

UNIVERSIDAD PERUANA UNIÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA

Escuela Profesional de ingeniería Ambiental



**Depuración de aguas residuales domésticas en altas altitudes,
con humedales artificiales de flujo subsuperficial horizontal con
juncos en condiciones de invernadero**

Tesis para obtener el Título Profesional de ingeniero Ambiental

Autores:

Cesar Gabriel Condori Ccollanqui

Luzmila Dionicia Huanaco Quincho

Asesor:

Mtro. Juan Eduardo Vigo Rivera

Juliaca, marzo de 2024

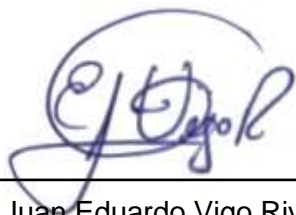
DECLARACIÓN JURADA DE ORIGINALIDAD DE TESIS

Yo Mtro. Juan Eduardo Vigo Rivera, docente de la Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental, de la Universidad Peruana Unión.

DECLARO:

Que la presente investigación titulada: “**DEPURACIÓN DE AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS EN ALTAS ALTITUDES, CON HUMEDALES ARTIFICIALES DE FLUJO SUBSUPERFICIAL HORIZONTAL CON JUNCOS EN CONDICIONES DE INVERNADERO**” de los autores **Cesar Gabriel Condori Ccollanqui** y **Luzmila Dionicia Huanaco Quincho** tiene un índice de similitud de 5% verificable en el informe del programa Turnitin, y fue realizada en la Universidad Peruana Unión bajo mi dirección.

En tal sentido asumo la responsabilidad que corresponde ante cualquier falsedad u omisión de los documentos como de la información aportada, firmo la presente declaración en la ciudad de Juliaca, a los 18 días del mes de marzo del año 2024.



Mtro. Juan Eduardo Vigo Rivera

Asesor

ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS



En Puno, Juliaca, Villa Chullunquiari, a 18 día(s) del mes de marzo del año 2024 siendo las 12:00 horas, se reunieron los miembros del jurado en la Universidad Peruana Unión Campus Juliaca, bajo la dirección del (de la) presidente(a):

Ing. Enrique Mamani Lucha el (la) secretario(a): Ing. Nancy Lurana Rafael y los demás miembros: Msc. Jeayda Abigail Londeri Burgos - Ing. Verónica Naydi Pari Mamani y el (la) asesor(a) Mtro. Juan Eduardo Vigo Rivera con el propósito de administrar el acto académico de sustentación de la tesis titulado:

"Deposición de aguas residuales domésticas en altas altitudes, con humedales artificiales de flujo subsuperficial horizontal con Juncos en condiciones de invernadero" del(los) bachiller(es): a) Lesar Gabriel Londeri Lullonqui b) Luzmila Dionisia Huanaco Quincho c)

conducente a la obtención del título profesional de:

Ingeniero Ambiental

El Presidente inició el acto académico de sustentación invitando al (a la) / a (los) (las) candidato(a)s hacer uso del tiempo determinado para su exposición. Concluida la exposición, el Presidente invitó a los demás miembros del jurado a efectuar las preguntas, y aclaraciones pertinentes, las cuales fueron absueltas por al (a la) / a (los) (las) candidato(a)s. Luego, se produjo un receso para las deliberaciones y la emisión del dictamen del jurado.

Posteriormente, el jurado procedió a dejar constancia escrita sobre la evaluación en la presente acta, con el dictamen siguiente:

Bachiller (a): Lesar Gabriel Londeri Lullonqui

CALIFICACIÓN	ESCALAS			Mérito
	Vigesimal	Literal	Cualitativa	
<u>Aprobado</u>	<u>17</u>	<u>B+</u>	<u>Muy Bueno</u>	<u>Sobresaliente</u>

Bachiller (b): Luzmila Dionisia Huanaco Quincho

CALIFICACIÓN	ESCALAS			Mérito
	Vigesimal	Literal	Cualitativa	
<u>Aprobado</u>	<u>17</u>	<u>B+</u>	<u>Muy Bueno</u>	<u>Sobresaliente</u>

Bachiller (c):

CALIFICACIÓN	ESCALAS			Mérito
	Vigesimal	Literal	Cualitativa	

(*) Ver parte posterior

Finalmente, el Presidente del jurado invitó al (a la) / a (los) (las) candidato(a)s a ponerse de pie, para recibir la evaluación final y concluir el acto académico de sustentación procediéndose a registrar las firmas respectivas.

[Firma]
Presidente/a

[Firma]
Asesor/a

[Firma]
Bachiller (a)

[Firma]
Miembro

[Firma]
Bachiller (b)

[Firma]
Secretario/a

[Firma]
Miembro

[Firma]
Bachiller (c)

AGRADECIMIENTO

Cesar Gabriel Condori Ccollanqui

A Dios por ser mi guía y fortaleza en todo este proceso.

A mis padres, Víctor Condori Apaza y Vicentina Ccollanqui Barrantes, por su amor incondicional y apoyo constante, base de todos mis logros.

Luzmila Dionicia Huanaco Quincho

A Dios por ser mi guía y fortaleza en todo este proceso.

A mis padres, Hipólito Huanaco Morocco y Rosalía Quincho Hanco, por su amor incondicional y respaldo permanente, que han sido el cimiento de todos mis logros.

INDICE

AGRADECIMIENTO	¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
AGRADECIMIENTO	IV
RESUMEN	6
ABSTRACT	7
1. INTRODUCCIÓN	8
2. MATERIALES Y MÉTODOS	9
2.1. CARACTERIZACIÓN DEL AGUA RESIDUAL.....	9
2.2. IMPLEMENTACIÓN DE LOS HUMEDALES ARTIFICIALES.....	10
2.3. PUESTA EN MARCHA Y MONITOREO DE LOS HUMEDALES	13
2.4. BALANCE DE ENERGÍA	15
2.5. MARCO NORMATIVO PERUANO E INTERNACIONAL.....	15
3.0. RESULTADOS Y DISCUSIONES.....	16
3.1. CARACTERÍSTICAS DEL AGUA RESIDUAL DOMÉSTICA	16
3.2. <i>Remoción de la carga orgánica, del nitrógeno y fósforo</i>	20
3.3. <i>Comportamiento de la temperatura en los humedales</i>	23
3.4. <i>Calor ganado</i>	24
3.5. <i>Cumplimiento del marco normativo</i>	26
4.0. CONCLUSIONES.....	32
6. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS	34
7. ANEXOS.....	40

Depuración de aguas residuales domésticas en altas altitudes, con humedales artificiales de flujo subsuperficial horizontal con Juncos en condiciones de invernadero

Cesar Gabriel Condori Ccollanqui^a, Luzmila Dionicia Huanaco Quincho^a

^a*Universidad Peruana Unión, Facultad de Ingeniería y Arquitectura, EP. Ingeniería Ambiental, Juliaca, Perú*

RESUMEN

La descarga no tratada de aguas residuales domésticas causa una contaminación significativa en cuerpos de agua superficial en el Perú. Este estudio evalúa la eficacia de humedales artificiales de flujo subsuperficial horizontal, plantados con *Juncus brunneus*, operando bajo condiciones de invernadero en el altiplano peruano, como alternativa de tratamiento sostenible. Se implementaron seis unidades experimentales, tres en invernadero y tres en condiciones externas, con un soporte de capas de grava gruesa, grava media y arena. Durante 90 días, se monitorearon parámetros clave (DBO₅, DQO, N-total, P-total y SST) y las temperaturas del ambiente, el invernadero y el agua del humedal cada 15 días. Los resultados mostraron que el sistema en invernadero mantuvo temperaturas estables superiores a 22 °C, lo cual optimizó la actividad microbiana, alcanzando picos de calor de 93.8 MJ al mediodía. Esto contribuyó a altas tasas de remoción: 91.2% para DQO, 91.76% para DBO₅, 88.04% para P-total, 96.57% para N-total y 97.31% para SST. El cumplimiento normativo también fue destacado, ya que los niveles finales en invernadero se mantuvieron dentro de los límites establecidos por normativas nacionales e internacionales, incluyendo la rigurosa Directiva Europea. Estos hallazgos demuestran que los humedales con invernadero en entornos de gran altitud no solo mejoran la eficiencia de depuración de aguas residuales, sino que también ofrecen una solución energéticamente eficiente y ambientalmente sostenible.

Palabras clave: condiciones altiplánicas, depuración de aguas residuales humedales artificiales, juncos, temperatura.

Domestic wastewater treatment at high altitudes, with artificial wetlands of horizontal subsurface flow with reeds under greenhouse conditions

ABSTRACT

The untreated discharge of domestic wastewater causes significant contamination in surface water bodies in Peru. This study evaluates the efficiency of horizontal subsurface flow constructed wetlands, planted with *Juncus brunneus* and operated under greenhouse conditions in the Peruvian highlands, as a sustainable treatment alternative. Six experimental units were implemented, three in a greenhouse and three in outdoor conditions, using a support medium of coarse gravel, medium gravel, and sand. Over a 90-day period, key parameters (BOD₅, COD, total nitrogen, total phosphorus, and TSS) and temperatures of the environment, greenhouse, and wetland water were monitored every 15 days. The results showed that the greenhouse system maintained stable temperatures above 22 °C, optimizing microbial activity and reaching heat peaks of 93.8 MJ at noon. This contributed to high removal rates: 91.2% for COD, 91.76% for BOD₅, 88.04% for total phosphorus, 96.57% for total nitrogen, and 97.31% for TSS. Regulatory compliance was also notable, as final levels in the greenhouse remained within the limits established by national and international standards, including the stringent European Directive. These findings demonstrate that greenhouse-enhanced wetlands in high-altitude environments not only improve wastewater purification efficiency but also offer an energy-efficient and environmentally sustainable solution.

Key words: altiplanic conditions, Constructed wetlands, reeds, wastewater treatment, temperature.

1. INTRODUCCIÓN

Actualmente, la mayoría de las actividades humanas generan aguas residuales que no son tratadas, constituyendo uno de los principales problemas en los países subdesarrollados. La descarga de aguas sin tratamiento afecta la salud de las personas, el clima y los ecosistemas en general (WWAP, 2019). En el Perú, la contaminación de las aguas superficiales es un problema grave debido a la descarga indiscriminada de desechos no tratados, el crecimiento poblacional y la erosión de las orillas de los ríos (MINAM, 2018). Además, la cantidad y calidad de este recurso viene disminuyendo a causa de estos factores, resultando en altos contenidos de nutrientes, materia orgánica y partículas coloidales, responsables de la turbidez del agua superficial y el deterioro de la calidad del agua (Walker et al., 2019).

En el departamento de Puno, las aguas residuales contienen grandes cantidades de coliformes fecales que se vierten sin cumplir con el Decreto Supremo N.º 003-2010-MINAM, el cual establece los Límites Máximos Permisibles para los efluentes de plantas de tratamiento de aguas residuales domésticas o municipales. Esto afecta la salud de las personas y contamina los cuerpos de agua (GORE-Puno, 2012; SUNASS, 2022). La implementación de humedales artificiales se ha demostrado eficaz en diversas investigaciones. Inga Sotelo y Vélez Chang (2022) señalan que los humedales artificiales son una opción reconocida y recomendada para el tratamiento de aguas residuales, produciendo efluentes de buena calidad con bajos costos de inversión, operación y mantenimiento, y sin necesidad de personal altamente capacitado. Pero presentan problemas como el bajo rendimiento en climas fríos, la vulnerabilidad de las plantas acuáticas, los grandes requerimientos de superficie de terreno y la gestión inadecuada. Por lo que necesitan aislamiento térmico, para mitigar estos problemas y mejorar la eficiencia (Liu et al., 2024).

En Durango, México, se realizó un estudio utilizando humedales artificiales de flujo subsuperficial bajo condiciones de invernadero para tratar aguas residuales domésticas con plantas acuáticas como *Schoenoplectus americanus*, *S. tabernaemontani* y *Eleocharis densa*. Los resultados mostraron reducciones del 96 al 98% en amoníaco, del 99 al 100% en fosfato, y del 98.5 al 98.7% en coliformes fecales en un período de 9 meses (Pérez-López et al., 2009). De manera similar, en Etiopía, se utilizó un humedal subsuperficial de flujo horizontal utilizó la especie de junco (*Scirpus validus*) para la depuración de aguas residuales domésticas, logrando eficiencias de remoción del 76% para DBO₅, 62% para DQO y 75% para SST (Haddis et al., 2020).

En la ciudad de Santa Rosa, Jicamarca-Lima, Perú, se implementó humedales artificiales flujo subsuperficial horizontal, con *Schoenoplectus americanus* (junco), obteniendo una reducción de DBO del 96.77% y de DQO del 96.90% (Guerra Marin, 2022). Igualmente, Pérez Ruiz y Bustamante Dávila (2019) utilizaron junco (*Typha sp.*) y vetiver (*Chrysopogon zizanioides*) en un humedal artificial para tratar aguas residuales municipales en el distrito de Saposoa. A los 51 días, la remoción de DBO fue del 78% para el junco y del 89% para el vetiver. En cuanto a la DQO, la eficiencia de remoción fue del 78% para el junco y del 90% para el vetiver. La remoción de SST fue del 89% para el junco y del 94% para el vetiver.

Por otro lado, el estudio experimental sobre humedal artificial en el tratamiento de las aguas residuales domésticas de la 3ra brigada de fuerzas especiales, se llevó a cabo en la base contraterrorista de Rioja como una alternativa de tratamiento para las aguas residuales. La planta herbácea juncos, utilizada en el humedal, facilitó la eliminación de contaminantes gracias a su capacidad para crear comunidades bacterianas en sus raíces. La eficiencia de remoción de DBO₅ alcanzó el 98.15% y de SST el 89.13%. Los resultados se compararon con los límites máximos permitidos (Rubio Chinguel y Montenegro Quiroz, 2018).

Dada la eficacia comprobada de los sistemas de humedales artificiales en diferentes contextos, esta investigación propone la depuración de aguas residuales domésticas en altas altitudes utilizando humedales artificiales con la especie juncos, bajo condiciones de invernadero en el Distrito de Calapuja, Puno-Perú. Este enfoque es económicamente viable y socioambientalmente sostenible.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Caracterización del agua residual

Para determinar la biodegradabilidad de las aguas residuales a tratar, se utilizó la relación DBO₅/DQO, siguiendo la metodología descrita por Metcalf y Eddy (1995). La razón de biodegradabilidad se calculó mediante la Ecuación 1:

$$\text{Ratio} = \text{DBO}_5/\text{DQO}$$

(1)

La clasificación de la razón de biodegradabilidad es la siguiente: una relación DBO_5/DQO mayor a 0.4 indica que el agua residual es muy biodegradable, una relación entre 0.2 y 0.4 sugiere que el agua es biodegradable, y una relación menor a 0.2 indica que el agua es poco biodegradable (Metcalf y Eddy, 2014). Esta clasificación es fundamental para identificar el grado de tratamiento necesario y evaluar la eficiencia de los procesos de tratamiento biológico aplicados. La relación DBO_5/DQO proporciona una medida útil para comprender la capacidad de descomposición biológica de los contaminantes presentes en las aguas residuales.

2.2. Implementación de los humedales artificiales

La investigación se llevó a cabo en el distrito de Calapuja, Puno, Perú, a una altitud de 3825 metros sobre el nivel del mar, utilizando humedales artificiales diseñados basándose en el Manual de Humedales Artificiales de la ONU-HABITAT (2008) y el Manual de Depuración de Aguas Residuales mediante Humedales Artificiales de Bolivia (Delgadillo et al., 2010). Se emplearon seis unidades experimentales de humedales artificiales de flujo subsuperficial horizontal. Tres de estos humedales se implementaron en espacios abiertos en condiciones altiplánicas, con una temperatura promedio de 8.72 °C, mientras que los otros tres se instalaron en condiciones de invernadero, con una temperatura promedio de 16.58 °C. Las dimensiones y el esquema de montaje de estas unidades se presentan en la figura 3.

