

Miriam Calizaya

Miriam y Yaqui V5.docx



My Files



My Files



Universidad Peruana Union

Detalles del documento

Identificador de la entrega

trn:oid:::29566:573429588

Fecha de entrega

31 mar 2026, 10:09 a.m. GMT-5

Fecha de descarga

31 mar 2026, 10:13 a.m. GMT-5

Nombre del archivo

Miriam y Yaqui V5.docx

Tamaño del archivo

2.7 MB

38 páginas

11.690 palabras

67.285 caracteres

5% Similitud general

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para ca...

Filtrado desde el informe

- Bibliografía
- Texto citado
- Texto mencionado
- Coincidencias menores (menos de 8 palabras)

Fuentes principales

- 4%  Fuentes de Internet
- 2%  Publicaciones
- 3%  Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

Marcas de integridad

N.º de alerta de integridad para revisión

-  **Caracteres reemplazados**
451 caracteres sospechosos en N.º de páginas
Las letras son intercambiadas por caracteres similares de otro alfabeto.

Los algoritmos de nuestro sistema analizan un documento en profundidad para buscar inconsistencias que permitirían distinguirlo de una entrega normal. Si advertimos algo extraño, lo marcamos como una alerta para que pueda revisarlo.

Una marca de alerta no es necesariamente un indicador de problemas. Sin embargo, recomendamos que preste atención y la revise.

Fuentes principales

- 4% Fuentes de Internet
- 2% Publicaciones
- 3% Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

Fuentes principales

Las fuentes con el mayor número de coincidencias dentro de la entrega. Las fuentes superpuestas no se mostrarán.

1	Internet	repository.unad.edu.co	<1%
2	Internet	hdl.handle.net	<1%
3	Trabajos entregados	BENEMERITA UNIVERSIDAD AUTONOMA DE PUEBLA BIBLIOTECA on 2023-02-02	<1%
4	Internet	es.scribd.com	<1%
5	Internet	saaelp.sp.gov.br	<1%
6	Internet	www.ptolomeo.unam.mx:8080	<1%
7	Trabajos entregados	Universidad Nacional Santiago Antunez de Mayolo on 2026-03-17	<1%
8	Trabajos entregados	Universidad Nacional de Cajamarca on 2025-10-21	<1%
9	Internet	www.thepharmajournal.com	<1%
10	Trabajos entregados	Universidad Cesar Vallejo on 2019-06-22	<1%
11	Internet	repository.usta.edu.co	<1%

12	Publicación	M. Hernández-Martínez, T. Gallardo-Velázquez, G. Osorio-Revilla, N. Almaraz-Abar...	<1%
13	Internet	repositorio.upct.es	<1%
14	Trabajos entregados	uaq on 2025-07-02	<1%
15	Internet	www.fontagro.org	<1%
16	Publicación	Alvarado, Jorge Villalobos. "Reducibility of Schrödinger Operators on Multilayer G...	<1%
17	Publicación	J. Colomer. "Cálculo de flujos de calor en la interfase aire-agua del lago de Banyol...	<1%
18	Trabajos entregados	Submitted on 1691031302045	<1%
19	Internet	www.as2014.com.ar	<1%
20	Trabajos entregados	Universidad Católica de Santa María on 2015-04-23	<1%
21	Trabajos entregados	Universidad Estatal Amazonica- on 2026-01-22	<1%
22	Trabajos entregados	Universidad Nacional Agraria La Molina on 2026-01-16	<1%
23	Trabajos entregados	Universidad Técnica De Ambato- Direccion de Investigacion y Desarrollo , DIDE o...	<1%
24	Internet	doaj.org	<1%
25	Internet	repositorio.ucv.edu.pe	<1%

26	Trabajos entregados uncedu on 2025-01-14	<1%
27	Internet www.scielo.org.bo	<1%
28	Internet burjcdigital.urjc.es	<1%
29	Internet dspace.ucuenca.edu.ec	<1%
30	Internet dspace.unitru.edu.pe	<1%
31	Internet repositorio.uncp.edu.pe	<1%
32	Internet www.coursehero.com	<1%
33	Internet www.dspace.espol.edu.ec	<1%
34	Internet www.intep.edu.co	<1%
35	Internet www.jove.com	<1%
36	Internet www.slideshare.net	<1%
37	Publicación Juan Antonio Ávalos Masó. "Factors influencing the mobility of Red Palm Weevil R..."	<1%
38	Publicación Pedro Palencia, Fátima Martínez, Juan Jesús Medina, José López-Medina. "Strawbe..."	<1%
39	Trabajos entregados Universidad Catolica Sedes Sapientiae on 2025-11-05	<1%

40	Trabajos entregados	Universidad Estatal Amazonica- on 2026-03-27	<1%
41	Trabajos entregados	Universidad Nacional de Colombia on 2018-07-16	<1%
42	Internet	bdigital.zamorano.edu	<1%
43	Internet	futur.upc.edu	<1%
44	Internet	revistas.unsm.edu.pe	<1%
45	Internet	riaa.uaem.mx:8080	<1%
46	Trabajos entregados	uncedu on 2024-03-04	<1%
47	Internet	www.juntadeandalucia.es	<1%



Artículos

1 Evaluación de la fitodepuración de aguas residuales domésticas con Jacinto de agua (*Eichhornia Crassipes*) y Algas de piedra (*Chara spp.*) en condiciones de invernadero en el altiplano peruano

2 Evaluation of the Phytoremediation of Domestic Wastewater Using Water Hyacinth (*Eichhornia crassipes*) and Stonewort Algae (*Chara spp.*) Under Greenhouse Conditions in the Peruvian Highlands

Resumen

1 Esta investigación evaluó la fitodepuración de aguas residuales domésticas mediante *Eichhornia crassipes* (jacinto de agua) y *Chara spp.* bajo y sin invernadero, aprovechando calentamiento solar pasivo en el altiplano peruano (Juliaca, 3825 m s. n. m.). Se aplicó un diseño factorial 2×3 (sin/con invernadero × control/*E. crassipes*/*Chara spp.*), con 6 tratamientos, 3 repeticiones (18 unidades experimentales de 400 L) y monitoreado cada 15 días durante 75 días. Se midieron DBO₅, DQO, fósforo total, NO₂⁻, NO₃⁻, SO₄²⁻, pH y temperatura; el microclima (temperatura, humedad y radiación) se registró de forma continua con sensores. El invernadero generó un microclima más cálido y húmedo (T° media del aire 22.79 vs 9.31 °C; HR 72.5% vs 41.1%) y elevó la temperatura media del agua (T4-T6: 16.07-17.65 °C vs T1-T3: 14.10-14.66 °C). El pH se mantuvo alcalino (7.6-8.8), con incremento en T5 hasta 8.8. El mejor desempeño correspondió a T5 (*E. crassipes* + invernadero), con remociones finales de DBO 92.0% (457.4→36.4 mg/L), DQO 94.6% (1764→95.8 mg/L), P 77.4% (70.4→15.9 mg/L), NO₂⁻ 97.4% (0.194→0.005 mg/L) y NO₃⁻ 78.8% (13.7→2.9 mg/L); T6 destacó en SO₄²⁻ con 51.4% (74→36 mg/L). La mayor parte de la remoción en T5 se alcanzó a 30 días (≈82-90% del total). En conclusión, la cobertura térmica pasiva potencia y acelera la depuración biológica, y la configuración *E. crassipes* más invernadero emerge como opción prioritaria para tratamientos naturales en climas fríos altoandinos.



Palabras clave: fitorremediación, *Eichhornia crassipes*, *Chara spp.*, aguas residuales, humedales, tratamiento natural, depuración, altiplano peruano.

Abstract

This study evaluated the phytoremediation of domestic wastewater using *Eichhornia crassipes* (water hyacinth) and *Chara spp.* under greenhouse and open-air conditions, leveraging passive solar heating in the Peruvian Altiplano (Juliaca, 3,825 m a.s.l.). A 2×3 factorial design was implemented (without/with greenhouse × control/*E. crassipes*/*Chara spp.*), comprising six treatments with three replicates (18 experimental units of 400 L) and monitoring every 15 days over 75 days. BOD₅, COD, total phosphorus, NO₂⁻, NO₃⁻, SO₄²⁻, pH, and temperature were measured; microclimate variables (temperature, humidity, and solar radiation) were continuously recorded using sensors. The greenhouse produced a warmer and more humid microclimate (mean air temperature 22.79 vs 9.31 °C; RH 72.5% vs 41.1%) and increased mean water temperature (T4–T6: 16.07–17.65 °C vs T1–T3: 14.10–14.66 °C). pH remained alkaline (7.6–8.8), increasing in T5 up to 8.8. The best performance was achieved by T5 (*E. crassipes* + greenhouse), with final removals of BOD 92.0% (457.4→36.4 mg/L), COD 94.6% (1764→95.8 mg/L), P 77.4% (70.4→15.9 mg/L), NO₂⁻ 97.4% (0.194→0.005 mg/L), and NO₃⁻ 78.8% (13.7→2.9 mg/L); T6 showed the highest SO₄²⁻ removal at 51.4% (74→36 mg/L). Most of the removal in T5 was achieved by day 30 (≈82–90% of the total). In conclusion, passive thermal coverage enhances and accelerates biological treatment, and the *E. crassipes* more greenhouse configuration emerges as a priority option for nature-based treatment in cold high-Andean climates.

Keywords: phytoremediation, *Eichhornia crassipes*, *Chara spp.*, wastewater, wetlands, natural treatment, purification, Peruvian highlands.

Introducción



No obstante, la mayoría de estas investigaciones han sido desarrolladas en zonas de altitud moderada. Persisten vacíos de conocimiento respecto a la eficiencia de la fitorremediación en regiones altoandinas, donde condiciones como bajas temperaturas, elevada radiación solar y variaciones climáticas extremas pueden influir en el rendimiento de los sistemas de tratamiento. La región altiplánica, particularmente la ciudad de Juliaca, ubicada a más de 3 800 m s. n. m., enfrenta serias limitaciones en infraestructura de saneamiento, lo que agrava la descarga de efluentes domésticos sin tratamiento (Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú, 2022). A pesar de estas restricciones, la alta radiación solar podría aprovecharse mediante estrategias de calentamiento pasivo para mejorar la eficiencia de sistemas de fitorremediación (Nuñez et al., 2019). Dado que las tecnologías convencionales de tratamiento pueden resultar costosas y dificultosas de implementar en zonas altoandinas, surge la necesidad de explorar alternativas accesibles y sostenibles. Entre estas, el uso combinado de *Eichhornia crassipes* y *Chara spp.* constituye una opción prometedora, ya que ambas especies presentan capacidades complementarias para absorber, transformar y retener diversos tipos de contaminantes. Por ello, evaluar la eficiencia de la fitorremediación con jacinto de agua y algas de piedra en condiciones de invernadero en el altiplano peruano, considerando el potencial del calentamiento solar pasivo, permitirá generar evidencia científica relevante para el diseño de sistemas de tratamiento adaptados a las características ambientales de las zonas de gran altitud. Esta investigación busca contribuir a soluciones ecológicas, económicamente viables y culturalmente accesibles para mejorar la calidad del agua en regiones altoandinas.

La contaminación de los cuerpos de agua por descargas de aguas residuales domésticas constituye uno de los problemas ambientales más relevantes a escala mundial. Se estima que alrededor del 80 % de las aguas residuales son vertidas al ambiente sin recibir un tratamiento adecuado, lo que compromete la salud humana, altera los ecosistemas acuáticos y deteriora la calidad del recurso hídrico (WWAP, 2017; Jones et al., 2022). Frente a esta problemática, se han desarrollado alternativas sostenibles como la fitodepuración, una técnica basada en el uso de plantas acuáticas capaces de remover contaminantes de manera eficiente, económica y ambientalmente amigable (Flomo & Chaki, 2023). Entre las especies más estudiadas destaca *Eichhornia crassipes* (jacinto de agua), reconocida por su elevada capacidad para remover demanda



bioquímica de oxígeno (DBO), demanda química de oxígeno (DQO), sólidos suspendidos totales (SST), nutrientes y metales pesados (Ahmad, Alam, & Naaz, 2025). Esta macrófita flotante ha sido ampliamente reportada como una de las más eficientes para la fitodepuración de aguas residuales domésticas, debido a su rápido crecimiento, alta producción de biomasa y notable capacidad de adaptación a diferentes condiciones ambientales. Su eficacia depuradora se atribuye principalmente a la arquitectura de su sistema radicular fibroso, que incrementa la superficie de contacto con el agua residual, favorece la retención de sólidos suspendidos, promueve la absorción de nutrientes como nitrógeno y fósforo, y proporciona sustrato para comunidades microbianas que participan activamente en la degradación de la materia orgánica y en la reducción de microorganismos indicadores (Alvarado Chilcon & Manayay Peralta, 2020; Valdivia Rodríguez, 2019).

