

Fitorremediación de Agua Residual Doméstica con *Pontederia Sagittata* y *Cyperus Alternifolius* en un Humedal Artificial Subsuperficial – Libre en Flujo Pistón

María Nazareth Jimenez-Velazquez, Nancy Estrada-Pérez, Gaspar López-Ocaña * y Monserrat Guadalupe Barco-Mendez

Laboratorio de Tecnología del Agua, División Académica de Ciencias Biológicas, Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, Villahermosa, Tabasco, México.

* Autor de correspondencia: ocanagl77@hotmail.com ; Tel.: (+52) 9931933824

Desarrollo sustentable (Humedales naturales y construidos)

Recibido: 7 de agosto de 2026 Aceptado: 27 de septiembre de 2026 Publicado: 20 de octubre de 2026

DOI: <https://doi.org/10.56845/terys.v5i2.749>

Resumen: Esta investigación evaluó la remoción de color y turbiedad entre otros parámetros de control de aguas residuales domésticas vía humedales artificiales con *Pontederia sagittata* y *Cyperus alternifolius*, en el Laboratorio de Tecnología del agua ubicado en la DACBIOL-UJAT. El sistema de tratamiento está conformado por un cárcamo receptor de aguas residuales domésticas, un tanque séptico, un humedal artificial de flujo libre HAFL1-Ps, de flujo subsuperficial (HAFL1-Ca), de flujo libre (HAFL2-Ps) y subsuperficial (HAFL2-Ca) en flujo pistón mixto con dimensiones de 3.62 m de largo, 0.31 m de ancho para ambos, 0.2 m de tirante operativo para HAFL y 0.4 m de tirante operativo para HAFS, el flujo de agua operó por gravedad con un volumen de 0.22 m³ para HAFS y 0.44 m³ para HAFL, un Q= 399 L/día para ambos, TRH de 6 horas para HAFS y 14.16 horas para HAFL. Se presentaron concentraciones promedio iniciales en el afluente residual de 8.1 (±0.4) UpH de pH, 20.8 (±1.5) °C de temperatura, 1554.3 (±138) µS/cm de CE, 778.7 (±49) mg/L de SDT, 1085.9 (±245) UC, 21.7 (±7.4) UNT, 1.4 (±0.4) mg/L de OD y -208.7 (±56.7) Vm de POR, la concentración de contaminantes en la etapa de arranque para el efluente tratado de 7.7(±0.2) UpH de pH, 26.8 (±1.8) °C de temperatura, 823 (±117) µS/cm de CE, 410 (±91.7) mg/L de SDT, 269 (±188) UC, 4 (±4.3) UNT, 3.1 (±1) mg/L de OD y 30.4 (±77.4) Vm de POR, en la etapa de estabilización fue de 7.8 (±0.2) UpH de pH, 21 (±1.3) °C de temperatura, 919 (±285) µS/cm de CE, 460 (±144) mg/L de SDT, 217 (±51) UC, 1.4 (±1) UNT, 1.8 (±0.2) mg/L de OD y -56 (±53.5) Vm de POR. Las mayores remociones se obtuvieron en la estabilización destacando el HAFS1-Ca con 44% de color y 67% de turbiedad, lo que confirma que la combinación del flujo subsuperficial y el establecimiento de la especie incremento el desempeño del sistema.

Palabras clave: agua residual, color, eficiencia de remoción, tiempo de retención y turbiedad

Phytoremediation of Domestic Wastewater with *Pontederia sagittata* and *Cyperus alternifolius* in a Subsurface–Free-Flow Constructed Wetland with Plug Flow