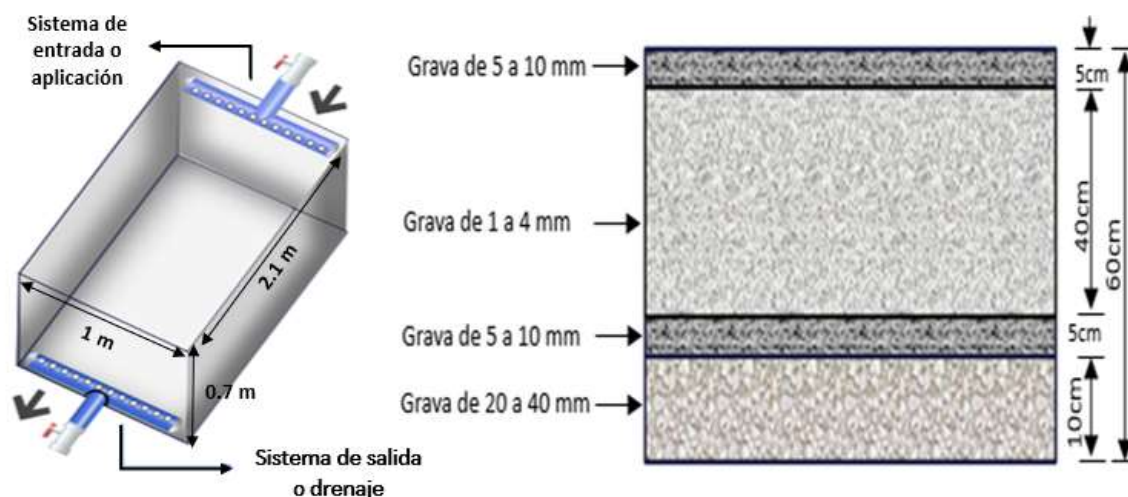
Las aguas residuales fueron recolectadas en una fosa séptica de un solo compartimento, con un volumen de 2 metros cúbicos (1 x 1.4 x 1.5 m de ancho, largo y profundidad), utilizada como tanque de sedimentación. Este tanque reduce la cantidad de sólidos en suspensión y la carga orgánica (Delgadillo et al., 2010). Su función principal fue distribuir los suministros a las seis unidades experimentales mediante flujo por gravedad a través de tuberías de PVC de 1 pulgada. Las dimensiones de los humedales fueron 2.1 x 1.0 x 0.7 m de largo, ancho y profundidad. Para la impermeabilización de los humedales se utilizó una membrana doble de plástico, sobre la cual se colocó una capa de arena nivelada para evitar perforaciones durante la colocación y las posteriores actividades de construcción. En cuanto a los sistemas de drenaje, se empleó una tubería principal de PVC de una pulgada de diámetro de 90 cm de largo y múltiples orificios de salida. Estos sistemas cuentan con llaves de paso para controlar el caudal.

El medio de soporte utilizado fue grava de diferentes dimensiones, siguiendo las recomendaciones del manual de humedales de ONU-HABITAT. Se empleó grava gruesa de 20 a 40 mm en la base con una altura de 10 cm para actuar como lecho filtrante para el sistema de recolección o drenaje. Se utilizó grava media para separar los sustratos, con una medida de 5 a 10 mm y una altura de 5 cm. El sustrato principal fue arena o grava fina de 1 a 4 mm, con una altura de 40 cm (ver figura 1).

Estos detalles de diseño y montaje son esenciales para la eficacia de los humedales artificiales en el tratamiento de aguas residuales, proporcionando un entorno adecuado para la filtración y el tratamiento biológico de los contaminantes presentes.

Figura 1

Disposición del sustrato para los humedales



Los humedales fueron plantados con la especie *Juncus brunneus*, conocida localmente como “ututu” o “totora cora”. Esta planta se distribuye en el Perú en suelos húmedos, a altitudes entre 3550 y 4100 metros sobre el nivel del mar (Tovar, 1990). Según Aponte (2009), el junco está adaptado a estanques poco profundos, pudiendo comportarse tanto como planta acuática flotante como sumergida. Además, estas plantas son capaces de absorber componentes metálicos del agua y, durante la descomposición de sus raíces, liberan sustancias orgánicas que contribuyen al proceso de desnitrificación, mejorando así el funcionamiento de los humedales.

Los juncos utilizados en este estudio fueron seleccionados de humedales naturales de la zona y trasplantados en un sustrato arenoso. Para asegurar su adaptación y

arraigamiento, las plantas fueron alimentadas regularmente con agua residual antes de ser trasplantadas a los humedales artificiales. Con el fin de evitar variaciones climáticas, las plantas fueron cubiertas con una capa de plástico durante cuatro meses. Se plantaron ocho juncos de manera uniforme en cada uno de los humedales, con una separación de 40 cm entre ellos, debido a su excelente capacidad de arraigo.

Figura 2

Plantas de *Juncus brunneus* seleccionadas y preparadas para el trasplante en humedales artificiales

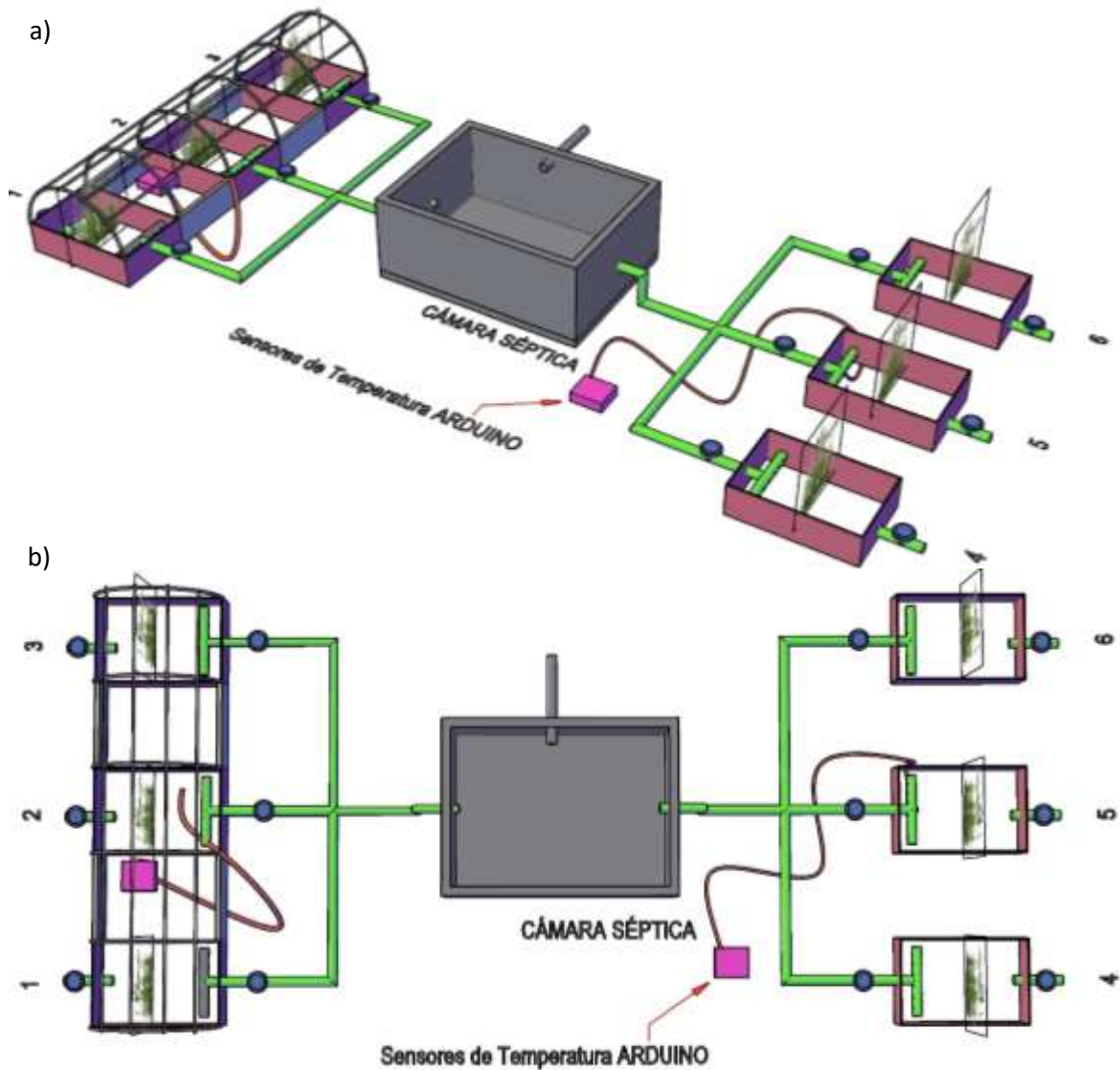


Se construyó un invernadero tipo túnel diseñado para pequeñas superficies (ver Figura 3). Este tipo de invernadero presenta varias ventajas, entre ellas la capacidad de controlar los factores climáticos, una gran resistencia a fuertes vientos y una excelente distribución de la luminosidad en su interior gracias a su forma ovalada (Lesur González, 2018). Se recomiendan la orientación de los invernaderos en el sentido Este-Oeste para maximizar la exposición solar (Lenschak y Iglesias, 2019).

El invernadero construido tiene dimensiones de 3 x 6 x 2 m de ancho, largo y altura. Los soportes ovalados se fabricaron con tubos de PVC de media pulgada, mientras que los soportes principales de la entrada y la base se realizaron con cintas de madera. Finalmente, se cubrió el invernadero con Agrofilm para asegurar una protección adecuada. Dentro del invernadero, se instalaron tres humedales, como se muestra en la Figura 3.

Figura 3

Esquema de instalación de humedales artificiales en invernadero tipo túnel y fotografía del invernadero construido. a) Vista Isométrica, y b) Vista de Planta.



2.3. Puesta en Marcha y Monitoreo de los Humedales

Para la puesta en marcha de los humedales, primero se realizó la medición del caudal del agua residual utilizando el método volumétrico. Se optó por trabajar con un caudal empírico de 0.0024 L/s para evitar la saturación de agua en el humedal, y se empleó un sistema de flujo continuo. Además, el tiempo de retención hidráulica de cada tratamiento fue de 90 días. Durante este período, se realizaron monitoreos en siete ocasiones, con intervalos de 15 días, en los que se monitorizaron parámetros fisicoquímicos como DBO₅, DQO, SST, N total y P total. Las muestras fueron analizadas en el laboratorio de Monitoreo

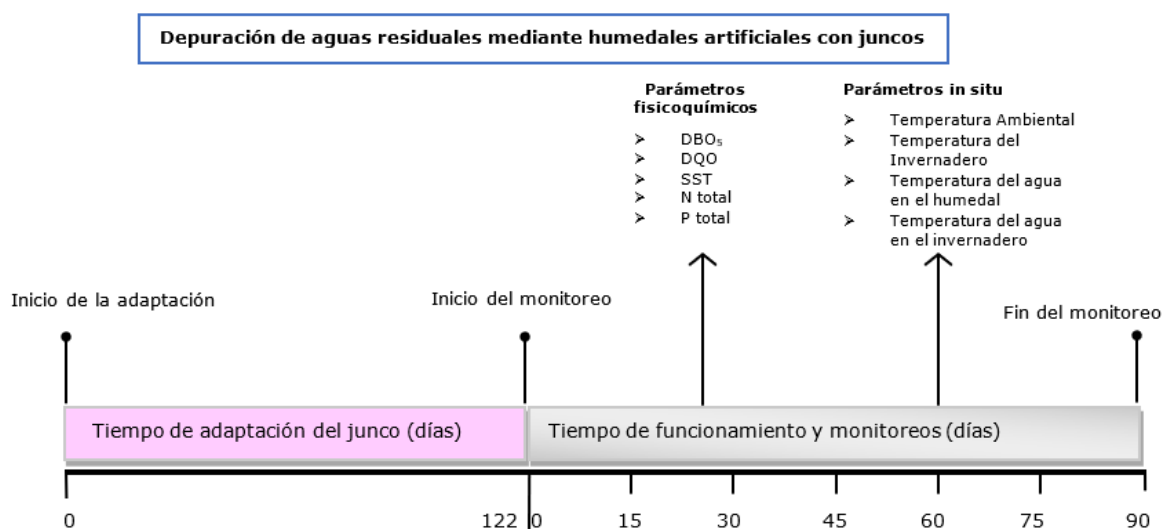
Ambiental de la Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental de la Universidad Peruana Unión – Filial Juliaca.

Asimismo, se llevaron a cabo monitoreos diarios de los parámetros *in situ*, tales como temperatura ambiental, temperatura del invernadero y temperatura del agua del humedal. Para el monitoreo de temperaturas, se utilizaron dos sensores TH SHT31 en plataforma Arduino, los cuales permitieron leer la temperatura en grados Celsius con un rango de trabajo de -40° a 125°C y una precisión de 0.2°C. Además, el sensor de humedad tuvo un rango de trabajo de 0 a 100% RH. Paralelamente, se instalaron dos sensores de Temperatura DS18B20 para líquidos, que fueron sondas a prueba de agua cubiertas de acero inoxidable, lo cual previno la oxidación de la sonda. El rango de medición de estos sensores fue de -55° C hasta 125°C, con una precisión de ±0.5°C, y la longitud del cable de las sondas fue de 2 metros.

Finalmente, la lectura de datos de los sensores de temperatura ambiental y del agua del humedal se realizó en intervalos de 10 minutos, posteriormente promediados cada media hora, durante las 24 horas de los 90 días de ejecución del proyecto. Esta estrategia de monitoreo permitió obtener datos precisos y continuos sobre las condiciones operativas de los humedales, asegurando así la eficacia del sistema y la calidad de los resultados obtenidos.

Figura 4

Línea de tiempo del Proceso de depuración del agua residual mediante Humedales Artificiales con Juncos



2.4. Balance de energía

Con el objetivo de cuantificar la energía captada por el invernadero, se realizó un balance energético utilizando los datos de temperatura ambiente y la temperatura dentro del invernadero. Para calcular el balance de temperatura del sistema (invernadero), se aplicaron las fórmulas especificadas en las Ecuaciones 2 y 3 (Çengel y Bolos, 2015). Con el fin de conocer la cuantificación de la energía captada por el invernadero, se realizó el balance de energía, teniendo los datos de temperatura ambiente e invernadero. Ecuación 2 y 3.

$$T_{\text{entrada}} - T_{\text{salida}} = T_{\text{sistema}} \quad (2)$$

Dónde: “T” es igual a temperatura °C, T_{entrada} y T_{salida} son la transferencia neta de temperatura, T_{sistema} es el cambio de energías interna.

$$T_{\text{del invernadero}} - T_{\text{del medio ambiente}} = T_{\text{ganado}} \quad (3)$$

2.5. Marco normativo peruano e internacional

La Tabla 1 muestra los LMP de diferentes normas, incluye la norma peruana y de normas internacionales.

Tabla 1

Límites Máximos Permisibles para efluentes de plantas de tratamiento de aguas residuales en Perú, México, Colombia y la Unión Europea

Parámetros	Decreto Supremo N° 003-2010-MINAM.	NORMA Oficial Mexicana NOM-001-SEMARNAT-2021	Resolución 631 de 2015-Colombia MINAMBIENTE	Directiva 91/271/CEE del Consejo – Unión Europea	Resolución 883-Colombia
DBO ₅ (mg/L)	100	-	90	25	200
DQO (mg/L)	200	210	180	125	100
SST (mg/L)	150	84	90	35	100
Nitrógeno total (mg/L)	-	35	-	15	-
Fosforo total (mg/L)	-	21	-	2	0.4

3.0. RESULTADOS Y DISCUSIONES

3.1. CARACTERÍSTICAS DEL AGUA RESIDUAL DOMÉSTICA

La Tabla 2 presenta los resultados de los tratamientos de aguas residuales en dos condiciones: con invernadero (Tratamientos 1, 2 y 3) y sin invernadero (Tratamientos 4, 5 y 6) a lo largo de un período de 90 días. Los parámetros evaluados incluyen DBO₅ (Demanda Bioquímica de Oxígeno a 5 días), DQO (Demanda Química de Oxígeno), N-Total (Nitrógeno Total), P-Total (Fósforo Total) y SST (Sólidos Suspendidos Totales). Cada parámetro se mide en mg/L.