En el contexto peruano, diversos estudios han documentado remociones significativas de contaminantes fisicoquímicos y microbiológicos. Ayala Tocto, Calderón Ordoñez, Rascón, & Collazos Silva, (2018) reportaron que *E. crassipes* alcanzó eficiencias de remoción de 84.72 % para DBO₅ y 90.77 % para DQO, mientras que Caqui Rodriguez & Rofner Wyngaert (2025), en condiciones altoandinas de Huancayo, registraron eficiencias de 78.7 % en DQO y 99.9 % en coliformes termotolerantes después de 36 días de tratamiento. Asimismo, Bautista Campos (2021) concluyó que el jacinto de agua fue más eficiente que *Pistia stratiotes* en la remoción de DBO₅, asociando este comportamiento a su capacidad fitodepuradora, rizofiltradora y a su mejor adaptabilidad al medio. En conjunto, estos antecedentes respaldan el uso de *Eichhornia crassipes* como una biotecnología de bajo costo, fácil operación y elevada eficiencia para el tratamiento complementario de aguas residuales domésticas, particularmente en contextos donde las limitaciones técnicas, económicas y climáticas restringen la implementación de tecnologías convencionales (Limache Quispe & Tirado Rebaza, 2022). Por otro lado, las algas de piedra del género *Chara* spp. constituyen macrófitas sumergidas de alto valor ecológico en ecosistemas acuáticos continentales, especialmente en ambientes altoandinos como el lago Titicaca, donde presentan amplia distribución, elevada abundancia y un papel clave en la estructuración del hábitat acuático. En la zona litoral de este sistema, *Chara* sp. ha sido identificada como una de las especies más frecuentes dentro de la vegetación subacuática, formando asociaciones determinadas por la profundidad y por las características del sustrato, lo



que evidencia su alta plasticidad ecológica y capacidad de adaptación a condiciones ambientales variables (Pasapera García, Villanueva Quispe, Siguayro Mamani, Gamarra Peralta, & Arpasi Ordoño, 2023).

Estas praderas sumergidas actúan como sustrato para diversas comunidades biológicas, favorecen la presencia de fauna asociada y contribuyen a la estabilidad ecológica de los sistemas acuáticos (Pasapera García et al., 2023). Asimismo, las caráceas cumplen funciones relevantes en la regulación de nutrientes, la fijación de carbono y calcio, y la retención de sedimentos, influyendo de manera directa en la mejora de las condiciones fisicoquímicas del agua y en su transparencia (Yana Neira, 2022). Desde una perspectiva ecológica más amplia, las macrófitas sumergidas como *Chara* spp. son consideradas componentes esenciales en la dinámica de humedales y cuerpos de agua, debido a que su presencia suele asociarse con mejores condiciones de calidad del agua y con una mayor complejidad de las comunidades biológicas (Mamani Choque, 2020; Vizcardo & Gil-kodaka, 2015). Además, en ecosistemas eutrofizados, las macroalgas y otras plantas acuáticas representan elementos importantes en los procesos de recuperación ecológica, por su capacidad para colonizar áreas perturbadas y contribuir a la estabilización del sistema (Morales & Rivera, 2013). En conjunto, estas evidencias permiten considerar a *Chara* spp. como una macrófita sumergida de alto valor ecológico y con potencial para su incorporación en sistemas de fitodepuración, particularmente en contextos altoandinos donde se requieren soluciones sostenibles, de bajo costo y adaptadas a condiciones ambientales extremas.

La evidencia disponible sobre sistemas naturales de tratamiento en ambientes de gran altitud sigue siendo limitada, particularmente bajo condiciones climáticas extremas propias de los Andes; estudios recientes en humedales construidos de los Andes tropicales señalan que aún faltan datos sobre su desempeño en estas condiciones (Arévalo-Durazno, Zumalacarregui, Ho, Narváez, & Alvarado, 2023). En el Altiplano, factores como la intensa radiación solar, las bajas temperaturas y la alta amplitud térmica diaria pueden modificar la eficiencia de los tratamientos (Juanicó, Weinberg, & Soto, 2000). En el caso de Juliaca, además, persisten brechas de infraestructura de saneamiento y tratamiento de aguas residuales reconocidas en documentación oficial reciente (Ministerio de Vivienda, 2024). En ese contexto, y considerando que las tecnologías convencionales de tratamiento suelen ser costosas y de difícil



implementación en zonas altoandinas, resulta necesario evaluar alternativas accesibles y sostenibles. Entre ellas, el uso combinado de *Eichhornia crassipes* y *Chara* spp. constituye una opción prometedora, debido a que ambas especies presentan características funcionales complementarias para absorber, transformar y retener distintos tipos de contaminantes. Por ello, evaluar la eficiencia de la fitodepuración de aguas residuales domésticas con jacinto de agua y algas de piedra en condiciones de invernadero en el altiplano peruano permitirá generar evidencia científica relevante para el diseño de sistemas de tratamiento adaptados a las condiciones ambientales de zonas de gran altitud. De esta manera, la presente investigación busca aportar al desarrollo de soluciones ecológicas, económicamente viables y socialmente accesibles para mejorar la calidad del agua en regiones altoandinas.

Materiales y métodos

Lugar experimental

La presente investigación se desarrolló en la Universidad Peruana Unión, Campus Juliaca, ubicada en el departamento de Puno, a 3825 m s. n. m. ; esta zona altoandina se caracteriza por presentar bajas temperaturas y alta radiación solar, condiciones ambientales que influyen directamente en los procesos biológicos de tratamiento. Las especies vegetales seleccionadas para el tratamiento experimental de aguas residuales domésticas fueron *Eichhornia crassipes* (jacinto de agua) y *Chara* spp., ambas reconocidas por su capacidad de absorber nutrientes y metales, así como por su adaptación a ecosistemas acuáticos. *Eichhornia crassipes* fue recolectada de cuerpos de agua ubicados en otra ciudad y posteriormente sometida a un proceso de adaptación en invernadero; por su parte, *Chara* spp. fue obtenida del lago Titicaca. Con el fin de favorecer los procesos biológicos del sistema, se incorporó un sistema de calentamiento solar pasivo, orientado a aprovechar la radiación solar para incrementar la temperatura del agua y mejorar la eficiencia depurativa de las macrófitas.



Construcción del invernadero y equipamiento

Para la implementación del sistema experimental se utilizaron materiales de construcción, instrumental y equipos, así como materiales de análisis y laboratorio. En la construcción de las unidades experimentales se emplearon madera (tablas y listones para los marcos de los estanques), plástico impermeable de doble capa para el revestimiento, plástico PET para la cobertura del invernadero, tubos de PVC de 1" para el drenaje, bomba sumergible, tornillos, clavos, cintas y herramientas menores, soportes para la cubierta y una estructura de madera para el marco del invernadero.

En cuanto al instrumental y equipos, se utilizaron termómetros digitales sumergibles, un medidor multiparamétrico para pH, oxígeno disuelto, conductividad y temperatura, sensores industriales de temperatura y humedad relativa, un módulo ESP32 con pantalla y memoria SD, sistema de comunicación RS485, regulador de voltaje, placas electrónicas con fuente de alimentación, impresora 3D para la estructura soporte de sensores, fuente de energía (externa o solar opcional) y una laptop. Para el análisis de laboratorio se emplearon frascos esterilizados para muestreo, reactivos para DBO₅ y DQO según Standard Methods, soluciones patrón y kits de calibración de sensores, kit de fósforo, reactivos para nitrógeno, nitritos y nitratos, conservantes químicos para el transporte de muestras, hielera para conservación y materiales de vidrio como tubos y vasos de precipitado. Además, se construyó un invernadero modular tipo túnel (5 × 4 × 2 m), con estructura de madera y cubierta de plástico PET de 200 micras, el sistema de invernadero se destinó parcialmente a tratamientos con calentamiento solar pasivo.



Figura 1. Montaje del sistema experimental de tratamiento de aguas residuales mediante macrófitas acuáticas y protección térmica pasiva.

Diseño estadístico experimental

El estudio se desarrolló bajo un diseño experimental factorial 2×3 , en el que se evaluaron de manera simultánea dos factores: la condición térmica/protectora del sistema y el componente biológico incorporado, lo que permitió analizar tanto los efectos individuales como la posible interacción entre ambos factores. El Factor A correspondió a la condición de protección térmica del sistema, con dos niveles: (A1) sin invernadero y (A2) con invernadero. El Factor B correspondió al tipo de componente biológico aplicado, con tres niveles: (B0) blanco, sin incorporación de organismos; (B1) macrófita acuática flotante, representada por *Eichhornia crassipes*; y (B2) alga carófito sumergida, correspondiente a *Chara spp.* La combinación de ambos factores dio lugar a un total de seis tratamientos experimentales ($A \times B$), con 3 repeticiones haciendo un total de 18 unidades experimentales.



Tabla 1. Sistema factorial de fitorremediación y pulimiento ecológico bajo condiciones térmicas contrastantes

Tratamiento	Condición	Componente biológico	Descripción
T1 (A1B0)	Sin invernadero	Blanco	Control sin invernadero, sin incorporación de organismos biológicos
T2 (A1B1)	Sin invernadero	<i>Eichhornia crassipes</i>	Fitorremediación mediante macrófita acuática flotante sin invernadero
T3 (A1B2)	Sin invernadero	<i>Chara</i> spp.	Pulimiento eco-depurador mediante alga carófito sumergida sin invernadero
T4 (A2B0)	Con invernadero	Blanco	Control con invernadero, sin incorporación de organismos biológicos
T5 (A2B1)	Con invernadero	<i>Eichhornia crassipes</i>	Fitorremediación mediante macrófita acuática flotante bajo condiciones de invernadero
T6 (A2B2)	Con invernadero	<i>Chara</i> spp.	Pulimiento eco-depurador mediante alga carófito sumergida bajo condiciones de invernadero

El monitoreo se realizó cada 15 días durante 75 días, obteniéndose seis jornadas de muestreo. En cada evaluación se analizaron los parámetros fisicoquímicos pH, temperatura, DBO₅, DQO, nitritos (NO₂⁻), nitratos (NO₃⁻), fósforo total (PO₄³⁻) y sulfatos (SO₄²⁻), medidos desde el día 0 (inicio del ensayo) y repetidos en los días 15, 30, 45, 60 y 75, lo que permitió evaluar la evolución temporal del proceso de tratamiento.

Metodología de la siembra del Jacinto de agua y la Chara

El jacinto de agua (*Eichhornia crassipes*) fue recolectado en la costa del Perú y acondicionado durante 15 días en ambiente interior en la ciudad



de Juliaca, con el fin de favorecer su adaptación previa al establecimiento experimental. En el día 0, se acondicionaron 18 pozas experimentales, ubicadas dentro y fuera del invernadero, cada una con aproximadamente 400 L de agua residual proveniente del punto de desfogue de la Universidad Peruana Unión, campus Juliaca, empleando una motobomba para su transferencia. Una vez completado el llenado, se procedió a la instalación de las macrófitas según los tratamientos establecidos: 6 pozas recibieron 20 individuos de jacinto de agua previamente adaptado, otras 6 pozas fueron acondicionadas con 5 kg de chara recolectada del lago Titicaca el mismo día, registrándose su longitud inicial, y las 6 pozas restantes se mantuvieron como tratamiento control, sin macrófitas. El monitoreo del crecimiento de las especies se realizó a intervalos de 15 días, mediante la evaluación de variables morfológicas tales como número de individuos, longitud de crecimiento, desarrollo del tallo, desarrollo de raíces y floración. Las mediciones se efectuaron con una regla graduada, complementándose con muestreos aleatorios y compuestos para el seguimiento integral de la evolución de las macrófitas durante el periodo experimental.