Abstract: This research evaluated the removal of color and turbidity, among other control parameters of domestic wastewater, through constructed wetlands with *Pontederia sagittata* and *Cyperus alternifolius*, at the Water Technology Laboratory located at DACBIOL-UJAT. The treatment system consists of a receiving sump for domestic wastewater, a septic tank, a free-flow constructed wetland (HAFL1-Ps), a subsurface-flow wetland (HAFL1-Ca), a free-flow wetland (HAFL2-Ps), and a subsurface-flow wetland (HAFL2-Ca) operating in mixed plug flow, with dimensions of 3.62 m in length and 0.31 m in width for both, an operating water depth of 0.2 m for HAFL and 0.4 m for HAFS. Water flow operated by gravity, with a volume of 0.22 m³ for HAFS and 0.44 m³ for HAFL, a flow rate (Q) of 399 L/day for both, and hydraulic retention times (HRT) of 6 hours for HAFS and 14.16 hours for HAFL. The initial average concentrations in the wastewater influent were 8.1 (±0.4) pH units, 20.8 (±1.5) °C for temperature, 1554.3 (±138) µS/cm for electrical conductivity (EC), 778.7 (±49) mg/L for total dissolved solids (TDS), 1085.9 (±245) color units (CU), 21.7 (±7.4) nephelometric turbidity units (NTU), 1.4 (±0.4) mg/L for dissolved oxygen (DO), and -208.7 (±56.7) Vm for oxidation-reduction potential (ORP). The concentrations of contaminants in the treated effluent during the start-up stage were 7.7 (±0.2) pH units, 26.8 (±1.8) °C for temperature, 823 (±117) µS/cm for EC, 410 (±91.7) mg/L for TDS, 269 (±188) CU, 4 (±4.3) NTU, 3.1 (±1) mg/L for DO, and 30.4 (±77.4) Vm for ORP. During the stabilization stage, the values were 7.8 (±0.2) pH units, 21 (±1.3) °C for temperature, 919 (±285) µS/cm for EC, 460 (±144) mg/L for TDS, 217 (±51) CU, 1.4 (±1) NTU, 1.8 (±0.2) mg/L for DO, and -56 (±53.5) Vm for ORP. The highest removal efficiencies were obtained during stabilization, with HAFS1-Ca standing out with 44% color removal and 67% turbidity removal, confirming that the combination of subsurface flow and the establishment of the species increased the performance of the system.

Keywords: wastewater, color, removal efficiency, retention time, turbidity

Introducción

Las aguas residuales de diferentes índoles actualmente son un problema en México, pues no se cuenta con capacidad de instalaciones que traten debidamente este tipo de aguas, debido a los altos costos de infraestructura,

mantenimiento y operación de las plantas de tratamiento para aguas residuales de tipo convencional (Romellón Cerino *et al.*, 2023). El Sistema Nacional de Información del Agua (SINA) reportó que en el año 2023 nacionalmente el caudal tratado de aguas residuales tratadas fue del 12.4 millones de m³/día, siendo 72.94% dando a entender que 27.06% de las aguas residuales se descargaron sin ningún tratamiento previo. En el año 2022 con un caudal 12.42 millones de m³/día dando un 73.05 % tratada y descargando 26.95% de aguas residuales sin tratamiento (Comisión Nacional del Agua [CONAGUA], 2023).

En México la falta de conciencia y compromiso ambientales hacia la importancia a recurso naturales, han hecho una limitación a los recuso económicos para la construcción, operación y mantenimiento para sistemas de tratamiento de aguas residuales (Domínguez-Montero *et al.*, 2024). La calidad del agua es susceptible del deterioro, a función por el aumento de la población de algunas comunidades que descargan sus aguas residuales a cuerpos receptores. CONAGUA reportó que en el 2024 existían 3976 plantas de tratamientos en operación, 218 son de humedales artificiales (HA); es decir menos del 5.48% del total (CONAGUA, 2024).