Tabla 2

Efecto del Tratamiento de humedales con y sin Invernadero en la Calidad del Agua Residual Doméstica (DBO₅, DQO, N-Total, P-Total y SST)

	N° de tratamiento	Tiempo días	DBO ₅ mg/L	DQO mg/L	N-Total mg/L	P - Total mg/L	SST mg/L	pH
Tratamientos con Invernadero	1	0	142.0	286.0	33.0	54.0	95.4	7
		15	49.5	102.8	10.0	15.7	4.1	7.2
		30	25.5	90.3	10.0	11.4	2.6	7.4
		45	13.6	21.5	0.7	3.6	2.6	7.4
		60	17.3	61.5	9.0	6.1	2.9	7.6
		75	30.5	109.0	9.3	7.7	4.7	7.4
		90	21.1	52.0	9.8	5.9	3.2	7.3
	2	0	142.0	286.0	33.0	54.0	95.4	7
		15	53.5	106.5	10.0	15.7	5.5	7.2
		30	28.5	100.3	9.5	7.2	3.8	7.3
		45	10.9	24.0	1.3	6.9	5.6	7
		60	75.3	75.3	8.7	7.4	3.1	7.4
		75	41.0	116.5	9.7	7.0	3.7	7.9
		90	22.9	60.0	8.9	7.4	2.4	7.3
	3	0	142.0	286.0	33.0	54.0	95.4	7
		15	56.5	142.8	11.0	15.6	4.4	7.2
		30	27.5	106.5	9.8	9.2	4.1	7.4
		45	10.6	31.5	1.4	9.5	4.1	8.1
		60	15.4	59.0	8.5	5.8	2.7	8
		75	52.7	114.0	10.0	7.2	4.1	7.9
		90	23.1	56.0	8.5	6.3	2.1	7.3
Tratamientos sin Invernadero	4	0	142.0	286.0	33.0	54.0	95.4	7
		15	53.0	181.5	10.0	22.7	22.3	7.2
		30	52.7	137.8	10.2	10.8	13.3	7.3
		45	14.8	35.0	1.5	11.2	7.6	7
		60	39.2	130.3	11.5	12.6	6.2	7.8
		75	88.7	149.0	13.0	13.4	12.3	8.1
		90	23.2	79.0	10.8	12.3	13.3	7.5
	5	0	142.0	286.0	33.0	54.0	95.4	7
		15	82.0	194.0	14.0	20.5	30.4	7.4

	30	40.7	164.0	11.0	12.8	11.2	7.3
	45	18.8	31.3	1.1	11.3	10.4	7
	60	25.2	80.5	10.4	9.5	7.2	7
	75	90.0	127.8	12.5	10.1	11.5	7.8
	90	28.0	80.0	11.6	13.8	10.2	7.6
	0	142.0	286.0	33.0	54.0	95.4	7.3
	15	117.0	245.3	13.0	23.8	44.8	7.2
	30	61.3	140.3	10.5	15.4	9.5	7.4
6	45	16.7	36.0	1.2	10.9	15.0	7
	60	31.8	96.5	9.6	8.3	6.4	8
	75	71.0	119.0	12.6	11.0	9.8	7.6
	90	29.1	69.0	10.2	9.7	16.2	7.5

La Tabla 2 muestra que el pH inicial fue de 7.6, indicando un nivel medio que son valores típicos de aguas residuales urbanas (Henze, 1992) . Los valores de DBO₅ (142 mg/L) y DQO (286 mg/L) corresponden a una concentración media, mientras que los SST (95.4 mg/L) representan una concentración baja (Metcalf y Eddy, 1995b). El N-total (33 mg/L) se clasifica como un valor medio para aguas residuales urbanas (Sánchez-Ramírez et al., 2017) . Por otro lado, el P-total (54 mg/L) indica un alto contenido de nutrientes, típico de aguas residuales municipales (Henze y Comeau, 2011). Para evaluar la biodegradabilidad de las aguas residuales, se utilizó la relación DBO₅/DQO. El cálculo de esta relación es de 0.49, que de acuerdo con la clasificación de biodegradabilidad, un valor de 0.49 indica que el agua residual es muy biodegradable.

La DBO₅ y la DQO son indicadores clave de la carga orgánica en el agua. Los resultados muestran una disminución de la DBO₅ y DQO en los tratamientos con invernadero. La DBO₅ se reduce de 142 a 13.6 mg/L en 45 días para el tratamiento 1. Estos resultados son consistentes con estudios que demuestran que los humedales con invernadero pueden mejorar la eficiencia de eliminación de materia orgánica debido a la optimización de las condiciones ambientales para la actividad microbológica (Kadlec y Wallace, 2008; Vymazal, 2019).

Los niveles de nitrógeno total (N-Total) y fósforo total (P-Total) son críticos para controlar la eutrofización en cuerpos de agua. La tabla 3 muestra una reducción de estos parámetros en los tratamientos con invernadero. El N-Total disminuye de 33 mg/L a 0.7 mg/L en 45 días en el tratamiento 1. Esta reducción se alinea con la literatura, que destaca la capacidad de los humedales para promover procesos de nitrificación y desnitrificación (Vymazal y Kröpfelová, 2008; Kivaisi, 2001).

La reducción de los sólidos suspendidos totales (SST) también es significativa en los tratamientos con invernadero. Los SST disminuyen de 95.4 mg/L a 2.6 mg/L en 45 días en el tratamiento 1. Los humedales son efectivos en la sedimentación y filtración de sólidos suspendidos, lo que coincide con estos hallazgos (Cooper, 2007; Brix, 1994).

Aunque los tratamientos sin invernadero también muestran una reducción en la DBO₅ y DQO, esta disminución es menos pronunciada. Esto puede atribuirse a la falta de condiciones controladas, como la temperatura y la humedad, que afectan la eficiencia de los procesos biológicos (Vymazal, 2005). La reducción de N-Total y P-Total es más variable en los tratamientos sin invernadero. Por ejemplo, el tratamiento 4 muestra una reducción de N-Total a 1.5 mg/L en 45 días, mientras que otros tratamientos tienen valores más altos. La eficiencia variable puede deberse a factores ambientales no controlados (Gikas y Tsihrintzis, 2012).

Los SST en los tratamientos sin invernadero muestran una reducción menos eficiente comparada con los tratamientos con invernadero. Esto subraya la importancia de las condiciones ambientales controladas para optimizar la eliminación de sólidos suspendidos (Moshiri, 1993). Los sistemas de humedales con invernadero demuestran una mayor eficiencia en la reducción de DBO₅, DQO, N-Total, P-Total y SST. Estos resultados apoyan la adopción de tecnologías de tratamiento controladas para mejorar la gestión de aguas residuales domésticas (Kadlec y Wallace, 2008; Vymazal, 2019).

La implementación de humedales con invernadero es recomendable en áreas con condiciones climáticas extremas, ya que proporcionan un entorno controlado que mejora la eficiencia del tratamiento. Estos sistemas pueden combinarse con otras tecnologías para maximizar la calidad del efluente tratado (Brix, 1994; Kivaisi, 2001).

Tabla 3

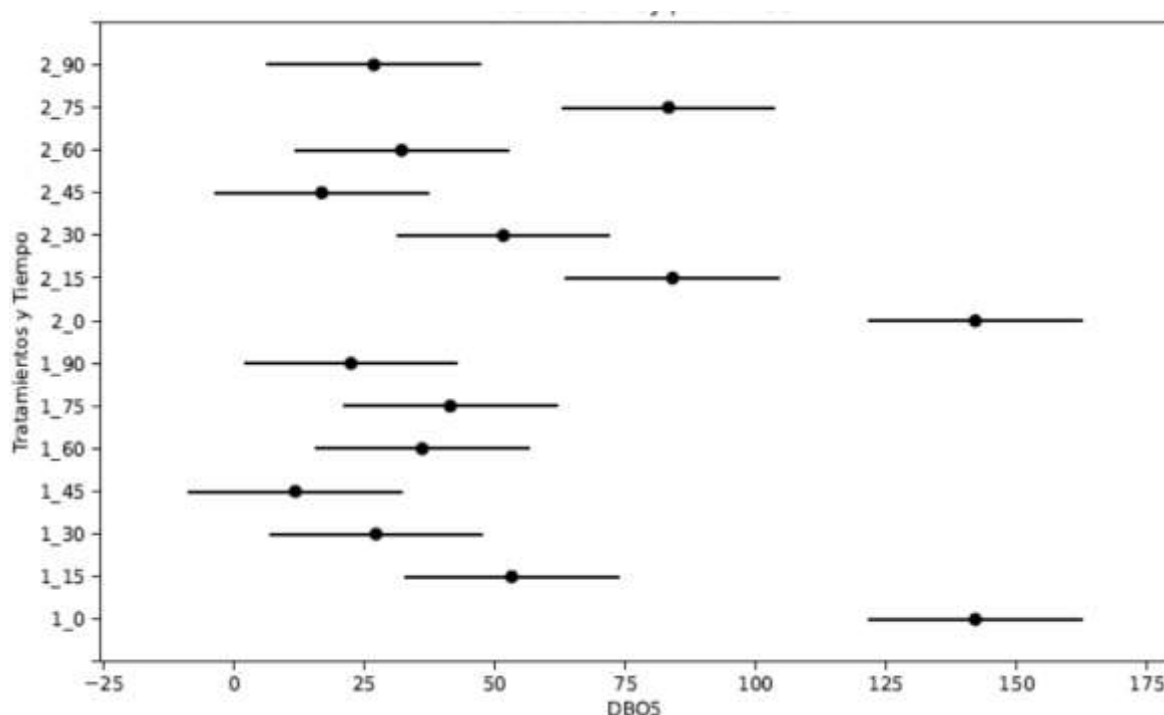
Análisis de Varianza (ANOVA) para los Factores de Tratamiento, Tiempo y su Interacción para la DBO

Combinaciones	sum_sq	df	F	p -valor
C(Tratamiento)	2255.73	1	12.10	0.002
C(Tiempo)	66474.90	6	59.41	0.000
C(Tratamiento):C(Tiempo)	2779.14	6	2.48	0.047
Residual	5221.65	28		

La Tabla 3 presenta el análisis de varianza, el cual revela que tanto el Tratamiento (con invernadero y sin invernadero) como el Tiempo (0, 15, 30, 45, 60, 75 y 90 días) tienen efectos significativos sobre la variable de respuesta (DBO). Además, se observa una interacción significativa entre Tratamiento y Tiempo, lo que sugiere que el efecto del Tratamiento varía en función del nivel de Tiempo. Esta interacción significativa resalta la importancia de interpretar los efectos del Tratamiento considerando los diferentes niveles de Tiempo.

Figura 5

Comparación de la Demanda Bioquímica de Oxígeno mediante la prueba de Tukey: Efecto de los Tratamientos y Tiempos en las Diferencias Medias de DBO



La Figura 5 de la prueba de Tukey para la DBO presenta diferencias medias en DBO entre combinaciones específicas de tratamientos y tiempos, con intervalos de confianza al 95% alrededor de cada punto que permiten evaluar la significancia estadística de estas diferencias. Los puntos más a la izquierda representan combinaciones que logran menores niveles de DBO, indicando una mayor eficacia en la reducción de carga orgánica. En particular, las combinaciones "1_0", "1_15", "1_30" y "1_45" muestran valores inferiores de DBO en comparación con combinaciones como "2_75" o "2_90", que aparecen a la

derecha de la gráfica. Los intervalos de confianza que no cruzan el valor cero indican diferencias estadísticamente significativas en DBO, reforzando la efectividad de combinaciones como "1_15" y "1_0" para disminuir la DBO. Estas combinaciones a la izquierda del eje reflejan las condiciones de tratamiento y tiempo más adecuadas para optimizar la eliminación de carga orgánica, ofreciendo una base sólida para el desarrollo de protocolos de tratamiento ambientalmente sostenibles.

La variabilidad observada entre las combinaciones resalta la importancia de una selección cuidadosa de tratamientos y tiempos para lograr niveles bajos de DBO. Las combinaciones a la derecha de la gráfica, con valores más altos de DBO, son menos efectivas en la reducción de carga orgánica, lo que subraya el valor de esta metodología para identificar estrategias de tratamiento óptimas. La figura permite identificar de manera visual las combinaciones de tratamiento y tiempo que son más efectivas para reducir la DBO. Esto es esencial para la toma de decisiones en la implementación de protocolos de tratamiento que busquen la máxima eficiencia en la disminución de la carga orgánica, promoviendo prácticas de tratamiento de aguas más sostenibles y con menor impacto ambiental.

3.2. Remoción de la carga orgánica, del nitrógeno y fósforo

La tabla 4 presenta los porcentajes de remoción de diversos parámetros de calidad del agua (DBO₅, DQO, SST, Nitrógeno Total y Fósforo Total) a lo largo de diferentes períodos de tiempo, tanto con invernadero como sin invernadero. A continuación, se ofrece una interpretación detallada de los datos, complementada con citas de revistas de alto impacto para contextualizar y fortalecer la interpretación.

Tabla 4

Remoción de los parámetros de la DBO₅, DQO, SST, N-Total y P- Total

Parámetros	Días							Media
	0	15	30	45	60	75	90	%
DBO ₅ (Con invernadero)	0.0%	62.6%	80.9%	91.8%	88.4%	70.8%	84.2%	79.8%
DBO ₅ (Sin Invernadero)	0.0%	40.8%	63.7%	88.2%	77.4%	41.4%	81.1%	65.4%
DQO (Con invernadero)	0.0%	59.0%	65.4%	91.0%	77.2%	60.4%	80.4%	72.2%
DQO (Sin Invernadero)	0.0%	27.7%	48.5%	88.1%	64.2%	53.9%	73.4%	59.3%
SST (Con invernadero)	0.0%	95.1%	96.3%	95.7%	97.0%	95.6%	97.3%	96.2%

SST (Sin Invernadero)	0.0%	65.9%	88.1%	88.5%	93.1%	88.3%	86.1%	85.0%
Nitrógeno total (Con invernadero)	0.0%	68.7%	70.4%	96.6%	73.5%	70.7%	72.5%	75.4%
Nitrógeno total (Sin Invernadero)	0.0%	62.6%	68.0%	96.2%	68.2%	61.5%	67.1%	70.6%
Fosforo total (Con invernadero)	0.0%	71.0%	82.8%	87.6%	88.0%	86.5%	87.9%	84.0%
Fosforo total (Sin Invernadero)	0.0%	58.6%	75.9%	79.4%	81.2%	78.7%	77.9%	75.3%

La remoción de Demanda Bioquímica de Oxígeno a 5 días revela una diferencia significativa en eficiencia entre los sistemas con y sin invernadero. En presencia de un invernadero, la remoción de DBO₅ comienza en 0% y alcanza un máximo de 91.8% a los 45 días, con una media de 79.8%, destacando la alta eficiencia en la degradación de materia orgánica biodegradable. Este rendimiento se atribuye al control de temperatura y humedad dentro del invernadero, que optimiza la actividad microbiana, como lo demuestran estudios recientes (Zhu et al., 2021; Kumari y Das, 2023). En contraste, sin invernadero, la remoción es significativamente menor, comenzando también en 0% pero alcanzando solo un máximo de 88.2% a los 45 días, con una media de 65.4%. La ausencia de condiciones controladas reduce la eficiencia del tratamiento, lo cual coincide con investigaciones previas que señalan que las fluctuaciones ambientales pueden limitar la actividad microbiana y, por ende, la remoción de DBO₅ (Valkama et al., 2017).

La remoción de la Demanda Química de Oxígeno (DQO) varía significativamente entre los sistemas con y sin invernadero. Con un invernadero, la remoción alcanza un máximo de 91.0% a los 45 días y una media de 72.2%, indicando que la mayor estabilidad de las condiciones operativas mejora la oxidación de materia orgánica (Bui et al., 2016). Sin invernadero, los valores de remoción son menores, con un pico de 88.1% a los 45 días y una media de 59.3%. La ausencia de control ambiental reduce la eficiencia de la remoción de materia orgánica no biodegradable, consistente con estudios que muestran que los tratamientos biológicos son menos eficientes bajo condiciones no controladas (Villegas et al., 2016; Coday et al., 2014).