Recolección y determinación de los parámetros analizados

El agua residual doméstica fue recolectada del sistema de alcantarillado universitario y posteriormente se realizó su caracterización inicial siguiendo los procedimientos establecidos en Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. Los parámetros analizados incluyeron la Demanda Bioquímica de Oxígeno a cinco días (DBO_5) y la Demanda Química de Oxígeno (DQO), ambos expresados en mg/L, determinados mediante los métodos 5210 B y 5220 D, respectivamente, con una frecuencia de evaluación cada 15 días. Asimismo, se cuantificaron los nutrientes inorgánicos: nitrato (NO_3^-) por el método 4500- NO_3^- , nitrito (NO_2^-) mediante el método 4500- NO_2^- y fosfato total (PO_4^{3-}) por el método 4500-P, todos con periodicidad quincenal y expresados en mg/L. Del mismo modo, el sulfato (SO_4^{2-}) fue determinado en mg/L siguiendo el método 4500 correspondiente, también cada 15 días. La metodología se estructuró a partir de un sistema de monitoreo ambiental automatizado, basado en sensores industriales seleccionados por su alta



estabilidad operativa, baja deriva y resistencia a la descalibración. El sistema fue implementado en nueve pozas experimentales destinadas al tratamiento de aguas residuales, distribuidas en tres tratamientos: tres pozas con jacinto de agua, tres con Chara y tres pozas control sin macrófitas. Con fines de análisis comparativo, los datos registrados en cada grupo experimental fueron promediados para obtener un valor representativo por tratamiento. La plataforma de instrumentación estuvo compuesta por sensores multiparamétricos industriales con interfaz RS485, electrodos sumergibles, placas electrónicas para adquisición de datos, reguladores de voltaje, una fuente de alimentación estabilizada, un módulo ESP32 con pantalla integrada y memoria SD, además de cableado industrial y un sistema de comunicación serial. Esta configuración permitió disponer de un sistema cerrado, robusto y confiable para la adquisición continua de información ambiental. Asimismo, el sistema operó bajo especificaciones técnicas compatibles con estándares industriales y certificaciones como CE, RoHS e IP65/IP67, lo que respaldó su desempeño en condiciones experimentales. Se registraron de forma continua variables como temperatura media diaria del aire, humedad relativa media diaria, conductividad eléctrica, temperatura del agua y radiación solar, con una frecuencia de muestreo de un dato por minuto. Posteriormente, la información fue procesada mediante promedios cada 30 minutos, garantizando consistencia en los registros, confiabilidad instrumental y validez científica en el análisis comparativo de los sistemas con jacinto de agua, Chara y tratamiento control

Resultados

Remoción de contaminantes bajo un sistema factorial de tratamiento biológico

La Tabla 2 resume la dinámica temporal de remoción de carga orgánica y nutrientes en los tratamientos evaluados durante los 75 días de operación.



Tabla 2. Evolución de los parámetros fisicoquímicos asociados a la carga orgánica y nutrientes en aguas residuales domésticas bajo los tratamientos experimentales durante 75 días

Tratamiento/Día	DBO (mg/L)	DQO (mg/L)	Fósforo Total (mg/L)	Nitrito (mg/L)	Nitrato (mg/L)	Sulfato (mg/L)
T1D0	457.4 ± 0.0001 ^f	1764.0 ± 0.0001 ^f	70.4 ± 0.0001 ^e	0.1940 ± 0.0001 ^d	13.7 ± 0.0001 ^e	74.0 ± 0.0001 ^w
T1D15	343.6 ± 0.0001 ^e	1366.5 ± 0.0001 ^e	68.8 ± 0.0001 ^d	0.1820 ± 0.0001 ^c	13.5 ± 0.0001 ^{de}	73.0 ± 0.0001 ^u
T1D30	313.3 ± 0.0001 ^d	1321.0 ± 0.0001 ^d	66.5 ± 0.0001 ^c	0.1690 ± 0.0001 ^b	13.4 ± 0.0001 ^{de}	72.0 ± 0.0001 ^t
T1D45	275.6 ± 0.0001 ^c	1256.0 ± 0.0001 ^c	66.4 ± 0.0001 ^c	0.1640 ± 0.0001 ^b	13.2 ± 0.0001 ^{de}	72.0 ± 0.0001 ^t
T1D60	231.4 ± 0.0001 ^b	1164.0 ± 0.0001 ^b	65.3 ± 0.0001 ^b	0.1580 ± 0.0001 ^{ab}	13.1 ± 0.0001 ^{de}	70.0 ± 0.0001 ^r
T1D75	212.0 ± 0.0001 ^a	1092.0 ± 0.0001 ^a	63.1 ± 0.0001 ^a	0.1560 ± 0.0001 ^{ab}	12.8 ± 0.0001 ^d	68.0 ± 0.0001 ^p
T2D0	457.4 ± 0.0001 ^f	1764.0 ± 0.0001 ^f	70.4 ± 0.0001 ^e	0.1940 ± 0.0001 ^d	13.7 ± 0.0001 ^e	74.0 ± 0.0001 ^w
T2D15	294.1 ± 0.0001 ^{cd}	1051.5 ± 0.0001 ^s	59.5 ± 0.0001 ^a	0.0910 ± 0.0001 ⁱ	7.0 ± 0.0001 ^c	70.0 ± 0.0001 ^r
T2D30	208.6 ± 0.0001 ^a	859.0 ± 0.0001 ^r	50.6 ± 0.0001 ^s	0.0820 ± 0.0001 ^k	5.9 ± 0.0001 ^b	69.0 ± 0.0001 ^q
T2D45	173.3 ± 0.0001 ^z	796.5 ± 0.0001 ^q	47.9 ± 0.0001 ^r	0.0610 ± 0.0001 ^j	5.0 ± 0.0001 ^a	68.0 ± 0.0001 ^p
T2D60	148.9 ± 0.0001 ^y	696.5 ± 0.0001 ^p	41.8 ± 0.0001 ^q	0.0410 ± 0.0001 ⁱ	4.2 ± 0.0001 ^a	67.0 ± 0.0001 ^o
T2D75	125.1 ± 0.0001 ^x	674.0 ± 0.0001 ^o	37.9 ± 0.0001 ^p	0.0310 ± 0.0001 ^h	3.2 ± 0.0001 ^a	64.0 ± 0.0001 ^m
T3D0	457.4 ± 0.0001 ^f	1764.0 ± 0.0001 ^f	70.4 ± 0.0001 ^e	0.1940 ± 0.0001 ^d	13.7 ± 0.0001 ^e	74.0 ± 0.0001 ^w
T3D15	246.0 ± 0.0001 ^{bc}	969.0 ± 0.0001 ^t	45.5 ± 0.0001 ^r	0.0650 ± 0.0001 ^j	6.1 ± 0.0001 ^{bc}	69.0 ± 0.0001 ^q
T3D30	169.7 ± 0.0001 ^z	741.5 ± 0.0001 ^p	33.8 ± 0.0001 ^o	0.0560 ± 0.0001 ⁱ	5.6 ± 0.0001 ^{ab}	67.0 ± 0.0001 ^o
T3D45	147.0 ± 0.0001 ^y	596.5 ± 0.0001 ⁿ	28.2 ± 0.0001 ^m	0.0390 ± 0.0001 ^h	5.2 ± 0.0001 ^{ab}	62.0 ± 0.0001 ^k
T3D60	98.7 ± 0.0001 ^w	491.5 ± 0.0001 ⁱ	26.5 ± 0.0001 ⁱ	0.0290 ± 0.0001 ^g	4.9 ± 0.0001 ^a	59.0 ± 0.0001 ⁱ
T3D75	83.3 ± 0.0001 ^v	460.8 ± 0.0001 ^k	23.6 ± 0.0001 ^k	0.0190 ± 0.0001 ^f	3.0 ± 0.0001 ^a	52.0 ± 0.0001 ^f
T4D0	457.4 ± 0.0001 ^f	1764.0 ± 0.0001 ^f	70.4 ± 0.0001 ^e	0.1940 ± 0.0001 ^d	13.7 ± 0.0001 ^e	74.0 ± 0.0001 ^w
T4D15	308.7 ± 0.0001 ^d	1251.5 ± 0.0001 ^{cd}	65.4 ± 0.0001 ^b	0.1710 ± 0.0001 ^{bc}	13.0 ± 0.0001 ^{de}	71.0 ± 0.0001 ^s
T4D30	225.3 ± 0.0001 ^{ab}	1100.0 ± 0.0001 ^a	63.1 ± 0.0001 ^a	0.1590 ± 0.0001 ^{ab}	12.4 ± 0.0001 ^d	69.0 ± 0.0001 ^q
T4D45	186.0 ± 0.0001 ^a	1010.0 ± 0.0001 ^s	62.0 ± 0.0001 ^a	0.1510 ± 0.0001 ^a	11.9 ± 0.0001 ^d	65.0 ± 0.0001 ⁿ
T4D60	174.0 ± 0.0001 ^z	924.0 ± 0.0001 ^s	60.1 ± 0.0001 ^a	0.1350 ± 0.0001 ^a	11.4 ± 0.0001 ^{cd}	64.0 ± 0.0001 ^m
T4D75	146.6 ± 0.0001 ^y	812.0 ± 0.0001 ^r	59.0 ± 0.0001 ^a	0.1190 ± 0.0001 ^a	10.8 ± 0.0001 ^c	63.0 ± 0.0001 ^l
T5D0	457.4 ± 0.0001 ^f	1764.0 ± 0.0001 ^f	70.4 ± 0.0001 ^e	0.1940 ± 0.0001 ^d	13.7 ± 0.0001 ^e	74.0 ± 0.0001 ^w
T5D15	164.7 ± 0.0001 ^z	724.0 ± 0.0001 ^o	32.4 ± 0.0001 ⁿ	0.0410 ± 0.0001 ⁱ	5.9 ± 0.0001 ^b	67.0 ± 0.0001 ^o
T5D30	87.7 ± 0.0001 ^v	396.5 ± 0.0001 ^j	22.3 ± 0.0001 ^j	0.0230 ± 0.0001 ^g	5.1 ± 0.0001 ^{ab}	61.0 ± 0.0001 ^j
T5D45	63.1 ± 0.0001 ^u	229.0 ± 0.0001 ^h	19.8 ± 0.0001 ⁱ	0.0110 ± 0.0001 ^e	4.5 ± 0.0001 ^a	56.0 ± 0.0001 ^h
T5D60	44.1 ± 0.0001 ^t	146.5 ± 0.0001 ^f	17.5 ± 0.0001 ^h	0.0090 ± 0.0001 ^d	3.8 ± 0.0001 ^a	46.0 ± 0.0001 ^o
T5D75	36.4 ± 0.0001 ^s	95.8 ± 0.0001 ^e	15.9 ± 0.0001 ^g	0.0050 ± 0.0001 ^c	2.9 ± 0.0001 ^a	39.0 ± 0.0001 ^b



T6D0	457.4 ± 0.0001 ^f	1764.0 ± 0.0001 ^f	70.4 ± 0.0001 ^e	0.1940 ± 0.0001 ^d	13.7 ± 0.0001 ^e	74.0 ± 0.0001 ^w
T6D15	197.4 ± 0.0001 ^a	809.0 ± 0.0001 ^q	40.4 ± 0.0001 ^p	0.0470 ± 0.0001 ⁱ	7.2 ± 0.0001 ^c	61.0 ± 0.0001 ^j
T6D30	137.3 ± 0.0001 ^x	521.5 ± 0.0001 ^m	28.5 ± 0.0001 ^m	0.0370 ± 0.0001 ^h	6.5 ± 0.0001 ^{bc}	53.0 ± 0.0001 ^g
T6D45	110.4 ± 0.0001 ^w	351.5 ± 0.0001 ⁱ	24.6 ± 0.0001 ^k	0.0310 ± 0.0001 ^h	5.8 ± 0.0001 ^b	47.0 ± 0.0001 ^E
T6D60	75.4 ± 0.0001 ^v	246.5 ± 0.0001 ^h	23.4 ± 0.0001 ^j	0.0220 ± 0.0001 ^g	4.8 ± 0.0001 ^a	40.0 ± 0.0001 ^C
T6D75	66.4 ± 0.0001 ^u	231.5 ± 0.0001 ^h	20.5 ± 0.0001 ⁱ	0.0130 ± 0.0001 ^f	4.0 ± 0.0001 ^a	36.0 ± 0.0001 ^A

Nota: T1–T6 corresponden a los tratamientos experimentales evaluados; D0, D15, D30, D45, D60 y D75 representan los días de monitoreo (0, 15, 30, 45, 60 y 75 días, respectivamente). Los valores se expresan como media ± desviación estándar. Letras distintas en superíndice dentro de una misma columna indican diferencias significativas entre tratamientos y/o tiempos de evaluación, de acuerdo con la prueba de comparación múltiple ($p < 0.05$).