Los humedales artificiales son concebidos como sistemas de depuración de aguas residuales que incorpora sistemas de diseño, construcción y operaciones con propósitos para la calidad del agua, con eso también se espera que tenga una eficiente remoción en contaminantes básicos. Una de las ventajas de utilizar este tipo de humedales en comparación con los sistemas intensivos, es que generan menor emisión de malos olores, ruido, requieren una sencilla operación y son de fácil mantenimiento, son visiblemente más estéticos y demanda menores costos al realizar el tratamiento al no requerir una gran fuente de energía eléctrica para su funcionamiento. En la actualidad los humedales artificiales ya son utilizados ya sean individuales o de manera combinada en otros procesos de tratamiento. De acuerdo Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento (MAPAS) de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), una de las ventajas de utilizar un humedal artificial es el bajo costo de energía eléctrica para su funcionamiento ya que representa una oportunidad a aquellas zonas donde no se cuenta con este tipo de servicios y tiene una importancia del desarrollo alternativo de tratamiento de aguas residuales. Teniendo como desventaja a estos sistemas es la demandad áreas mucho mayores que los sistemas convencionales (CONAGUA, 2016).

Por lo expuesto anteriormente este trabajo tiene como objetivo la evaluación de un Humedal artificial de flujo pistón (serpentin) que opera con agua residual doméstica, en el cual se evaluara la factibilidad de remoción de contaminantes básicos y conocer el comportamiento de las especies *Pontederia sagittata* y *Cyperus alternifolius*. Para verificar el cumplimiento normativo ambiental vigente de la descarga a cuerpos receptores.

Materiales y Métodos

Área de estudio

La investigación se realizó en la División Académica de Ciencias Biológicas, ubicada en la carretera Villahermosa-Cárdenas Km 0.5 S/N Entronque a Bosques de Saloya. Villahermosa, Tabasco, México. Con las coordenadas latitud 17°59'28.02''N y longitud 92°58'26.37'' O, en este punto se encuentran las unidades experimentales que serán empleadas y que forman parte del Laboratorio de Tecnología del Agua de la división. Donde aquí se llevará a cabo todas las etapas para el desarrollo de la investigación.

Descripción del tratamiento

El sistema de tratamiento se diseñó en reactores de flujo pistón (PFR), con un sistema de distribución en dos canaletas internas de HA de flujo libre con *Pontederia sagittata* (HAFL1-Ps y HAFL3-Ps), dos canaletas internas de HA de flujo subsuperficial con *Cyperus alternifolius* (HAFS2-Ca y HAFS4-Ca). Las aguas residuales en la institución se generan alrededor de un Q_{med} de 21.2 m³/día, el tratamiento del agua empieza con un cárcamo, posteriormente se ingresa a un tanque séptico con volumen de 37.8 m³ y TRH de 2 días. Para el sistema experimental el Q_{med} de operación es de 399 L/día, el HA de flujo pistón de estudio opera por gravedad con un y cuentan con dimensiones de 3.60 m de largo y 1.62 m de ancho, integrado con las cuatro canaletas internas con dimensiones de 3.62 m de largo, 0.31 m de ancho para ambos, 0.4 m de tirante operativo de agua, con 0.2 m de tirante del medio de soporte para HAFL y 0.4 m para HAFS, con un volumen de 0.22 m³ para HAFS y 0.44 m³ para el HAFL, se estima un TRH de 6 horas para HAFS y 14.16 horas para HAFL (López Ocaña *et al.*, 2023) (Figura 1).