La remoción de Sólidos Suspendidos Totales (SST) es significativamente más eficiente en sistemas con invernadero comparados con aquellos sin invernadero. En presencia de un invernadero, la remoción de SST es consistentemente alta, alcanzando un máximo de 97.3% a los 90 días y una media de 96.2%, lo que refleja una alta capacidad de retención de partículas sólidas, probablemente debido a la sedimentación mejorada bajo condiciones controladas (Daigger y Boltz, 2011; Costa, 2024). En contraste, sin invernadero, la remoción de SST es más variable, alcanzando un máximo de 93.1% a los

60 días y una media de 85.0%. Aunque sigue siendo eficiente, esta remoción es inferior a la observada con invernadero, corroborando estudios que destacan la importancia de la estabilización de las condiciones para una sedimentación eficiente (Lambiasi et al., 2024; Wang et al., 2024).

La remoción de Nitrógeno Total y Fósforo Total presenta diferencias notables entre los sistemas con y sin invernadero en humedales construidos. En presencia de un invernadero, la remoción de nitrógeno total alcanza un máximo de 96.6% a los 45 días, con una media de 75.4%, favoreciendo la desnitrificación, un proceso altamente sensible a la temperatura y la disponibilidad de oxígeno. Esto es apoyado por investigaciones que muestran que las condiciones estables de temperatura en humedales construidos mejoran significativamente la desnitrificación (Yang et al., 2024). Sin invernadero, la remoción de nitrógeno también es alta, con un máximo de 96.2% a los 45 días y una media de 70.6%, aunque inferior, lo que coincide con hallazgos que sugieren que las variaciones de temperatura y oxígeno afectan negativamente la eficiencia de la desnitrificación (Xu et al., 2019).

Para el fósforo total, la remoción con invernadero es elevada, alcanzando un máximo de 88.0% a los 60 días y una media de 84.0%, mejorando la precipitación y adsorción de fósforo, crítico para la prevención de la eutrofización. Estudios han demostrado que la eficiencia en la remoción de fósforo mejora significativamente bajo condiciones controladas (Diao et al., 2018). Sin embargo, sin invernadero, la remoción es menor, con un pico de 81.2% a los 60 días y una media de 75.3%, indicando que la ausencia de condiciones controladas limita la eficiencia del proceso, lo cual es respaldado por estudios que destacan la importancia de las condiciones controladas para la eliminación efectiva de fósforo (Yang et al., 2024).

Los datos indican que el uso de un invernadero mejora significativamente la eficiencia de remoción para todos los parámetros estudiados. Esto se debe a las condiciones controladas de temperatura y humedad, que favorecen las reacciones biológicas y químicas, como lo demuestran múltiples estudios en el campo. Por ejemplo, un estudio en *Water Research* encontró que los sistemas de invernadero optimizan la actividad microbiana, lo que mejora la degradación de contaminantes orgánicos (Costa, 2024). Además, investigaciones han demostrado que la estabilidad de las condiciones operativas en humedales construidos con invernadero promueve la desnitrificación y la adsorción de fósforo, incrementando la eficiencia general del tratamiento (Xu et al., 2019).

Los mayores porcentajes de remoción se observan generalmente alrededor de los 45 días, lo que sugiere un tiempo óptimo de retención para la mayoría de los parámetros, alineado con investigaciones previas que subrayan la importancia de tiempos adecuados de retención para la optimización de los procesos de tratamiento (Kadlec y Wallace, 2008).

Por otra parte Aponte (2009), evaluó la relación fisiológica entre crecimiento, floración y los nutrientes del junco, en su estudio se puede apreciar el papel fundamental del nitrato en el crecimiento, siendo el mejor indicador del crecimiento. Este proceso se vio facilitado por la alta concentración de nitratos en el sustrato en el que crecen los juncos. El fosfato, por el contrario, no tuvo un efecto muy notable sobre el crecimiento de esta planta, pero puede actuar sinérgicamente con los nitratos. En cuanto a la producción de biomasa, el nitrato incrementó la producción de biomasa seca y fresca, mientras que el fosfato no tuvo ese efecto. Siendo el nitrato un nutriente esencial para el desarrollo de esta especie.

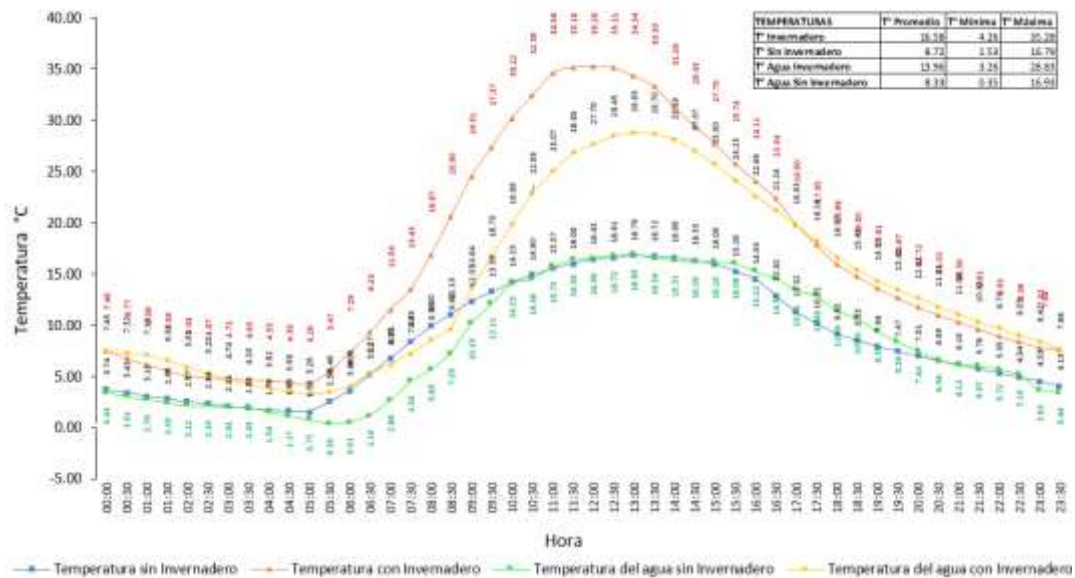
En el estudio se logró una remoción de 91.76% de DBO_5 en la remoción de aguas residuales de DBO_5 en condiciones de invernadero, teniendo un buen porcentaje en remoción a los 90 días. También (Bustamante Dávila y Pérez Ruiz, 2019), obtuvo un resultado favorable de remoción de (DBO_5) del agua residual municipal con la especie fitorremediadora (junco) en humedales artificiales, teniendo un valor de 77.7% a los 51 días. Mena Ayala (2022) estudió la remoción de aguas residuales domésticas utilizando 3 especies fitorremediadoras (carricillo, juncos y jacinto de agua); en el que se tuvo al junco como 2do lugar en capacidad de remoción de DBO_5 con un porcentaje del 70% de remoción.

3.3. Comportamiento de la temperatura en los humedales

La figura 6 muestra el comportamiento de las temperaturas media horaria diaria del invernadero y la temperatura ambiental, estas temperaturas fueron medidas con sensores arduino en el periodo de operación (90 días) y la temperatura ambiental fue obtenida y comparada con la estación meteorológica más cercana Pucará.

Figura 6

Comportamiento de las temperaturas media horaria diaria del invernadero y temperatura ambiente.



La figura 6 muestra el comportamiento de las temperaturas del agua del humedal media horaria diaria del invernadero y la temperatura ambiental, estas temperaturas fueron medidas con sensores Arduino para líquidos mediante sondas a prueba de agua cubiertas de acero inoxidable, en el periodo de operación (90 días). El comportamiento de las temperaturas medio horarias diarias del invernadero y sin invernadero se monitorearon los 90 días, teniendo un mayor valor a horas 11:00 am – 01:00pm. De acuerdo Alianza por el Agua (2008) las temperaturas de los tratamientos aerobios las bacterias aerobias se mantienen viables en el intervalo 10 a 40 ° C; las temperaturas promedio de los tratamientos están por encima de los 22 °C. En condiciones de invernadero, se lograron tasas de remoción 96.57 % para N-total, mostrando que la temperatura favoreció significativamente en la depuración de aguas residuales domésticas y al crecimiento del junco en entornos de gran altitud.

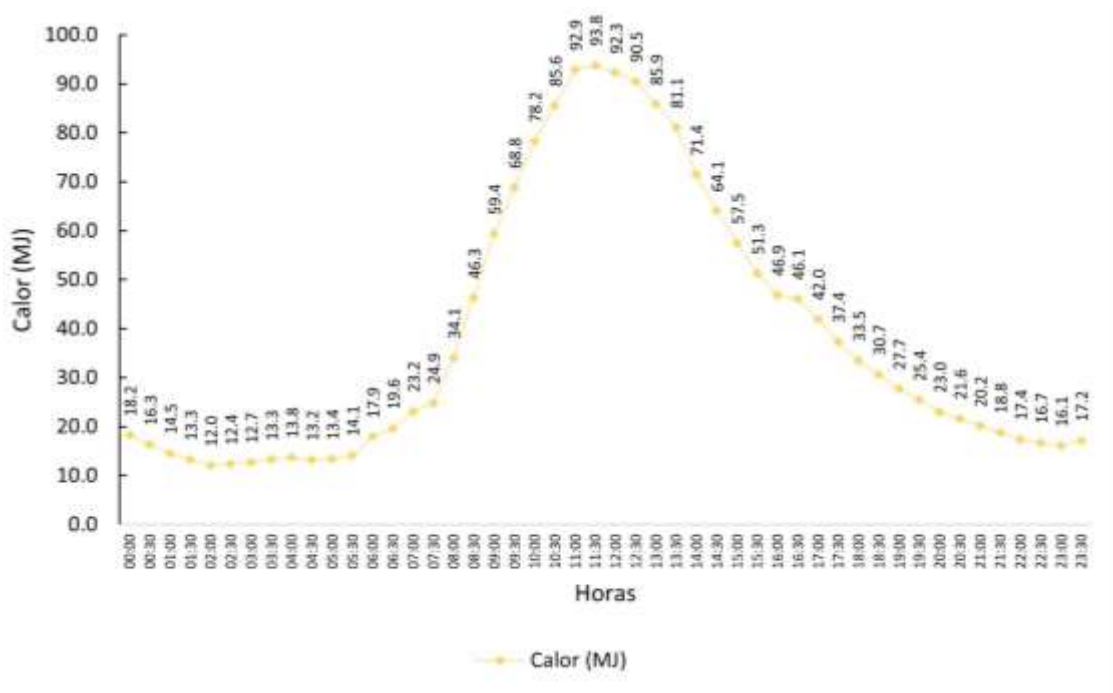
3.4. Calor ganado

Para obtener el calor ganado por el sistema empleado se aplicó la fórmula de $Q=CM\Delta T$ la Q significa calor añadido, “C” es calor específico del agua, “M” es la masa, y “ ΔT ” es el cambio de la temperatura, empleando el caudal utilizado en los humedales, el tiempo y la masa y las temperaturas de ambos sistemas (invernadero y la temperatura sin

invernadero) y obtenemos un resultado obtenido en calor expresado en mega Joule "MJ" por 24 horas ver figura 7.

Figura 7

Calor ganado con el invernadero por horas expresado en MJ.



Se registraron las temperaturas promedio horarias diarias en el interior del invernadero y en condiciones sin invernadero, utilizando sensores Arduino durante el periodo de operación de 90 días. La temperatura ambiental fue obtenida y comparada con los datos de la estación meteorológica más cercana, ubicada en Pucará. Los tratamientos realizados en el invernadero presentaron temperaturas que se encuentran por debajo de las normativas establecidas, resultados similares a los reportados en el estudio de (Guerra Marin, 2022)), quien evaluó la eficacia de un humedal artificial con *Schoenoplectus americanus* (junco) para la depuración de aguas residuales domésticas en Santa Rosa – Jicamarca. De manera análoga, Bedoya Escobar (2014) evaluaron la capacidad de *Schoenoplectus californicus* ("junco") para la fitorremediación de agua contaminada con arsénico en un entorno experimental controlado en Tacna, Perú. La investigación emplea un diseño en fases de adaptación, nutrición e intoxicación con concentraciones de arsénico de hasta 1 mg/L, y utiliza el método de Gutzeit para cuantificar el arsénico residual. Los resultados indican que el *Schoenoplectus californicus* es eficaz en la reducción de arsénico

en agua, posicionándose como una alternativa prometedora para la remediación de aguas contaminadas y contribuyendo a soluciones sostenibles frente a la contaminación por metales pesados.

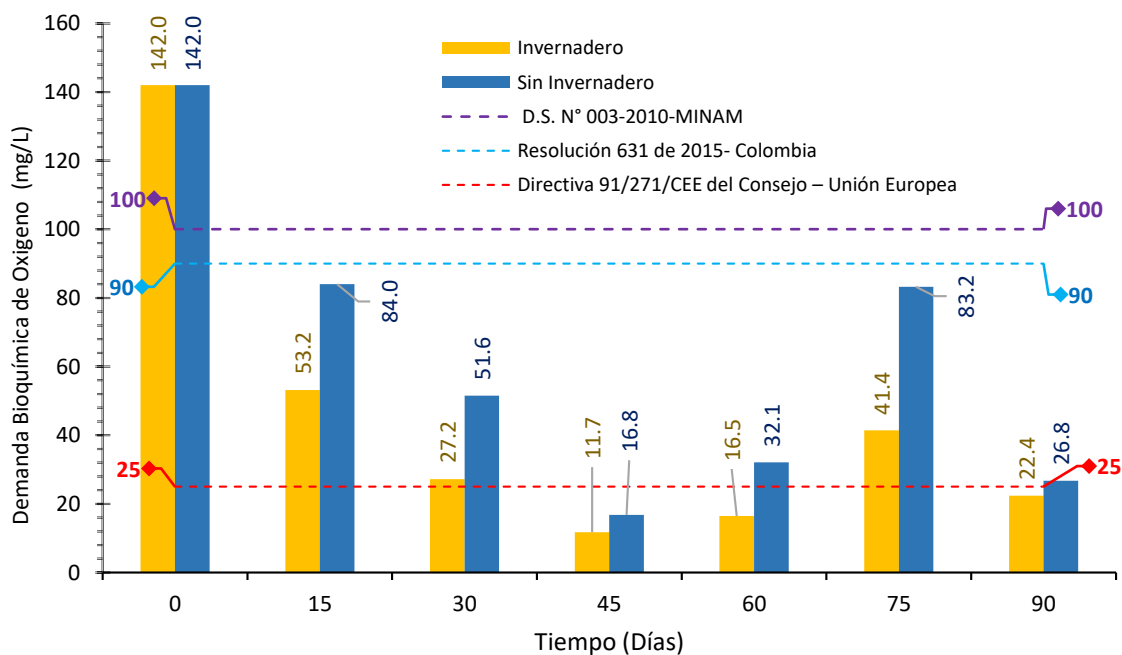
La figura 7 muestra la variación de energía calorífica a lo largo de un ciclo de 24 horas, en un entorno cerrado de un invernadero. Se observa un patrón de aumento progresivo del calor a partir de las 07:00 horas, alcanzando su punto máximo alrededor de las 12:30 horas, con un valor cercano a 93.8 MJ. Posteriormente, el nivel de energía calorífica desciende gradualmente, manteniendo una forma simétrica de curva hasta llegar a su nivel mínimo de aproximadamente 17 MJ hacia la medianoche. Este perfil de calor es típico de sistemas que responden a la radiación solar a lo largo del día, con un incremento matutino que culmina en el mediodía debido a la mayor intensidad de radiación, y una disminución vespertina mientras el ambiente se enfría. El análisis de este tipo de datos es esencial para optimizar el uso de energía en ambientes controlados, dado que permite una mejor gestión del sistema de calefacción, ventilación o refrigeración, y potencialmente mejora la eficiencia energética y sostenibilidad del sistema.

3.5. Cumplimiento del marco normativo

La figura 8, 9, 10, 11 y 12 muestran el cumplimiento del marco normativo de los LMPs nacionales e internacionales de los parámetros: DBO₅, DQO, N Total, P Total y SST.