Los resultados muestran un efecto marcado tanto del componente biológico como de la condición térmica del sistema, evidenciando respuestas diferenciadas en la depuración de materia orgánica, fósforo y especies nitrogenadas y sulfatadas.

Dinámica fisicoquímica y microclimática del sistema de tratamiento

La Tabla 3 muestra el comportamiento del potencial de hidrogeno durante los 75 días experimentales.

Tabla 3. Comportamiento del potencial de hidrógeno (pH) en los diferentes tratamientos durante el periodo experimental de 75 días

Tratamientos	Tiempo (días)					
	0	15	30	45	60	75
	Potencial de hidrógeno					
T1	8.4	8.3	8.3	8.1	8.0	7.6
T2	8.4	8.4	8.5	8.6	8.6	8.6
T3	8.4	8.4	8.4	8.5	8.5	8.5
T4	8.4	8.1	8.1	8.0	7.8	7.8



T5	8.4	8.6	8.7	8.7	8.8	8.8
T6	8.4	8.5	8.5	8.6	8.6	8.6

La Tabla 3 muestra que el pH inicial fue uniforme en todos los tratamientos (8.4), evidenciando condiciones de partida homogéneas. Durante los 75 días de evaluación, se observaron comportamientos diferenciados: T5 presentó un incremento progresivo del pH hasta 8.8, seguido de T2 y T6, que mantuvieron valores alcalinos estables (8.6). En contraste, T1 y T4 evidenciaron una disminución sostenida, alcanzando 7.6 y 7.8, respectivamente, mientras que T3 mostró una variación mínima, con valores entre 8.4 y 8.5. Además, la Tabla 4 muestra el comportamiento de la temperatura, humedad y la radiación solar.

Tabla 4. Comportamiento horario de la temperatura, humedad y la radiación solar en condiciones ambientales, bajo invernadero y en los tratamientos evaluados

Tiem po	Temperatura (°C)								Humedad (%)		Radiación solar (W/m ²)	
	Ambien tal	Invernad ero	T1	T2	T3	T4	T5	T6	Ambien tal	En invernad ero	Ambien te	En Invernad ero
00:00	4.97	9.37	10.2 0	9.80	10.1 0	12.9 0	13.2 0	13.3 0	46.0	85.5	0	0
00:30	4.91	8.98	9.70	9.20	9.50	10.8 0	11.2 0	11.4 0	47.3	87.0	0	0
01:00	4.51	8.58	9.10	8.60	8.90	9.80	10.5 0	10.4 0	48.6	87.3	0	0
01:30	4.13	8.26	8.40	7.90	8.10	9.00	9.60	9.50	48.6	88.3	0	0
02:00	3.78	7.94	7.70	7.10	7.20	8.30	8.70	8.80	50.1	88.8	0	0
02:30	3.56	7.63	7.10	6.80	6.80	7.70	8.10	8.30	50.5	89.2	0	0
03:00	3.21	7.55	6.60	6.40	6.50	7.10	7.40	7.60	52.4	89.9	0	0
03:30	2.86	6.96	6.10	6.20	6.20	6.90	7.00	7.10	51.9	90.0	0	0
04:00	2.55	6.99	5.80	6.00	5.90	6.50	6.70	6.80	52.3	91.2	0	0
04:30	2.17	6.66	5.10	5.30	5.20	6.10	6.20	6.20	53.5	91.1	0	0
05:00	1.96	6.57	4.90	5.00	5.10	5.90	6.10	6.10	54.8	91.4	0	0
05:30	1.76	5.74	4.80	4.90	5.00	5.80	6.00	5.80	57.7	91.6	2	0
06:00	2.00	8.33	5.20	5.70	5.50	6.30	6.70	6.50	57.2	80.7	31	9
06:30	2.33	10.51	7.40	8.60	8.10	9.50	9.80	10.0 0	56.3	69.9	167	101
07:00	4.21	18.37	9.60	10.4 0	9.20	10.3 0	11.0 0	11.6 0	54.1	63.4	210	159
07:30	6.17	23.96	11.7 0	12.9 0	11.0 0	12.1 0	12.9 0	13.1 0	50.2	63.2	301	265
08:00	8.26	28.86	13.8 0	14.0 0	13.1 0	13.3 0	14.2 0	14.4 0	44.7	62.2	423	361
08:30	10.17	34.16	14.2 0	14.3 0	13.1 0	13.5 0	15.2 0	15.6 0	41.7	56.2	503	427



09:00	11.67	36.80	15.6 0	16.2 0	13.3 0	14.5 0	16.6 0	17.6 0	40.2	55.6	589	433
09:30	12.70	39.46	15.9 0	16.5 0	15.4 0	14.9 0	16.8 0	18.1 0	36.9	52.9	710	446
10:00	13.57	41.87	16.2 0	17.0 0	16.1 0	17.2 0	18.6 0	18.7 0	34.8	51.8	790	469
10:30	14.32	43.72	16.9 0	18.3 0	17.9 0	17.6 0	20.3 0	21.4 0	32.7	51.8	846	476
11:00	15.31	45.29	17.3 0	19.8 0	19.2 0	18.8 0	22.9 0	23.2 0	30.5	51.5	904	496
11:30	15.98	47.16	18.8 0	20.6 0	21.8 0	21.3 0	27.3 0	27.6 0	28.6	49.0	944	518
12:00	16.54	47.53	21.4 0	23.1 0	23.4 0	22.8 0	28.7 0	29.9 0	29.0	48.9	979	719
12:30	17.00	48.21	22.1 0	23.5 0	23.8 0	27.4 0	30.2 0	31.0 0	27.9	48.8	1017	801
13:00	17.17	48.22	23.8 0	24.0 0	24.0 0	26.9 0	29.4 0	29.7 0	26.6	51.8	926	625
13:30	17.32	48.24	25.5 0	26.5 0	25.6 0	26.7 0	27.8 0	29.4 0	24.9	52.7	848	519
14:00	17.77	47.23	23.8 0	26.0 0	24.0 0	26.3 0	27.7 0	28.8 0	23.7	53.7	771	515
14:30	17.24	45.10	23.1 0	25.9 0	23.3 0	26.1 0	27.5 0	28.5 0	24.7	55.3	650	479
15:00	17.19	42.60	21.2 0	25.2 0	23.2 0	25.8 0	27.2 0	28.4 0	26.6	55.9	578	479
15:30	16.81	40.80	20.9 0	24.8 0	22.9 0	25.1 0	26.9 0	28.2 0	27.3	56.9	447	332
16:00	16.38	36.94	20.7 0	23.4 0	22.1 0	25.0 0	26.8 0	28.1 0	27.4	58.4	321	267
16:30	15.52	31.78	20.4 0	23.2 0	21.9 0	24.4 0	26.4 8	27.6 0	29.1	63.8	170	113
17:00	14.32	21.59	19.2 0	19.3 0	20.0 0	22.8 0	24.6 0	25.3 0	32.3	67.3	66	51
17:30	12.71	18.03	19.1 0	19.2 0	19.0 0	21.7 0	22.8 0	24.5 0	36.6	73.8	14	10
18:00	11.66	16.48	18.1 0	18.2 0	18.6 0	21.7 0	21.7 0	22.7 0	38.7	75.2	2	1.4
18:30	10.80	15.80	18.1 0	16.6 0	17.4 0	20.8 0	19.5 0	20.7 0	41.0	77.4	0	0
19:00	9.83	14.59	17.8 0	16.4 0	15.9 0	20.3 0	18.1 0	19.8 0	44.3	79.6	0	0
19:30	9.09	13.69	14.3 2	15.2 0	15.7 0	18.3 0	17.0 0	18.7 0	46.8	79.2	0	0
20:00	8.42	13.08	14.0 0	14.8 0	14.0 0	17.9 0	16.9 0	18.0 0	47.4	81.6	0	0
20:30	7.96	12.49	13.8 0	13.6 0	13.3 0	16.8 0	16.7 0	17.2 0	44.0	84.3	0	0
21:00	7.29	11.89	12.9 0	12.7 0	12.7 0	16.2 0	16.4 0	16.8 0	43.9	86.5	0	0
21:30	6.88	11.17	12.5 0	11.5 0	12.2 0	15.9 0	15.6 0	16.2 0	41.4	90.0	0	0
22:00	6.26	10.42	12.1 0	11.1 0	11.8 0	15.0 0	15.3 0	15.9 0	41.7	90.0	0	0
22:30	5.82	9.95	11.8 0	10.9 0	11.3 0	14.9 5	14.8 4	14.7 6	42.1	90.0	0	0
23:00	5.28	9.47	11.2 0	10.8 2	10.8 4	13.4 0	14.3 0	14.3 4	42.6	88.3	0	0
23:30	4.73	8.84	10.7 0	10.3 0	10.2 2	13.2 0	13.6 0	13.7 0	43.3	88.8	0	0
Media	9.31	22.79	14.1 0	14.6 6	14.2 8	16.0 7	17.0 6	17.6 5	41.1	72.5	275	189



Eficiencias

La Figura 2 muestra la eficiencia de carga orgánica y nutrientes en los tratamientos evaluados, durante los 75 días experimentales.

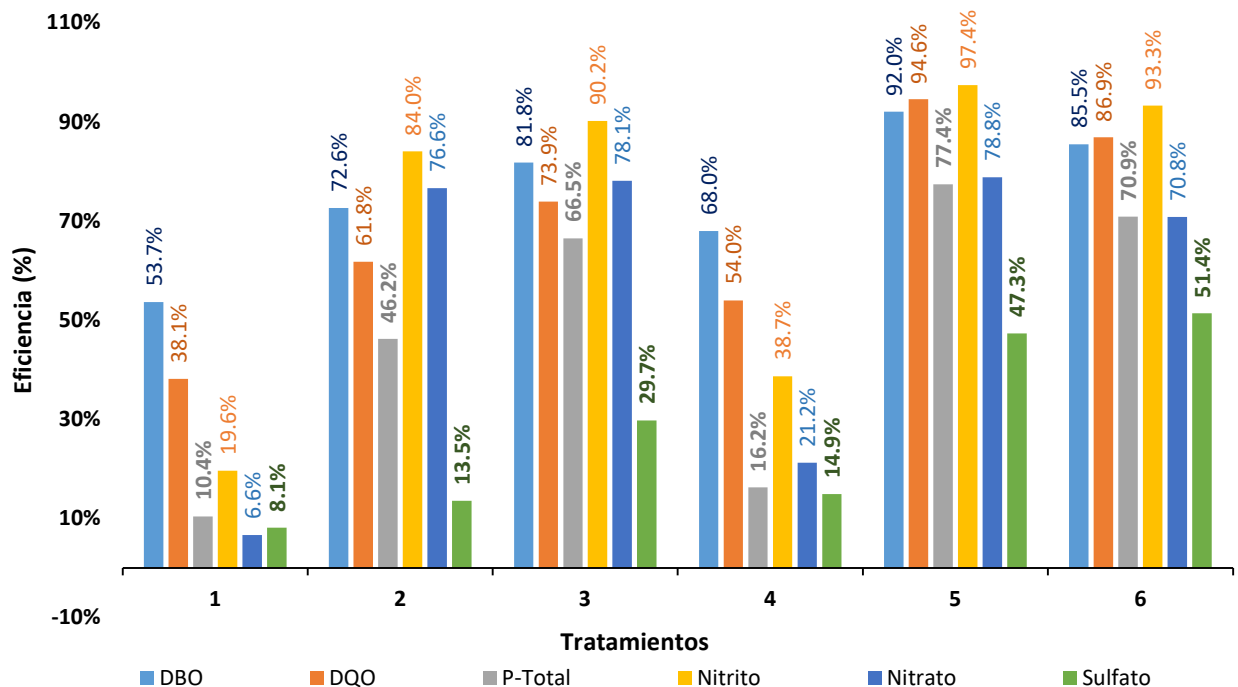


Figura 2. Comparación de la eficiencia de remoción de materia orgánica y nutrientes en los tratamientos experimentales

Parámetros morfofisiológicos en macrófitas acuáticas



La Tabla 5 muestra como fue el comportamiento morfofisiológicos del Jacinto de agua durante los 75 días del periodo experimental.

