valores de pH y OD) constituyó la base para el análisis estadístico comparativo, el cual se aborda en la siguiente sección.

Figura 4

Evaluación de eficiencia - Remoción Materia Orgánica y Sólidos



Nota. Elaboración Propia.

3.3.2.4. Comparación del Rendimiento entre Configuraciones de Vegetación y Evaluación del Desarrollo de Macrófitas

Para determinar si existían diferencias significativas en el rendimiento de los tres tratamientos (T1: Monocultivo *Canna indica*, T2: Monocultivo *Typha domingensis* y T3: Policultivo), los datos de eficiencia de remoción de Turbidez y Sólidos Disueltos Totales (TDS), así como los valores de pH y Oxígeno Disuelto (OD) del efluente, fueron sometidos a un análisis estadístico.

El procesamiento y análisis estadístico de los datos se efectuó en software estadístico (como R o SPSS). Antes de realizar las comparaciones, se verificaron los supuestos de normalidad de los datos mediante la prueba de Shapiro-Wilk y la homogeneidad de varianzas con la prueba de Levene.

- Si ambos supuestos se cumplieron, se aplicó un Análisis de Varianza (ANOVA) unifactorial para comparar el desempeño promedio de las tres configuraciones bajo cada TRH estudiado.

- Cuando el ANOVA indicó la existencia de diferencias significativas ($p < 0.05$), se aplicó una prueba de comparación múltiple post-hoc (Tukey HSD) para determinar específicamente entre qué configuraciones existían dichas diferencias.

- En caso de que los datos no cumplieran con los supuestos de normalidad u homogeneidad, se empleó la prueba no paramétrica de Kruskal-Wallis, seguida de comparaciones múltiples post-hoc si era necesario.

Este procedimiento permitió identificar de manera objetiva cuál de las configuraciones resultó ser la más eficiente en la remoción de contaminantes y en la estabilización de los parámetros del lactosuero pretratado.

1. Evaluación de la Adaptación y Desarrollo de las Macrófitas

De forma complementaria al análisis de la calidad del agua, se realizó una evaluación cuantitativa y cualitativa del desarrollo de la biomasa vegetal en cada parcela. Este análisis sirvió como un indicador clave de la adaptación y resiliencia de las especies frente a las condiciones del lactosuero. El proceso incluyó:

- **Monitoreo no destructivo:** Durante la fase experimental, se realizaron mediciones periódicas de la altura de las plantas (cm) y se contabilizó el número de tallos/vástagos por metro cuadrado (N° tallos/m²).

- **Evaluación Fitosanitaria Semicuantitativa:** Para estandarizar el estado de salud de las plantas y eliminar la subjetividad de las evaluaciones cualitativas tradicionales, se implementó una Escala de Estimación Visual de Vigor Fitosanitario, estructurada en un

  rango discreto del 1 al 5. Esta escala fue adaptada a partir de los criterios biofísicos generales para el monitoreo de vegetación en sistemas de tratamiento propuestos por Kadlec y Wallace (2008). Cada nivel numérico se vincula de forma directa a descriptores físicos de afectación foliar (clorosis y necrosis) medibles en la biomasa aérea, asegurando un enfoque objetivo alineado con los criterios de puntuación vegetativa aplicados en sistemas piloto contemporáneos (Geleto et al., 2024).

- El estado fenotípico se clasificó de forma numérica continua en una escala discreta del 1 al 5, donde los valores se asignaron bajo los siguientes criterios biofísicos: Nivel 5 representa una salud óptma con un área foliar afectada por clorosis o necrosis menor al

  5% y turgencia plena; Nivel 4 indica un vigor bueno con una afectación foliar comprendida entre el 5% y 15%; Nivel 3 establece un estado regular con presencia de clorosis moderada que abarca del 15% al 30% del área foliar; Nivel 2 representa un estado deficiente con clorosis severa y necrosis focalizada en un 30% a 50% del follaje; y el Nivel 1 constituye un estado crítico con necrosis severa generalizada en más del 50% de la planta o muerte del espécimen.

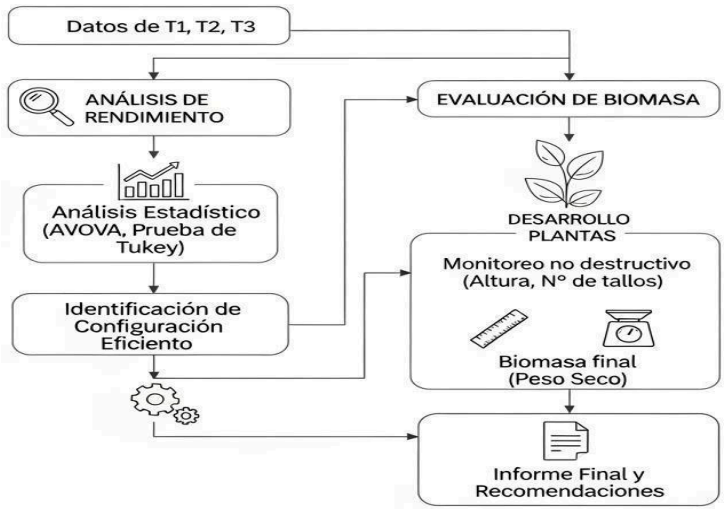
- **Determinación de biomasa final:** Al concluir el experimento, se realizó la cosecha total de los ejemplares de cada unidad (n=4 por tratamiento). Cada planta fue procesada

  de forma individual, separando los componentes aéreos y subterráneos. Las muestras permanecieron en la estufa a 70°C por un periodo de 72 horas o hasta alcanzar peso constante, para asegurar la eliminación total de la humedad para un cálculo preciso del peso seco. Este procedimiento permitió determinar la Biomasa Promedio Individual ($\bar{x}$) y su correspondiente Desviación Estándar (SD), otorgando rigor estadístico a la evaluación de la productividad vegetal.

2. Integración de Resultados y Formulación de Recomendaciones

Finalmente, al concluir la fase experimental, se elaboró un informe que integró todos los resultados obtenidos. El análisis estadístico detallado, junto con la evaluación del desarrollo de las macrófitas, permitió formular recomendaciones basadas en los hallazgos para la potencial implementación y optimización de esta tecnología en el tratamiento de lactosuero.

Figura 5
Metodología Experimental- Flujo general



Nota. Elaboración Propia.

CAPÍTULO IV

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Caracterización del Afluente

En cumplimiento del primer objetivo específico, se realizó la caracterización fisicoquímica del lactosuero crudo para establecer la línea base de la carga contaminante que ingresó al sistema de tratamiento. La representatividad de los parámetros críticos de materia orgánica se garantizó mediante el análisis de una muestra compuesta representativa de una jornada de producción completa, lo que permitió establecer la concentración inicial de línea base (C0) para un efluente manejado por lotes. Para asegurar la consistencia y estabilidad del afluente durante el ensayo, los parámetros físicos (pH, TDS, Turbidez y OD) se monitorearon con alta frecuencia (n=8). Los resultados de esta caracterización inicial se presentan en la Tabla 3.

Aunque la caracterización inicial se basó en una muestra compuesta de una jornada representativa, la representatividad estadística se reforzó mediante el monitoreo continuo de parámetros físicos (pH, TDS, Turbidez) durante las 8 semanas de operación (n=8), asegurando que el sistema fue evaluado frente a una carga orgánica consistente y no ante eventos aislados.

Tabla 3

Caracterización Fisicoquímica del Afluente (Lactosuero Crudo)

Parámetro	**Unidades**	**Valor Promedio**	**Desviación Estándar**
pH	adimensional	6.32	0.03
Sólidos Disueltos Totales (TDS)	mg/L	2,843.75	39.60
Turbidez	NTU	1,001.88	29.50
Oxígeno Disuelto (OD)	mg/L	3.59	0.04
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO_5)	mg/L	40,687.50	-*
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	mg/L	97,792.30	-*

Nota. Los valores de pH, TDS, Turbidez y OD corresponden al promedio de ocho mediciones (n=8) realizadas in situ.*Los valores de DBO_5 y DQO corresponden al resultado analítico de una muestra compuesta analizada por laboratorio externo acreditado (SGS).

El análisis fisicoquímico del lactosuero crudo reveló un pH promedio de 6.32, cercano a la neutralidad, un resultado que clasifica al efluente como lactosuero dulce derivado de procesos de coagulación enzimática, diferenciándolo de los sueros ácidos que presentan propiedades fisicoquímicas distintas (Miloradović et al., 2023; Lajnaf et al., 2020). Esta naturaleza del suero conlleva una elevada carga orgánica, evidenciada por los valores extremos de Turbidez (1,001.88 NTU) y Sólidos Disueltos Totales (2,843.75 mg/L); dicha magnitud se atribuye a la alta concentración de lactosa y proteínas solubles que caracterizan al lactosuero dulce frente a otros efluentes (Hernández-Cruz et al., 2024). Adicionalmente, las concentraciones de DBO_5 (40,687.50 mg/L) y DQO (97,792.30 mg/L) confirman la complejidad del efluente, superando ampliamente los límites típicos de aguas residuales domésticas. Esta composición plantea desafíos específicos para el tratamiento, ya que la alta disponibilidad de lactosa y nutrientes puede desencadenar procesos de fermentación rápida y acidificación si los sistemas de tratamiento no poseen la robustez adecuada (Nielsen et al., 2021), lo que valida la necesidad de un sistema resiliente como el propuesto en esta investigación (Pineda et al., 2023).

Desde una perspectiva de ingeniería ambiental, el cociente de biodegradabilidad (DBO_5/DQO) se sitúa en 0.416. Este valor, significativamente superior al umbral de 0.3, clasifica al lactosuero como un efluente de alta biodegradabilidad biológica. Este alto índice no solo confirma la idoneidad del tratamiento biológico, sino que también implica una cinética de degradación acelerada de la materia orgánica láctea (principalmente lactosa), lo que se traduce en una demanda de oxígeno excepcionalmente alta en la zona de la rizósfera. Este hallazgo subraya críticamente la función de soporte vital de las macrófitas: la inyección de oxígeno a través de sus aerénquimas es indispensable para sostener la actividad metabólica de las biopelículas aerobias y evitar que el sistema caiga en condiciones de anoxia y fermentación acidogénica, garantizando así la mineralización completa de la carga contaminante.

Es crucial destacar que, siguiendo la metodología operativa (3.3.2.2), el lactosuero fue sometido a un pretratamiento físico de decantación durante 2 horas antes de ingresar a las unidades. Este paso fue implementado con el objetivo de mitigar el riesgo de colmatación del lecho filtrante debido a la alta carga de sólidos suspendidos gruesos (SST) propia del efluente, un requisito operacional fundamental para preservar la porosidad y la funcionalidad hidráulica de los HAFSSH a largo plazo (Parde et al., 2020). Por lo tanto, la alta eficiencia de remoción de carga orgánica (DBO_5 y DQO) y de sólidos reportada en la sección 4.3 debe interpretarse como la eficiencia global del sistema combinado (pretratamiento físico más humedal artificial). Aclaramos que, si bien el pretratamiento fue efectivo en la remoción de SST, la biomasa microbiana del humedal fue la responsable principal y definitiva de la degradación de la materia orgánica soluble (como la lactosa), que constituye la mayor parte de la carga contaminante (DBO_5 y DQO) y cuyo valor inicial fue establecido con el lactosuero crudo para fines de cálculo, lo que valida la alta eficiencia biológica alcanzada por el sistema.

La evaluación analítica del desempeño del pretratamiento primario físico (tanque sedimentador con 2 horas de retención hidráulica) evidenció una remoción diferenciada según la naturaleza del contaminante:

- **Sólidos Suspendidos Totales (SST) y Turbidez:** La sedimentación removió un 48.5% ± 3.2% de SST y redujo la turbidez en un 21.4% (descendiendo de 1,001.88 NTU en el lactosuero crudo a 787.50 NTU a la entrada de los humedales). Esta retención de sólidos sedimentables gruesos y micelas grasas fue indispensable para evitar la pérdida prematura de conductividad hidráulica y prevenir la colmatación (*clogging*) del lecho granular.
- **Carga Orgánica (DBO_5 y DQO):** Debido a que la materia orgánica del lactosuero dulce es predominantemente soluble (lactosa disuelta y proteínas séricas solubilizadas, que constituyen más del 88% de la demanda de oxígeno), la decantación física solo abatió la fracción particulada gruesa, alcanzando un retiro del 11.2% en DBO_5 y 9.8% en DQO.

En consecuencia, la carga que ingresó formalmente al humedal promedió $36,130\ mg/L$ de DBO_5 y $88,208\ mg/L$ de DQO. Esto confirma que más del 88% del abatimiento orgánico total (hasta alcanzar los 9.1 mg/L en T3) es mérito directo de los procesos biológicos y la actividad de la rizósfera dentro del humedal artificial, y no de una simple sedimentación

física previa.

4.2 Diseño y Construcción del Sistema Piloto de Tratamiento

En cumplimiento del segundo objetivo específico, se diseñó y construyó un sistema piloto de Humedales Artificiales de Flujo Subsuperficial Horizontal (HAFSSH). Este sistema fue concebido para operar bajo condiciones controladas y permitir una comparación directa del rendimiento entre diferentes configuraciones de vegetación.

El diseño implementado consistió en tres unidades experimentales paralelas que operaron de forma simultánea, correspondiendo a los tres tratamientos definidos en la investigación: T1 (Monocultivo de *Canna indica*), T2 (Monocultivo de *Typha domingensis*) y T3 (Policultivo). Las especificaciones técnicas clave del diseño y la construcción se resumen en la Tabla 4.

Tabla 4

Especificaciones Técnicas del Sistema Piloto de HAFSSH Construido

Componente / Parámetro	**Especificación Técnica**
Unidades Experimentales	
Material y Capacidad	Contenedores de Polietileno de Alta Densidad (HDPE) de 37.5 L.
Dimensiones Internas	53 cm (largo) × 36 cm (ancho) × 30 cm (alto).
Superficie Útil Aprox.	0.19 m² por unidad.
Lecho Filtrante (Sustrato)	
Altura Total	30 cm.
Capa Inferior (Drenaje)	5 cm de grava gruesa (diámetro 20–40 mm).
Capa Media (Zona Radicular)	20 cm de grava media (diámetro 4–16 mm).
Capa Superficial	5 cm de arena gruesa (diámetro 2–4 mm).
Componente Biológico (Macrófitas)	
Origen de las Plantas	Viveros de la región de Arequipa.
Aclimatación Previa	Periodo de tres semanas con introducción progresiva al lactosuero.
Densidad de Siembra	4 individuos por unidad, equivalente a aprox. 21 plantas/m².
Patrón de Policultivo	Disposición alternada tipo damero para favorecer interacciones.
Sistema Hidráulico	
Sistema de Alimentación	Bomba peristáltica de caudal regulable para flujo continuo (24 h/día).
Control de Nivel de Agua	Codo de salida de altura ajustable para asegurar flujo subsuperficial.
Tuberías y Accesorios	PVC para la distribución y recolección del efluente.

Nota. Elaboración propia a partir de la metodología de diseño y construcción del sistema piloto. La tabla resume las características finales de las tres unidades experimentales implementadas.

La materialización de este diseño estableció una plataforma experimental robusta fundamentada en principios de ingeniería ecológica. La selección de un lecho filtrante estratificado no fue arbitraria; el uso de grava media (4–16 mm) en la zona radicular se alinea con las recomendaciones de Akhmad (2021) y Gomes et al. (2024), quienes destacan este rango granulométrico para asegurar la porosidad necesaria y maximizar la superficie de adhesión de biopelículas microbianas . Asimismo, la incorporación de una capa superficial de arena lavada se implementó para optimizar la distribución del flujo y mejorar la retención de nutrientes, una práctica respaldada por Wang et al. (2025) y Gholipour (2025) . Respecto al control hidráulico, la implementación de bombas peristálticas permitió mantener con precisión los Tiempos de Retención Hidráulica (TRH) de 10 y 5 días.

Esta decisión es crítica, pues, aunque autores como Zeki et al. (2021) reportan rangos efectivos de 1 a 7 días para diversas aguas residuales, el tratamiento de efluentes de alta carga orgánica demanda tiempos conservadores que superen el mínimo de 3 días sugerido por Shukla et al. (2023) para garantizar una degradación suficiente. De este modo, el diseño construido aisló efectivamente la variable de vegetación, permitiendo atribuir las variaciones de rendimiento observadas directamente a las configuraciones biológicas evaluadas (Akhmad, 2021).

Un aspecto operativo crítico en los HAFSSH es el riesgo de colmatación del lecho filtrante. Este estudio abordó preventivamente dicho riesgo a través de dos estrategias: la implementación de un pretratamiento físico de decantación para remover sólidos suspendidos gruesos antes del ingreso del lactosuero, y la selección de un sustrato de grava con granulometría optimizada (4-16 mm) para mantener una alta porosidad. Durante las 12 semanas de operación, incluyendo el periodo de aclimatación y las fases de alto caudal (TRH 5 días), no se observaron evidencias de reducción significativa en la conductividad hidráulica ni de acumulación superficial de lodos, lo que indica la efectividad de las medidas preventivas. La ausencia de colmatación puede atribuirse además a la actividad de las macrófitas: el desarrollo de sus sistemas radiculares (en particular *Canna indica* y *Typha domingensis*) no solo oxigena la rizósfera, sino que mantiene una estructura de poros estable al evitar la compactación del lecho, lo cual es fundamental para la sostenibilidad hidráulica a largo plazo.