Figura 8

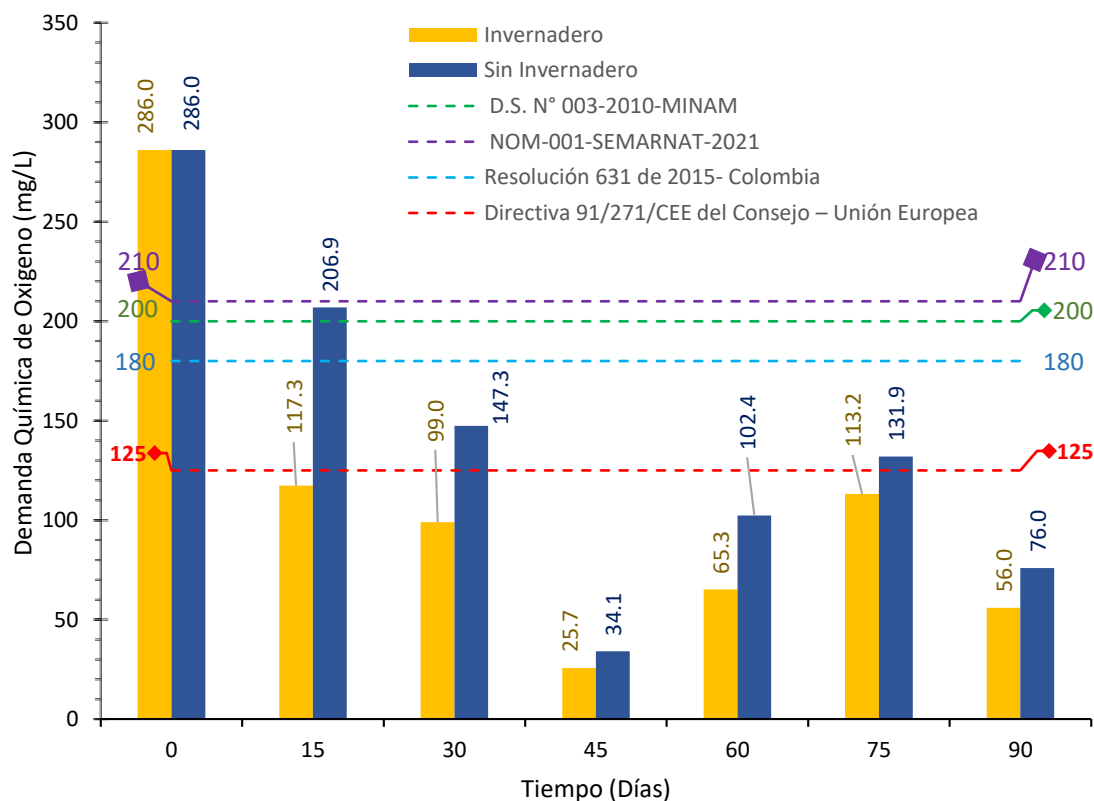
Marco normativo nacional e internacional para la Demanda Bioquímica de Oxígeno



La figura 9 compara la Demanda Bioquímica de Oxígeno en agua dentro de un invernadero y sin invernadero durante 90 días, mostrando una notable disminución en ambos casos. Inicialmente, los valores de DBO son elevados (142 mg/L), superando las normativas de Perú, Colombia y la Unión Europea. Al final del periodo, el sistema de invernadero logra reducir la DBO a 22.4 mg/L, cumpliendo incluso con el límite europeo de 25 mg/L, mientras que el ambiente externo permanece ligeramente por encima. Estos resultados sugieren que el invernadero favorece la degradación de materia orgánica, ofreciendo un enfoque efectivo para el tratamiento de agua en condiciones controladas y cumplimiento normativo.

Figura 9

Marco normativo nacional e internacional para la Demanda Química de Oxígeno



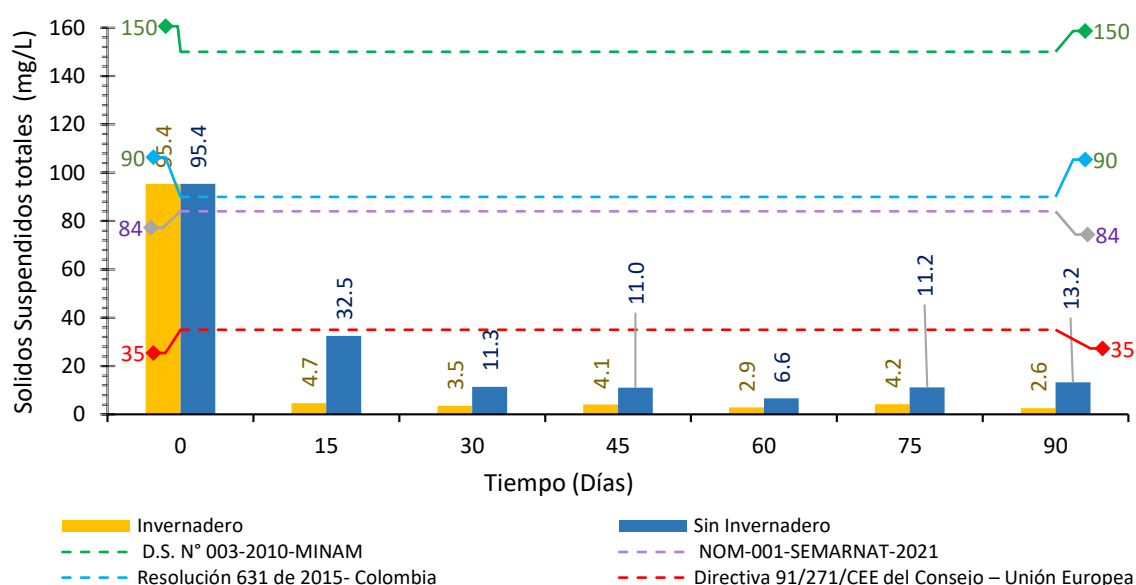
La figura 9 muestra la evolución de la Demanda Química de Oxígeno en agua bajo dos condiciones: dentro de un invernadero (barra amarilla) y en un ambiente sin invernadero (barra azul), a lo largo de un periodo de 90 días. La DQO es un indicador clave de la cantidad de sustancias orgánicas e inorgánicas en el agua, expresada en mg/L, y refleja la necesidad de oxígeno para su oxidación química completa. Inicialmente, ambos sistemas presentan valores elevados de DQO (286 mg/L), lo cual indica una carga considerable de contaminantes. Durante el tiempo de tratamiento, se observa una disminución gradual de la DQO en ambas condiciones, con una reducción más pronunciada en el agua del invernadero. A los 90 días, la DQO en el invernadero alcanza 56 mg/L, mientras que en el ambiente sin invernadero se mantiene en 76 mg/L.

Inicialmente, ambos sistemas superan los límites de todas las normativas. Sin embargo, a partir de los 45 días, la DQO en el invernadero disminuye por debajo del límite de 125 mg/L de la Unión Europea y permanece por debajo de este umbral hasta el final del periodo de estudio. Por el contrario, el ambiente sin invernadero reduce su DQO, pero solo

cumple con las normativas de Perú y México al final del periodo. Esta reducción significativa en la DQO dentro del invernadero sugiere que las condiciones controladas favorecen la descomposición de contaminantes de manera más eficiente. Este resultado subraya el potencial del uso de invernaderos para mejorar la calidad del agua y cumplir con los estándares de tratamiento de aguas residuales, particularmente para normativas internacionales estrictas como la Directiva Europea.

Figura 10

Marco normativo nacional e internacional para Sólidos Suspendidos Totales



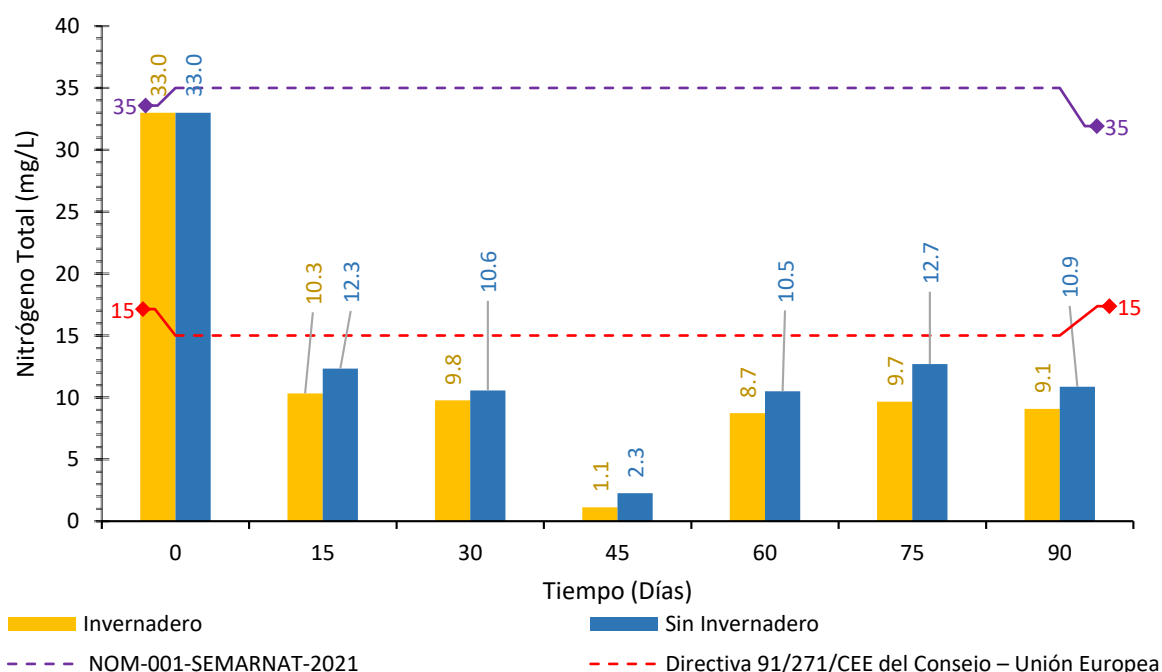
La figura 10 muestra la evolución de los sólidos suspendidos totales en agua en dos condiciones: un sistema de invernadero (barra amarilla) y uno sin invernadero (barra azul), a lo largo de un periodo de 90 días. Los SST son una medida importante de la calidad del agua, ya que una alta concentración de sólidos en suspensión puede indicar la presencia de materia orgánica e inorgánica que impacta negativamente la transparencia y calidad del agua. Al inicio (día 0), ambos sistemas muestran valores elevados de SST (95.4 mg/L), que exceden varios límites normativos. Sin embargo, se observa una reducción significativa de los SST a medida que transcurre el tiempo, con valores notablemente menores en el sistema de invernadero. Al final de los 90 días, los SST en el invernadero descienden a 2.6 mg/L, mientras que el sistema sin invernadero presenta 13.2 mg/L.

Aunque ambos sistemas cumplen con la normativa colombiana desde el inicio, el sistema de invernadero logra cumplir con los límites más estrictos de la Directiva Europea

y de la norma mexicana a partir del día 15, manteniendo valores muy por debajo de estos umbrales hasta el final del periodo de estudio. El sistema sin invernadero, en cambio, alcanza estos límites más estrictos solo en los últimos días. Estos resultados subrayan la eficacia del sistema de invernadero para reducir los sólidos suspendidos de manera más rápida y sostenible, permitiendo el cumplimiento de normativas ambientales rigurosas y mejorando significativamente la calidad del agua.

Figura 11

Marco normativo internacional para nitrógeno total

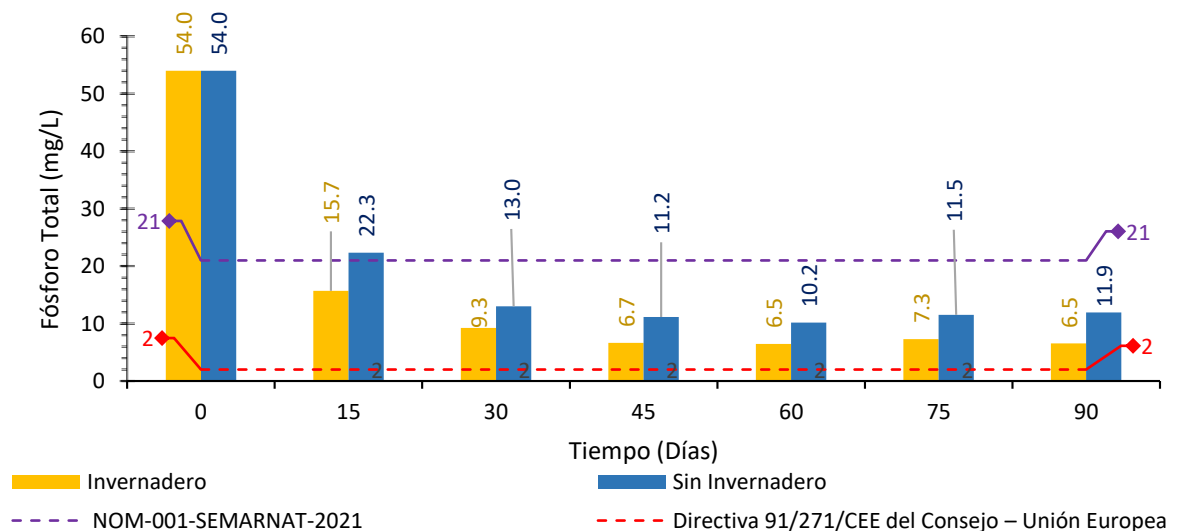


La figura 11 presenta la evolución de las concentraciones de nitrógeno total en agua en dos condiciones de tratamiento: dentro de un invernadero (barra amarilla) y en un ambiente sin invernadero (barra azul), durante un periodo de 90 días. La concentración de N-Total es un parámetro crítico en la calidad del agua, ya que niveles elevados de nitrógeno pueden causar eutrofización y afectan la sostenibilidad de los ecosistemas acuáticos. Al inicio del estudio (día 0), ambos sistemas muestran valores altos de N-Total (33.0 mg/L). A lo largo del tiempo, se observa una disminución significativa del N-Total en el sistema de invernadero, alcanzando 1.1 mg/L al día 45 y manteniéndose en niveles bajos hasta el final del periodo. En contraste, el sistema sin invernadero muestra una reducción menos pronunciada, alcanzando valores de 10.9 mg/L al final de los 90 días.

Los resultados demuestran que el sistema de invernadero no solo reduce rápidamente la concentración de nitrógeno a niveles seguros, sino que también logra cumplir consistentemente con el límite más estricto de 15 mg/L de la Unión Europea a partir del día 30. Por otro lado, el sistema sin invernadero, aunque reduce el N-Total, no alcanza el nivel requerido por la normativa europea y se mantiene por encima de este límite. Esta diferencia en la eficacia entre ambos sistemas sugiere que las condiciones controladas del invernadero facilitan la eliminación de nitrógeno, lo cual es crucial para el diseño de sistemas de tratamiento de agua que buscan minimizar la contaminación por nutrientes y cumplir con normativas ambientales estrictas.

Figura 12

Marco normativo internacional para fósforo total



La figura 12 muestra la variación en las concentraciones de fósforo total en agua tratada en dos condiciones: dentro de un invernadero (barra amarilla) y en un ambiente sin invernadero (barra azul), a lo largo de un periodo de 90 días. El fósforo total es un indicador relevante de la calidad del agua, ya que contribuye a la eutrofización, un proceso que puede desencadenar el crecimiento excesivo de algas y afectar negativamente los ecosistemas acuáticos.

Al inicio del experimento (día 0), ambos sistemas muestran una concentración inicial elevada de fósforo total (54.0 mg/L), superando ampliamente los límites de las normativas internacionales representadas en la gráfica: NOM-001-SEMARNAT-2021 (México) con un límite de 21 mg/L y la Directiva 91/271/CEE (Unión Europea) con un límite de 2 mg/L. Con el tiempo, las concentraciones de fósforo disminuyen significativamente, especialmente en el sistema de invernadero. En el sistema sin invernadero, aunque también se observa una reducción, los valores finales (11.9 mg/L al día 90) siguen excediendo el límite europeo, pero cumplen con el estándar mexicano de 21 mg/L. Estos resultados sugieren que el sistema de invernadero es altamente efectivo en la eliminación de fósforo, alcanzando y manteniendo niveles adecuados para cumplir con normativas estrictas de calidad de agua, como las de la Unión Europea. La capacidad del invernadero para reducir el fósforo de manera más eficiente que el ambiente sin invernadero indica que este sistema controlado podría ser una estrategia viable para el tratamiento de aguas residuales con alta carga de nutrientes, ayudando a mitigar el riesgo de eutrofización en cuerpos de agua receptores.