Tabla 5. Dinámica temporal de parámetros morfofisiológicos de *Eichhornia crassipes* bajo condiciones con y sin invernadero

Tiempo	Macrofita <i>Eichhornia crassipes</i> (Jacinto de agua)							
	Sin invernadero	Con invernadero	Sin invernadero	Con invernadero	Sin invernadero	Con invernadero	Sin invernadero	Con invernadero
Días	Densidad poblacional (unidades)		Longitud de raíces adventicias nuevas (cm)		Incremento longitudinal de raíces preexistentes (cm)		Longitud de raíces senescentes (cm)	
0	20	20	0	0	3.67	4.1	0	0
15	20	20	0	1.4	4.23	6.8	2.3	0.2
30	22	25	0.3	3.2	5.1	9.7	2.6	0.3
45	21	38	1.2	5.6	5.9	13.1	3.3	0
60	23	57	3	6.2	7.6	15.2	4	0
75	24	69	4.3	6.8	8.4	17.6	5.8	0
Días	Elongación foliar en hojas establecidas (cm)		Tasa de expansión foliar en hojas emergentes (cm)		Número de hojas senescentes (unidades)		Número de inflorescencias por individuo	
0	10.6	10.5	0	0	0	0	0	0
15	11.4	12.3	0	0	2	0	0	0
30	12.3	16.9	0	1.6	3	0	0	0
45	13.1	21.3	1.3	5.2	4	2	0	1
60	14.2	29.6	2	6.3	4	3	0	5
75	16.1	33.4	3	9.8	4	1	0	12

La Tabla 6 muestra como fue el comportamiento morfofisiológicos de la *Chara spp.* durante los 75 días del periodo experimental

Tabla 6. Dinámica temporal del crecimiento estructural y regeneración de *Chara spp.* bajo condiciones con y sin invernadero

Tiempo	Carófito sumergida - <i>Chara spp.</i>					
	Sin invernadero	Con invernadero	Sin invernadero	Con invernadero	Sin invernadero	Con invernadero



Días	Longitud del talo principal (cm)		Número de brotes laterales nuevos (unidades)		Número de ejes senescentes (unidades)	
0	22.6	23	0	0	0	0
15	32.7	27	0	0	2	1
30	37.1	39.4	1.3	0.2	2	2
45	40.2	48	2	2.3	4	2
60	40.5	52.17	3.6	2.9	9	5
75	43.4	54.3	4.8	3.2	9	7

Discusión

Remoción de contaminantes bajo un sistema factorial de tratamiento biológico

La Tabla 2 evidencia que la eficiencia de depuración estuvo fuertemente condicionada por la interacción entre el componente biológico (tipo de macrófita) y la condición térmica (presencia de invernadero), generando diferencias significativas entre tratamientos y a lo largo del tiempo ($p < 0.05$). Las letras superíndices obtenidas mediante la prueba de comparación múltiple de Tukey confirman la formación de grupos homogéneos diferenciados, lo que respalda que las variaciones observadas responden directamente a los factores experimentales y no a fluctuaciones aleatorias. Se identificó una dinámica bifásica en todos los tratamientos: una fase inicial de remoción rápida (0–30 días), seguida de una etapa de estabilización o pulimiento (30–75 días), comportamiento típico de sistemas tipo humedal donde los procesos de adsorción, biodegradación y transformación redox ocurren de manera acoplada (Wu et al., 2023).. Sin embargo, el análisis estadístico evidencia que la magnitud de esta respuesta difiere significativamente entre tratamientos, destacando T5 y T6 como los sistemas con mejor desempeño global.

En términos de materia orgánica, los tratamientos con macrófitas mostraron reducciones significativamente superiores respecto a los controles, siendo T5 (*Eichhornia crassipes* bajo invernadero) el sistema



43

más eficiente. La DBO disminuyó de 457.4 a 36.4 mg/L (92.0%) y la DQO de 1764.0 a 95.8 mg/L (94.6%) al día 75. No obstante, el aspecto más relevante es la cinética del proceso: más del 70% de la remoción ocurrió dentro de los primeros 30 días, lo que indica que la etapa inicial está dominada por la biodegradación de compuestos fácilmente asimilables, seguida por una fase más lenta asociada a la degradación de fracciones recalcitrantes. Desde el punto de vista estadístico, la prueba de Tukey muestra que T5 se ubica en grupos significativamente inferiores desde etapas tempranas (letras como V, U, T y S), diferenciándose claramente de los controles (T1), que permanecen en grupos superiores (a-f). Esta separación confirma que la superioridad de T5 no solo es cuantitativa, sino también estadísticamente consistente en el tiempo. Además, aunque T6 también presenta mejoras significativas, sus valores finales son ligeramente superiores, lo que sugiere diferencias en los mecanismos predominantes de remoción.

1

El efecto del invernadero resulta determinante en esta dinámica, ya que el incremento de temperatura favorece la actividad microbiana y acelera las tasas metabólicas, incrementando la velocidad de oxidación de la materia orgánica. Este comportamiento ha sido ampliamente reportado en humedales construidos, donde la temperatura actúa como un factor limitante o potenciador del proceso (Akratos & Tsihrintzis, 2007). Desde un enfoque mecanístico, el alto desempeño de los sistemas con macrófitas se explica por el acoplamiento planta-microbiota. Las raíces de *Eichhornia crassipes* incrementan el área superficial para el desarrollo de biofilms y liberan oxígeno en la rizósfera, generando microzonas aeróbicas que favorecen la degradación oxidativa. Este proceso se complementa con la retención física de sólidos y la absorción directa de nutrientes por la biomasa vegetal (Rehman, Pervez, Khattak, & Ahmad, 2017; Nahar & Sunny, 2024), lo que explica la elevada eficiencia observada en T5.

En cuanto al fósforo total, el tratamiento T5 alcanzó la mayor remoción (77.4%), mostrando diferencias significativas desde el día 15 respecto a T1 y T4. La prueba de Tukey evidencia una transición progresiva hacia grupos estadísticamente inferiores, lo que indica una remoción eficiente y temprana. Este comportamiento sugiere la acción combinada de mecanismos de adsorción, asimilación biológica y posibles procesos de precipitación, los cuales son típicos en sistemas de humedales (Zimiani, Luciane, Tatiane, & Jesus, 2024). Respecto a las



especies nitrogenadas, el análisis estadístico confirma una remoción altamente significativa del nitrito, especialmente en T5, donde los valores finales se ubican en grupos completamente diferenciados respecto a los iniciales. En contraste, el nitrato presenta una reducción más gradual, con cierto solapamiento de grupos en etapas intermedias, lo que refleja la naturaleza secuencial del proceso nitrificación-desnitrificación. Este comportamiento evidencia la coexistencia de microzonas aeróbicas y anóxicas dentro del sistema, característica clave en la eliminación de nitrógeno en humedales construidos (Yousaf et al., 2021).

El sulfato mostró una dinámica distinta, con remociones moderadas y dependientes de condiciones reductoras. El tratamiento T6 (*Chara spp.* bajo invernadero) alcanzó los valores más bajos (grupo A), significativamente diferentes de los tratamientos control (grupo W), lo que indica una mayor eficiencia en condiciones anóxicas. Este comportamiento sugiere la actividad de bacterias sulfatorreductoras, donde el sulfato actúa como aceptor final de electrones en ambientes reductores (Dyksma & Pester, 2024), evidenciando que *Chara spp.* podría favorecer condiciones más reductoras en comparación con *Eichhornia crassipes*. En conjunto, la integración del análisis estadístico mediante ANOVA y la prueba de Tukey confirma que las diferencias observadas entre tratamientos son estadísticamente significativas ($p < 0.05$), consolidando la superioridad del tratamiento T5 en la remoción de materia orgánica y nutrientes, y de T6 en procesos asociados a condiciones reductoras. Asimismo, se evidencia que el uso de invernadero no solo incrementa la eficiencia global del sistema, sino que acelera la cinética de depuración y reduce la variabilidad del proceso.

Estos hallazgos refuerzan el enfoque de los humedales construidos como sistemas altamente dependientes de la interacción entre factores ambientales y biológicos, donde el control de variables como la temperatura resulta clave para maximizar el desempeño, especialmente en contextos altoandinos donde las limitaciones térmicas suelen restringir la actividad microbiana y, por ende, la eficiencia del tratamiento (Parde et al., 2021).



Dinámica fisicoquímica y microclimática del sistema de tratamiento

La **Tabla 3** muestra que la dinámica del potencial de hidrógeno (pH) durante los 75 días de evaluación estuvo influida por los dos factores del sistema experimental: la condición térmica del tratamiento (sin invernadero y con invernadero) y la presencia o ausencia del componente biológico (control, *Eichhornia crassipes* y *Chara* spp.). En términos generales, todos los tratamientos se mantuvieron dentro de un intervalo alcalino relativamente estable (7.6–8.8), lo que sugiere condiciones químicas favorables para el tratamiento. Este comportamiento es coherente con lo descrito en sistemas acuáticos vegetados, donde el pH está regulado por la interacción entre fotosíntesis, respiración, carbono inorgánico disuelto y actividad microbiana. En particular, la remoción de CO₂ por la actividad fotosintética puede incrementar el pH al desplazar el equilibrio del sistema carbonato-bicarbonato, tal como señalaron Akratos y Tsihrintzis (2007) y Gao (2021). Akratos & Tsihrintzis (2007) y Gao (2021).

Los tratamientos control (T1 y T4) presentaron una disminución progresiva del pH, más acentuada en T1, lo que sugiere una menor capacidad de autorregulación del medio en ausencia de organismos depuradores. En contraste, los tratamientos con *Eichhornia crassipes* mostraron una tendencia ascendente, especialmente T5, que alcanzó el mayor valor del ensayo (8.8). Este resultado respalda el efecto positivo de esta macrófita sobre la calidad del agua, ya que se ha documentado su capacidad para mejorar parámetros fisicoquímicos como pH, sólidos suspendidos, oxígeno disuelto y nutrientes, además de su amplia adaptabilidad en sistemas de tratamiento de aguas residuales (Monroy et al., 2024). En esa misma línea, Ricart et al. (2023) indicaron que en sistemas con macrófitas flotantes el incremento del pH suele estar asociado al consumo de CO₂ durante la fotosíntesis, mecanismo que contribuye a la alcalinización del medio.

Por su parte, los tratamientos con *Chara* spp. (T3 y T6) mostraron un comportamiento más estable, con variaciones mínimas del pH, lo que sugiere un efecto regulador más constante sobre la química del agua. Este patrón es consistente con la ecología funcional de las carófitas, ya que especies del género *Chara* pueden utilizar de manera eficiente el carbono



inorgánico disuelto y actuar como sumideros de nutrientes en ecosistemas someros, contribuyendo así a la estabilidad del medio acuático. En este sentido, Markovic et al.(2023), destacaron que estas macroalgas desempeñan un papel importante en la regulación de la química del agua, mientras que Strzałek et al.(2023) subrayaron su contribución a la estabilidad ecológica y biogeoquímica de sistemas acuáticos poco profundos. En conjunto, estos resultados indican que los tratamientos con componente biológico, especialmente bajo condición de invernadero, favorecieron un ambiente más alcalino y estable que los tratamientos control, lo que respalda la integración de estrategias biológicas y térmicas en sistemas ecológicos de tratamiento de aguas residuales en ambientes altoandinos.

La **Tabla 4** muestra que la dinámica térmica del sistema estuvo determinada principalmente por la condición térmica definida en el diseño experimental, es decir, por la presencia o ausencia de invernadero, y en segundo término por el componente biológico incorporado en cada tratamiento. La radiación solar fue nula durante la noche y se incrementó progresivamente desde las primeras horas de la mañana hasta alcanzar su valor máximo a las 12:30 h, con 1017 W/m² en el ambiente y 801 W/m² dentro del invernadero. Aunque la radiación registrada en el interior fue menor, la cobertura permitió una mayor retención de calor y una menor pérdida térmica por convección, lo que favoreció temperaturas del agua más elevadas y estables en los tratamientos con invernadero (T4, T5 y T6) en comparación con los tratamientos sin cobertura (T1, T2 y T3). Este comportamiento coincide con lo reportado por Sun, Song, Yang, Liu, & Cui, (2023), quienes señalaron que la envoltura del invernadero reduce las pérdidas energéticas y mejora la acumulación térmica, generando un microclima más cálido que el exterior.