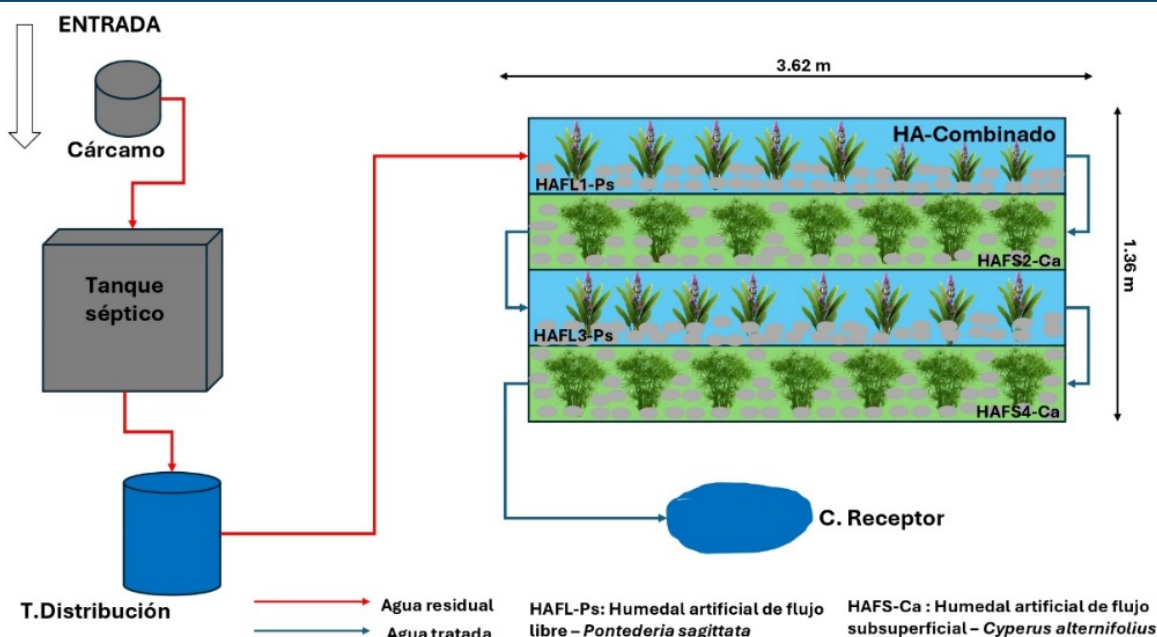


Figura 1. Diagrama de distribución del sistema de tratamiento.

Caracterización de especies

El *Cyperus alternifolius* es de la familia de las ciperáceas, introducida, ésta fue obtenida mediante donación al Laboratorio de Tecnología del Agua de la DACBIOL, pues provenía de un estanque de tortugas donde se utilizaba como decoración. La especie macrófita *Pontederia sagittata* es una especie nativa del estado de Tabasco, su colecta fue obtenida de una laguna natural localizada en la DACBIOL. Para la colecta de las especies se obtuvieron 40 ejemplares en total de las dos especies ya mencionadas en dos días diferentes, donde estas fueron colocadas en recipientes de plásticos con un volumen de agua para evitar cual tipo de estrés y a la vez una correcta manipulación a su traslado. Una vez obtenido los ejemplares se sometieron una caracterización en estado salvaje para determinar su morfología de las cuales se obtuvieron (peso, altura, ancho de tallo, ancho de raíz, número de flores, número de tallos) (Romellón Cerino *et al.*, 2022). Una vez establecidas las especies se empezó a realizar un monitoreo del comportamiento de crecimiento, el monitoreo se llevó a cabo durante cada semana en donde se observa la adaptabilidad de cada especie. En la siguiente tabla se muestra el promedio y la desviación estándar de los dos diferentes periodos que se llevaron a cabo en el estudio.

Evaluación del gasto de operación

Para determinar el gasto medio de operación se utilizó el método volumétrico: midiendo el tiempo de llenado de un recipiente de volumen conocido, donde se colecta la descarga (Gualpa *et al.*, 2022) se puede determinar el gasto de operación de las unidades experimentales, la medición del gasto se realizó durante una semana (lunes a viernes) en horarios de 7:00 am a 6:00 pm con intervalos de 2 horas.

Calidad del agua

Para la calidad del agua se tomaron muestras en frascos de 1 L, previamente esterilizados y debidamente etiquetados conforme la NMX-AA-003-1980, durante dos periodos de estudio, un primer periodo de arranque (noviembre 2025) y el segundo de estabilización (marzo 2026), teniendo 15 muestras simples en el arranque y 15 muestras simples en la estabilización, siendo un total de 30 muestras simples para parámetros de control y 5 muestras compuestas en estabilización, teniendo en cuenta que solo tomo como muestra el Afluente doméstico y la salida del sistema para la determinación de DQO (Secretaría de Comercio y Fomento Industrial, 1980). Los parámetros fisicoquímicos se analizaron con equipos multiparamétricos como: Temperatura (T) (SM 2550), Potencial de Hidrogeno (pH) (SM 9040 b), Conductividad eléctrica (CE) (SM 2130), Oxígeno disuelto (OD) (SM 4500-O) que se mide in situ, Sólidos disueltos totales (SDT) (SM 2540 C) y Potencial oxido reducción (ORP) (SM-4500 H) y para la medición del Color (UC) (SM2120) y