4.0. CONCLUSIONES

Las características iniciales del agua residual doméstica tratada en los humedales presentan valores típicos de aguas residuales urbanas, con DBO5 de 142 mg/L y DQO de 286 mg/L, lo que indica una carga orgánica de nivel medio. La concentración inicial de sólidos suspendidos totales (SST) es de 95.4 mg/L, lo cual representa una baja concentración de sólidos, mientras que el nitrógeno total (N-Total) de 33 mg/L corresponde a niveles medios. En contraste, el fósforo total (P-Total) presenta un valor elevado (54 mg/L), característico de aguas residuales municipales, reflejando una alta carga de nutrientes. Adicionalmente, la relación DBO5/DQO de 0.49 indica una alta biodegradabilidad, aspecto favorable para los procesos de tratamiento biológico.

A lo largo del periodo de tratamiento, los datos muestran que el sistema con invernadero alcanzó un promedio de reducción de DBO5 del 79.8%, con un máximo de 91.8% a los 45 días, y una remoción promedio de DQO del 72.2%. Este nivel de eficiencia se atribuye a las condiciones controladas en el invernadero, que optimizan la actividad microbiológica y facilitan la degradación de la materia orgánica. Asimismo, en los SST, el sistema con invernadero alcanzó una remoción consistente con una media del 96.2%, destacando su capacidad de sedimentación y filtración mejoradas en condiciones estables. En el caso del nitrógeno total, el sistema con invernadero logró una remoción promedio del

75.4%, favoreciendo la desnitrificación en un ambiente controlado de temperatura y oxígeno. De manera similar, el fósforo total mostró una eliminación significativa con un promedio de remoción del 84.0%, facilitando la adsorción y precipitación de este nutriente, lo cual es fundamental para mitigar la eutrofización.

Además, el estudio del comportamiento térmico en humedales con y sin invernadero evidenció que las temperaturas en el invernadero fueron consistentemente más altas que las del ambiente externo, alcanzando picos entre las 11:00 a.m. y la 1:00 p.m., condiciones que favorecen la actividad microbiológica. Esta estabilidad térmica, registrada durante 90 días con sensores Arduino, mantuvo temperaturas promedio superiores a 22 °C, dentro del rango óptimo para bacterias aerobias, lo cual optimizó la remoción de nitrógeno total con una eficiencia de hasta el 96.57%. Este control térmico también favoreció el crecimiento del junco en humedales de gran altitud, posicionando al invernadero como una solución efectiva para el tratamiento de aguas residuales en climas fríos o entornos de altitud elevada.

Paralelamente, el análisis del calor ganado en el sistema con invernadero, que mostró una ganancia de energía significativa con un pico de 93.8 MJ al mediodía y un descenso a 17 MJ hacia medianoche, aportó una estabilidad térmica que optimizó aún más la actividad microbiana y la eficiencia en la remoción de contaminantes. Este perfil térmico estable reduce la necesidad de energía adicional para calefacción, lo que subraya el potencial del invernadero como una solución eficiente y sostenible para el tratamiento de aguas residuales.

Finalmente, en términos de cumplimiento normativo, el sistema con invernadero demostró una remoción de DQO que llegó a 56 mg/L, situándose bajo el límite europeo de 125 mg/L, en tanto que el sistema sin invernadero solo alcanzó 76 mg/L, cumpliendo únicamente con los estándares de Perú y México. En cuanto a SST, el sistema con invernadero alcanzó una reducción constante a 2.6 mg/L al final del periodo, muy por debajo del límite europeo de 35 mg/L, mientras que el sistema sin invernadero llegó a 13.2 mg/L, cumpliendo el estándar, aunque con menor rapidez y eficiencia.

En conclusión, los humedales con invernadero no solo aceleran la remoción de contaminantes y mejoran la calidad del efluente, sino que cumplen consistentemente con los estándares internacionales más exigentes, como los de la Unión Europea.

6. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- Alianza por el Agua. (2008). Manual De Depuración De Aguas Residuales Urbanas: Monográficos Agua en Centroamérica. En *Secretariado de Alianza por el agua, Ecología y Desarrollo* (Ideasamare). <http://alianzaporelagua.org/documentos/MONOGRAFICO3.pdf>
- Aponte, H. (2009). El junco: clasificación, biología y gestión. *Científica*, 6(1), 38-45.
- Bedoya Escobar, B. M. (2014). *Evaluación de la actividad fitorremediadora del Schoenoplectus californicus "junco" en agua contaminada con arsénico. Tacna 2013* [Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann - Tacna]. <http://repositorio.unjbg.edu.pe/handle/UNJBG/2029>
- Brix, H. (1994). Functions of Macrophytes in wetlands. *Water Science & Technology*, 29(4), 71-78.
- Bui, X. T., Vo, T. P. T., Ngo, H. H., Guo, W. S., y Nguyen, T. T. (2016). Multicriteria assessment of advanced treatment technologies for micropollutants removal at large-scale applications. *Science of the Total Environment*, 563-564, 1050-1067. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.04.191>
- Bustamante Dávila, E., y Pérez Ruiz, W. T. (2019). *"Evaluación de la eficiencia de humedales artificiales en el tratamiento de aguas residuales municipales utilizando las especies junco typha sp y vetiver chrysopogon zizanioides en el distrito de Saposoa.* Universidad Peruana Unión.
- Çengel, Y. A., y Bolos, M. A. (2015). *Termodinámica: Un Enfoque de Ingeniería* (M.-H. Interamericana (ed.)).
- Coday, B. D., Yaffe, B. G. M., Xu, P., y Cath, T. Y. (2014). Rejection of trace organic compounds by forward osmosis membranes: A literature review. *Environmental Science and Technology*, 48(7), 3612-3624. <https://doi.org/10.1021/es4038676>
- Cooper, P. F. (2007). Historical aspects of wastewater treatment. En *Decentralised sanitation and reuse: concepts, systems and implementation* (pp. 11-38).
- Costa, C. (2024). Advances in the Management of Solid Waste and Wastewater Treatment. *Water (Switzerland)*, 16(10), 6-11. <https://doi.org/10.3390/w16101404>

- Daigger, G. T., y Boltz, J. P. (2011). Trickle Filter and Trickle Filter-Suspended Growth Process Design and Operation: A State-of-the-Art Review. *Water Environment Research*, 83(5), 388-404. <https://doi.org/10.2175/106143010x12681059117210>
- Delgadillo, O., Camacho, A., Andrade, M., y Pérez, L. (2010). *Depuración de aguas residuales por medio de humedales artificiales - Universidad Mayor de San Simón*. https://books.google.com.pe/books?hl=en&lr=&id=1kO2J5aDljQC&oi=fnd&pg=PA1&dq=depuración+de+aguas&ots=Kjg3A2vW_j&sig=TLZrUj1P2mUudCC522C7j1n0agk&redir_esc=y#v=onepage&q=depuración+de+aguas&f=false
- Diao, J., Shao, L., Liu, D., Qiao, Y., Tan, W., Wu, L., y Xie, B. (2018). Removal of Phosphorus from Leach Liquor of Steel Slag: Adsorption Dephosphorization with Activated Alumina. *Jom*, 70(10), 2027-2032. <https://doi.org/10.1007/s11837-018-3076-9>
- Gikas, G. D., y Tsihrintzis, V. A. (2012). A small-size vertical flow constructed wetland for on-site treatment of household wastewater. *Ecological Engineering*, 44, 337-343. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2012.04.016>
- GORE-Puno, (Gobierno Regional de Puno). (2012). Diagnostico Ambiental Regional de Puno. En *Consultores y Auditores Ambientales Ecoeficiencia SRL*. <http://siar.minam.gob.pe/puno/documentos/diagnostico-ambiental-regional-dar-puno#:~:text=Instrumento de gestión ambiental%2C basado,la biodiversidad vulnerable y afectada.>
- Guerra Marin, J. (2022). *Elaboración de humedal artificial con Schoenoplectus americanus (Junco) para la depuración de aguas residuales domésticas en Santa Rosa – Jicamarca [Universidad César Vallejo]*. https://repositorio.ucv.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12692/102977/Guerra_MJ-SD.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Haddis, A., Van der Bruggen, B., y Smets, I. (2020). Constructed wetlands as nature based solutions in removing organic pollutants from wastewater under irregular flow conditions in a tropical climate. *Ecohydrology and Hydrobiology*, 20(1), 38-47. <https://doi.org/10.1016/j.ecohyd.2019.03.001>
- Henze, M. (1992). Characterization of wastewater for modelling of activated sludge processes. *Water Science and Technology*, 25(6), 1-15.

<https://doi.org/10.2166/wst.1992.0110>

Henze, M., y Comeau, Y. (2011). Wastewater Characterization. En *Biological wastewater treatment: principles, modelling and design* (pp. 33-52). IWA Pub. <https://doi.org/10.2166/9781780409146>

Inga Sotelo, M. Á., y Vélez Chang, D. J. (2022). Tratamiento con humedales artificiales de aguas residuales canalizadas para su uso en la Universidad Nacional José Faustino Sánchez Carrión - 2022. *Big Bang Faustiniiano*, 11(1), 14-19.

Kadlec, R. H., y Wallace, S. D. (2008). Treatment Wetlands. En CRC Press (Ed.), *Segunda*.

Kivaisi, A. K. (2001). The potential for constructed wetlands for wastewater treatment and reuse in developing countries: A review. *Ecological Engineering*, 16(4), 545-560. [https://doi.org/10.1016/S0925-8574\(00\)00113-0](https://doi.org/10.1016/S0925-8574(00)00113-0)

Kumari, S., y Das, S. (2023). Bacterial enzymatic degradation of recalcitrant organic pollutants: catabolic pathways and genetic regulations. *Environmental Science and Pollution Research*, 30(33), 79676-79705. <https://doi.org/10.1007/s11356-023-28130-7>

Lambiasi, L., Ddiba, D., Andersson, K., Parvage, M., y Dickin, S. (2024). Greenhouse gas emissions from sanitation and wastewater management systems: a review. *Journal of Water and Climate Change*, 15(4), 1797-1819. <https://doi.org/10.2166/wcc.2024.603>

Lenscak, M. P., y Iglesias, N. (2019). Invernaderos: Tecnología apropiada en las regiones productivas del territorio nacional argentino (del paralelo 23 al 54). *INTA Ediciones, Colección*, 226.

Lesur González, L. S. (2018). *Manual de Invernaderos para la Producción Agrícola* (Editorial Trillas (ed.)).

Liu, S., Zhang, Y., Feng, X., y Pyo, S. H. (2024). Current problems and countermeasures of constructed wetland for wastewater treatment: A review. *Journal of Water Process Engineering*, 57(November 2023), 104569. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2023.104569>

Mena Ayala, A. (2022). *Eficiencia del sistema de humedales artificiales, en el tratamiento de aguas residuales domésticas*. Universidad Nacional Mayor de San Marcos.

- Metcalf, y Eddy. (2014). *Wasterwater Engeneering - Treatment and Reuse*. www.mhhe.com
- Metcalf y Eddy. (1995a). *Ingeniería de Aguas residuales. Tratamiento, vertido y reutilización* (3ª Edición). McGraw-Hill.
- Metcalf y Eddy. (1995b). *Ingeniería de aguas residuales. Volumen 1: Tratamiento, vertido y reutilización*. (McGPYR/7"H).
- MINAM (Ministerio del Ambiente). (2018). Diagnóstico Ambiental del Perú. En *Ministerio del Ambiente* (Número 025). <https://sinia.minam.gob.pe/documentos/diagnostico-ambiental-peru>
- Moshiri, G. A. (1993). *Constructed Wetlands for Water Quality Improvement* (1st ed.). CRC Press.,. <https://doi.org/https://doi.org/10.1201/9781003069997>
- ONU-HABITAT. (2008). *Manual de Humedales Artificiales*. Programa Agua para las ciudades asiáticas de ONU_HABITAT.
- Pérez-López, M. E., Del Socorro González-Elizondo, M., López-González, C., Martínez-Prado, A., y Cuevas-Rodríguez, G. (2009). Aquatic macrophytes tolerance to domestic wastewater and their efficiency in artificial wetlands under greenhouse conditions. *Hidrobiologica*, 19(3), 233-244.
- Pérez Ruiz, W. T., y Bustamante Dávila, E. (2019). *Evaluación de la eficiencia de humedales artificiales en el tratamiento de aguas residuales municipales utilizando las especies junco typha sp y vetiver chrysopogon zizanioides en el distrito de Saposoa*. Universidad Peruana Unión.
- Rubio Chinguel, J. L., y Montenegro Quiroz, A. M. (2018). Humedal Artificial en el tratamiento de las aguas residuales domésticas de la 3ra Brigada de Fuerzas Especiales, batallón de servicios N° 300, Distrito de Rioja, Provincia de Rioja, Departamento de San Martín [Universidad Nacional de San Martín]. En *Universidad Nacional de San Martín* (Vol. 1). <https://repositorio.unsa.edu.pe/handle/UNSA/5720>
- Sánchez-Ramírez, J., Ribes, J., Ferrer, J., y García-Usach, M. F. (2017). Obtención de los principales parámetros del agua residual urbana empleados en los modelos matemáticos de fangos activados a partir de una caracterización analítica simple. *Ingeniería y Región*, 17, 33-48. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=6662298>

- SUNASS. (2022). *Diagnóstico de las plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR) en el ámbito de las empresas prestadoras.*
- Tovar, O. (1990). *Manual de identificación de pastos naturales de los Andes del Sur Peruano (Gramineas)* (Proyecto Alpacas 1990 (ed.)).
- Valkama, P., Mäkinen, E., Ojala, A., Vahtera, H., Lahti, K., Rantakokko, K., Vasander, H., Nikinmaa, E., y Wahlroos, O. (2017). Seasonal variation in nutrient removal efficiency of a boreal wetland detected by high-frequency on-line monitoring. *Ecological Engineering*, 98, 307-317. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2016.10.071>
- Villegas, L. G. C., Mashhadi, N., Chen, M., Mukherjee, D., Taylor, K. E., y Biswas, N. (2016). A Short Review of Techniques for Phenol Removal from Wastewater. *Current Pollution Reports*, 2(3), 157-167. <https://doi.org/10.1007/s40726-016-0035-3>
- Vymazal, J. (2005). Horizontal sub-surface flow and hybrid constructed wetlands systems for wastewater treatment. *Ecological Engineering*, 25(5), 478-490. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2005.07.010>
- Vymazal, J. (2019). Constructed Wetlands for Wastewater Treatment. *Encyclopedia of Ecology: Volume 1-4, Second Edition*, 1(1), 14-21. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-409548-9.11238-2>
- Vymazal, J., y Kröpfelová, L. (2008). *Wastewater Treatment in Constructed Wetlands with Horizontal Sub-Surface Flow.*
- Walker, D. B., Baumgartner, D. J., Gerba, C. P., y Fitzsimmons, K. (2019). Surface Water Pollution. En *Environmental and Pollution Science* (3.ª ed., pp. 261-292). Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-814719-1.00016-1>
- Wang, P., Ye, N., Han, Y., y He, X. (2024). Experimental Study on the Sedimentation Performance of an Arc-Plate Linear Sedimentation Tank. *Water (Switzerland)*, 16(8). <https://doi.org/10.3390/w16081075>
- WWAP (Programa Mundial de Evaluación de los Recursos Hídricos de la UNESCO). (2019). *Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos 2019: No dejar a nadie atrás* (UNESCO (ed.)). <https://es.unesco.org/water-security/wwap/wwdr/2019#download>

- Xu, R., Zhang, Y., Liu, R., Cao, Y., Wang, G., Ji, L., y Xu, Y. (2019). Effects of different substrates on nitrogen and phosphorus removal in horizontal subsurface flow constructed wetlands. *Environmental Science and Pollution Research*, 26(16), 16229-16238. <https://doi.org/10.1007/s11356-019-04945-1>
- Yang, L., Jin, X., Hu, Y., Zhang, M., Wang, H., Jia, Q., y Yang, Y. (2024). Technical structure and influencing factors of nitrogen and phosphorus removal in constructed wetlands. *Water Science and Technology*, 89(2), 271-289. <https://doi.org/10.2166/wst.2023.414>
- Zhu, Y., Chen, R., Li, Y. Y., y Sano, D. (2021). Virus removal by membrane bioreactors: A review of mechanism investigation and modeling efforts. *Water Research*, 188, 116522. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2020.116522>

7. ANEXOS

7.1 ANEXO A: EVIDENCIA DE SUMISIÓN

[tca] Acuse de recibo de envío

Helena Rivas López <tyca.ojs@gmail.com>

Lun 04/03/2024 15:11

Para: Juan Eduardo Vigo Rivera <eduardo.vigo@upeu.edu.pe>

Hola Juan Eduardo Vigo Rivera:

Gracias por enviar el manuscrito "Depuración de aguas residuales domésticas en altas altitudes, con humedales artificiales de flujo subsuperficial horizontal con Juncos en condiciones de invernadero" a Tecnología y ciencias del agua para posible publicación.