En los tratamientos sin invernadero, correspondientes a T1 (blanco), T2 (*Eichhornia crassipes*) y T3 (*Chara* spp.), las temperaturas medias fueron de 14.10, 14.66 y 14.28 °C, respectivamente, lo que evidencia una mayor exposición a la variación ambiental y a la amplitud térmica propia del contexto altoandino. En cambio, los tratamientos con invernadero, T4 (blanco), T5 (*Eichhornia crassipes*) y T6 (*Chara* spp.), alcanzaron medias superiores de 16.07, 17.06 y 17.65 °C, respectivamente. Asimismo, durante las horas de mayor radiación, T5 y T6 registraron los valores máximos más altos del sistema, con 30.20 y 31.00 °C, superando tanto a sus equivalentes sin cobertura como a los



tratamientos blanco. Estos resultados son particularmente relevantes, ya que la temperatura condiciona directamente la eficiencia de los humedales construidos y sistemas de fitotratamiento. Según Sun et al. (2023), en ambientes fríos la remoción de contaminantes tiende a disminuir debido a la menor actividad microbiana, la reducción de la absorción por macrófitas y la desaceleración de procesos como la nitrificación; por el contrario, un incremento térmico favorece el metabolismo biológico y mejora el desempeño depurativo del sistema.

Al comparar los tratamientos según el componente biológico, se observó que los sistemas blanco (T1 y T4) registraron temperaturas menores que los tratamientos con *Eichhornia crassipes* y *Chara* spp., mientras que T5 y T6 presentaron los mayores valores térmicos del experimento. Esto sugiere que, además del efecto dominante del invernadero, la presencia de macrófitas y algas pudo contribuir a modificar la inercia térmica del agua mediante cambios en la cobertura superficial, la absorción de radiación y la dinámica interna del sistema. En el caso de *Eichhornia crassipes*, su alta productividad y su reconocida capacidad de adaptación en sistemas de tratamiento respaldan su papel en la modificación del microambiente acuático, como lo reportaron Monroy et al. (2024). Por su parte, Liu (2023) indicó que las carófitas del género *Chara* poseen mecanismos eficientes de adquisición de carbono inorgánico para la fotosíntesis, estrechamente vinculados con cambios en el pH, la alcalinidad y la dinámica interna del agua, lo que ayuda a explicar su comportamiento estable dentro del sistema. En conjunto, estos resultados evidencian que la combinación entre cobertura térmica pasiva y componente biológico, particularmente en T5 y T6, generó las condiciones más favorables para mantener temperaturas más altas y estables, lo cual representa una ventaja operativa importante para el tratamiento ecológico de aguas residuales domésticas en ambientes altoandinos.

La temperatura dentro del invernadero fue consistentemente superior a la temperatura ambiental durante todo el periodo evaluado. El valor máximo registrado en el interior alcanzó 48.24 °C a las 13:30 h, mientras que en el ambiente la temperatura máxima fue de 17.77 °C a las 14:00 h. Del mismo modo, durante la madrugada se mantuvo una ventaja térmica sostenida dentro del invernadero; por ejemplo, a las 05:30 h se registraron 5.74 °C en el interior frente a 1.76 °C en el ambiente. Además, la temperatura media en el invernadero fue de 22.79



°C, ampliamente superior a la media ambiental de 9.31 °C. En conjunto, estos resultados evidencian un efecto invernadero eficiente bajo condiciones altoandinas, al favorecer la acumulación y conservación del calor a lo largo del día y reducir la severidad de las bajas temperaturas nocturnas, en concordancia con lo descrito por Sun et al. (2023) para sistemas protegidos con cobertura.

La radiación solar diaria acumulada fue de aproximadamente 23.76 MJ m⁻² en condiciones ambientales y 16.33 MJ m⁻² dentro del invernadero, lo que equivale a una transmitancia media cercana al 68.7 %. Asimismo, la radiación alcanzó su valor máximo a las 12:30 h, con 1017 W m⁻² en el ambiente y 801 W m⁻² en el interior del invernadero. Estos resultados muestran que, aunque la cubierta redujo parcialmente la radiación incidente, permitió el ingreso de una proporción importante de energía solar, suficiente para favorecer el calentamiento interno del sistema. En términos generales, estos valores se encuentran dentro de lo esperable para cubiertas plásticas agrícolas empleadas en condiciones altoandinas (Franco, Rodríguez-Arroyo, Jiménez-Lao, Garzón, & Lao, 2023).

La humedad relativa presentó un comportamiento inversamente relacionado con la temperatura y la radiación solar, tanto en el ambiente externo como en el interior del invernadero. Durante la madrugada, cuando la radiación solar fue nula y las temperaturas fueron más bajas, la humedad alcanzó sus valores máximos, registrándose entre 46.0 % y 57.7 % en el ambiente y entre 85.5 % y 91.6 % dentro del invernadero. En contraste, conforme la radiación solar aumentó desde las primeras horas de la mañana y la temperatura se elevó progresivamente hasta el mediodía, la humedad relativa disminuyó en ambos medios, alcanzando mínimos de 23.7 % en el ambiente y 48.8 % en el interior del invernadero. Este comportamiento responde a la relación física esperada entre estas variables, ya que el incremento de la temperatura aumenta la capacidad del aire para contener vapor de agua y, en consecuencia, reduce la humedad relativa cuando no existe un aporte proporcional de humedad, tal como fue descrito por Chen et al. (2025) en estudios sobre microclima de invernaderos.

La comparación entre ambientes muestra que el invernadero generó un microclima claramente diferenciado, con una humedad relativa media de 72.5 %, muy superior al 41.1 % registrado en el exterior. Aun cuando



en el interior se alcanzaron temperaturas considerablemente más altas, el invernadero conservó valores de humedad relativa superiores durante todo el ciclo diario, lo que indica una mayor retención de vapor de agua y una menor ventilación directa con el exterior. Este efecto coincide con lo reportado por Choab et al. (2019) y H. Liu et al. (2025) , quienes señalaron que las estructuras cubiertas reducen el intercambio convectivo, amortiguan las pérdidas de agua y modifican simultáneamente el balance de energía y humedad del aire. En conjunto, la comparación de humedad, temperatura y radiación solar confirma que la radiación actuó como el principal impulsor del calentamiento diurno, mientras que el invernadero transformó esa energía en un ambiente más cálido y, al mismo tiempo, más húmedo que el exterior.

Esta regulación microclimática resulta especialmente relevante en condiciones altoandinas, donde las bajas temperaturas y la alta variabilidad térmica pueden limitar la actividad biológica de los sistemas de tratamiento. En humedales construidos y tecnologías afines, la temperatura es uno de los factores ambientales más determinantes del rendimiento del sistema, ya que modula la actividad microbiana, la fisiología de las macrófitas y la eficiencia de remoción de contaminantes. Por ello, la generación de un microambiente con menor fluctuación térmica y condiciones de humedad más estables puede contribuir a reducir el estrés sobre la biota y favorecer un funcionamiento más estable del sistema (Operacz, Krzysztof, & Bugajski, 2023).

Remoción

La Figura 2 demuestran que la incorporación de macrófitas acuáticas y el control microclimático mediante invernadero influyeron significativamente en la eficiencia de remoción de materia orgánica y nutrientes. En términos globales, los tratamientos con componente biológico superaron ampliamente a los controles (T1 y T4), confirmando que los procesos biológicos dominan la depuración en sistemas tipo humedal construido, más allá de los mecanismos físicos de sedimentación o dilución (Verduzo Garibay, Fernández del Castillo, de Anda, Senés-Guerrero, & Gradilla-Hernández, 2022).

El tratamiento T5 (*Eichhornia crassipes* bajo invernadero) alcanzó las mayores eficiencias de remoción de DBO (92.0%) y DQO (94.6%),



seguido por T6 y T3. Este comportamiento puede explicarse por la intensa actividad microbiana en la rizósfera de *E. crassipes*, donde la liberación radial de oxígeno favorece la degradación aerobia de compuestos orgánicos (He et al., 2023). La elevada remoción de DQO indica que no solo se degradó la fracción biodegradable, sino que también se promovieron procesos de transformación más amplios de la materia orgánica total, consistentes con sistemas de alta biomasa vegetal (Mar, Zit, Ortega-pineda, & Zamora-castro, 2024).

El efecto positivo del invernadero sugiere una influencia directa de la temperatura sobre las tasas cinéticas microbianas. Se ha demostrado que la actividad metabólica bacteriana en humedales es altamente dependiente de la temperatura, con incrementos exponenciales en la velocidad de degradación orgánica dentro de rangos mesofílicos (Conrad, 2023). En contextos altoandinos, donde las temperaturas son limitantes, el control térmico puede ser un factor determinante para maximizar la eficiencia del sistema.

La remoción de fósforo fue mayor en T5 (77.4%) y T6 (70.9%), lo cual coincide con lo reportado para sistemas con macrófitas flotantes y sumergidas, donde la eliminación ocurre por absorción vegetal, asimilación microbiana y precipitación química inducida por cambios de pH (Dean, Akhtar, Ditta, Valipour, & Aslam, 2022). La actividad fotosintética puede incrementar el pH en la columna de agua, favoreciendo la precipitación de fosfatos con calcio o hierro presentes en el medio. La menor eficiencia en los controles confirma que la remoción de fósforo es fuertemente dependiente de la biomasa activa, más que de procesos pasivos de sedimentación.

Las eficiencias elevadas de remoción de nitrito (hasta 97.4% en T5) sugieren una rápida oxidación o asimilación dentro del ciclo del nitrógeno. En sistemas con *E. crassipes*, la combinación de zonas oxigenadas en la rizósfera y microambientes anóxicos en el sustrato permite la coexistencia de nitrificación y desnitrificación, promoviendo la eliminación integral del nitrógeno reactivo (Marzocchi, Benelli, Larsen, Bartoli, & Glud, 2019). La ligera diferencia entre la remoción de nitrito y nitrato podría indicar que la nitrificación fue altamente eficiente, mientras que la desnitrificación dependió de la disponibilidad de carbono orgánico como fuente de electrones, proceso ampliamente documentado en humedales construidos (Sun et al., 2022). El incremento de eficiencia bajo condiciones de invernadero respalda lo reportado por Wang et al. (2023), quienes



13 demostraron que la temperatura es uno de los factores más influyentes en la eliminación de nitrógeno en sistemas naturales y artificiales.

Las eficiencias moderadas de sulfato (hasta 51.4% en T6) sugieren que la reducción bacteriana de sulfato pudo haber ocurrido en microzonas anaerobias del sistema. Sin embargo, este proceso suele ser menos dominante que los mecanismos asociados al carbono y nitrógeno, a menos que existan condiciones estrictamente reductoras (Cai et al., 2021). La mayor remoción en tratamientos con biomasa indica que la acumulación de materia orgánica pudo favorecer la actividad de bacterias sulfato-reductoras.

Aunque ambas especies mostraron desempeño relevante, *Eichhornia crassipes* evidenció mayor eficiencia global, probablemente debido a su alta tasa de crecimiento, extensa superficie radicular y elevada capacidad de transferencia de oxígeno a la rizósfera (Singh & Balomajumder, 2021). Por otro lado, *Chara spp.*, al ser una macroalga sumergida, depende más de procesos de asimilación directa y cambios en la química del agua inducidos por fotosíntesis, lo que podría explicar su desempeño ligeramente inferior en materia orgánica pero competitivo en nitrógeno.

Los resultados confirman que la combinación de macrófitas acuáticas y control térmico genera un efecto sinérgico que optimiza la depuración biológica. En climas fríos, donde la cinética microbiana suele ser el factor limitante, el uso de invernaderos podría incrementar significativamente la eficiencia y estabilidad de humedales construidos, reduciendo tiempos de retención hidráulica y mejorando el desempeño anual del sistema. El tratamiento T5 representa la configuración más eficiente, con remociones superiores al 90% para materia orgánica y nitrito, situándolo dentro de rangos reportados para sistemas terciarios de alta eficiencia.