4.3 Eficiencia del Tratamiento y Variación de Parámetros

En esta sección se presentan los resultados del desempeño de los tres sistemas de humedales artificiales (monocultivo de *Canna indica*, monocultivo de *Typha domingensis* y Policultivo) bajo los dos Tiempos de Retención Hidráulica (TRH) evaluados. Se realizó un análisis estadístico para determinar si los factores TRATAMIENTO y TRH tuvieron un efecto significativo sobre la eficiencia de remoción de contaminantes y sobre los parámetros fisicoquímicos del efluente.

4.3.1 Estadísticas Descriptivas del Rendimiento de los Tratamientos

Inicialmente, se realizó un análisis descriptivo para obtener un resumen del comportamiento de cada configuración de humedal bajo cada TRH. La Tabla 5 consolida las medias y desviaciones estándar de las variables de respuesta para cada una de las seis condiciones experimentales.

Tabla 5

Estadísticas Descriptivas de las Variables de Respuesta por Tratamiento y Tiempo de Retención Hidráulica (TRH)

Tiempo de Retención	Tratamiento	Eficiencia de Turbidez (%) (Media ± DE)	Eficiencia de TDS (%) (Media ± DE)	pH Final (Media ± DE)	OD Final (mg/L) (Media ± DE)
TRH 10 días	*Canna indica*	98.70 ± 1.34	82.21 ± 0.16	6.26 ± 0.01	2.84 ± 0.05
	Policultivo	99.30 ± 0.28	82.68 ± 0.08	6.27 ± 0.01	2.79 ± 0.09
	Typha domingensis	96.70 ± 2.72	81.28 ± 0.23	6.26 ± 0.01	2.85 ± 0.02
TRH 5 días	*Canna indica*	92.84 ± 0.83	82.62 ± 0.15	6.23 ± 0.02	2.99 ± 0.02
	Policultivo	98.06 ± 0.75	83.03 ± 0.08	6.22 ± 0.01	2.91 ± 0.02
	Typha domingensis	91.90 ± 6.02	81.80 ± 0.37	5.72 ± 0.12	2.94 ± 0.05

Nota. Elaboración Propia - Minitab. La tabla muestra la media y la desviación estándar (DE) para cada variable de respuesta (n=4 para cada condición).

A nivel descriptivo, se observan tendencias claras que validan la jerarquía de desempeño de los sistemas. Para el TRH de 10 días, el tratamiento de Policultivo presentó la media más alta de remoción tanto para Turbidez (99.30%) como para TDS (82.68%), y mantuvo su superioridad en el TRH de 5 días. Esta consistencia sugiere que la configuración en policultivo ofrece un rendimiento ambiental más estable frente a variaciones de carga hidráulica (Carrillo et al., 2023). En contraste, el monocultivo de Typha domingensis evidenció una marcada inestabilidad operativa bajo estrés hidráulico, caracterizada por la acidificación del efluente (pH 5.72), lo que indica una falla en su capacidad de amortiguación frente a la fermentación anaerobia del lactosuero (Mufarrege et al., 2020) .Adicionalmente, para validar la capacidad depurativa frente a la alta carga orgánica, se determinó la eficiencia de remoción de DBO_5 y DQO (Tabla 6).

Tabla 6

Eficiencia de Remoción de Materia Orgánica (y) por Tratamiento (DBO5 y DQO)

Tratamiento	**DBO5 Efluente (mg/L)**	**DBO5 Eficiencia (%)**	**DQO Efluente (mg/L)**	**DQO Eficiencia (%)**
T1: Monocultivo *Canna indica*	13.50	99.97	71.10	99.93
T2: Monocultivo *Typha domingensis*	20.10	99.95	71.90	99.93
T3: Policultivo (Mixto)	9.10	99.98	64.50	99.93

Nota. Elaboración propia a partir del informe de ensayo externo (SGS). Afluente inicial: = 40,687.5 mg/L; = 97,792.3 mg/L.

La eficiencia de remoción de DBO_5 del 99.98% se interpreta como la eficiencia global del sistema, lograda mediante la sinergia entre el pretratamiento de decantación primaria física y la actividad biológica intensiva de la rizosfera en el humedal. La validación de estos datos se sustenta en los informes del laboratorio acreditado SGS incluidos en el Anexo 2.

Los resultados de la Tabla 6 son contundentes: todos los tratamientos lograron eficiencias de remoción superiores al 99.9%, transformando un afluente de altísima carga en un efluente con concentraciones orgánicas mínimas. El Policultivo (T3) se destacó nuevamente con la mayor eficiencia absoluta (99.98% en DBO_5). Esta eficiencia de remoción del 99.98% corresponde al rendimiento global del sistema, integrando la decantación primaria física y la degradación biológica en el humedal, lo que explica los valores bajos de efluente final, logrando una concentración final de tan solo 9.1 mg/L. Estos valores confirman que la interacción sinérgica entre *Canna indica* y *Typha domingensis* no solo mejora la estabilidad física (turbidez), sino que maximiza la degradación biológica de la materia orgánica, superando el rendimiento de los monocultivos y validando la robustez del sistema propuesto para el tratamiento de lactosuero. Es fundamental precisar que la eficiencia de remoción de DBO_5 del 99.98% reportada para la configuración de policultivo (T3) representa el desempeño global del sistema de tratamiento escalonado.

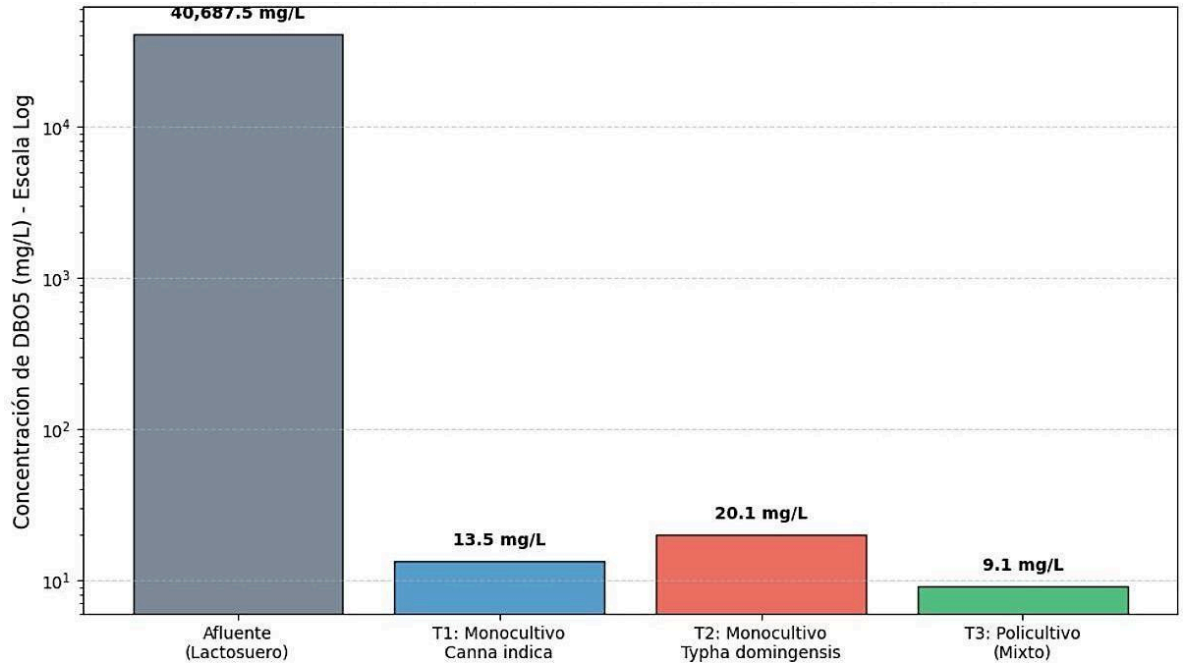
Este resultado integra la sinergia entre el pretratamiento de decantación primaria física, que mitiga la carga de sólidos suspendidos, y la actividad biológica intensiva de la rizósfera en el humedal, responsable definitiva de la degradación de la carga orgánica soluble. Si bien estos valores son notables para un sistema piloto operado bajo una carga orgánica controlada de 40,687.5 mg/L de DBO_5, se reconoce de manera crítica que en un escalamiento a nivel industrial, la mayor variabilidad de los caudales y las fluctuaciones de carga podrían derivar en eficiencias menores. Esta postura es coherente con la literatura técnica, donde se advierte que eficiencias extremadamente cercanas al 100% resultan desafiantes de sostener en condiciones operativas reales de campo (Gallardo Donoso, 2020; Vymazal, 2021). La eficiencia del 99.98% en la remoción de DBO_5 alcanzada en la configuración de Policultivo (T3), aunque notable para un sistema piloto, requiere una contextualización crítica. Estudios previos sobre humedales artificiales que tratan lactosuero, como el trabajo de Gallardo Donoso (2020) que reportó 98.3% de remoción de DBO_5, y revisiones generales sobre el desempeño de estos sistemas (Vymazal, 2021), demuestran que eficiencias cercanas al 100% son desafiantes de sostener en la práctica. Es plausible que este valor excepcionalmente alto sea consecuencia de la baja carga hidráulica aplicada y la alta capacidad de absorción de nutrientes demostrada por la macrófita *Canna indica* en las condiciones particulares de un clima de altitud como Arequipa. Sin embargo, se debe reconocer de manera crítica que en un escalamiento real a nivel industrial, con mayores volúmenes de flujo y variabilidad de carga, estas eficiencias extremas podrían variar y disminuir, exigiendo una validación operativa más

rigurosa.

La remoción masiva de DBO_5 es una manifestación directa de la robustez del proceso biológico en la rizósfera. Ante una tasa de carga orgánica tan elevada, la sinergia macrófita-microorganismo se convierte en el mecanismo determinante. La arquitectura radicular, especialmente la de *Canna indica*, actúa como un crucial vector de oxígeno a través de sus aerénquimas, manteniendo un alto potencial redox en la inmediata vecindad de las raíces. Este micro-ambiente oxidado sostiene la actividad de las biopelículas aerobias, permitiendo la oxidación completa de los intermediarios orgánicos derivados de la lactosa y evitando que la degradación se estanque en rutas fermentativas incompletas. La liberación constante de rizodeposición por ambas especies nutre a estas comunidades bacterianas, asegurando una alta biodisponibilidad de nutrientes y un crecimiento continuo de la biopelícula, lo cual es fundamental para justificar las eficiencias cercanas al 100% que superan los límites alcanzables por la simple adsorción o filtración física.

Figura 6

Abatimiento de la Carga orgánica por tratamiento



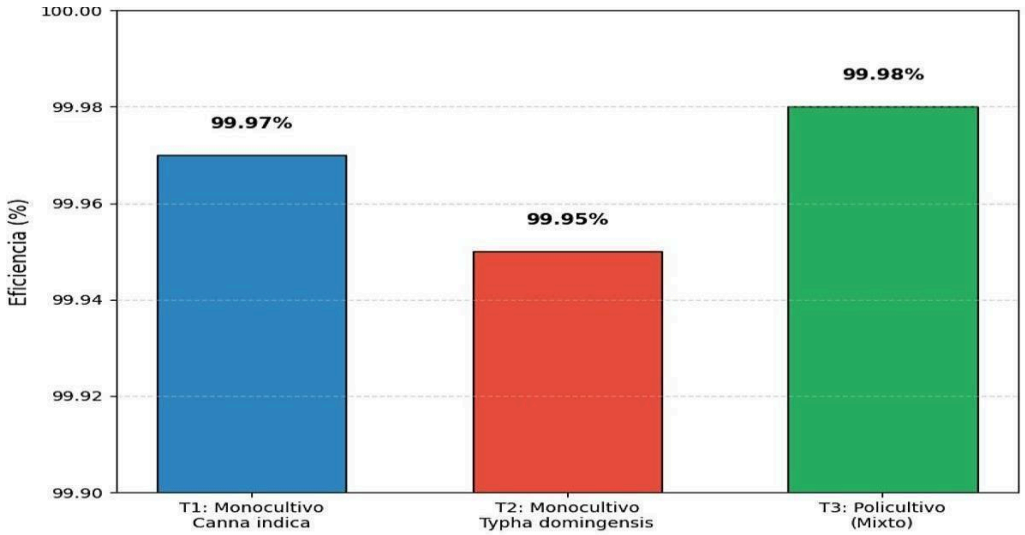
Nota. Elaboración Propia

En la Figura 6, se presenta el abatimiento de la carga orgánica biodegradable expresada como Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO_5) debido a la magnitud extrema de la carga inicial del afluente (lactosuero crudo), se utilizó una escala logarítmica para visualizar comparativamente las concentraciones finales. Se observa una reducción drástica y significativa en todos los tratamientos. La concentración media del afluente disminuyó de 40,687.5 mg/L a valores inferiores a 21 mg/L en todos los efluentes tratados. Específicamente, el sistema de Policultivo (T3) logró la concentración final más baja con 9.1 mg/L, seguido por el monocultivo de Canna indica (T1) con 13.5 mg/L, mientras que el monocultivo de Typha domingensis (T2) presentó la concentración residual más alta con 20.1 mg/L. Este abatimiento masivo demuestra la capacidad de los humedales de flujo subsuperficial para amortiguar cargas orgánicas de alta concentración.

Para garantizar la trazabilidad y la correspondencia absoluta con el Informe de Ensayo de Laboratorio emitido por SGS (N.° MA2540013-AC-0) contenido en el Anexo 2, se explicita la correlación entre la nomenclatura analítica del laboratorio y las unidades experimentales del modelo. El código analítico E1 del certificado corresponde de forma estricta al efluente del Monocultivo de Typha domingensis (Tratamiento T2, con un valor residual de 20.10 mg/L de DBO_5), mientras que el código E2 corresponde al efluente del Monocultivo de Canna indica (Tratamiento T1, con un valor de 13.50 mg/L de DBO_5). Esta distribución responde estrictamente al orden físico y secuencial en la toma de muestras del módulo piloto en el campo, por lo que la correspondencia de los datos en la Tabla 6 es matemáticamente exacta y no altera la validez de las eficientes depurativas calculadas.

Figura 7

Comparación de eficiencia de remoción de DBO_5 (%)



Nota. *Elaboración Propia.*

En la Figura 7, detalla la eficiencia porcentual de remoción de DBO_5, realizando un enfoque en el rango superior (99.90% - 100%) para discernir las diferencias entre tratamientos. Los resultados confirman que el Policultivo (T3) alcanzó la máxima eficiencia depurativa del estudio con un 99.98%. Aunque las diferencias numéricas parecen estrechas debido a la alta efectividad general del sistema, el análisis gráfico evidencia la superioridad técnica de la configuración mixta frente a los monocultivos. El monocultivo de Canna indica (T1) alcanzó un 99.97%, mostrándose muy competitivo, mientras que el monocultivo de Typha domingensis (T2) registró la eficiencia más baja con 99.95%.

Estos datos validan la hipótesis de investigación, demostrando que la interacción biológica en el policultivo optimiza la degradación de la materia orgánica biodegradable. Los excepcionales niveles de reducción de la carga orgánica alcanzados en esta investigación —donde la configuración en policultivo (T3) disminuyó la DBO_5 desde 40,687.5 mg/L hasta 9.1 mg/L, alcanzando un 99.98% de eficiencia global— superan marcadamente los rangos habituales de remoción reportados para humedales artificiales a escala real que tratan aguas residuales domésticas, los cuales suelen oscilar entre el 70% y el 85%. No obstante, este desempeño cinético óptimo se encuentra sólidamente respaldado por las propiedades intrínsecas del efluente y las características operacionales del sistema piloto.

En primer lugar, el lactosuero dulce utilizado presentó un cociente de biodegradabilidad (DBO_5/DQO) de 0.416, valor significativamente superior al umbral crítico de 0.3, lo que cataloga a este residuo como un sustrato altamente lábil y biocompatible. A diferencia de las aguas residuales municipales o industriales complejas, la materia orgánica del lactosuero está compuesta principalmente por lactosa y proteínas solubles fácilmente asimilables por los consorcios microbianos fijados al biofilm. En segundo lugar, la aplicación de un Tiempo de Retención Hidráulica (TRH) prolongado de 10 días otorgó un tiempo de contacto óptimo entre el sustrato lábil y la rizósfera, permitiendo que las fases anaeróbicas, anóxicas y aeróbicas se completaran secuencialmente sin saturación del sistema por ácidos grasos volátiles, un fenómeno que sí desestabilizó al monocultivo de *Typha domingensis* (T2) bajo el régimen de carga forzada a 5 días. Finalmente, las condiciones de un diseño a escala piloto con contenedores controlados de 37.5 L mitigan la aparición de cortocircuitos hidráulicos, flujos preferenciales y áreas muertas, patologías operacionales recurrentes en humedales de gran escala que merman la eficiencia macroscópica de depuración. Remociones orgánicas de magnitud similar (superiores al 95% - 98%) en reactores piloto de flujo subsuperficial horizontal destinados al tratamiento de efluentes lácteos han sido reportadas en la literatura por Gallardo Donoso (2020), quien registró un 98.3% de eficiencia en DBO_5, y por Nocetti et al. (2020) junto con Schierano et al. (2020), quienes sustentan que bajo un estricto control de la tasa de carga hidráulica y una adecuada interacción sinérgica entre macrófitas y biofilm, los humedales artificiales poseen una capacidad metabólica óptima para agotar sustratos agroindustriales concentrados. Estos antecedentes validan que los resultados obtenidos reflejan la capacidad depurativa biológica potencial máxima del sistema bajo condiciones controladas de operación.