Con nuestro sistema de gestión en línea podrá iniciar sesión en el sitio web de la revista y hacer un seguimiento de su progreso a través del proceso editorial:

URL del manuscrito:

<https://www.revistatyca.org.mx/ojs/index.php/tyca/authorDashboard/submission/3830>

Nombre de usuario/a: jevr72

Quedo a sus órdenes.

Helena Rivas López

En cumplimiento con la Ley General de Protección de Datos Personales en Posesión de Sujetos Obligados, el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA), con domicilio en Paseo Cuauhnáhuac número 8532, Col. Progreso, C.P. 62550 Jiutepec, Morelos, es el responsable del tratamiento de los datos personales que nos proporcione de carácter personal a través de este medio; dichos datos serán protegidos conforme a lo dispuesto por la citada Ley y demás normatividad que resulte aplicable. Se entiende el consentimiento expreso del titular de los datos personales para utilizarlos en actividades propias de su objeto social como lo es la revista *Tecnología y ciencias del agua*. Para mayor información, lo invitamos a consultar el Aviso de Privacidad en nuestro portal <https://www.gob.mx/imta/acciones-y-programas/avisos-de-privacidad-del-imta>

7.2 ANEXO B. RESOLUCIÓN DE INSCRIPCIÓN DEL PERFIL DE PROYECTO DE TESIS EN FORMATO ARTÍCULO



"AÑO DEL BICENTENARIO DEL PERÚ: 200 AÑOS DE INDEPENDENCIA"

RESOLUCIÓN N° 1409/A-2021/UPeU-FIA-CF-T

Lima, Ñaña 21 de diciembre de 2021

VISTO:

El expediente de **Cesar Gabriel ,Condori Ccollanqui**, identificado(a) con Código Universitario N° 201521922 y **Luzmila Dionicia ,Huanaco Quincho**, identificado(a) con Código Universitario N° 201521934, de la Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental de la Facultad de Ingeniería y Arquitectura de la Universidad Peruana Unión;

CONSIDERANDO

Que la Universidad Peruana Unión tiene autonomía académica, administrativa y normativa, dentro del ámbito establecido por la Ley Universitaria N° 30220 y el Estatuto de la Universidad;

Que la Facultad de Ingeniería y Arquitectura de la Universidad Peruana Unión, mediante sus reglamentos académicos y administrativos, ha establecido las formas y procedimientos para la aprobación e inscripción del perfil de proyecto de tesis en formato artículo y la designación o nombramiento del asesor para la obtención del título profesional;

Que **Cesar Gabriel ,Condori Ccollanqui** y **Luzmila Dionicia ,Huanaco Quincho**, han solicitado: la inscripción del perfil de proyecto de tesis titulado "Depuración de aguas residuales domesticas mediante humedales artificiales con *Festuca dolichophylla*, *Juncus* y *Scirpus californicus* en condiciones altiplánicas" y la designación del Asesor, encargado de orientar y asesorar la ejecución del perfil de proyecto de tesis en formato artículo;

Estando a lo acordado en la sesión del Consejo de la Facultad de Ingeniería y Arquitectura de la Universidad Peruana Unión, celebrada el 21 de diciembre de 2021, y en aplicación del Estatuto y el Reglamento General de Investigación de la Universidad;

SE RESUELVE:

Aprobar el perfil de proyecto de tesis en formato artículo titulado "Depuración de aguas residuales domesticas mediante humedales artificiales con *Festuca dolichophylla*, *Juncus* y *Scirpus californicus* en condiciones altiplánicas" y disponer su inscripción en el registro correspondiente, designar al (a) **Mtro. Juan Eduardo Vigo Rivera** como ASESOR para que oriente y asesore la ejecución del perfil de proyecto de tesis en formato artículo el cual fue dictaminado por: **MSc. Rose Adeline Callata Chura** y **ng. Verónica Haydeé Pari Mamani**, otorgándoles un plazo máximo de doce (12) meses para la ejecución.

Regístrese, comuníquese y archívese.



Dra. María Vallejos Atalaya de Cornejo
DECANA



Dra. Erika Inés Acuña Salinas
SECRETARIA ACADÉMICA

cc:
-Interesado
Asesor
Dirección General de Investigación
Archivo

7.3 ANEXO B: ANÁLISIS DE LABORATORIO



UNIVERSIDAD PERUANA UNIÓN
FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA
LABORATORIO DE LA E.P. DE INGENIERIA AMBIENTAL
Carretera Salida a Arequipa Km. 6 Chullunquiari, Autopista Héroes de la Guerra
del Pacífico

ANÁLISIS DE AGUAS RESIDUALES

Solicitante: Cesar Gabriel Condori Ccollanqui / Luzmila Dionicio Huanaco Quincho
Análisis de: Físicoquímico de aguas residuales
Condiciones de llegada: Buenas **Extraídas por:** El solicitante
Lugar de muestreo: Calapuja – Lampa - Puno
Muestra conservada: Sí
Fecha de muestreo: 11/08/2022

RESULTADOS DE LOS ANÁLISIS DE LOS PARÁMETROS SOLICITADOS

1	RESULTADOS DE LOS VALORES INICIALES DE LOS PARÁMETROS MONITOREADOS DEL AGUA RESIDUAL DOMÉSTICA				
Muestra	DQO	DBO 5	Fósforo total	Nitrógeno total	SST
	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L
Inicial	286	142	54	33	95.4

ADVERTENCIA:

Este laboratorio no asume ninguna responsabilidad sobre aspectos relacionados con el uso final de la información suministrada.

FECHA: 15/08/2022

Nota: La firma institucional avala que el informe técnico pertenece a la institución.



Jefe de Laboratorio
ING. AMBIENTAL - UPeU E.I
Ing. Glen Bryan Madrigal Pérez
Jefe de laboratorio.



UNIVERSIDAD PERUANA UNION
FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA
LABORATORIO DE LA E.P. DE INGENIERIA AMBIENTAL
Carretera Salida a Arequipa Km. 6 Chullunquiani, Autopista Héroes de la Guerra
del Pacífico

ANÁLISIS DE AGUAS RESIDUALES

Solicitante: Cesar Gabriel Condori Ccollanqui / Luzmila Dionicio Huanaco Quincho
Análisis de: Físicoquímico de aguas residuales
Condiciones de llegada: Buenas **Extraídas por:** El solicitante
Lugar de muestreo: Calapuja – Lampa - Puno
Muestra conservada: Sí
Fecha de muestreo: 24/08/2022

RESULTADOS DE LOS ANÁLISIS DE LOS PARÁMETROS SOLICITADOS

Día 15	RESULTADOS DE LOS PARÁMETROS MONITOREADOS DEL AGUA RESIDUAL TRATADA				
	DQO mg/L	DBO5 mg/L	FÓSFORO TOTAL mg/L	NITRÓGENO TOTAL mg/L	SST mg/L
1	102.75	49.5	15.7	10	4.1
2	106.5	53.5	15.7	9.5	5.5
3	142.75	56.7	15.6	11	4.4
4	181.5	53.0	22.7	10	22.3
5	194	82	20.5	14	30.4
6	245.25	117	23.8	13	44.8

ADVERTENCIA:

Este laboratorio no asume ninguna responsabilidad sobre aspectos relacionados con el uso final de la información suministrada.

FECHA: 26/08/2022

Nota: La firma institucional avala que el informe técnico pertenece a la Institución.



Jefe de Laboratorio
ING. AMBIENTAL - UPeU FJ

Ing. Glen Bryan Madrigal Pérez
Jefe de laboratorio.



UNIVERSIDAD PERUANA UNION
FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA
LABORATORIO DE LA E.P. DE INGENIERIA AMBIENTAL
Carretera Salida a Arequipa Km. 6 Chullunquiani, Autopista Héroes de la Guerra
del Pacifico

ANALISIS DE AGUAS RESIDUALES

Solicitante: Cesar Gabriel Condori Ccollanqui / Luzmila Dionicio Huanaco Quincho
Análisis de: Físicoquímico de aguas residuales
Condiciones de llegada: Buenas **Extraídas por:** El solicitante
Lugar de muestreo: Calapuja – Lampa - Puno
Muestra conservada: Sí
Fecha de muestreo: 07/09/2022

RESULTADOS DE LOS ANÁLISIS DE LOS PARÁMETROS SOLICITADOS

Día 30	RESULTADOS DE LOS PARÁMETROS MONITOREADOS DEL AGUA RESIDUAL TRATADA				
	DQO	DBO5	FÓSFORO TOTAL	NITRÓGENO TOTAL	SST
Muestra	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L
1	90.25	25.5	11.4	10	2.6
2	100.25	28.5	7.2	10	3.8
3	106.5	27.5	9.2	9.8	4.1
4	137.75	53	11	10	13.3
5	164	40.7	12.8	11	11.2
6	140.3	61.3	15.4	10.5	9.5

ADVERTENCIA:

Este laboratorio no asume ninguna responsabilidad sobre aspectos relacionados con el uso final de la información suministrada.

FECHA: 09/09/2022

Nota: La firma institucional avala que el informe técnico pertenece a la institución.

Jefe de Laboratorio
ING. AMBIENTAL - UPeU FJ

Ing. Glen Bryan Madrigal Pérez
Jefe de laboratorio.



UNIVERSIDAD PERUANA UNION
FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA
LABORATORIO DE LA E.P. DE INGENIERIA AMBIENTAL
Carretera Salida a Arequipa Km. 6 Chullunquiani, Autopista Héroes de la Guerra
del Pacifico

ANALISIS DE AGUAS RESIDUALES

Solicitante: Cesar Gabriel Condori Ccollanqui / Luzmila Dionicio Huanaco Quincho
Análisis de: Fisicoquímico de aguas residuales
Condiciones de llegada: Buenas **Extraídas por:** El solicitante
Lugar de muestreo: Calapuja – Lampa - Puno
Muestra conservada: Sí
Fecha de muestreo: 23/09/2022

RESULTADOS DE LOS ANÁLISIS DE LOS PARÁMETROS SOLICITADOS

Día 45	RESULTADOS DE LOS PARÁMETROS MONITOREADOS DEL AGUA RESIDUAL TRATADA				
Muestra	DQO	DBO5	FÓSFORO TOTAL	NITRÓGENO TOTAL	SST
	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L
1	21.5	13.6	3.6	0.7	2.6
2	24	10.9	6.9	1.3	5.6
3	31.5	10.6	9.5	1.4	4.1
4	35	14.8	11.22	1.5	7.6
5	31.3	18.8	11.34	1.1	10.4
6	36	16.7	10.89	1.2	15

ADVERTENCIA:

Este laboratorio no asume ninguna responsabilidad sobre aspectos relacionados con el uso final de la información suministrada.

FECHA: 26/09/2022

Nota: La firma institucional avala que el informe técnico pertenece a la institución.



Jefe de Laboratorio
ING. AMBIENTAL - UPeU FJ

Ing. Glen Bryan Madrigal Pérez
Jefe de laboratorio.



UNIVERSIDAD PERUANA UNION
FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA
LABORATORIO DE LA E.P. DE INGENIERIA AMBIENTAL
Carretera Salida a Arequipa Km. 6 Chullunquiani, Autopista Héroes de la Guerra
del Pacifico

ANALISIS DE AGUAS RESIDUALES

Solicitante: Cesar Gabriel Condori Ccollanqui / Luzmila Dionicio Huanaco Quincho

Análisis de: Fisicoquímico de aguas residuales

Condiciones de llegada: Buenas

Extraídas por: El solicitante

Lugar de muestreo: Calapuja – Lampa - Puno

Muestra conservada: Sí

Fecha de muestreo: 07/10/2022

RESULTADOS DE LOS ANÁLISIS DE LOS PARÁMETROS SOLICITADOS

Día 60	RESULTADOS DE LOS PARÁMETROS MONITOREADOS DEL AGUA RESIDUAL TRATADA				
	DQO	DBO	FÓSFORO TOTAL	NITRÓGENO TOTAL	SST
Muestra	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L
1	61.5	17.3	6.12	9	2.9
2	75.3	16.7	7.44	8.7	3.1
3	59	15.4	5.82	8.5	2.7
4	130.25	39.2	12.6	11.5	6.2
5	80.5	25.2	9.54	10.4	7.2
6	96.5	31.8	8.34	9.6	6.4

ADVERTENCIA:

Este laboratorio no asume ninguna responsabilidad sobre aspectos relacionados con el uso final de la información suministrada.

FECHA: 10/10/2022

Nota: La firma Institucional avala que el Informe técnico pertenece a la institución.

Jefe de Laboratorio
ING. AMBIENTAL - UPEU F.I
Ing. Glen Bryan Madrigal Pérez
Jefe de laboratorio.



UNIVERSIDAD PERUANA UNION
FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA
LABORATORIO DE LA E.P. DE INGENIERIA AMBIENTAL
Carretera Salida a Arequipa Km. 6 Chullunquiani, Autopista Héroes de la Guerra
del Pacifico

ANALISIS DE AGUAS RESIDUALES

Solicitante: Cesar Gabriel Condori Ccollanqui / Luzmila Dionicio Huanaco Quincho
Análisis de: Fisicoquímico de aguas residuales
Condiciones de llegada: Buenas **Extraídas por:** El solicitante
Lugar de muestreo: Calapuja – Lampa - Puno
Muestra conservada: Sí
Fecha de muestreo: 21/10/2022

RESULTADOS DE LOS ANÁLISIS DE LOS PARÁMETROS SOLICITADOS

Dia 75	RESULTADOS DE LOS PARÁMETROS MONITOREADOS DEL AGUA RESIDUAL TRATADA				
	DQO	DBO5	FÓSFORO TOTAL	NITRÓGENO TOTAL	SST
Muestra	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L
1	109	30.5	7.67	9.3	4.7
2	116.5	41	6.98	9.7	3.7
3	114	52.7	7.24	10	4.1
4	149	88.7	13.4	13	12.3
5	127.75	90	10.12	12.5	11.5
6	119	71	11.03	12.6	9.8

ADVERTENCIA:

Este laboratorio no asume ninguna responsabilidad sobre aspectos relacionados con el uso final de la información suministrada.

FECHA: 24/10/2022

Nota: La firma institucional avala que el informe técnico pertenece a la institución.

Jefe de Laboratorio
ING. AMBIENTAL - UPeU FJ

Ing. Glen Bryan Madrigal Pérez
Jefe de laboratorio.