Parámetros morfofisiológicos en macrófitas acuáticas

La Tabla 5 muestra que *Eichhornia crassipes* presentó un desempeño morfofisiológico claramente superior bajo condiciones de invernadero, lo que evidencia una respuesta positiva al microclima más cálido y estable



generado por la cobertura. Esta ventaja se expresó desde fases tempranas y se consolidó al final del ensayo, especialmente en densidad poblacional, elongación foliar y crecimiento radical. Mientras ambos tratamientos iniciaron con 20 individuos, al día 75 la densidad alcanzó 69 unidades con invernadero y solo 24 sin cobertura; del mismo modo, la elongación foliar en hojas establecidas llegó a 33.4 cm bajo invernadero, frente a 16.1 cm en condición abierta. Este patrón es coherente con la alta plasticidad ecológica, la rápida propagación clonal y la elevada producción de biomasa descritas para *E. crassipes*, rasgos que explican su notable capacidad de establecimiento y expansión en ambientes acuáticos favorables (You, Yu, Xie, & Yu, 2013).

La respuesta del sistema radical de la *Eichhornia crassipes* confirmó esta tendencia. Bajo invernadero, la longitud de raíces adventicias nuevas y el incremento longitudinal de raíces preexistentes alcanzaron 6.8 y 17.6 cm, respectivamente, valores sustancialmente mayores que los observados sin cobertura (4.3 y 8.4 cm). Asimismo, la tasa de expansión foliar en hojas emergentes fue más de tres veces mayor bajo invernadero al final del periodo experimental. Estos resultados sugieren que el ambiente protegido favoreció la formación de biomasa nueva y la renovación activa de tejidos, lo cual es funcionalmente relevante en sistemas de fitotratamiento, ya que las raíces de *E. crassipes* constituyen la principal interfaz para la absorción de nutrientes, la retención de sólidos y el soporte de comunidades microbianas asociadas a la depuración del agua (Talukdar, 2016).

En contraste, los indicadores de senescencia fueron menores bajo invernadero. La longitud de raíces senescentes se redujo a 0 cm desde el día 45 hasta el final del ensayo en la condición protegida, mientras que sin invernadero aumentó progresivamente hasta 5.8 cm; además, el número de hojas senescentes fue menor y la producción de inflorescencias fue marcadamente superior bajo cobertura, alcanzando 12 inflorescencias por individuo al día 75, frente a ausencia total de floración en condición abierta. En conjunto, estos resultados indican que el invernadero no solo promovió el crecimiento vegetativo, sino que también prolongó la funcionalidad fisiológica y favoreció la expresión reproductiva de la especie. Desde una perspectiva aplicada, ello sugiere que la combinación entre cobertura térmica pasiva y *E. crassipes* mejora la estabilidad y el potencial funcional del sistema, aspecto clave para optimizar procesos de fitodepuración en condiciones altoandinas. Esta



interpretación concuerda con revisiones recientes que destacan la elevada adaptabilidad de la especie y su utilidad en el tratamiento de aguas residuales cuando dispone de condiciones ambientales favorables para sostener su crecimiento y actividad metabólica (Rasool et al., 2023).

La Tabla 6 muestra que *Chara* spp. presentó crecimiento estructural en ambas condiciones experimentales, aunque el tratamiento con invernadero evidenció un mejor desempeño en la elongación del talo principal. Ambos sistemas iniciaron con longitudes similares (22.6 cm sin invernadero y 23.0 cm con invernadero), pero al día 75 el tratamiento protegido alcanzó 54.3 cm, mientras que el sistema sin cobertura llegó a 43.4 cm. Este resultado sugiere que el microclima más cálido y estable del invernadero favoreció el crecimiento longitudinal de la carófitas, lo cual es coherente con estudios que indican que la morfología y el crecimiento de las carófitas responden de manera directa a las condiciones del ambiente, especialmente a la disponibilidad de luz, la estabilidad del hábitat y la temperatura del agua (Rasool et al., 2023). En ese sentido, la mayor elongación observada bajo cobertura indica una respuesta favorable de *Chara* spp. frente a condiciones menos restrictivas para su desarrollo.

Respecto a la regeneración estructural, expresada en el número de brotes laterales nuevos, ambos tratamientos mostraron incrementos graduales a lo largo del tiempo, aunque el sistema sin invernadero registró el mayor valor final (4.8 unidades) en comparación con el tratamiento con invernadero (3.2 unidades). Esta diferencia sugiere que, en condiciones más expuestas, *Chara* spp. pudo activar una estrategia compensatoria basada en una mayor brotación lateral, mientras que bajo invernadero habría priorizado el crecimiento del eje principal. Este patrón coincide con la plasticidad morfológica descrita para las carófitas, cuyas respuestas de crecimiento y reproducción pueden variar según el ambiente, modificando la asignación de recursos entre elongación, ramificación y estructuras reproductivas o de regeneración (Choudhury et al., 2019). Por tanto, la menor formación de brotes laterales bajo invernadero no necesariamente indica menor vigor, sino una diferente estrategia de crecimiento frente a un entorno más favorable.

En cuanto a la senescencia, ambos tratamientos mostraron un aumento progresivo del número de ejes senescentes, aunque con mayor intensidad en la condición sin invernadero. Al día 75 se registraron 9 ejes senescentes en el sistema abierto y 7 en el tratamiento protegido, lo que



indica que la cobertura térmica contribuyó a reducir parcialmente el deterioro estructural de la carófitas. Esta respuesta es consistente con la ecología funcional de las carófitas, ya que su persistencia y biomasa dependen de condiciones ambientales relativamente estables; cuando estas son favorables, las plantas pueden mantener por más tiempo tejidos activos y sostener una mayor integridad estructural (Kufel & Kufel, 2002). En conjunto, los resultados indican que el invernadero favoreció un crecimiento más vigoroso y una menor senescencia de *Chara* spp., mientras que la condición sin cobertura estimuló una mayor brotación lateral, probablemente como respuesta adaptativa frente al mayor estrés ambiental.

Conclusiones

En condiciones altoandinas, la combinación macrófitas más invernadero no solo elevó las eficiencias finales, sino que aceleró de forma marcada la cinética de remoción, concentrando la mayor parte del tratamiento en el primer mes. El mejor desempeño correspondió a T5 (*chara* bajo invernadero), que ya a 15 días redujo la carga a DBO 164.7 mg/L (−64.0%), DQO 724 mg/L (−59.0%), P total 32.4 mg/L (−54.0%) y NO_2^- 0.041 mg/L (−78.9%); y a 30 días alcanzó DBO 87.7 mg/L (−80.8%), DQO 396.5 mg/L (−77.5%), P 22.3 mg/L (−68.3%) y NO_2^- 0.023 mg/L (−88.1%), equivalentes a 88% (DBO), 82% (DQO), 88% (P) y 91% (NO_2^-) de la remoción total lograda al día 75. Al cierre del ensayo, T5 consolidó remociones de DBO 92.0% (36.4 mg/L), DQO 94.6% (95.8 mg/L), P 77.4% (15.9 mg/L), NO_2^- 97.4% (0.005 mg/L) y NO_3^- 78.8% (2.9 mg/L), mientras que T6 (*Chara* spp. bajo invernadero) destacó en procesos más reductores al lograr la mayor remoción de SO_4^{2-} 51.4% (74→36 mg/L).

En contraste, los controles mostraron reducciones limitadas incluso a 75 días (T1: DQO 38.1%, P 10.4%, NO_3^- 6.6%), confirmando que el rendimiento del sistema depende del acoplamiento planta-microbiota y que el invernadero actúa como acelerador térmico de la depuración. Además, el invernadero generó un microclima claramente más favorable (T° media del aire 22.79 vs 9.31 °C; +13.48 °C y humedad media 72.5% vs 41.1%; +31.4 %), y esa ganancia se reflejó en agua más cálida en los tratamientos con invernadero (T4–T6: 16.07–17.65 °C vs T1–T3: 14.10–



14.66 °C, con picos de 31.00 °C en T6 y 30.20 °C en T5) y en pH más alto/estable cuando hubo componente biológico, destacando T5 que subió hasta 8.8 (+0.4), mientras los controles disminuyeron hasta 7.6 (T1) y 7.8 (T4). Por lo que, la mayor eficiencia del sistema se logró cuando se combinó el componente biológico con el invernadero, destacando T5 (*Eichhornia crassipes* + invernadero) como la mejor configuración: alcanzó 92.0% de remoción de DBO, 94.6% de DQO, 77.4% de fósforo y hasta 97.4% de nitrito; en segundo nivel se ubicaron los tratamientos con *Chara spp.* (especialmente T6, con 70.9% de fósforo y la mayor remoción de sulfato: 51.4%), mientras que los controles (T1 y T4) quedaron por debajo, confirmando que la depuración la dominan los procesos biológicos y que el invernadero potencia ese desempeño.

Finalmente, en condiciones altoandinas, el invernadero potenció de forma marcada la biomasa funcional de las macrófitas, con un efecto dominante en *Eichhornia crassipes*: la densidad aumentó de 20 a 69 individuos (vs 24 sin cobertura; $\approx 2.9\times$), el crecimiento radical se duplicó (17.6 vs 8.4 cm en raíces preexistentes) y la senescencia radical se anuló (0 vs 5.8 cm). En paralelo, se reforzó el crecimiento foliar (33.4 vs 16.1 cm en hojas establecidas; 9.8 vs 3.0 cm en hojas emergentes) y se indujo reproducción (12 vs 0 inflorescencias/individuo). En *Chara spp.*, la cobertura incrementó la longitud del talo (54.3 vs 43.4 cm; $\approx 25\%$) y redujo la senescencia (7 vs 9 ejes), sugiriendo que la protección térmica mejora la persistencia y el rendimiento biológico en sistemas de tratamiento en climas fríos.

Agradecimientos

Los autores expresan su sincero agradecimiento a la Universidad Peruana Unión por el apoyo brindado durante el desarrollo de la presente investigación, así como por facilitar el acceso a los laboratorios y ambientes experimentales necesarios para su ejecución. Del mismo modo, agradecen profundamente a sus padres por su respaldo constante a lo largo de este proceso. Finalmente, dedican este trabajo a Dios, quien fue su fortaleza y guía desde el inicio hasta la culminación de la investigación.

Referencias



- Ahmad, M. M., Alam, T., & Naaz, S. (2025). Water Hyacinth is a Potential Aquatic Plant Used in Water Treatment : A Short Review. *Scholars Academic Journal of Biosciences*, 9515(7), 898-907. <https://doi.org/doi.org/10.36347/sajb.2025.v13i07.004>
- Akratos, C. S., & Tsihrintzis, V. A. (2007). Effect of temperature, HRT, vegetation and porous media on removal efficiency of pilot-scale horizontal subsurface flow constructed wetlands. *Ecological Engineering*, 29(2), 173-191. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2006.06.013>
- Alvarado Chilcon, J., & Manayay Peralta, J. (2020). *Uso de la Eichhornia crassipes (Jacinto de agua) para el tratamiento de aguas residuales domésticas en humedales artificiales*. Universidad César Vallejo.
- Arévalo-Durazno, M., Zumalacarregui, J. G., Ho, L., Narváez, A., & Alvarado, A. (2023). Performance of modified first-stage French Vertical Flow Constructed Wetlands under extreme operational conditions. *Water science and technology : a journal of the International Association on Water Pollution Research*, 88 1, 220-232. <https://doi.org/10.2166/wst.2023.201>
- Ayala Tocto, R. Y., Calderón Ordoñez, E., Rascón, J., & Collazos Silva, R. (2018). Fitorremediación de aguas residuales domésticas utilizando las especies *Eichhornia crassipes*, *Nymphoides humboldtiana* y *Nasturtium officinale*. *Revista de Investigación Agroproducción Sustentable*, 2(3), 47-53. <https://doi.org/10.5281/zenodo.3946755>
- Bautista Campos, D. J. (2021). *Eficiencia de Jacinto de agua (Eichhornia crassipes) y Lechuga de agua (Pistia stratiotes) en la remoción de la DBO5 de las aguas residuales municipales del distrito de Chota, 2020*. Universidad Nacional Autónoma de Chota.
- Cai, M.-H., Luo, G., Li, J., Li, W.-T., Li, Y., & Li, A.-M. (2021). Substrate competition and microbial function in sulfate-reducing internal circulation anaerobic reactor in the presence of nitrate. *Chemosphere*, 280, 130937. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.130937>
- Caqui Rodriguez, F. Y., & Rofner Wyngaert, K. L. (2025).



Fitorremediación con macrófitas flotantes eichhornia crassipes y lemna minor como alternativa para el tratamiento de aguas residuales en zonas altoandinas, Sapallanga, Huancayo. Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas.