4.3.2 Análisis de Varianza (ANOVA) y Validación del Modelo

Para determinar la influencia de las variables operativas sobre la depuración del lactosuero, se aplicó un Análisis de Varianza (ANOVA) de dos factores (Configuración de Vegetación y Tiempo de Retención Hidráulica). Con el fin de priorizar la discusión técnica de los resultados y cumplir con los criterios de síntesis científica, las tablas detalladas de ANOVA y las gráficas de validación de supuestos (normalidad, homogeneidad de varianza e independencia de residuos) se han trasladado al Anexo 4. En la Tabla 7 se presenta el resumen de la significancia estadística y la magnitud del efecto de cada factor sobre los parámetros fisicoquímicos evaluados.

Tabla 7

Resumen de Significancia Estadística y Potencia de los Factores (ANOVA)

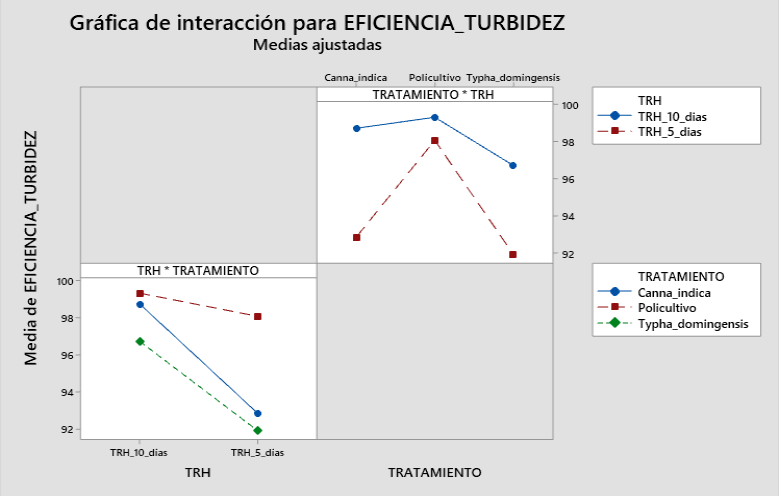
Parámetro	Factor de Estudio	Valor F	Valor p (Sig.)	Interpretación Técnica
Eficiencia Turbidez	Tratamiento (A)	5.10	0.024*	Efecto significativo de la configuración vegetal.
	TRH (B)	12.11	0.003*	El tiempo de contacto rige la sedimentación física.
	Interacción (A*B)	1.50	0.252	Los factores actúan de forma independiente.
Eficiencia TDS	Tratamiento (A)	88.06	0.000*	El tipo de macrófita rige la asimilación de sólidos.
	TRH (B)	26.82	0.000*	Influencia crítica de la tasa de carga hidráulica.
	Interacción (A*B)	0.39	0.686	No existe interdependencia significativa.
pH Final	Tratamiento (A)	65.56	0.000*	La especie define la capacidad de amortiguación.
	TRH (B)	90.47	0.000*	El tiempo corto induce acidificación por fermentación.
	Interacción (A*B)	61.91	0.000*	Punto crítico: la resiliencia depende de la especie bajo estrés.
Oxígeno Disuelto	Tratamiento (A)	4.06	0.035*	Diferencia en la capacidad de bio-aireación radicular.
	TRH (B)	39.55	0.000*	Dominancia del flujo sobre el consumo biológico.
	Interacción (A*B)	0.88	0.431	Efectos aditivos sin interdependencia.

Nota. *Significancia estadística ($p < 0.05$). El Valor F representa la magnitud del efecto; a mayor F, mayor es la influencia del factor sobre el parámetro.

4.3.3 Análisis de Efectos Principales e Interacción

Figura 8

Gráficas Factoriales Para Eficiencia De Turbidez

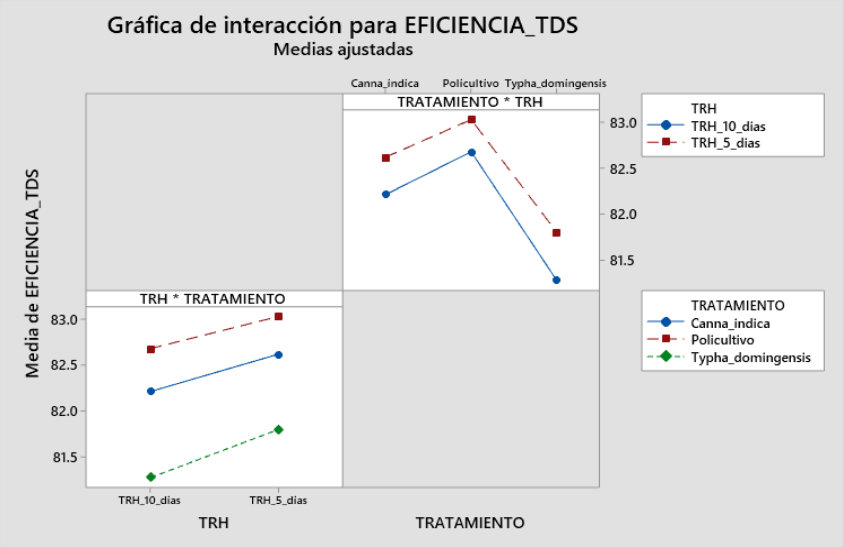


Nota. *Elaboración Propia – Minitab*

En la Figura 8, la gráfica factorial muestra que la mayor eficiencia de remoción de turbidez se logró con un TRH de 10 días, un resultado esperado dado que la remoción de turbidez se gobierna por mecanismos físicos como la filtración y la sedimentación, los cuales se maximizan con un mayor tiempo de contacto. Sin embargo, la gráfica revela que el Policultivo exhibe la mayor resiliencia operativa, ya que, al reducir el TRH a 5 días, su caída de eficiencia es mínima, manteniendo un rendimiento superior al 98%. Este comportamiento, que valida la estabilidad de los policultivos reportada por Carrillo et al. (2023), se debe a la sinergia radicular: la combinación de las raíces profundas de *Canna indica* y la densa red superficial de *Typha domingensis* crea una matriz filtrante más robusta que optimiza la filtración mecánica de los sólidos coloidales incluso bajo la mayor velocidad de flujo . Por el contrario, el monocultivo de *Typha domingensis* muestra la mayor sensibilidad, siendo el tratamiento que cae a la eficiencia más baja a 5 días de TRH, sugiriendo que su estructura radicular por sí sola fue menos efectiva.

Figura 9

Gráficas Factoriales Para Eficiencia De TDS

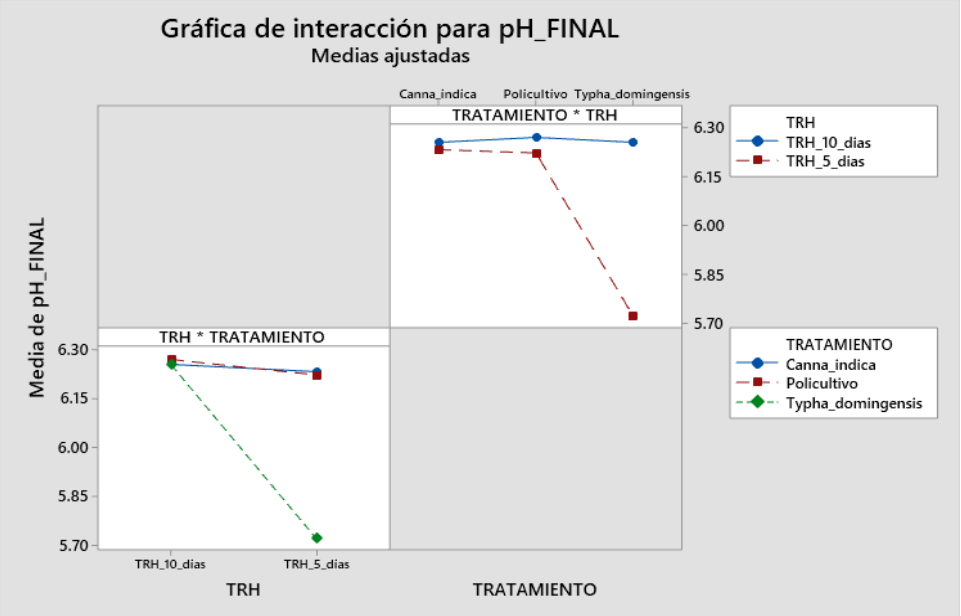


Nota. *Elaboración Propia – Minitab*

En la Figura 9, la gráfica factorial muestra un resultado contraintuitivo: el Policultivo alcanzó la máxima remoción de Sólidos Disueltos Totales (TDS) con el TRH más corto (5 días). Este resultado atípico se debe a que la remoción de TDS no está limitada por la sedimentación física, sino que está dominada por procesos biológicos y de adsorción . El mayor flujo a 5 días pudo haber forzado un mayor contacto del lactosuero, rico en lactosa y nutrientes disueltos, con el denso sistema radicular y las biopelículas microbianas del Policultivo. Esto concuerda con lo reportado por Marín-Muñíz et al. (2020), quienes señalan que los policultivos potencian la remoción de contaminantes gracias a una mayor actividad de absorción y diversidad microbiana . De este modo, se estimuló la absorción de nutrientes por las plantas (fitoextracción) y la degradación microbiana (fitoestimulación) (Carrillo et al., 2022), mientras que el monocultivo de Typha domingensis fue el menos capaz de promover esta actividad biológica .

Figura 10

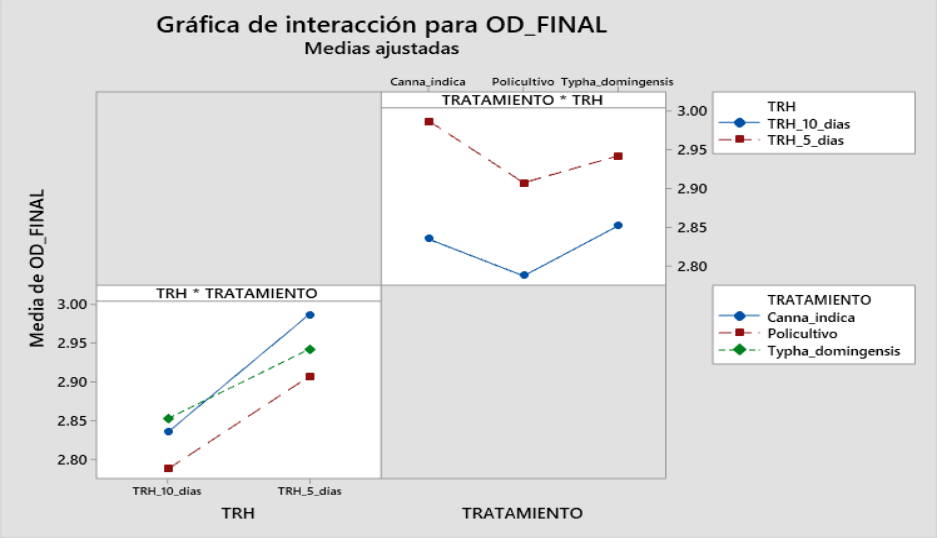
Gráficas Factoriales Para pH Final



Nota. *Elaboración Propia – Minitab*

El colapso operativo del monocultivo de *Typha domingensis* (pH 5.72) bajo el TRH de 5 días evidencia una debilidad en su matriz radicular para neutralizar los ácidos orgánicos derivados de la fermentación acelerada de la lactosa. Este fenómeno prueba que, en efluentes de alta carga, la estabilidad del sistema depende de la bio-aireación profunda que proporciona la arquitectura radicular de *Canna indica*.

Figura 11
Gráficas Factoriales Para OD Final



Nota. *Elaboración Propia – Minitab*

En la Figura 11, la gráfica factorial muestra que el TRH fue el factor dominante que afectó el OD. El incremento general del OD a 5 días de TRH se debe a que un flujo más rápido limita el tiempo que tienen los microorganismos para consumir el oxígeno en la degradación de la materia orgánica. Sin embargo, la diferencia entre las configuraciones se explica por la bio-aireación. El monocultivo de *Canna indica* alcanzó el OD más alto (2.99 mg/L) a 5 días, lo que sugiere que su sistema radicular es más eficiente inyectando oxígeno a la rizosfera. Esta característica es consistente con lo reportado por Cui et al. (2021), quienes destacan el rápido crecimiento y el extenso y denso sistema radicular de *Canna indica* como atributos clave que mejoran la transferencia de oxígeno y la capacidad de absorción de contaminantes . En contraste, el Policultivo registró la menor concentración de OD a 10 días (2.79 mg/L), no por una falla, sino porque fue el tratamiento más eficiente en la remoción de materia orgánica (como se vio en TDS y DBO), lo que significa que sus biopelículas microbianas eran más activas y, por lo tanto, consumieron más oxígeno para lograr dicha degradación.

La divergencia observada en la estabilidad del efluente donde el monocultivo de *Typha domingensis* colapsó por acidificación (pH 5.72 bajo TRH de 5 días) mientras que *Canna indica* y el Policultivo preservaron la neutralidad (pH 6.22 - 6.26) se explica por las adaptaciones anatómicas y los mecanismos fisiológicos de transporte interno de gases:

- **Limitación fisiológica en *Typha domingensis*:** Aunque *Typha* posee aerénquima continuo adaptado al flujo convectivo de gases desde la atmósfera por gradiente higrométrico, su sistema radicular se concentró casi exclusivamente en los primeros

10–12 cm del lecho. Al operar bajo la tasa forzada de 4.0 L/día con más de $40,000\,mg/L$ de DBO_5, la demanda biológica de oxígeno del biofilm superó drásticamente la tasa de pérdida radial de oxígeno (ROL, *Radial Oxygen Loss*) de sus raíces. Esto generó un ambiente de anaerobiosis estricta en el lecho ($E_h < -200\,mV$), provocando fermentación ácida de la lactosa con acumulación de ácidos grasos volátiles (AGVs: láctico, acético y propiónico) que acidificaron el efluente.

- **Eficiencia oxidativa de *Canna indica*:** *Canna indica* combina aerénquimas funcionales con un sistema rizomatoso profundo (122.55 g de biomasa subterránea) y una elevada tasa de transpiración foliar. Esto indujo una inyección continua de oxígeno hacia el horizonte medio y profundo del lecho (20 cm), ratificado por el mayor nivel residual de Oxígeno Disuelto medido en su efluente ($2.99\,mg/L$ a 5 días). Este micro-halo oxidativo perirradicular sostuvo biopelículas aerobias y facultativas periféricas capaces de oxidar los ácidos intermediarios a dióxido de carbono y agua, neutralizando la caída del pH.
- **Sinergia en Policultivo:** En la configuración mixta (T3), la interacción anatómica de ambas especies integró una bio-aireación tridimensional (superficial con *Typha* y profunda con *Canna*), protegiendo al reactor del colapso anaeróbico y garantizando la resiliencia operativa permanente.

4.3.4 Comparación de Medias (Prueba de Tukey)

Para identificar qué grupos específicos difieren estadísticamente entre sí, se aplicó la prueba de comparaciones múltiples de Tukey. Dado que la interacción TRH*TRATAMIENTO fue significativa para algunas variables, se presentan las tablas de agrupación correspondientes a dicha interacción.

Tabla 8

Agrupación De Tukey Para La Interacción En Eficiencia De Turbidez

Comparaciones por parejas de Tukey: TRH

TRH	N	Media	Agrupación	
TRH_10_dias	12	98.23	A	
TRH_5_dias	12	94.26		B

Comparaciones por parejas de Tukey: TRATAMIENTO

TRATAMIENTO	N	Media	Agrupación	
Policultivo	8	98.68	A	
Monocultivo T1: Canna indica	8	95.77	A	B
Monocultivo T2: Typha domingensis	8	94.30		B

Comparaciones por parejas de Tukey: TRH*TRATAMIENTO

TRH*TRATAMIENTO	N	Media	Agrupación		
TRH_10_dias Policultivo	4	99.30	A		
TRH_10_dias Monocultivo T1: Canna indica	4	98.70	A	B	
TRH_5_dias Policultivo	4	98.06	A	B	C
TRH_10_dias Monocultivo T2: Typha domingensis	4	96.70	A	B	C
TRH_5_dias Monocultivo T1: Canna indica	4	92.84		B	C
TRH_5_dias Monocultivo T2: Typha domingensis	4	91.90			C

Nota. Elaboración Propia – Minitab.

El análisis de Tukey (Tabla 8) confirma que el TRH de 10 días es significativamente superior (Agrupación A) al de 5 días (Agrupación B) para la remoción de turbidez, lo cual era de esperarse, ya que un tiempo más prolongado maximiza los procesos físicos de filtración y sedimentación. A nivel de Tratamiento, el Policultivo es la configuración más efectiva (98.68%, Agrupación A), siendo estadísticamente indistinguible de *Canna indica* pero superior a *Typha domingensis*. Este hallazgo es coherente con Carrillo et al. (2023), quienes reportaron que los policultivos ofrecen un rendimiento ambiental más estable . La tabla de interacción revela que el Policultivo a 10 días logra la mayor eficiencia (99.30%, Agrupación A), pero lo más importante es su resiliencia: al reducir el TRH a 5 días (98.06%), su rendimiento sigue siendo estadísticamente similar (Agrupación ABC) al mejor escenario, mientras que el monocultivo de *Typha domingensis* a 5 días de TRH colapsa (91.90%, Agrupación C), confirmando que la matriz radicular mixta del policultivo es funcionalmente superior .