UNIVERSIDAD PERUANA UNION
FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA
LABORATORIO DE LA E.P. DE INGENIERIA AMBIENTAL
Carretera Salida a Arequipa Km. 6 Chullunqui, Autopista Héroes de la Guerra
del Pacifico

ANALISIS DE AGUAS RESIDUALES

Solicitante: Cesar Gabriel Condori Ccollanqui / Luzmila Dionicio Huanaco Quincho
Análisis de: Fisicoquímico de aguas residuales
Condiciones de llegada: Buenas **Extraídas por:** El solicitante
Lugar de muestreo: Calapuja – Lampa - Puno
Muestra conservada: Sí
Fecha de muestreo: 03/11/2022

RESULTADOS DE LOS ANÁLISIS DE LOS PARÁMETROS SOLICITADOS

Día 90	RESULTADOS DE LOS PARÁMETROS MONITOREADOS DEL AGUA RESIDUAL TRATADA				
	DQO	DBO5	FÓSFORO TOTAL	NITRÓGENO TOTAL	SST
Muestra	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L
1	52	21.1	5.91	9.8	3.2
2	60	22.9	7.36	8.9	2.4
3	56	23.1	6.34	8.5	2.1
4	79	23.2	12.3	10.8	13.3
5	80	28	13.8	11.6	10.2
6	69	29.1	9.7	10.2	16.2

ADVERTENCIA:

Este laboratorio no asume ninguna responsabilidad sobre aspectos relacionados con el uso final de la información suministrada.

FECHA: 07/11/2022

Nota: La firma institucional avala que el informe técnico pertenece a la institución.



Jefe de Laboratorio
LABORATORIO AMBIENTAL - UPeU

Ing. Glen Bryan Madrigal Pérez
Jefe de laboratorio.

7.4 ANEXO C: ANÁLISIS ESTADÍSTICO

Tabla 5

Análisis de Varianza (ANOVA) para los Factores de Tratamiento, Tiempo y su Interacción para la DQO

Combinaciones	sum_sq	df	F	p -valor
C(Tratamiento)	10586.24	1	49.91	0.000
C(Tiempo)	249189.60	6	195.80	0.000
C(Tratamiento):C(Tiempo)	8258.21	6	6.49	0.000
Residual	5939.18	28		

Figura 20

Comparación de la Demanda Química de Oxígeno mediante la prueba de Tukey: Efecto de los Tratamientos y Tiempos en las Diferencias Medias de DQO

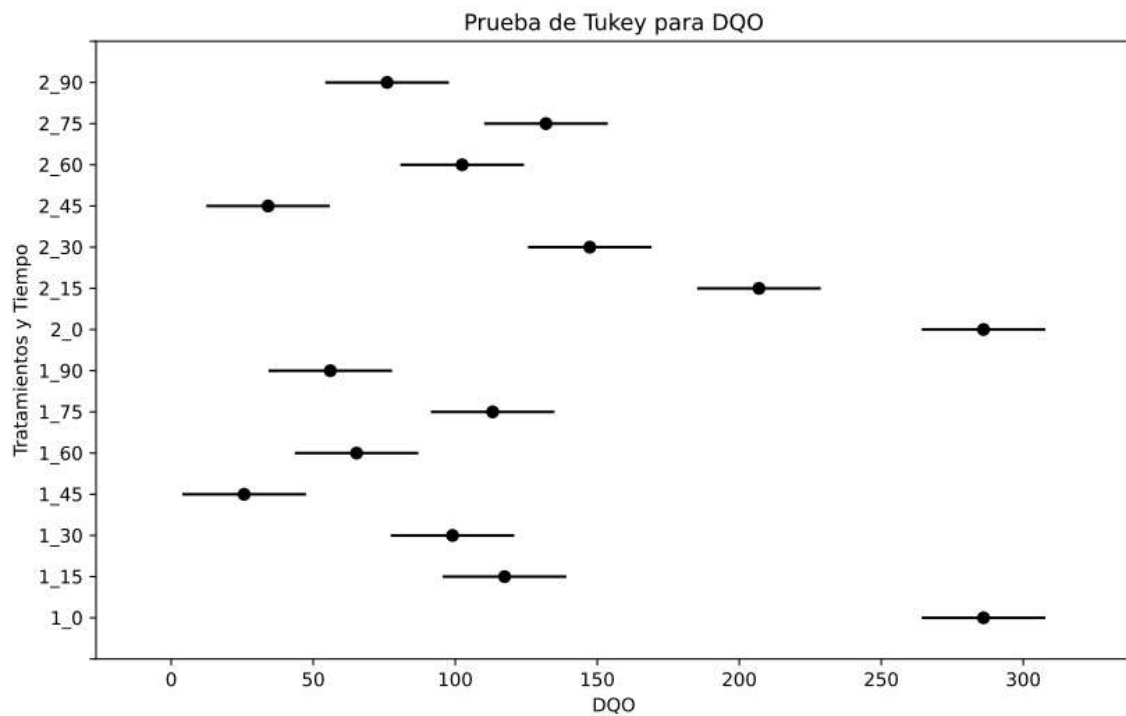


Tabla 6

Análisis de Varianza (ANOVA) para los Factores de Tratamiento, Tiempo y su Interacción para la SST

Combinaciones	sum_sq	df	F	p -valor
C(Tratamiento)	876.80	1.00	75.58	1.92E-09
C(Tiempo)	39113.23	6.00	561.95	7.81E-28
C(Tratamiento):C(Tiempo)	714.10	6.00	10.26	5.14E-06
Residual	324.81	28.00		

Figura 21

Comparación de Sólidos Suspendidos Totales mediante la prueba de Tukey: Efecto de los Tratamientos y Tiempos en las Diferencias Medias de SST

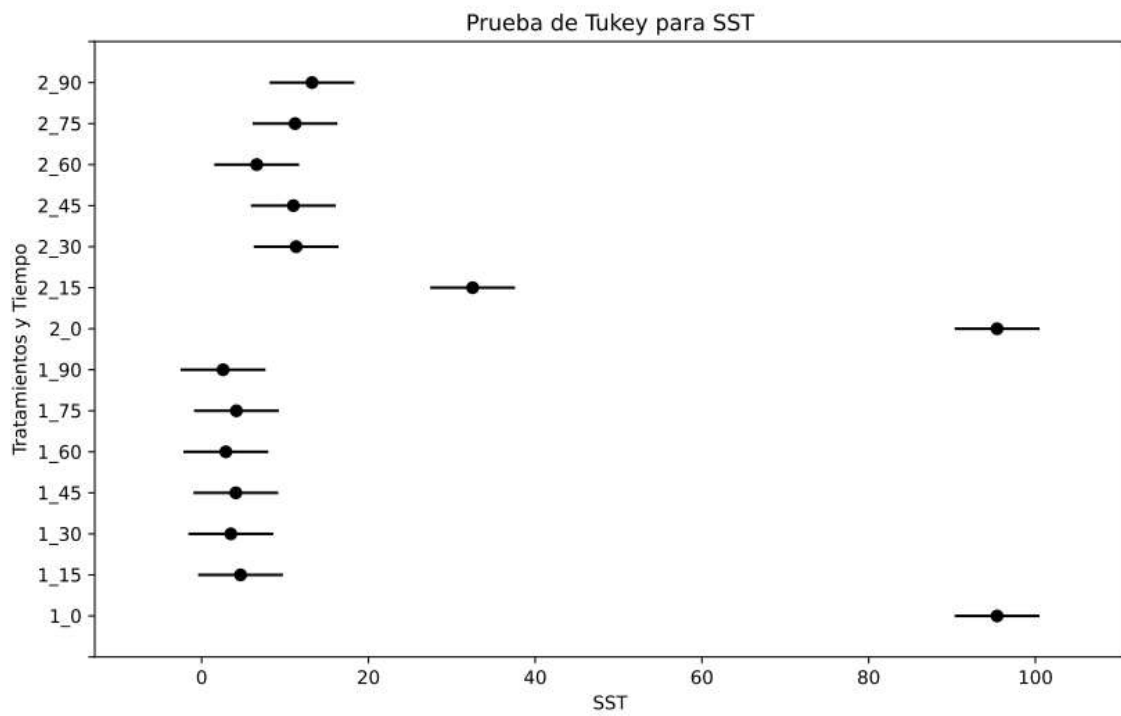


Tabla 7

Análisis de Varianza (ANOVA) para los Factores de Tratamiento, Tiempo y su Interacción para el N

Combinaciones	sum_sq	df	F	p -valor
C(Tratamiento)	19.48	1.00	37.96	1.2E-06
C(Tiempo)	3426.35	6.00	1112.97	5.8E-32
C(Tratamiento):C(Tiempo)	10.85	6.00	3.53	1.0E-02
Residual	14.37	28.00		

Figura 22

Comparación de Nitrógeno mediante la prueba de Tukey: Efecto de los Tratamientos y Tiempos en las Diferencias Medias de N.

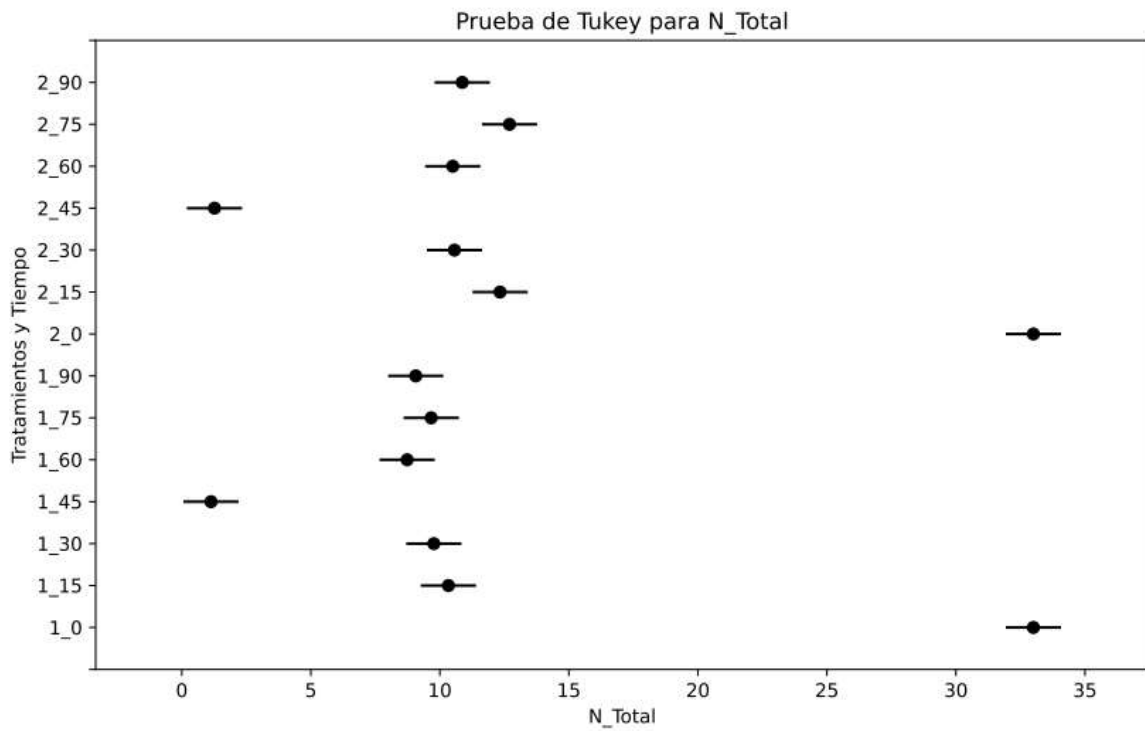


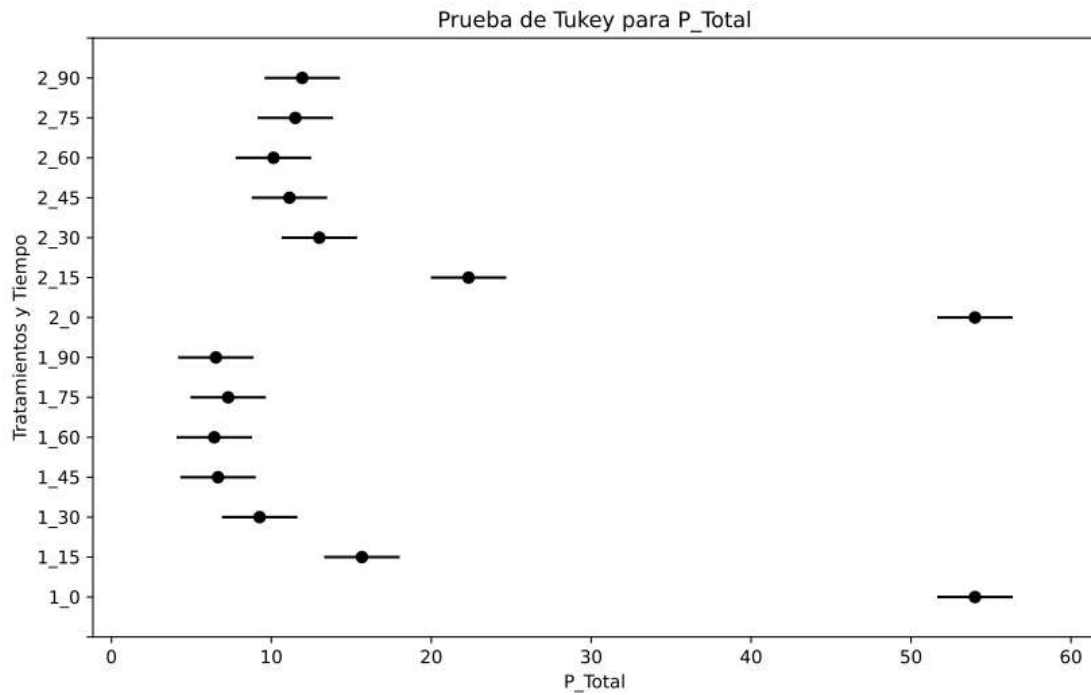
Tabla 8

Análisis de Varianza (ANOVA) para los Factores de Tratamiento, Tiempo y su Interacción para el P

Combinaciones	sum_sq	df	F	p -valor
C(Tratamiento)	170.01	1.00	68.12	0.00
C(Tiempo)	10001.76	6.00	667.93	0.00
C(Tratamiento):C(Tiempo)	38.23	6.00	2.55	0.04
Residual	69.88	28.00		

Figura 23

Comparación de Fósforo mediante la prueba de Tukey: Efecto de los Tratamientos y Tiempos en las Diferencias Medias de P.



7.5 ANEXO A: PANEL FOTOGRÁFICO

Figura 13

Dimensionamiento, excavación a) e impermeabilización de los humedales b).



Figura 14

Instalación de sistemas de drenaje.



Figura 15

Disposición de sustrato en el sistema de drenaje a) y disposición de sustrato en el humedal b).



Figura 16

Instalación de sensores Arduino de temperatura.



Figura 17

Trasplante de juncos de los humedales aledaños a) y b) y enraizamiento de juncos c).



Figura 18

Instalación de humedales a) y funcionamiento de humedales b).

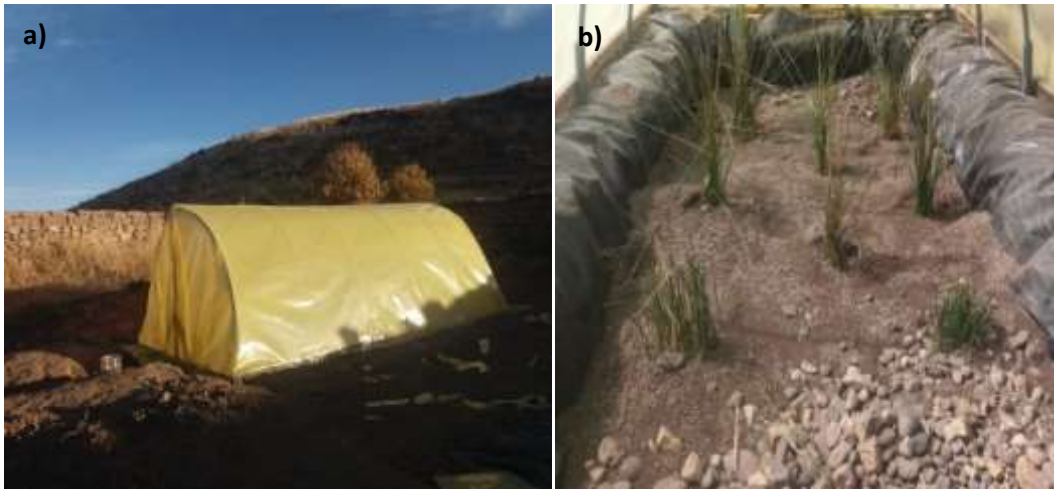


Figura 19

Muestreo de aguas residuales del humedal.



Figura 19

Análisis de laboratorio SST.