Chen, S., Liu, A., Tang, F., Hou, P., Lu, Y., & Yuan, P. (2025). A Review of Environmental Control Strategies and Models for Modern Agricultural Greenhouses. *Sensors*, 25(1388).
<https://doi.org/doi.org/10.3390/s25051388>

Choab, N., Allouhi, A., El Maakoul, A., Kousksou, T., Saadeddine, S., & Jamil, A. (2019). Review on greenhouse microclimate and application: Design parameters, thermal modeling and simulation, climate controlling technologies. *Solar Energy*, 191, 109-137.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.solener.2019.08.042>

Choudhury, M., Urrutia-Cordero, P., Zhang, H., Ekvall, M., Medeiros, L., & Hansson, L. (2019). Charophytes collapse beyond a critical warming and brownification threshold in shallow lake systems. *The Science of the total environment*, 661, 148-154.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.01.177>

Conrad, R. (2023). Complexity of temperature dependence in methanogenic microbial environments. *Frontiers in Microbiology Introduction*, (July), 1-13.
<https://doi.org/10.3389/fmicb.2023.1232946>

Dean, S., Akhtar, M. S., Ditta, A., Valipour, M., & Aslam, S. (2022). *Microcosm Study on the Potential of Aquatic Macrophytes for Phytoremediation of Phosphorus-Induced Eutrophication.*

Dyksma, S., & Pester, M. (2024). Growth of sulfate-reducing Desulfobacterota and Bacillota at periodic oxygen stress of 50 %. *Microbiome*. <https://doi.org/10.1186/s40168-024-01909-7>

Flomo, M. R., & Chaki, S. (2023). *Phytoremediation , Effective Technology in the Removal of Nutrients and Heavy Metals in Wastewater by Slavonia Molesta , and Pistoia Stratiotes.* 12(2).

Franco, J. E., Rodríguez-Arroyo, J. A., Jiménez-Lao, R., Garzón, E., & Lao, M. T. (2023). Radiometric, Mechanical and Agronomic



Characterization of Four Commercial Polymeric Films for Greenhouse Applications. *Applied Sciences (Switzerland)*, 13(24).
<https://doi.org/10.3390/app132413098>

Gao, K. (2021). Approaches and involved principles to control pH / pCO₂ stability in algal cultures. *Journal of Applied Phycology*, 3497-3505. <https://doi.org/10.1007/s10811-021-02585-y>

He, X., Zhang, S., Lv, X., Liu, M., Ma, Y., & Guo, S. (2023). Eichhornia crassipes-rhizospheric biofilms contribute to nutrients removal and methane oxidization in wastewater stabilization ponds receiving simulative sewage treatment plants effluents. *Chemosphere*, 322, 138100.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.138100>

Jones, E. R., Bierkens, M. F. P., Wanders, N., Sutanudjaja, E. H., Beek, L. P. H. Van, & Vliet, M. T. H. Van. (2022). Current wastewater treatment targets are insufficient to protect surface water quality. *Communications Earth & Environment*, 1-8.
<https://doi.org/10.1038/s43247-022-00554-y>

Juanicó, M., Weinberg, H., & Soto, N. (2000). Process design of waste stabilization ponds at high altitude in Bolivia. *Water Science and Technology*, 42, 307-313. <https://doi.org/10.2166/wst.2000.0668>

Kufel, L., & Kufel, I. (2002). Chara beds acting as nutrient sinks in shallow lakes—a review. *Aquatic Botany*, 72, 249-260.
[https://doi.org/10.1016/s0304-3770\(01\)00204-2](https://doi.org/10.1016/s0304-3770(01)00204-2)

Limache Quispe, F. D., & Tirado Rebaza, L. U. M. (2022). Acción de dos macrófitas para el tratamiento del agua residual de las lagunas de estabilización de Magollo , Tacna – Perú. *Ciencias & Desarrollo*, 21(1), 29-39.

Liu, H., Zhao, H., Tian, Y., Liu, S., Li, W., Wang, Y., ... Lei, X. (2025). From First Frost to Last Snow : Tracking the Microclimate Evolution of Greenhouses Across North China ' s Winter Spectrum. *Agronomy*, 15(1663), 1-16. <https://doi.org/doi.org/10.3390/agronomy15071663>



- Liu, Z. (2023). DIC fertilization of primary production in karst lake-reservoirs and its effects on carbon sequestration and mitigation of eutrophication. *Kexue Tongbao/Chinese Science Bulletin*, 68(8), 915-926. <https://doi.org/10.1360/TB-2022-0640>
- Mamani Choque, R. S. (2020). Calidad ecológica en humedales con caracoles portadores de *Fasciola hepática* en el municipio de Huarina. *Apthapi*, 6(3), 2057-2069.
- Mar, L., Zit, I., Ortega-pineda, G., & Zamora-castro, S. (2024). *Phytoremediation Performance with Ornamental Plants in Monocultures and Polycultures Conditions Using Constructed*.
- Marzocchi, U., Benelli, S., Larsen, M., Bartoli, M., & Glud, R. N. (2019). Spatial heterogeneity and short-term oxygen dynamics in the rhizosphere of *Vallisneria spiralis*: Implications for nutrient cycling. *Freshwater Biology*, 64(3), 532-543. <https://doi.org/https://doi.org/10.1111/fwb.13240>
- Ministerio de Vivienda, C. y S. (2024). *Informe N.º D00011-2024-VIVIENDA/DEPPCS-UEI*. Lima, Perú: Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento. Recuperado de Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento website: <https://ofi5.mef.gob.pe/invierte/general/downloadArchivo?idArchivo=c8b09742-bcd7-403f-abb8-95ab2d564f8d.pdf>
- Monroy, A., Liliana, L., Lopez, C., De, A. C., Guerra, P., Barrios, R. A., & Silver, A. (2024). Unlocking the potential of *Eichhornia crassipes* for wastewater treatment : phytoremediation of aquatic pollutants , a strategy for advancing Sustainable Development Goal - 06 clean water. *Environmental Science and Pollution Research*, 31(31), 43561-43582. <https://doi.org/10.1007/s11356-024-33698-9>
- Morales, E. A., & Rivera, S. F. (2013). Macrófitas poco frecuentes o desconocidas de la laguna Alalay , Cochabamba , Bolivia. *Acta Nova*, 6, 36-52.
- Nahar, K., & Sunny, S. A. (2024). *Co-Benefits of Eichhornia Crassipes (Water Hyacinth) as Sustainable Biomass for Biofuel Production and Aquatic Ecosystem Phytoremediation*. 317-333.



- Operacz, A., Krzysztof, J., & Bugajski, P. (2023). *Impact of Climate Conditions on Pollutant Concentrations in the Effluent from a One-Stage Constructed Wetland : A Case Study*.
- 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/https://doi.org/10.1016/j.eti.2020.101261>
- Pasapera García, J., Villanueva Quispe, C., Siguayro Mamani, H., Gamarra Peralta, C., & Arpasi Ordoño, D. (2023). Zonificación espacial de la vegetación subacuática en zonas litorales del Lago Titicaca, 2018 - 2019. *Boletín del Instituto del Mar del Perú*, 38(1), 2018-2019.
- Rasool, S., Ahmad, I., Jamal, A., Saeed, M. F., Zakir, A., Abbas, G., ... Caballero-calvo, A. (2023). Evaluation of Phytoremediation Potential of an Aquatic Macrophyte (*Eichhornia crassipes*) in Wastewater Treatment. *Sustainability*, 15(11533).
<https://doi.org/doi.org/10.3390/su151511533>
- Rehman, F., Pervez, A., Khattak, B. N., & Ahmad, R. (2017). Constructed Wetlands: Perspectives of the Oxygen Released in the Rhizosphere of Macrophytes. *CLEAN – Soil, Air, Water*, 45(1).
<https://doi.org/https://doi.org/10.1002/clen.201600054>
- Ricart, A. M., Honisch, B., Fachon, E., Hunt, C. W., Salisbury, J., Arnold, S. N., & Price, N. N. (2023). *Optimizing marine macrophyte capacity to locally ameliorate ocean acidification under variable light and flow regimes : Insights from an experimental approach*. 1-19.
<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0288548>
- Singh, N., & Balomajumder, C. (2021). Phytoremediation potential of water hyacinth (*Eichhornia crassipes*) for phenol and cyanide elimination from synthetic / simulated wastewater. *Applied Water Science*, 11(8), 1-15. <https://doi.org/10.1007/s13201-021-01472-8>
- Strzałek, M., Kufel, L., Apolinarska, K., Becher, M., Biardzka, E., Brzozowski, M., ... Pełechaty, M. (2023). Recycling and deposition of inorganic carbon from calcium carbonate encrustations of



charophytes. *Limnology and Oceanography*, 69, 279–289.
<https://doi.org/10.1002/lno.12479>

Sun, Q., Song, Y., Yang, Z., Liu, X., & Cui, S. (2023). Effects of insulation cover measures on the temperature environment of chinese solar greenhouse. *INMATEH - Agricultural Engineering*, 71(3), 573-582.

Sun, Z., Dzakpasu, M., Zhao, L., Wang, Z., Zhang, D., Qu, M., ... Zheng, Y. (2022). Enhancement of partial denitrification-anammox pathways in constructed wetlands by plant-based external carbon sources. *Journal of Cleaner Production*, 370, 133581.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.133581>

Talukdar, A. D. A. S. (2016). *Physiological responses of water hyacinth , Eichhornia crassipes (Mart .) Solms , to cadmium and its phytoremediation potential*. 40(1), 84-94.
<https://doi.org/10.3906/biy-1411-86>

Valdivia Rodríguez, C. A. (2019). *Eficiencia de Eichhornia crassipes (Mart.) Solms laub - Pontederiaceae y Nasturtium officinale W.T. Aiton – Brassicaceae en la remoción de DBO5 y DQO del efluente de la planta de Tratamiento de aguas residuales de Celendín*. Universidad Nacional de Cajamarca.

Verduzo Garibay, M., Fernández del Castillo, A., de Anda, J., Senés-Guerrero, C., & Gradilla-Hernández, M. S. (2022). Structure and activity of microbial communities in response to environmental, operational, and design factors in constructed wetlands. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 19(11), 11587-11612. <https://doi.org/10.1007/s13762-021-03719-y>

Vizcardo, C., & Gil-kodaka, P. (2015). Estructura de las comunidades macrozoobentónicas de los humedales de Ventanilla, Callao, Perú. *Anales Científicos*, 76(1), 1-11.

Wang, H., Xu, Y., & Chai, B. (2023). Effect of Temperature on Microorganisms and Nitrogen Removal in a Multi-Stage Surface Flow Constructed Wetland. *Water*, 15(1256), 1-15.
<https://doi.org/doi.org/10.3390/w15071256> Academic



- Wu, H., Wang, R., Yan, P., Wu, S., Chen, Z., Zhao, Y., ... Zhang, J. (2023). Constructed wetlands for pollution control. *Nature Reviews Earth & Environment*, 4(4), 218-234. <https://doi.org/10.1038/s43017-023-00395-z>
- WWAP (Programa Mundial de Evaluación de los Recursos Hídricos de las Naciones Unidas), . (2017). *Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos 2017. Aguas residuales: El recurso desaprovechado*. Paris: UNESCO. <https://doi.org/10.69740/ud.9789588972091.9789587873658>
- Yana Neira, E. A. (2022). *Actividad antibacteriana del extracto etanólico de la macroalga Chara globularis Thuill.* Universidad Nacional del Altiplano.
- You, W., Yu, D., Xie, D., & Yu, L. (2013). Overwintering survival and regrowth of the invasive plant *Eichhornia crassipes* are enhanced by experimental warming in winter. *Aquatic Biology*, 19, 45-53. Recuperado de <https://www.int-res.com/journals/ab/articles/ab00519>
- Yousaf, A., Khalid, N., Aqeel, M., Noman, A., Naeem, N., Sarfraz, W., ... Khalid, A. (2021). *Nitrogen Dynamics in Wetland Systems and Its Impact on Biodiversity*. 196-217.
- Zimiani, R., Luciane, D. P., Tatiane, F., & Jesus, A. De. (2024). Phosphorus removal by free water surface constructed wetlands for the wastewater treatment : bibliometric and bibliographic review. *Discover Water*. <https://doi.org/10.1007/s43832-023-00050-0>