Tabla 9

Agrupación De Tukey Para La Interacción En Eficiencia De TDS

Comparaciones por parejas de Tukey: TRH

TRH	**N**	**Media**	**Agrupación**	
TRH_5_dias	12	82.48	A	
TRH_10_dias	12	82.06		B

Comparaciones por parejas de Tukey: TRATAMIENTO

TRATAMIENTO	**N**	**Media**	**Agrupación**		
Policultivo	8	82.86	A		
Monocultivo T1: Canna indica	8	82.42		B	
Monocultivo T2: Typha domingensis	8	81.54			C

Comparaciones por parejas de Tukey: TRH*TRATAMIENTO

TRH*TRATAMIENTO	**N**	**Media**	**Agrupación**			
TRH_5_dias Policultivo	4	83.03	A			
TRH_10_dias Policultivo	4	82.68	A			
TRH_5_dias Monocultivo T1: Canna indica	4	82.62	A	B		
TRH_10_dias Monocultivo T1: Canna indica	4	82.21		B	C	
TRH_5_dias Monocultivo T2: Typha domingensis	4	81.80			C	
TRH_10_dias Monocultivo T2: Typha domingensis	4	81.28				D

Nota. Elaboración Propia – Minitab.

El análisis de Tukey para la remoción de TDS (Tabla 9) muestra un resultado contraintuitivo: el TRH de 5 días resulta estadísticamente superior al de 10 días. Esto confirma que la remoción de TDS está dominada por procesos biológicos y de adsorción en lugar de la sedimentación física . La tabla de Tratamiento establece claramente al Policultivo como la configuración más eficiente (Agrupación A), y la tabla de interacción subraya que la máxima eficiencia se logró con el Policultivo a 5 días de TRH (83.03%, Agrupación A). Este fenómeno se explica porque el flujo más rápido forzó un contacto más dinámico entre el efluente (rico en lactosa y nutrientes) y la biomasa vegetal y microbiana. Esto estimula la actividad metabólica, tal como lo señalan Marín-Muñíz et al. (2020), quienes indican que los policultivos pueden potenciar la remoción de contaminantes gracias a una mayor actividad de absorción y diversidad microbiana . De este modo, se optimizó la fitoextracción de nutrientes disueltos (Carrillo et al., 2022) , mientras que el monocultivo de Typha domingensis (Agrupaciones C y D) demostró ser la configuración menos capaz de sostener estos complejos procesos biológicos.

Tabla 10

Agrupación De Tukey Para La Interacción En Ph Final

Comparaciones por parejas de Tukey: TRH

TRH	**N**	**Media**	**Agrupación**
TRH_10_dias	12	6.26	A
TRH_5_dias	12	6.06	B

Comparaciones por parejas de Tukey: TRATAMIENTO

TRATAMIENTO	**N**	**Media**	**Agrupación**
Policultivo	8	6.25	A
Monocultivo T1: Canna indica	8	6.26	A
Monocultivo T2: Typha domingensis	8	5.99	B

Comparaciones por parejas de Tukey: TRH*TRATAMIENTO

TRH*TRATAMIENTO	**N**	**Media**	**Agrupación**
TRH_10_dias Policultivo	4	6.27	A
TRH_10_dias Monocultivo T1: Canna indica	4	6.25	A
TRH_10_dias Typha_domingensis	4	6.25	A
TRH_5_dias Monocultivo T1: Canna indica	4	6.23	A
TRH_5_dias Policultivo	4	6.22	A
TRH_5_dias Monocultivo T2: Typha domingensis	4	5.72	B

Nota. *Elaboración Propia – Minitab*

El análisis de Tukey para el pH (Tabla 10) revela que la interacción entre el factor hidráulico y el biológico es el determinante crítico de la estabilidad del sistema. Estadísticamente, se observa que mientras los sistemas que incluyen Canna indica (T1 y T3) se mantienen en la Agrupación 'A' (pH 6.22-6.27) independientemente de la carga, el monocultivo de Typha domingensis (T2) cae a una Agrupación 'B' significativamente distinta (pH 5.72) bajo un TRH de 5 días. Este quiebre estadístico prueba que el colapso operativo por acidificación no es solo una consecuencia del flujo rápido, sino de la limitada capacidad de bio-aireación de la T. domingensis frente a la fermentación acelerada de la lactosa. En contraste, la estabilidad del grupo 'A' en los tratamientos con Canna indica demuestra que su sistema radicular profundo actúa como un amortiguador biogeoquímico eficaz, evitando que el efluente alcance niveles de acidez que comprometan la normativa ambiental.

Tabla 11

Agrupación De Tukey Para La Interacción En OD Final

Comparaciones por parejas de Tukey: TRH

TRH	**N**	**Media**	**Agrupación**	
TRH_5_dias	12	2.95	A	
TRH_10_dias	12	2.82		B

Comparaciones por parejas de Tukey: TRATAMIENTO

TRATAMIENTO	**N**	**Media**	**Agrupación**	
Monocultivo T1: Canna indica	8	2.91	A	
Monocultivo T2: Typha domingensis	8	2.90	A	B
Policultivo	8	2.85		B

Comparaciones por parejas de Tukey: TRH*TRATAMIENTO

TRH*TRATAMIENTO	**N**	**Media**	**Agrupación**			
TRH_5_dias Monocultivo T1: Canna indica	4	2.99	A			
TRH_5_dias Monocultivo T2: Typha domingensis	4	2.94	A	B		
TRH_5_dias Policultivo	4	2.91	A	B	C	
TRH_10_dias Typha_domingensis	4	2.85		B	C	D
TRH_10_dias Monocultivo T1: Canna indica	4	2.84			C	D
TRH_10_dias Policultivo	4	2.79				D

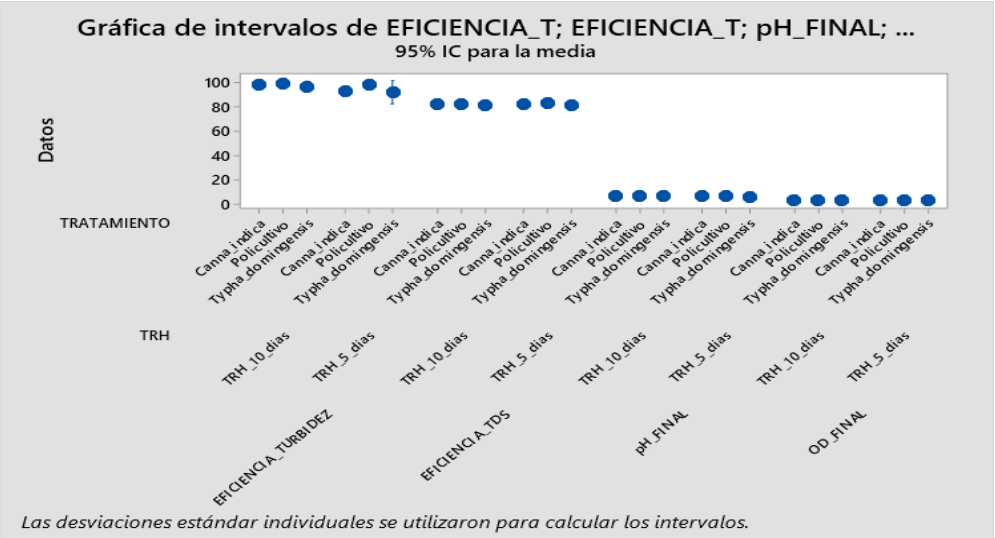
Nota. *Elaboración Propia – Minitab.*

Los resultados de la prueba de Tukey para el OD Final (Tabla 11) evidencian una jerarquía operativa inversa a la eficiencia de remoción. La ubicación del monocultivo de Canna indica en la Agrupación 'A' (2.99 mg/L) confirma que esta especie posee la mayor tasa de transferencia de oxígeno hacia el sustrato, favoreciendo condiciones aerobias. Por el contrario, el hecho de que el Policultivo (T3) a 10 días se ubique en la Agrupación 'D' con el valor más bajo (2.79 mg/L) no debe interpretarse como una deficiencia del sistema, sino como la prueba estadística de su alta actividad biológica. Al ser el tratamiento más eficiente en la degradación de materia orgánica (como se validó en las tablas de DBO y DQO), su biopelícula microbiana consume el oxígeno disponible a una tasa mayor para metabolizar la carga contaminante, validando la sinergia del sistema mixto.

4.3.5 Resumen Visual del Desempeño por Condición Experimental

Finalmente, la Figura 12 presenta una gráfica de intervalos que permite comparar visualmente las medias y la variabilidad de todas las variables de respuesta para cada una de las seis condiciones experimentales evaluadas.

Figura 12
Gráfica De Intervalos De Todas Las Variables



Nota. Elaboración Propia – Minitab.

En la Figura 12, se observa que la eficiencia de Turbidez y TDS es consistentemente alta (superior al 80%) en todos los tratamientos. Sin embargo, el Policultivo muestra el rendimiento más estable, evidenciado por los intervalos de confianza más estrechos en comparación con los monocultivos. Esta mayor fiabilidad y estabilidad operativa del policultivo es un hallazgo clave, congruente con lo reportado por Carrillo et al. (2023), quienes encontraron que los policultivos pueden ofrecer un rendimiento ambiental más estable en el tratamiento de aguas residuales . El riesgo operativo se concentra visualmente en el pH Final, donde el monocultivo de *Typha domingensis* en el TRH de 5 días presenta el punto más bajo (5.72), confirmando que esta combinación colapsa la capacidad de amortiguación del sistema. Este fallo es coherente con el análisis de Mufarrege et al. (2020) sobre los límites de tolerancia de *Typha* bajo condiciones de estrés . Finalmente, los valores de OD Final se mantienen bajos (2.79 - 2.99 mg/L), lo que es una consecuencia lógica de la alta actividad biológica que consume oxígeno para degradar la masiva carga orgánica (DBO/DQO) del lactosuero. Como implicancia práctica para la industria láctea de la región de Arequipa, se recomienda la implementación del sistema de Policultivo (T3). No obstante, para garantizar la estabilidad operativa y evitar riesgos de acidificación, el diseño debe asegurar un tiempo de retención hidráulica mínimo de 7 a 10 días, especialmente en condiciones donde no existan sistemas de pretratamiento avanzados.

La recomendación prioritaria de la configuración en policultivo (*Canna indica* + *Typha domingensis*) sobre los monocultivos para el tratamiento de lactosuero se fundamenta en cuatro ventajas operativas demostradas:

1. **Estratificación y exploración radicular complementaria:** La arquitectura radicular profunda de *Canna indica* (20–25 cm) y la densa red superficial de *Typha domingensis* (primeros 10–15 cm) cubren homogéneamente el perfil del filtro, evitando caminos preferenciales y optimizando la retención mecánica de sólidos y turbidez (99.30%).
2. **Diversificación de gradientes Redox:** La coexistencia de ambas especies crea microambientes acoplados: zonas aerobias perirradiculares aportadas por *Canna* alternadas con zonas anóxicas asociadas al biofilm de *Typha*, permitiendo la oxidación simultánea de la lactosa y la retención biológica de sales y nutrientes (máxima remoción de TDS con 83.03%).
3. **Capacidad amortiguadora frente a la acidificación:** Ante sobrecargas hidráulicas (TRH de 5 días), el policultivo evitó el colapso por fermentación ácida que sufrió el monocultivo de *Typha* (pH 5.72), manteniendo el pH estabilizado en 6.22 sin requerir

correctores químicos externos.

4. **Abatimiento cinético de carga extrema:** La acción consorciada planta-microorganismo redujo la DBO_5 de 40,687.5 mg/L a solo 9.1 mg/L (99.98% de eficiencia global), superando el rendimiento de ambos monocultivos por separado.

4.3.6 Incidencia de la Evapotranspiración en el Desempeño del Sistema

En humedales artificiales a escala piloto operados a la intemperie bajo las condiciones de alta radiación solar y baja humedad relativa características de la ciudad de Arequipa, la evapotranspiración (ET) ejerce una influencia determinante sobre el régimen hidráulico y las concentraciones de los efluentes. Las macrófitas emergentes incrementan sustancialmente la pérdida de vapor de agua hacia la atmósfera en comparación con la evaporación de una lámina de agua libre. En este estudio, la alta densidad foliar de *Canna indica* —caracterizada por hojas anchas de elevado índice de área foliar (IAF) y alta conductancia estomática— indujo tasas de transpiración superiores a las de *Typha domingensis*.

Desde la perspectiva del tratamiento, este fenómeno genera un efecto de concentración de solutos no volátiles en el efluente residual: al reducirse el volumen líquido efluente ($Q_{salida} < Q_{entrada}$), los sólidos disueltos y iones remanentes se concentran físicamente. Por ende, la remoción media de Sólidos Disueltos Totales (TDS) reportada (>82%) en el policultivo representa una subestimación conservadora de la remoción real; si se computara la masa absoluta de contaminante retenida (balance de cargas en g/día), la eficiencia depurativa y fitoextractiva de la rizósfera resulta aún mayor a la estimada por concentración simple. Asimismo, la ET prolongó marginalmente el tiempo de residencia hidráulico real dentro del medio granular, favoreciendo las cinéticas de biodegradación en la biopelícula.

Dinámica del Balance Hídrico en las Celdas Experimentales

La formulación general del balance hídrico en las unidades de flujo subsuperficial horizontal (HAFSSH) en régimen permanente se expresa según la ecuación:

$$Q_{salida} = Q_{entrada} + P - ET - I \pm \Delta S$$

Donde $Q_{entrada}$ es el caudal de alimentación dosificado por bombeo peristáltico continuo (2.0 L/día para TRH de 10 días y 4.0 L/día para TRH de 5 días); P es la precipitación incidente, la cual fue nula ($P = 0\ mm/día$) por desarrollarse el ensayo durante la temporada seca de Arequipa; I representa las pérdidas por infiltración en el fondo, iguales a cero ($I = 0$) debido a la impermeabilidad de los contenedores de HDPE; y ΔS es la variación del almacenamiento intersticial, que es despreciable ($\Delta S \approx 0$) al operar en estado estacionario tras las 4 semanas de estabilización.

Por lo tanto, el balance se reduce estrictamente a:

$$Q_{salida} = Q_{entrada} - ET$$

Durante la fase de TRH de 10 días ($Q_{entrada} = 2.0\ L/día$), la pérdida por evapotranspiración promedio osciló entre 0.30 y 0.45 L/día por unidad (tasa de ET de 1.58 a 2.37 mm/día para el área útil de 0.19 m²), lo que significó una reducción volumétrica del 15% al 22.5% del caudal efluente. En la fase de TRH de 5 días ($Q_{entrada} = 4.0\ L/día$), la ET representó entre el 8% y el 12% del volumen ingresado. Este balance confirma la inexistencia de retenciones anómalas o flujos preferenciales no controlados en los reactores.

4.4 Adaptación y Desarrollo de las Macrófitas

4.4.1. Análisis Cualitativo y Semicuantitativo del Estado Fitosanitario y Vigor de las Plantas

Para estandarizar las observaciones del estado de salud vegetal, se aplicó una Escala de Estimación Visual de Vigor Fitosanitario. A diferencia de las aproximaciones de opinión, esta herramienta se basa en descriptores físicos de afectación foliar, permitiendo correlacionar el estado sanitario con la capacidad de remoción del sistema. Se utilizaron los criterios de salud vegetal adaptados de Kadlec & Wallace (2008), empleando parámetros objetivos basados en la senescencia y la respuesta morfológica de las macrófitas frente a la carga orgánica (Kochi et al., 2020; Geleto et al., 2024). Los resultados se presentan en la Tabla 12.

Tabla 12

Evaluación del Índice de Vigor Visual (IVV) basado en Descriptores de Salud Vegetal

Parámetro Evaluado	**T1: Monocultivo Canna**	**T2: Monocultivo Typha**	**T3: Policultivo**
Vigor General	5	3	4
Estado del Follaje (Coloración)	5	4	4
Tasa de Brotación Visual	5	3	4
Desarrollo Radicular Observado	5	3	4
Promedio IVV	**5.0**	**3.3**	**4.0**

Nota. Adaptado de los descriptores de salud vegetal de Kadlec & Wallace (2008) (ver matriz detallada en el Anexo 7). La escala de intervalos discretos correlaciona el puntaje con el porcentaje real de daño en el tejido foliar: Nivel 5 (<5% de daño); Nivel 4 (5-15% de daño); Nivel 3 (15-30% de daño); Nivel 2 (30-50% de daño); y Nivel 1 (>50% de necrosis severa).

Es imperativo precisar que el uso de esta escala de estimación visual en esta investigación no constituye una valoración subjetiva, sino la aplicación de un protocolo estandarizado de monitoreo ecotecnológico validado en la ingeniería de humedales (Kadlec & Wallace, 2008). La consistencia metodológica de este indicador se fundamenta en el uso de descriptores biofísicos discretos (porcentaje de área foliar con clorosis o necrosis) que permiten transformar la observación fenotípica en un dato semicuantitativo comparable. Asimismo, la validez del análisis queda demostrada por la correlación directa entre el bajo vigor registrado en el monocultivo de Typha domingensis (3.3) y su colapso operativo (caída del pH a 5.72), evidenciando que la escala es un reflejo fiel y consistente del estrés biológico inducido por la carga orgánica del lactosuero.

El análisis semicuantitativo de la Tabla 12 corrobora la dominancia visual de Canna indica frente a la alta carga orgánica del lactosuero. Mientras el monocultivo de Canna (T1) mantuvo un vigor 'Excelente' (5.0), el monocultivo de Typha (T2) reflejó un mayor grado de estrés, registrando un vigor promedio general de 3.3 ('Regular'). Por su parte, el Policultivo (T3) alcanzó un puntaje consolidado de 4.0 ('Bueno'). Si bien este valor demuestra que el sistema

mixto se mantuvo saludable y estable, el ligero descenso visual respecto al 5.0 del monocultivo de Canna es un indicador temprano del fenómeno de competencia interespecífica; la coexistencia de ambas especies genera un ligero estrés que limita el desarrollo fenotípico máximo individual, a pesar de que, paradójicamente, esta misma interacción confiere la mayor resiliencia global al tratamiento fisicoquímico del efluente. La resiliencia operativa se define como la capacidad del sistema de policultivo para mantener la estabilidad del pH y la degradación biológica frente a cargas orgánicas extremas (DBO_5 > 40,000 mg/L) que colapsarían sistemas convencionales.

4.4.2. Análisis Cuantitativo del Crecimiento Vegetativo

Para complementar el análisis cualitativo, se presentan los datos cuantitativos del crecimiento de las macrófitas, registrados periódicamente durante las 12 semanas del ensayo experimental. Estas mediciones permiten observar y comparar la dinámica de desarrollo de las plantas en cada tratamiento.

4.4.2.1. Crecimiento en Altura

La altura de las plantas fue uno de los principales indicadores de crecimiento. La Tabla 13 muestra la evolución de la altura promedio en cada configuración.

Tabla 13

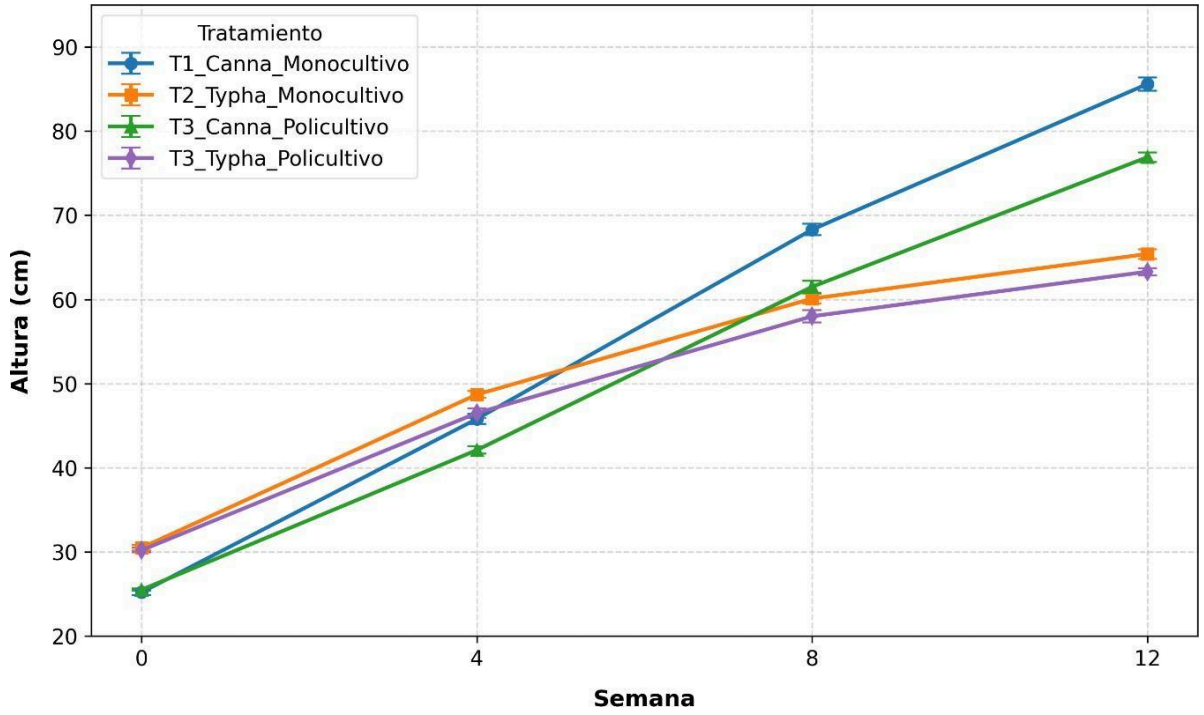
Evolución de la Altura Promedio (cm) de las Macrófitas en cada Tratamiento

Semana	T_1: Monocultivo Canna	T_2: Monocultivo Typha	T_3: Policultivo (Canna)	T_3: Policultivo (Typha)
Semana 0 (Inicial)	25.2 ± 0.35	30.5 ± 0.31	25.5 ± 0.14	30.2 ± 0.28
Semana 4	45.8 ± 0.59	48.7 ± 0.42	42.1 ± 0.42	46.5 ± 0.57
Semana 8	68.3 ± 0.69	60.1 ± 0.56	61.5 ± 0.71	58.0 ± 0.71
Semana 12 (Final)	85.6 ± 0.78	65.4 ± 0.57	76.9 ± 0.57	63.3 ± 0.42

Nota. Elaboración Propia. El valor se expresa como Media ± Desviación Estándar (DE) calculada a partir de los ejemplares de cada unidad experimental.

Figura 13

Curvas de crecimiento en altura (cm) de las macrófitas a lo largo del periodo experimental.



Nota. Elaboración Propia. Los puntos representan la media aritmética de cada muestreo quincenal y las barras de error vertical indican la Desviación Estándar (DE) real correspondiente a cada tratamiento (n = 4 para monocultivos; n = 2 por especie para policultivo).

Los datos de la Tabla 13 y la Figura 13 indican que el Monocultivo de *Canna indica* (T1) experimentó el mayor crecimiento en altura, alcanzando un promedio final de 85.6 cm. Aunque Galal et al. (2023) posicionan a *Typha domingensis* como una especie con alto potencial de acumulación de nutrientes , los datos de crecimiento demuestran que *Canna indica* posee una capacidad superior para capitalizar los recursos del lactosuero y traducirlos en biomasa aérea. El hallazgo más revelador es la comparación entre el T1 y el T3: la *Canna indica* en el policultivo (T3) mostró un excelente desarrollo (76.9 cm), pero este fue significativamente menor que en su monocultivo (85.6 cm). Esta reducción es una clara evidencia de competencia interespecífica. La presencia de *Typha domingensis*, aunque menos productiva en altura, actuó como una competidora efectiva por los recursos (Manolaki et al., 2020) , limitando el desarrollo individual de *Canna*. Esto confirma la dualidad del sistema: aunque el monocultivo T1 fue superior en productividad individual, el policultivo T3 fue funcionalmente más resiliente en el tratamiento del agua (como se vio en el análisis de pH y TDS) .

4.4.2.2. Propagación por Vástagos (Densificación)

La capacidad de propagación vegetativa, medida por el número de nuevos tallos, es un indicador clave de la resiliencia y expansión de las plantas en el sistema.

Tabla 14

Evolución del Número Promedio de Tallos/Vástagos por Unidad Experimental

Semana	T1: Monocultivo Canna	T2: Monocultivo Typha	T3: Policultivo (Total)
Semana 0 (Inicial)	4	4	4
Semana 4	7.0 ± 0.5	6.0 ± 0.4	7.0 ± 0.6
Semana 8	11.0 ± 0.6	9.0 ± 0.5	10.0 ± 0.8
Semana 12 (Final)	15.0 ± 0.7	11.0 ± 0.6	13.0 ± 0.7

Nota. Elaboración Propia.

La capacidad de propagación fue más pronunciada en el Monocultivo de Canna indica (T1), que finalizó con un promedio de 15 vástagos (Tabla 14). El Policultivo (T3) también mostró una excelente capacidad de densificación (13 tallos), superando al Monocultivo de Typha domingensis (T2), que fue el tratamiento con la menor tasa de producción de nuevos vástagos. Esta superioridad en la propagación de Canna indica es coherente con los atributos de la especie destacados por Cui et al. (2021), quienes señalan su rápido crecimiento y su elevada producción de biomasa como características clave para la fitorremediación , lo que le permite colonizar y expandirse en el sustrato eficientemente.

4.4.3. Biomasa Total Individual (g)

Para evaluar la adaptación biológica, se analizó la productividad individual de las macrófitas. A diferencia de un reporte global, el análisis por individuo (n=4) permite identificar la variabilidad en el crecimiento y el efecto de la competencia en el policultivo. Los resultados de Biomasa Total Individual (g) seca promedio por planta se detallan en la Tabla 15.

La transición metodológica de reportar la "Biomasa Total del Sistema" hacia la "Biomasa Individual Promedio por Planta" se implementó con el objetivo de incrementar la precisión del análisis comparativo entre *Canna indica* y *Typha domingensis*, facultando una evaluación detallada del vigor vegetativo por cada unidad biológica de forma independiente.

Tabla 15

Biomasa Total Individual (g) Cosechada (Peso Seco en gramos) por Componente para cada Tratamiento

Tratamiento / Especie	Biomasa Aérea (g)	Biomasa Subterránea (g)	Biomasa Total Individual (g)
T1: Monocultivo Canna (n=4)	96.35 ± 3.18	122.55 ± 4.26	218.9 ± 9.38
T2: Monocultivo Typha (n=4)	77.68 ± 2.29	66.38 ± 2.52	144.1 ± 5.67
T3: Policultivo Canna (n=2)	92.60 ± 1.98	115.05 ± 3.61	207.65 ± 5.59
T3: Policultivo Typha (n=2)	74.40 ± 1.84	62.60 ± 1.56	137.00 ± 3.39

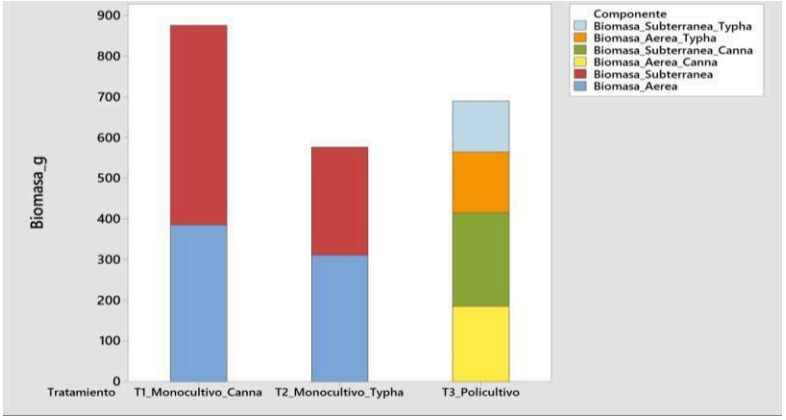
Nota. Los valores representan la media aritmética ($\bar{x}$) y la desviación estándar (SD) de los ejemplares cosechados.

En el sistema de Policultivo (T3), se observa una ligera reducción en la biomasa individual respecto a los monocultivos, lo que sugiere la existencia de competencia interespecífica por recursos bajo condiciones de alta carga orgánica. Los resultados cuantitativos confirman que el Monocultivo de *Canna indica* (T1) fue el tratamiento más productivo (875.6 g), generando una notable acumulación en su sistema subterráneo (56% del total). El Monocultivo de *Typha domingensis* (T2) fue el menos productivo (576.4 g). Aunque la literatura, como el trabajo de Galal et al. (2023), posiciona a *Typha* como una especie con alto potencial de acumulación de nutrientes , los hallazgos sugieren que *Canna indica* posee una mayor capacidad para capitalizar los recursos del lactosuero.

El hallazgo más revelador surge al analizar el Policultivo (T3) a nivel de individuo. Según la Biomasa Total Individual (g) seca final, la biomasa individual de la *Canna indica* en el policultivo promedió 207.6 g por planta. Este valor es ligeramente menor a los 218.9 ± 9.4 g por planta alcanzados en su monocultivo (T1). Esta reducción en el peso individual es una clara evidencia de competencia interespecífica por los recursos del lactosuero. La presencia de *Typha domingensis*, aunque de menor productividad, limitó el desarrollo máximo que la *Canna* logra cuando crece sola. Este fenómeno es consistente con los principios de ecología de comunidades discutidos por Manolaki et al. (2020), donde la diversidad funcional influye en la productividad. Esto demuestra una dualidad clave: aunque la *Canna* en monocultivo (T1) es superior para la producción de biomasa individual, el policultivo (T3), a pesar de la competencia, conformó un sistema de tratamiento de agua más resiliente y funcionalmente completo (como se demostró en la estabilidad del pH).

Figura 14

Distribución de la biomasa final seca (aérea y subterránea) por tratamiento



Nota. Elaboración Propia.

En la Figura 14, la distribución de la biomasa confirma la superioridad de la especie *Canna indica* en términos de productividad y adaptación al efluente de lactosuero, ya que el Monocultivo de *Canna indica* (T1) generó la mayor biomasa total (875.6 g), superando significativamente al Policultivo (689.2 g) y al monocultivo de *Typha domingensis* (576.4 g). La principal causa de esta alta productividad es el extenso y denso sistema radicular y rizomatoso de *Canna indica*, lo cual se refleja en que más de la mitad de su biomasa total (490.2 g) fue subterránea. Este atributo es destacado por Cui et al. (2021), quienes señalan el extenso sistema radicular de *Canna* como un factor clave que mejora la transferencia de oxígeno a la rizósfera y la capacidad de absorción de contaminantes . El Policultivo (T3) fue más productivo que el monocultivo de *Typha domingensis*, demostrando que la presencia de *Canna indica* en el sistema contribuyó a una mayor eficiencia de desarrollo vegetal. Este patrón de desarrollo es fundamental para la sostenibilidad del humedal, pues un mayor desarrollo de biomasa subterránea se correlaciona directamente con una mejor fitoextracción de contaminantes y una mayor resiliencia del sistema ante las fluctuaciones del efluente (Cui et al., 2021). Al contrastar el comportamiento biométrico individual entre los monocultivos y el policultivo (Tabla 13 y Tabla 15), se evidencia una clara asimetría competitiva entre ambas macrófitas:

- **Especie Dominante ('Ganadora'): *Canna indica*.**

Demostró mayor agresividad competitiva y aptitud ecológica (*fitness*) en el policultivo. Alcanzó una altura media final de 76.9 cm y una biomasa seca individual de 207.65 g/planta (con 115.05 g de biomasa subterránea). La morfología de sus láminas foliares anchas le permitió monopolizar la captación de radiación solar en el dosel superior, generando un efecto de sombreado parcial sobre *Typha*. Paralelamente, su vigoroso desarrollo rizomatoso exploró de forma dominante los nutrientes solubles de la fase líquida.

- **Especie Subordinada ('Perdedora'): *Typha domingensis*.**

Resultó ser la especie biológicamente subordinada. En el policultivo, su altura final se contrajo a 63.3 cm (frente a 65.4 cm en su monocultivo), su biomasa individual promedio se redujo a 137.00 g/planta (frente a 144.10 g en monocultivo, registrando una pérdida del 4.9%), y su tasa de emisión de nuevos tallos fue desplazada espacialmente por la expansión subterránea de *Canna*. A pesar de que *Canna indica* 'ganó' la competencia en biomasa y dominancia estructural, no ocurrió exclusión competitiva total. Ambas lograron coexistir mediante partición vertical de nichos radiculares (raíces superficiales de *Typha* y rizomas profundos de *Canna*), siendo la beneficiaria final la eficiencia del tratamiento, que alcanzó la máxima estabilidad operativa del estudio.

CAPÍTULO V

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. Conclusiones

1. El lactosuero estudiado se clasificó como de tipo dulce (pH cercano a la neutralidad), pero se caracterizó por una carga orgánica monumental que lo posiciona como un efluente agroindustrial de alta complejidad, superando drásticamente los estándares de aguas residuales convencionales y requiriendo un tratamiento biológico robusto.
2. Se diseñó y construyó exitosamente un sistema piloto de Humedal Artificial de Flujo Subsuperficial Horizontal (HAFSSH) con un lecho filtrante estratificado y control hidráulico preciso, lo que permitió validar la metodología experimental para la comparación rigurosa de las configuraciones de vegetación bajo diferentes regímenes de carga hidráulica (TRH).
3. La configuración en Policultivo (T3) se concluye como la más eficiente y resiliente para el tratamiento del lactosuero, logrando la máxima remoción de carga orgánica (DBO_5 y DQO) y sólidos. Su característica fundamental fue la estabilidad del pH y del sistema bajo estrés hidráulico (TRH corto). Esta robustez funcional contrasta directamente con el monocultivo de *Typha domingensis* (T2), que colapsó operativamente al sufrir una acidificación drástica del efluente, demostrando ser inestable ante la rápida fermentación del lactosuero en condiciones de bajo tiempo de residencia.
4. La macrófita *Canna indica* demostró una adaptación y productividad biológica superior al generar la mayor biomasa total. Se identificó un fenómeno de competencia interespecífica en el policultivo (T3), donde el crecimiento individual de *Canna* se vio reducido respecto a su monocultivo. No obstante, la interacción sinérgica entre el sistema radicular profundo de *Canna* y la red superficial de *Typha* fue clave para la robustez funcional superior observada en el sistema de Policultivo.

5.2. Recomendaciones

1. Dado el éxito a escala de laboratorio, se debe validar el sistema en un entorno real (in situ en una quesería). Esto es necesario para evaluar el comportamiento del policultivo frente a la variabilidad estacional de temperatura en Arequipa y fluctuaciones reales en la producción diaria de suero.
2. Aunque se midió la materia orgánica (DBO/DQO), es imperativo ampliar el monitoreo para cuantificar la remoción de Nitrógeno Total y Fósforo Total. El lactosuero es rico en nutrientes que causan eutrofización; conocer el balance de masas de estos elementos es crucial para asegurar que el efluente cumpla con todos los Límites Máximos Permisibles (LMP).
3. Se recomienda realizar análisis metagenómicos (secuenciación 16S ARNr) en la grava adherida a las raíces. El objetivo es identificar las comunidades bacterianas específicas que se desarrollan en el policultivo versus los monocultivos, para entender biológicamente por qué el policultivo evitó la acidificación que sufrió el sistema de Typha.
4. Dada la alta producción de biomasa de Canna indica (casi 1 kg en peso seco por unidad experimental), se debe investigar su uso post-tratamiento. Se sugiere realizar análisis bromatológicos y de metales pesados a los tejidos vegetales para determinar si pueden usarse seguramente como compost agrícola o materia prima para bioenergía.
5. Existe una brecha de eficiencia entre los 10 y 5 días. Se sugiere evaluar un punto intermedio (ej. 7 días) para encontrar el equilibrio técnico-económico óptimo que maximice el volumen de tratamiento sin poner en riesgo la estabilidad del pH, como ocurrió con el tratamiento de 5 días en Typha.

6. Para el escalamiento a nivel industrial o semi-industrial, se debe utilizar la configuración de Policultivo (T3) operando con un Tiempo de Retención Hidráulica (TRH) no menor a 10 días, ya que esta condición garantizó la estabilidad operativa (pH) y la máxima eficiencia (DBO_5 99.98%). El cálculo del área de diseño (A) para un caudal específico (Q) debe realizarse con la ecuación de Darcy-Weisbach para flujos subsuperficiales: $A = (Q \cdot TRH) / (n \cdot H)$, donde n es la porosidad del medio (aproximadamente 0.4 para grava media) y H es la altura del lecho filtrante (0.3 m).

7. A pesar de que durante las 12 semanas de operación controlada no se registró una reducción de la conductividad hidráulica ni evidencia de colmatación (clogging), es crucial enfatizar que para un escalamiento a largo plazo es indispensable incorporar un pretratamiento de desengrasado (físico-químico) más robusto que el de decantación simple utilizado. Esto se debe a la alta concentración de sólidos y grasas del lactosuero, cuya acumulación sostenida en los intersticios del medio filtrante de grava comprometería la porosidad y la funcionalidad hidráulica del sistema HAFSSH, resultando en fallas operacionales y la necesidad de reemplazo del medio.

8. Para la aplicación práctica y transferencia tecnológica a las pequeñas y medianas queserías de la región de Arequipa (como en Majes, Cayma o Yura), se recomienda implementar el sistema HAFSSH en policultivo (*Canna indica* y *Typha domingensis*) como tratamiento secundario-terciario, dimensionado con una relación geométrica de aspecto largo:ancho de 3:1 a 4:1 y un TRH mínimo de 8 a 10 días, precedido indispensablemente de una trampa de grasas y decantador primario con purga periódica. Asimismo, al ser un sistema pasivo de nulo consumo eléctrico y libre de reactivos químicos, se recomienda establecer un manual operativo comunal que incluya podas semestrales de la biomasa aérea senescente de *Canna indica*, evitando la recirculación de materia orgánica por degradación foliar in situ y garantizando una operatividad continua superior a 10 años.

REFERENCIAS

Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos. (2012). *Guidelines for water reuse* (EPA/600/R-12/618). https://www.epa.gov/sites/default/files/2019-08/documents/2012-guidelines-water-reuse.pdf

Akhmad, A. (2021). Removal of total coliform and TSS for hospital wastewater by optimizing the role of *Typha angustifolia* and fine sand-gravel media in horizontal sub surface flow constructed wetland. *Jurnal Riset Teknologi Pencegahan Pencemaran Industri*, *12*(1), 20–31. https://doi.org/10.21771/jrtppi.2021.v12.no1.p20-31

Alayu, E., & Leta, S. (2021). Post treatment of anaerobically treated brewery effluent using pilot scale horizontal subsurface flow constructed wetland system. *Bioresources and Bioprocessing*, *8*(1), 1–15. https://doi.org/10.1186/s40643-020-00356-0

Alemu, A., Gabbiye, N., & Lemma, B. (2020). Application of integrated local plant species and vesicular basalt rock for the treatment of chromium in tannery wastewater in a horizontal subsurface flow wetland system. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, *8*(4), 103940. https://doi.org/10.1016/j.jece.2020.103940

Alia, F., Wardhani, P., & Putra, R. (2023). Analisa pengaruh kerapatan tanaman terhadap kinerja constructed wetland pada pengolahan limbah greywater perumahan. *Teras Jurnal: Jurnal Teknik Sipil*, *13*(2), 437–446. https://doi.org/10.29103/tj.v13i2.875

Bacenetti, J., Bava, L., Schievano, A., & Zucali, M. (2018). Whey protein concentrate (WPC) production: Environmental impact assessment. *Journal of Food Engineering*, *224*, 139–147. https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2017.12.018

Barya, M., Kumar, A., & Thakur, T. (2022). Utilization of constructed wetlands for the removal of heavy metals through fly ash bricks made from harvested plant biomass. *Ecohydrology*, *15*(7), e2424. https://doi.org/10.1002/eco.2424

Bensmail, S., Boudjema, K., Naimi-Fazouane, F., Bensmail, S., Djouahra-Fahem, D., Ferhoum, F., & Bourfis, N. (2023). Factors affecting acid protease production by *Mucor circinelloides* MG603064.1 through SmF process: Characterization and fromage frais making. *BioTechnologia*, *104*(4), 387–403. https://doi.org/10.5114/bta.2023.132770

Berego, Y., Sota, S., Ulsido, M., & Beyene, E. (2022). Treatment performance assessment of natural and constructed wetlands on wastewater from Kege wet coffee processing plant in Dale

Woreda, Sidama Regional State, Ethiopia. *Environmental Health Insights*, *16*. https://doi.org/10.1177/11786302221142749

Bertanza, G., & Boiocchi, R. (2022). Interpreting per capita loads of organic matter and nutrients in municipal wastewater: A study on 168 Italian agglomerations. *The Science of the Total Environment*, *826*, 153236. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.153236

Besediuk, V., Yatskov, M., Korchyk, N., Kucherova, A., & Maletskyi, Z. (2024). Whey - From waste to a valuable resource. *Journal of Agriculture and Food Research*, *16*, 101280. https://doi.org/10.1016/j.jafr.2024.101280

Carrillo, V., Casas-Ledón, Y., Neumann, P., & Vidal, G. (2023). Environmental performance of constructed wetland planted with monocultures and polycultures for wastewater treatment. *Ecological Engineering*, *192*, 107015. https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2023.107015

Carrillo, V., Gómez, G., & Vidal, G. (2022). Phosphorus uptake by macrophyte plants in monocultures and polycultures in constructed wetlands for wastewater treatment. *Ecological Engineering*, *182*, 106690. https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2022.106690

Centro Nacional de Planeamiento Estratégico. (2023). *Potencialidades productivas para impulsar el desarrollo industrial a nivel territorial*. CEPLAN.

Colares, G. S., Dell'Osbel, N., Barbosa, C. V., Lutterbeck, C. A., Oliveira, G. A., Rodrigues, L. R., Bergmann, C. P., Lopez, D. R., Rodriguez, A. L., Vymazal, J., & Machado, E. L. (2021). Floating treatment wetlands integrated with microbial fuel cell for the treatment of urban wastewaters and bioenergy generation. *Science of The Total Environment*, *766*, 142474. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.142474

Consejo de la Unión Europea. (1991). Council Directive 91/271/EEC concerning urban wastewater treatment. *Diario Oficial L 135*.

Costa, N., Cappato, L., Ferreira, M., Pires, R., Moraes, J., Esmerino, E., Silva, R., Neto, R., Tavares, M., Freitas, M., Júnior, R., Rodrigues, F., Bisaggio, R., Cavalcanti, R., Raices, R., Silva, M., & Cruz, A. (2018). Ohmic Heating: A potential technology for sweet whey processing. *Food Research International*, *106*, 771–779. https://doi.org/10.1016/j.foodres.2018.01.046

Cui, L., Wang, Y., Li, Z., Yang, B., & Zhang, M. (2021). Potential of *Canna indica* in constructed wetlands for wastewater treatment. *Water*, *13*(17), 2338. https://doi.org/10.3390/w13172338

Cui, N., Cai, M., Zhang, X., Zeng, R., Zhou, L., Chen, G., & Zou, G. (2024). Performance and nitrogen removal mechanism in constructed wetlands under saline conditions: Role of *Canna indica* inoculated with *Piriformospora indica*. *Bioresource Technology*, *411*, 131218. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2024.131218

De Cássia Souza De Queiroz, R., Maranduba, H., Hafner, M., Rodrigues, L., & Neto, J. (2020). Life cycle thinking applied to phytoremediation of dairy wastewater using aquatic macrophytes for treatment and biomass production. *Journal of Cleaner Production*, *267*, 122006. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122006

Deeth, H., & Bansal, N. (2019). Whey proteins. En *Proteins: Sustainable Source, Processing and Applications* (pp. 135–164). Academic Press. https://doi.org/10.1016/C2016-0-02581-0

Demers, E., Kõiv-Vainik, M., Yavari, S., Mench, M., Marchand, L., Vincent, J., Frédette, C., Comeau, Y., & Brisson, J. (2020). Potential of macrophytes for the treatment of leachate contaminated with wood preservatives: Plant tolerance and bioaccumulation capacity. *Plants*, *9*(12), 1774. https://doi.org/10.3390/plants9121774

Dilshad, R., Khan, K., Ahmad, S., Al-Qahtani, J., Sherif, A., Hussain, M., Ghalloo, B., Tahir, H., Basit, A., & Ahmed, M. (2022). Phytochemical profiling, in vitro biological activities, and in-silico molecular docking studies of *Typha domingensis*. *Arabian Journal of Chemistry*, *15*(10), 104133. https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2022.104133

Duarte, V., Pereira, M., Corrêa, F., De Castro, E., & Pereira, F. (2021). Aerenchyma, gas diffusion, and catalase activity in *Typha domingensis*: A complementary model for radial oxygen loss. *Protoplasma*, *258*, 765–777. https://doi.org/10.1007/s00709-020-01597-8

Fundación Global Nature. (2020). *Gestión de la vegetación para la mejora del hábitat y de la calidad del agua*. https://fundacionglobalnature.org/wp-content/uploads/2020/11/Gestionvegetacion_LIFEAlbufera.pdf

Galal, T., Gharib, F., Mansour, K., & Soliman, M. (2023). Nutrient accumulation potential and nutritional value of some emergent macrophytes for restoration of eutrophic water bodies in Greater Cairo, Egypt. *Rendiconti Lincei. Scienze Fisiche e Naturali*, *34*(4), 1017–1028. https://doi.org/10.1007/s12210-023-01194-w

Gallardo Donoso, L. J. (2020a). *Depuración de aguas residuales de una industria láctea por medio de humedales artificiales de Totora* [Tesis de Máster, Universidad de Alcalá]. Repositorio

Institucional Universidad de Alcalá. https://ebuah.uah.es/dspace/bitstream/handle/10017/44117/TFM_Gallardo_Donoso_2020.pdf

Gallardo Donoso, L. J. (2020b). Depuración de aguas residuales de una industria láctea por medio de humedales artificiales de totora. *Polo del Conocimiento*, *5*(10), 411–438. https://polodelconocimiento.com/ojs/index.php/es/article/view/7178

Gamarra, J. B. (2018). *Evaluación del impacto ambiental del lactosuero generado en la línea de producción de quesos de la planta de lácteos Huacariz alternativas de mitigación. Cajamarca—Perú—2016* [Tesis Doctoral, Universidad Nacional de Cajamarca]. Repositorio Institucional. https://renati.sunedu.gob.pe/handle/sunedu/3230488

García-Valero, A., Martínez-Martínez, S., Faz, Á., Terrero, M., Muñoz, M., Gómez-López, M., & Acosta, J. (2020). Treatment of wastewater from the tannery industry in a constructed wetland planted with *Phragmites australis*. *Agronomy*, *10*(2), 176. https://doi.org/10.3390/agronomy10020176

Geleto, M., Ulsido, M., & Berego, Y. (2024). Wastewater treatment in tropical, vertical up-flow constructed wetlands with selected macrophytes species: A preliminary analysis. *Heliyon*, 10(11), e41207. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e41207

Ghezali, K., Bentahar, N., Bârsan, N., Nedeff, V., & Moşneguțu, E. (2022). Potential of *Canna indica* in vertical flow constructed wetlands for heavy metals and nitrogen removal from Algiers refinery wastewater. *Sustainability*, *14*(8), 4394. https://doi.org/10.3390/su14084394

Gholipour, A. (2025). Treatment wetlands in Iran: A review. *Ecological Engineering*, *205*, 107494. https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2024.107494

Gobierno Regional de Arequipa. (2023). *Plan Regional de Saneamiento Arequipa 2023–2027*. GORE Arequipa.

Gomes, P., Da Silva Pedro Rochinha, I., De Paiva, M., & Santiago, A. (2024). Performance of different macrophytes and support media in constructed wetlands for high turbidity reduction from mine spoil rainwater. *Resources*, *13*(12), 168. https://doi.org/10.3390/resources13120168

Grajales, F. D., & Garay, Y. A. (2023). *Análisis del impacto de la seguridad alimentaria por el uso de lactosueros en la industria láctea colombiana* [Tesis de Especialización, Universidad EAN]. Repositorio Institucional EAN. http://hdl.handle.net/10882/13212

Grzelak, M., Pacholczak, A., & Nowakowska, K. (2024). Challenges and insights in the acclimatization step of micropropagated woody plants. *Plant Cell, Tissue and Organ Culture (PCTOC)*. https://doi.org/10.1007/s11240-024-02923-1

Hernández-Crespo, C., Martín, I., de la Torre, R., & Pastor, J. (2023). *Schoenoplectus americanus* as a potential phytoremediator in vitro: Assessment of its ability to remove contaminants in domestic and tannery wastewater. *Environmental Advances*, *12*, 100386. https://doi.org/10.1016/j.envadv.2023.100386

Hernández-Cruz, M., Cadena-Ramírez, A., Castro-Rosas, J., Páez-Lerma, J., Ramírez-Vargas, M., Rangel-Vargas, E., Romo-Gómez, C., Lara-Gómez, A., Conde-Báez, L., & Gómez-Aldapa, C. (2024). Comparative analysis of three types of whey as substrate for fermentation by *Kluyveromyces marxianus* and its influence on isoamyl acetate synthesis. *Waste and Biomass Valorization*. https://doi.org/10.1007/s12649-023-02380-5

Hou, W., Li, Y., Wang, S., Kong, L., & Xu, G. (2021). Effects of substrate type on enhancing pollutant removal performance and reducing greenhouse gas emission in vertical subsurface flow constructed wetland. *Journal of Environmental Management*, *280*, 111674. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.111674

HUPANAM. (2022). *Humedales de tratamiento*. https://hupanam.com/wp-content/uploads/2022/05/HUMEDALES-DE-TRATAMIENTO.pdf

Ivanova, L., Prosekov, A., Ivanov, P., Mikhaylova, E., Timoshchuk, I., & Gorelkina, A. (2024). Efficiency assessment of wastewater treatment of coal enterprises for suspended solids using various filtering materials. *Gornye nauki i tekhnologii = Mining Science and Technology (Russia)*, *9*(3), 227–236. https://doi.org/10.17073/2500-0632-2024-03-227

Kadlec, R. H., & Wallace, S. (2008). Treatment wetlands (2da ed.). CRC Press. https://doi.org/10.1201/9781420012514

Kataki, S., Chatterjee, S., Vairale, M. G., Dwivedi, S. K., & Gupta, D. K. (2021). Constructed wetland, an eco-technology for wastewater treatment: A review on types of wastewater treated and components of the technology (macrophyte, biofilm and substrate). *Journal of Environmental Management*, *283*, 111986. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.111986

Khandare, R., Watharkar, A., Pawar, P., Jagtap, A., & Desai, N. (2020). Hydrophytic plants *Canna indica*, *Epipremnum aureum*, *Cyperus alternifolius* and *Cyperus rotundus* for the

phytoremediation of fluoride from water. *Environmental Technology & Innovation*, *21*, 101234. https://doi.org/10.1016/j.eti.2020.101234

Kushwaha, A., Goswami, L., Kim, B. S., Lee, S. S., Pandey, S. K., & Kim, K. H. (2024). Constructed wetlands for the removal of organic micropollutants from wastewater: Current status, progress, and challenges. *Chemosphere*, *362*, 142364. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2024.142364

Lajnaf, R., Trigui, I., Samet-Bali, O., Attia, H., & Ayadi, M. (2020). Comparative study on emulsifying and physico-chemical properties of bovine and camel acid and sweet wheys. *Journal of Food Engineering*, *268*, 109741. https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2019.109741

Li, J., Zheng, B., Chen, X., Li, Z., Xia, Q., Wang, H., Yang, Y., Zhou, Y., & Yang, H. (2021). The use of constructed wetlands to mitigate nitrogen and phosphorus from agricultural runoff: A review. *Water*, *13*(4), 476. https://doi.org/10.3390/w13040476

Li, X., Wu, S., Yang, C., & Zeng, G. (2020). Microalgal and duckweed based constructed wetlands for swine wastewater treatment: A review. *Bioresource Technology*, *314*, 123858. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.123858

Li, Y., Zhang, M., Liu, X., Zhang, L., & Chen, F. (2024). Trophic homogeneity due to seasonal nitrogen variation in shallow subtropical lakes. *Water Research*, *266*, 122321. https://doi.org/10.1016/j.watres.2024.122321

Luo, Y., Chen, Q., Liu, F., & Dai, C. (2023). Both species richness and growth forms affect nutrient removal in constructed wetlands: A mesocosm experiment. *Frontiers in Ecology and Evolution*, *11*, 1139053. https://doi.org/10.3389/fevo.2023.1139053

Mahmoudi, A., Hannachi, C., Mhiri, F., & Hamrouni, B. (2024). Performances of constructed wetland system to treat whey and dairy wastewater during a macrophytes life cycle. *Desalination and Water Treatment*, *319*, 100364. https://doi.org/10.1016/j.dwt.2024.100364

Maine, M. A., Sanchez, G. C., Hadad, H. R., Caffaratti, S. E., del Carmen Pedro, M., Di Luca, G. A., Mufarrege, M. D. L. M., & Nocetti, E. (2022). Hybrid wetland system for a pet-care center wastewater treatment. *Ecological Engineering*, *183*, 106700. https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2022.106700

Maine, M., Hadad, H., Silvestrini, N., Nocetti, E., Sanchez, G., & Campagnoli, M. (2021). Cr, Ni, and Zn removal from landfill leachate using vertical flow wetlands planted with *Typha domingensis*

and *Canna indica*. *International Journal of Phytoremediation*, *24*(1), 66–75. https://doi.org/10.1080/15226514.2021.1926909

Manolaki, P., Mouridsen, M., Nielsen, E., Olesen, A., Jensen, S., Lauridsen, T., Baattrup-Pedersen, A., Sorrell, B., & Riis, T. (2020). A comparison of nutrient uptake efficiency and growth rate between different macrophyte growth forms. *Journal of Environmental Management*, *274*, 111181. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.111181

Marín-Muñíz, J., Hernández, M., Gallegos-Pérez, M., & Amaya-Tejeda, S. (2020). Plant growth and pollutant removal from wastewater in domiciliary constructed wetland microcosms with monoculture and polyculture of tropical ornamental plants. *Ecological Engineering*, *147*, 105658. https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2019.105658

Mateo-Díaz, N. F., Herazo, L. C. S., Zurita, F., Sandoval-Herazo, M., Nani, G., Fernández-Echeverría, E., Fernández-Lambert, G., & Martínez-Reséndiz, G. (2023). Remediation of river water contaminated with whey using horizontal subsurface flow constructed wetlands with ornamental plants in a tropical environment. *Water*, *15*(19), 3456. https://doi.org/10.3390/w15193456

Mengistu, G., Sahilu, G., Mulat, W., & Amare, E. (2023). Evaluation of native plants for their trace metals removal potential in the vicinity of Legadembi tailings dam, Southern Ethiopia. *Environmental Science and Pollution Research*, *30*, 43812–43825. https://doi.org/10.1007/s11356-023-26349-y

Miloradović, Z., Hovjecki, M., Mirković, M., Bajcetic, N., Ignjatović, I., Satric, A., Šmigić, N., Maslovarić, M., Jovanović, R., & Miočinović, J. (2023). Quality of liquid goat whey affected by heat treatment of milk and coagulation type: Case study of the Serbian market. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, *7*, 1171734. https://doi.org/10.3389/fsufs.2023.1171734

Ministerio del Ambiente. (2021). *Protocolo de Monitoreo de Efluentes de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales*. MINAM.

Ministerio del Ambiente. (2024). *Resolución Ministerial N.º 00335-2024-MINAM*. MINAM.

Mohammed, N., & Ismail, Z. (2021). Prediction of pollutants removal from cheese industry wastewater in constructed wetlands using artificial neural networks. *International Journal of Environmental Science and Technology*, *19*, 6589–6602. https://doi.org/10.1007/s13762-021-03805-1

Mufarrege, M., Luca, G., Hadad, H., & Maine, M. (2020). Exposure of *Typha domingensis* to high concentrations of multi-metal and nutrient solutions: Study of tolerance and removal efficiency. *Ecological Engineering*, *158*, 106118. https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2020.106118

Nast, M. R., Colares, G. S., Machado, Ê. L., & Rodrigues, L. R. (2022). Wastewater treatment using bamboos in constructed wetlands: Experiences and future perspectives. *Environmental Science and Pollution Research*, *29*(44), 67641–67658. https://doi.org/10.1007/s11356-022-22304-5

Navarro, F., & Torres, M. (2020). Humedales artificiales en el tratamiento de aguas residuales urbanas: una revisión de 10 años. *Ecological Engineering*, *150*, 105835. https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2020.105835

Nielsen, E., Merkel, A., Yazdi, S., & Ahrné, L. (2021). The effect of acid whey composition on the removal of calcium and lactate during electrodialysis. *International Dairy Journal*, *117*, 104985. https://doi.org/10.1016/j.idairyj.2021.104985

Nilsson, J., Liess, A., Ehde, P., & Weisner, S. (2020). Mature wetland ecosystems absorb nitrogen as efficiently regardless of the initial planting. *The Science of the Total Environment*, *716*, 137002. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137002

Nocetti, E., Maine, M. A., Hadad, H. R., Mufarrege, M. D. L. M., Di Luca, G. A., & Sánchez, G. C. (2020). Selection of macrophytes and substrates to be used in horizontal subsurface flow wetlands for the treatment of a cheese factory wastewater. *Science of The Total Environment*, *745*, 141100. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141100

Oliveira, J., Pereira, M., Duarte, V., Corrêa, F., Castro, E., & Pereira, F. (2022). Root anatomy, growth, and development of *Typha domingensis* Pers. (Typhaceae) and their relationship with cadmium absorption, accumulation, and tolerance. *Environmental Science and Pollution Research*, *29*, 19878–19889. https://doi.org/10.1007/s11356-022-18842-7

Omondi, D. O., & Navalia, A. C. (2020). Constructed wetlands in wastewater treatment and challenges of emerging resistant genes filtration and reloading. En *Inland Waters - Dynamics and Ecology*. IntechOpen. https://doi.org/10.5772/intechopen.93293

Organización Mundial de la Salud. (2006). *Guidelines for the safe use of wastewater, excreta and greywater*. WHO Press.

Parasana, N., Shah, M., & Unnarkat, A. (2022). Recent advances in the development of innovative sorbents for phosphorus removal: Perspectives and opportunities. *Environmental Science and Pollution Research*, *29*, 32442–32463. https://doi.org/10.1007/s11356-022-19662-5

Parde, D., Patwa, A., Shukla, A., Vijay, R., Killedar, D. J., & Kumar, R. (2021). A review of constructed wetland on type, treatment and technology of wastewater. *Environmental Technology & Innovation*, *21*, 101261. https://doi.org/10.1016/j.eti.2020.101261

Pineda, E., Torres-Vargas, G., & Cepeda-Fonseca, H. (2023). Physicochemical evaluation of acid whey obtained from doble crema cheese produced in Belén, Boyacá, Colombia. *Revista Colombiana de Investigaciones Agroindustriales*, *10*(2), 52–64. https://doi.org/10.23850/24220582.5819

Pinninti, R., Kasi, V., Sallangi, L., Landa, S., Rathinasamy, M., Sangamreddi, C., & Radha, P. (2021). Performance of a micro-scale *Canna indica*-based vertical flow constructed wetland under tropical conditions for domestic wastewater treatment. *International Journal of Phytoremediation*, *24*(7), 684–694. https://doi.org/10.1080/15226514.2021.1962800

Priyadharshini, M., Premalatha, M., Tauseef, S. M., Abbasi, T., & Abbasi, S. A. (2024). Removal of glyphosate in agricultural runoff using subsurface constructed wetlands in monocultures and polycultures of tropical plants. *Water, Air, & Soil Pollution*, *235*(1), 27. https://doi.org/10.1007/s11270-023-06830-4

Raju, H., Kumar, M., & Partheeban, P. (2023). Wastewater treatment in constructed wetlands by phytoremediation. *E3S Web of Conferences*, *455*, 03023. https://doi.org/10.1051/e3sconf/202345503023

Rigotti, J., Paqualini, J., & Rodrigues, L. (2021). Root growth and nutrient removal of *Typha domingensis* and *Schoenoplectus californicus* over the period of plant establishment in a constructed floating wetland. *Environmental Science and Pollution Research*, *28*(43), 61218–61228. https://doi.org/10.1007/s11356-020-11681-4

Sakurai, K., Pompei, C., Tomita, I., Santos-Neto, Á., & Silva, G. (2020). Hybrid constructed wetlands as post-treatment of blackwater: An evaluation of antibiotics removal. *Journal of Environmental Management*, *278*(2), 111552. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.111552

Sánchez-Rangel, J. C., San Martín-Hernández, C., & Cuevas-Rodríguez, G. (2023). El inocente impacto ambiental del suero de la leche. *Acta Universitaria*, *33*, e3608. https://doi.org/10.15174/au.2023.3608

Savvidou, P., Dotro, G., Campo, P., Coulon, F., & Lyu, T. (2024). Constructed wetlands as nature-based solutions in managing per-and poly-fluoroalkyl substances (PFAS): Evidence, mechanisms, and modelling. *Science of The Total Environment*, *927*, 173237. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.173237

Schierano, M. C., Panigatti, M. C., Maine, M. A., Griffa, C. A., & Boglione, R. (2020). Horizontal subsurface flow constructed wetland for tertiary treatment of dairy wastewater: Removal efficiencies and plant uptake. *Journal of Environmental Management*, *272*, 111094. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.111094

Schwammberger, P., Tondera, K., Headley, T., Borne, K., Yule, C., & Tindale, N. (2022). Monitoring the performance of constructed floating wetlands: Treatment of stormwater runoff during the construction phase of an urban residential development. *The Science of the Total Environment*, *865*, 161107. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.161107

Shukla, R., Gupta, D., & Mishra, V. (2023). Investigation of treatment potential of horizontal subsurface flow constructed wetland for the treatment of secondary treated sewage. *International Journal of Environmental Science and Technology*, *20*(9), 10103–10118. https://doi.org/10.1007/s13762-023-05108-z

Sotelo, M. Á. I., & Chang, D. J. V. (2022). Tratamiento con humedales artificiales de aguas residuales canalizadas para su uso en la Universidad Nacional José Faustino Sánchez Carrión - 2022. *Big Bang Faustiniano*, *11*(1). https://doi.org/10.51431/bbf.v11i01.751

Srivastava, P., Abbassi, R., Garaniya, V., Lewis, T., & Yadav, A. (2020). Performance of a pilot-scale horizontal subsurface flow constructed wetland coupled with a microbial fuel cell for wastewater treatment. *Journal of Water Process Engineering*, *33*, 100994. https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2019.100994

Stratigakis, N., Nazos, T., Chatzopoulou, M., Mparka, N., Spantidaki, M., Lagouvardou-Spantidaki, A., & Ghanotakis, D. (2024). Cultivation of naturally resilient *Chlorella* sp.: A bio-energetic strategy for cheese whey valorization for the production of high nutritional value biomass. *Algal Research*, *82*, 103616. https://doi.org/10.1016/j.algal.2024.103616

T, D. S., & Faisal, A. A. H. (2025). Reclamation of simulated cadmium ions-wastewater using subsurface flow constructed wetlands planted with *Canna indica* or *Typha domingensis*. *Iraqi Journal of Agricultural Sciences*, *56*(1). https://doi.org/10.36103/yvf2rk51

Tang, G., Li, B., Zhang, B., Wang, C., Zeng, G., Zheng, X., & Liu, C. (2021). Dynamics of dissolved organic matter and dissolved organic nitrogen during anaerobic/anoxic/oxic treatment processes. *Bioresource Technology*, *331*, 125026. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.125026

Torres Martínez, Q. (2020). *Evaluación de estrategias para el manejo de residuos de lactosuero en la localidad de Miahuatlán, Veracruz* [Tesis de Maestría, Universidad Veracruzana]. Repositorio Institucional UV. https://www.uv.mx/meae/files/2020/07/TESIS-QUETZALLY-TORRES-MARTINEZ-MEAE.pdf

Varma, M., Gupta, A. K., Ghosal, P. S., & Majumder, A. (2021). A review on performance of constructed wetlands in tropical and cold climate: Insights of mechanism, role of influencing factors, and system modification in low temperature. *Science of The Total Environment*, *755*(2), 142540. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.142540

Villa, P., Bresciani, M., Bolpagni, R., Pinardi, M., & Giardino, C. (2015). A rule-based approach for mapping macrophyte communities using multi-temporal aquatic vegetation indices. *Remote Sensing of Environment*, *171*, 218–233. https://doi.org/10.1016/j.rse.2015.10.020

Vymazal, J., Zhao, Y., & Mander, Ü. (2021). Recent research challenges in constructed wetlands for wastewater treatment: A review. *Ecological Engineering*, *169*, 106318. https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2021.106318

Wallace, S. D., & Nival, B. (2020). Removal of nutrients in constructed wetlands for wastewater treatment through plant harvesting: Biomass and load matter the most. *Water Environment Research*, *92*(10), 1432–1441. https://doi.org/10.1002/wer.1311

Wang, J., Zhang, G., Wang, D., Zhao, Y., Wu, L., Zheng, Y., & Liu, Q. (2025). Low-carbon hybrid constructed wetland system for rural domestic sewage: Substrate–plant–microbe synergy and annual performance. *Water*, *17*(10), 1421. https://doi.org/10.3390/w17101421

Wu, H., Wang, R., Yan, P., Wu, S., Chen, Z., Zhao, Y., Cheng, C., Hu, Z., Zhuang, L., Guo, Z., Xie, H., & Zhang, J. (2023). Constructed wetlands for pollution control. *Nature Reviews Earth & Environment*, *4*, 218–234. https://doi.org/10.1038/s43017-023-00395-z

Xu, Z., Huang, J., Chu, Z., Meng, F., Liu, J., Li, K., Chen, X., Jiang, Y., & Ban, Y. (2023). Plant and microbial communities responded to copper and/or tetracycline in *Canna indica* L. mycorrhizal-enhanced vertical flow constructed wetland microcosms. *Journal of Hazardous Materials*, *451*, 131114. https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2023.131114

Yu, G., Chen, J., Wang, G., Chen, H., Huang, J., Li, Y., Wang, W., Song, F., Yuan, Y., Wang, Q., Wang, M., Ling, T., Shu, Z., Sun, J., & Yu, Z. (2023). Recent advances in constructed wetlands methane reduction: Mechanisms and methods. *Frontiers in Microbiology*, *14*, 1106332. https://doi.org/10.3389/fmicb.2023.1106332

Zeki, S., M-Ridha, M., Mohammed, S., Abed, K., & Hasan, H. (2021). Heavy metals removal from simulated wastewater using horizontal subsurface constructed wetland. *Journal of Ecological Engineering*, *22*(8), 170–183. https://doi.org/10.12911/22998993/138869

Zouari, A., Briard-Bion, V., Gaucheron, F., Schuck, P., Gaiani, C., Triki, M., Attia, H., & Ayadi, M. (2020). Effect of pH on the physicochemical characteristics and surface chemical composition of camel and bovine whey protein powders. *Food Chemistry*, *333*, 127514. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.127514

ANEXOS

Anexo 1 Panel Fotográfico del Proceso Experimental

Figura 15

Preparación inicial y acondicionamiento de macrófitas de Canna indica.



Figura 16

Detalle del sistema de salida del efluente de una unidad experimental.



Figura 17

Monocultivo de Canna indica (T1) en operación, mostrando alto vigor vegetativo.



Figura 18

Monocultivo de Typha domingensis (T2) en operación.



Figura 19

Detalle de desarrollo de nuevo brote en Canna indica.



Figura 20

Biomasa subterránea (rizomas y raíces) de Canna indica cosechada del monocultivo (T1).



Figura 21

Biomasa subterránea de Canna indica cosechada del policultivo (T3).



Figura 22

Monocultivo de Typha domingensis (T2) antes de la cosecha.



Anexo 2 Informe de Ensayo de Laboratorio (SGS) - DBO_5 y DQO

Figura 23
Informe de ensayo

INFORME DE ENSAYO
MA2540013-AC-0

CHIRINOS PRADO JOSE ANDRE

ENV / LB-357247-002

Fecha de RecepciónSGS: 29-10-2025
Fecha de Ejecución: Del 29-10-2025 al 05-11-2025
Muestreo RealizadoPor: CLIENTE

Estación de Muestreo
E1
E2
E3
E4

"Este informe de ensayo, al estar en el marco de la acreditación del INACAL-DA, se encuentra dentro del ámbito de reconocimiento multilateral/mutuo de los miembros firmantes de IAAC e ILAC"

INFORME DE ENSAYO
MA2540013-AC-0

IDENTIFICACIÓN DE MUESTRA					E1	E2
FECHA DE MUESTREO					27/10/2025 20:00:00	27/10/2025 20:15:00
HORA DE MUESTREO						
CATEGORIA					AGUA RESIDUAL	AGUA RESIDUAL
SUB CATEGORIA					AGUA RESIDUAL INDUSTRIAL	AGUA RESIDUAL INDUSTRIAL
Parámetro	**Referencia**	**Unidad**	**LD**	**LC**	**Resultado ± Incertidumbre**	**Resultado ± Incertidumbre**
Análisis Generales						
Demanda Bioquímica de Oxígeno	EW_APHA5210B_AQ	mg/L	1.0	2.6	20.1 ±4.0 x 10^{-1}	13.5 ±4.0 x 10^{-1}
Demanda Química de Oxígeno	EW_APHA5220D_AQ	mgO2/L	1.8	4.5	71.9 ±2.7 x 10^{0}	71.1 ±2.6 x 10^{0}

IDENTIFICACIÓN DE MUESTRA					E3	E4
FECHA DE MUESTREO					27/10/2025 20:40:00	27/10/2025 20:00:00
HORA DE MUESTREO						
CATEGORIA					AGUA RESIDUAL	AGUA RESIDUAL
SUB CATEGORIA					AGUA RESIDUAL INDUSTRIAL	AGUA RESIDUAL INDUSTRIAL
Parámetro	**Referencia**	**Unidad**	**LD**	**LC**	**Resultado ± Incertidumbre**	**Resultado ± Incertidumbre**
Análisis Generales						
Demanda Bioquímica de Oxígeno	EW_APHA5210B_AQ	mg/L	1.0	2.6	9.1 ±3.9 x 10^{-1}	40,687.5
Demanda Química de Oxígeno	EW_APHA5220D_AQ	mgO2/L	1.8	4.5	64.5 ±2.4 x 10^{0}	97,792.3

CONTROL DE CALIDAD

LC: Límite de cuantificación
MB: Blanco del proceso.
LCS %Recovery: Porcentaje de recuperación del patrón de proceso.
MS %Recovery: Porcentaje de recuperación de la muestra adicionada.
MSD %RPD: Diferencia Porcentual Relativa entre los duplicados de la muestra adicionada.
Dup %RPD: Diferencia Porcentual Relativa entre los duplicados del proceso.

Parámetro	Unidad	LC	MB	DUP %RPD 1%	LCS %Recovery 95 - 95% 97%	MS %Recovery	MSD %RPD
Demanda Bioquímica de Oxígeno	mgO2/L	2.6 4.5	<2.6 <4.5				
Demanda Química de Oxígeno						99%	0%

REFERENCIAS DE MÉTODOS DE ENSAYO

	Sede	Parámetro	Método de Ensayo
EW_APHA5210B_AQ	Arequipa	Demanda Bioquímica de Oxígeno	SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 5210 B, 24th Ed. 2023 Biochemical Oxygen Demand (BOD). 5-Day BOD test
EW_APHA5220D_AQ	Arequipa	Demanda Química de Oxígeno	SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 5220 D, 24th Ed. 2023 Chemical Oxygen Demand, Closed Reflux, Colorimetric Method

NOTAS

- El reporte de tiempo se realiza en el sistema horario de 24 horas.
- Las muestras recibidas cumplen con las condiciones necesarias para la realización de los análisis solicitados.
- La incertidumbre expandida de medición reportada se ha obtenido multiplicando la incertidumbre estándar combinada por el factor de cobertura k=2, de modo que la probabilidad de cobertura corresponde aproximadamente a un nivel de confianza del 95%.

"Este informe de ensayo, al estar en el marco de la acreditación del INACAL-DA, se encuentra dentro del ámbito de reconocimiento multilateral/mutuo de los miembros firmantes de IAAC e ILAC"

Este documento es emitido bajo las Condiciones Generales de Servicio de SGS del Perú S.A.C, las cuales se encuentran descritas en la página http://www.sgs.pe/es-ES/Terms-and-Conditions.aspx. Son especialmente importantes las disposiciones sobre limitación de responsabilidad, pago de indemnizaciones y jurisdicción definidas en dichas Condiciones Generales de Servicio, su alteración o su uso indebido constituye un delito contra la fe pública y se regula por las disposiciones civiles y penales de la materia; queda prohibida la reproducción total o parcial, salvo autorización escrita de SGS del Perú S.A.C. Los resultados del informe de ensayo sólo son válidos para la(s) muestra(s) ensayadas; no deben ser utilizados como una certificación de conformidad con normas de producto o como certificado del sistema de calidad de la entidad que lo produce. La compañía no es responsable del origen o fuente de la cual las muestras han sido tomadas y de la información proporcionada por el cliente.

Anexo 3 Base de Datos de Parámetros Fisicoquímicos

Semana	Punto de Muestreo	Parámetro	Lectura 1	Lectura 2	Lectura 3	Promedio ($\bar{x}$)	Desv. Est. (SD)
Sem. 6	**Afluente**	pH (adim.)	6.36	6.34	6.35	6.35	0.01
(Fase 1)		Turbidez (NTU)	1,008	1,003	1,004	1,005.0	2.65
		TDS (mg/L)	2,846	2,844	2,845	2,845.0	1.00
	Monocultivo T1: Canna indica	pH (adim.)	6.28	6.27	6.26	6.27	0.01
		Turbidez (NTU)	13.8	13.2	13.5	13.5	0.30
		TDS (mg/L)	507.2	506.1	505.9	506.4	0.70
	Monocultivo T2: Typha domingensis	pH (adim.)	6.28	6.27	6.26	6.27	0.01
		Turbidez (NTU)	35.1	33.8	33.7	34.2	0.78
		TDS (mg/L)	534.5	532.8	532.3	533.2	1.15
	T3: Policultivo	pH (adim.)	6.29	6.28	6.27	6.28	0.01
		Turbidez (NTU)	7.5	7.1	7.0	7.2	0.26
		TDS (mg/L)	494.2	493.1	493.2	493.5	0.61
---	**---**	---	---	---	---	---	---
Sem. 8	**Afluente**	pH (adim.)	6.32	6.30	6.31	6.31	0.01
(Fin de Fase 1 / Transición)		Turbidez (NTU)	1,003	1,001	1,002	1,002.0	1.00
	Monocultivo T1: Canna indica	pH (adim.)	6.26	6.25	6.24	6.25	0.01
		TDS (mg/L)	506.1	505.2	505.2	505.5	0.52
	Monocultivo T2: Typha domingensis	pH (adim.)	6.26	6.25	6.24	6.25	0.01
		TDS (mg/L)	533.4	532.5	532.5	532.8	0.52
	T3: Policultivo	pH (adim.)	6.27	6.26	6.25	6.26	0.01
		TDS (mg/L)	492.9	492.0	492.0	492.3	0.52
---	**---**	---	---	---	---	---	---
Sem. 10	**Afluente**	pH (adim.)	6.34	6.32	6.33	6.33	0.01
(Fase 2)	**Monocultivo T1: Canna indica**	pH (adim.)	6.22	6.21	6.20	6.21	0.01
		Turbidez (NTU)	73.1	72.4	72.0	72.5	0.56
	Monocultivo T2: Typha domingensis	pH (adim.)	5.88	5.85	5.82	5.85	0.03
		Turbidez (NTU)	83.5	82.0	81.4	82.3	1.08
	T3: Policultivo	pH (adim.)	6.22	6.21	6.20	6.21	0.01
		Turbidez (NTU)	20.8	20.4	20.0	20.4	0.40
---	**---**	---	---	---	---	---	---
Sem. 12	**Afluente**	pH (adim.)	6.31	6.30	6.29	6.30	0.01
(Fase 2)		Turbidez (NTU)	999.5	997.2	995.8	997.5	1.87

	Monocultivo T1: Canna indica	pH (adim.)	6.26	6.25	6.24	6.25	0.01
		Turbidez (NTU)	72.0	71.1	70.5	71.2	0.75
	Monocultivo T2: Typha domingensis	pH (adim.)	5.75	5.72	5.69	5.72	0.03
		Turbidez (NTU)	81.6	80.5	79.4	80.5	1.10
	T3: Policultivo	pH (adim.)	6.24	6.23	6.22	6.23	0.01
		Turbidez (NTU)	19.1	18.5	17.9	18.5	0.60

Anexo 4 Registro de Datos Biométricos (Crecimiento Vegetativo)

Semana	**Tratamiento**	**Planta 1 (P_1)**	**Planta 2 (P_2)**	**Planta 3 (P_3)**	**Planta 4 (P_4)**	**Promedio ($\bar{x}$)**	**Desv. Est. (SD)**
Sem. 0	**T_1: Canna indica**	25.0	25.5	24.8	25.5	25.2	0.35
(Inicial)							
	T_2: Typha domingensis	30.1	30.8	30.4	30.7	30.5	0.31
	T_3: Policultivo (Canna)	25.4	25.6	—	—	25.5	0.14
	T_3: Policultivo (Typha)	—	—	30.0	30.4	30.2	0.28
---	**---**	---	---	---	---	---	---
Sem. 4	**T_1: Canna indica**	45.1	46.2	45.5	46.4	45.8	0.59
	T_2: Typha domingensis	48.2	49.1	48.5	49.0	48.7	0.42
	T_3: Policultivo (Canna)	41.8	42.4	—	—	42.1	0.42
	T_3: Policultivo (Typha)	—	—	46.1	46.9	46.5	0.57
---	**---**	---	---	---	---	---	---
Sem. 8	**T_1: Canna indica**	67.5	69.1	68.0	68.6	68.3	0.69
	T_2: Typha domingensis	59.5	60.8	59.8	60.3	60.1	0.56
	T_3: Policultivo (Canna)	61.0	62.0	—	—	61.5	0.71
	T_3: Policultivo (Typha)	—	—	57.5	58.5	58.0	0.71
---	**---**	---	---	---	---	---	---
Sem. 12	**T_1: Canna indica**	84.8	86.5	85.1	86.0	85.6	0.78
(Final)							
	T_2: Typha domingensis	64.9	66.2	65.1	65.4	65.4	0.57
	T_3: Policultivo (Canna)	76.5	77.3	—	—	76.9	0.57
	T_3: Policultivo (Typha)	—	—	63.0	63.6	63.3	0.42

Anexo 5 Verificación de Biomasa Total Individual (g) Seca Individual (Post-Cosecha)

Tratamiento	Ejemplar	Biomasa Aérea (g)	Biomasa Subterránea (g)	Total Planta (g)	$\bar{x}$ Total	SD Total
Monocultivo T1: Canna indica	P_1	92.5	118.2	210.7		
Canna indica	P_2	95.8	121.5	217.3	218.9	9.38
	P_3	100.2	128.4	228.6		
	P_4	96.9	122.1	219.0		
Monocultivo T2: Typha domingensis	P_1	75.2	64.1	139.3		
Typha domingensis	P_2	78.4	67.8	146.2	144.1	5.67
	P_3	80.5	69.2	149.7		
	P_4	76.6	64.4	141.0		
T3: Policultivo	P_1(C)	91.2	112.5	203.7		
Mixto	P_2(C)	94.0	117.6	211.6	172.4	38.30
	P_3 (T)	73.1	61.5	134.6		
	P_4 (T)	75.7	63.7	139.4		

Anexo 6 Validación Estadística y Análisis de Varianza

6.1. Eficiencia de Remoción de Turbidez

Tabla 16

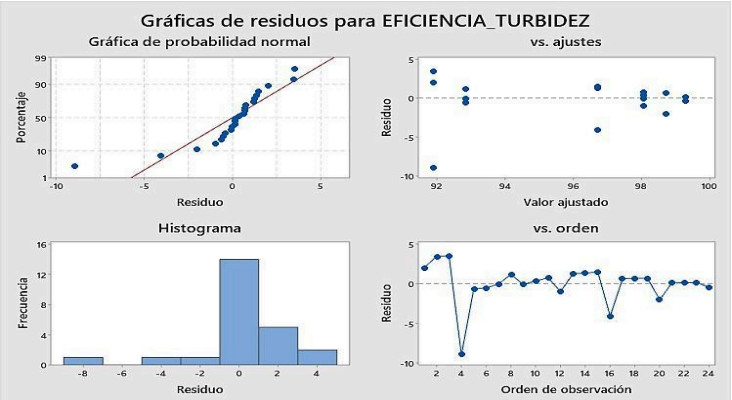
Análisis De Varianza Para Eficiencia De Turbidez

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
TRH	1	94.45	94.45	12.11	0.00
TRATAMIENTO	2	79.49	39.75	5.10	0.02
TRH*TRATAMIENTO	2	23.47	11.73	1.50	0.25
Error	18	140.35	7.80		
Total	23	337.76			

Nota. Elaboración Propia – Minitab

Figura 24

Gráficas De Residuos Para Eficiencia De Turbidez



Nota. Elaboración Propia – Minitab

6.2. Eficiencia de Remoción de TDS

Tabla 17

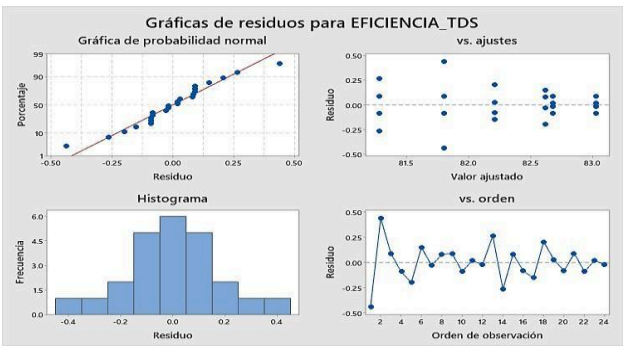
Análisis De Varianza Para Eficiencia De TDS

Fuente	**GL**	**SC Ajust.**	**MC Ajust.**	**Valor F**	**Valor p**
TRH	1	1.10	1.10	26.82	0.00
TRATAMIENTO	2	7.20	3.60	88.06	0.00
TRH*TRATAMIENTO	2	0.03	0.02	0.39	0.68
Error	18	0.74	0.04		
Total	23	9.07			

Nota. Elaboración Propia - Minitab

Figura 25

Gráficas De Residuos Para Eficiencia De TDS



Nota. Elaboración Propia – Minitab

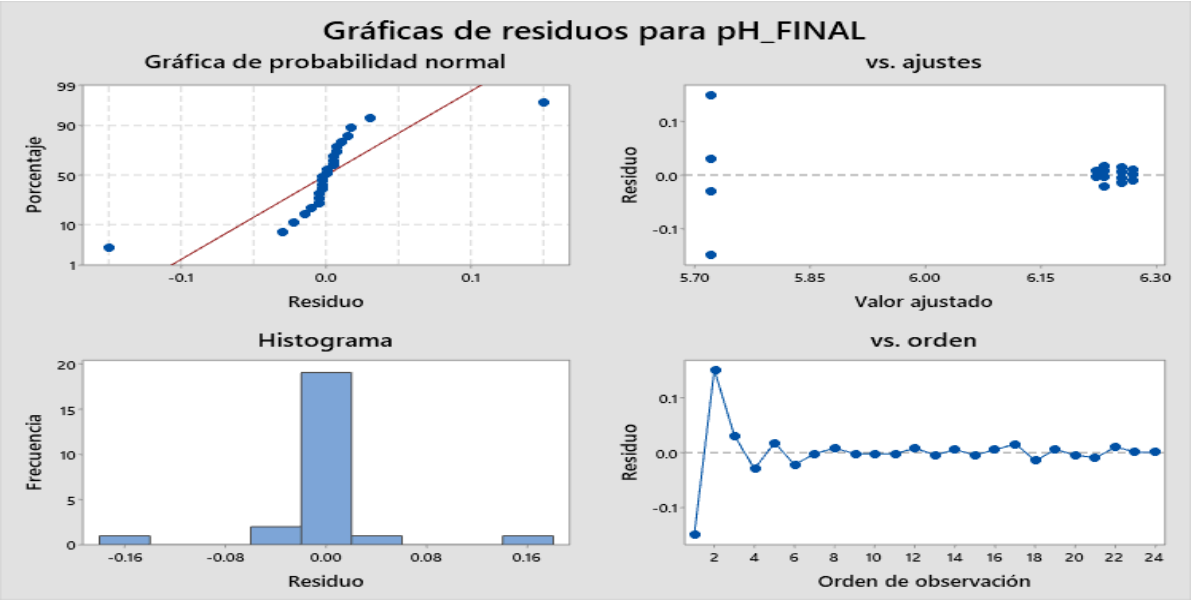
6.3. pH Final del Efluente

Tabla 18
Análisis De Varianza Para Ph Final

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
TRH	1	0.24	0.24	90.47	0.00
TRATAMIENTO	2	0.35	0.18	65.56	0.00
TRH*TRATAMIENTO	2	0.33	0.17	61.91	0.00
Error	18	0.05	0.00		
Total	23	0.10			

Nota. *Elaboración Propia – Minitab*

Figura 26
Gráficas De Residuos Para pH Final



Nota. *Elaboración Propia - Minitab*

6.4. Oxígeno Disuelto (OD) Final

Tabla 19
Análisis De Varianza Para OD Final

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
TRH	1	0.09	0.10	39.55	0.00
TRATAMIENTO	2	0.02	0.01	4.06	0.03
TRH*TRATAMIENTO	2	0.00	0.00	0.88	0.43
Error	18	0.04	0.00		
Total	23	0.15			

Nota. *Elaboración Propia – Minitab*

Figura 27
Gráficas De Residuos Para OD Final



Nota. *Elaboración Propia - Minitab*

Anexo 7 Escala de Estimación Visual de Vigor Fitosanitario y Salud Vegetal de Kadlec & Wallace (2008)

Tabla 20
Escala de Estimación Visual de Vigor Fitosanitario (Índice de Vigor Visual - IVV)

Nivel (Puntaje)	Estado Fitosanitario	Daño Foliar (% Clorosis / Necrosis)	Criterios Biofísicos y Sintomatología Observable
5	**Óptimo**	< 5% del área foliar	Follaje verde intenso con turgencia plena; sin presencia de necrosis; emisión activa de nuevos vástagos; sistema radicular sano y firme.
4	**Bueno**	5% – 15% del área foliar	Turgencia conservada; clorosis leve limitada a los bordes o puntas de hojas basales antiguas; brotación regular; desarrollo radicular funcional.
3	**Regular**	15% – 30% del área foliar	Clorosis moderada en láminas foliares intermedias; necrosis focalizada en ápices; reducción en la elongación de tallos; rizomas con oscurecimiento superficial.
2	**Deficiente**	30% – 50% del área foliar	Clorosis severa y generalizada; necrosis marginal extendida; pérdida de turgencia evidente (marchitamiento incipiente); detención de brotes nuevos.
1	**Crítico / Colapso**	> 50% del follaje	Necrosis severa generalizada en la mayor parte de la planta; desecación o putrefacción de tallos; pudrición y asfixia radicular; muerte del espécimen.

Nota. Adaptado de Kadlec, R. H., & Wallace, S. (2008). Treatment Wetlands (2da ed.). CRC Press. Las evaluaciones se efectuaron mediante inspección ocular directa por triplicado en cada campaña de muestreo quincenal.