Turbiedad (UNT) (SM 2130), se realizaron con el equipo LaMotte LTC-3000we, la Demanda Química de Oxígeno se determinó mediante el método de EPA 410.4, empleando un espectrofotómetro Hanna COD y un multiparamétrico HI 89009.

Eficiencia de remoción

La eficiencia en un tratamiento de aguas residuales son relaciones entre masa o concentraciones removidas y también la masa o concentración del efluente de un proceso o planta de tratamiento, normalmente este parámetro se expresa en porcentaje. La determinación de la eficiencia es base esencial para corroborar el correcto manejo y funcionamiento del sistema de tratamiento de aguas residuales aplicado. (Humanante Cabrera *et al.*, 2022).

$$E(\%) = \left(\frac{S_o - S}{S_o} \right) \times 100 \quad (1)$$

Dónde: E (%): Eficiencia de remoción; S: Carga contaminante de salida; S_o: carga contaminante de entrada.

Diseño experimental

El estudio se desarrolló mediante un diseño experimental completamente al azar con medidas repetidas en el tiempo para evaluar el desempeño de un sistema de tratamiento. Cada uno de los datos recaudados de los parámetros fisicoquímicos del agua, se procesaron los datos mediante el software STATGRAPHICS Centurión 19. En el análisis estadístico se verificó el cumplimiento de la independencia, normalidad y homogeneidad de las varianzas, se utilizó ANOVA más prueba de Fisher LSD para datos que si cumplen con los postulados de normalidad (Zar, 2010; Townend, 2002), los que no cumplieron con los supuestos paramétricos y para comparar más de tres grupos independientes se aplicó la prueba de Kruskal-Wallis en comparaciones globales y la prueba de Mann-Whitney para comparaciones por pares.

Resultados

Medio de soporte

El material de soporte utilizado en todos los tratamientos de humedales artificiales fue grava de río (canto redondo) de ¾" de Ø y zeolita con las siguientes características mostrado en la Tabla 1, que en comparación con lo realizado por Ji *et al.* (2021), donde sugieren 1450-1750 kg/m³ de densidad aparente, 2600-2700 kg/m³ de densidad real y 35-45 % de porosidad como características principales en la implantación como medio de soporte para humedales artificiales, existiendo una diferencia poco representativo con la investigación realizada, además de concluir con un TRH de 4.1 días mediante los resultados de porosidad reportados (55 %).

Tabla 1. Valores promedios (±DE) de las características del material de soporte utilizado (N=33)

Unidad experimental	Medio de soporte	Densidad aparente (kg/m ³)	Densidad real (kg/m ³)	Porosidad de lecho (%)	Diámetro de partícula (pulgadas)
HAFS	Grava	1230±0.003	2668±0.13	52.12±0.58	2.16±0.28
HAFL	Zeolita	740 ± 0.02	1400 ± 0.04	44.16±2.04	1.43±0.23

Gasto de operación

Durante los periodos de arranque y estabilización los tratamientos mostraron Q_{med} 399(±2.24) L/día donde los días con mayores fluctuaciones de caudal se presentaban los miércoles en donde se concentra la mayor asistencia de alumnado y personal los días viernes eran los días con menos fluctuaciones ya que existe una baja en la asistencia de alumnado y personal administrativo, teniendo en cuenta el TRH correspondiente a 4.1 días a comparación de la investigación de Estrada *et al.* (2025) donde se reportaron fluctuaciones de 310 (±1.38) L/día máximas y 380 (±2.36) L/día mínimas en condiciones similares en este caso para humedales de flujo subsuperficial con TRH de 3.6 días.

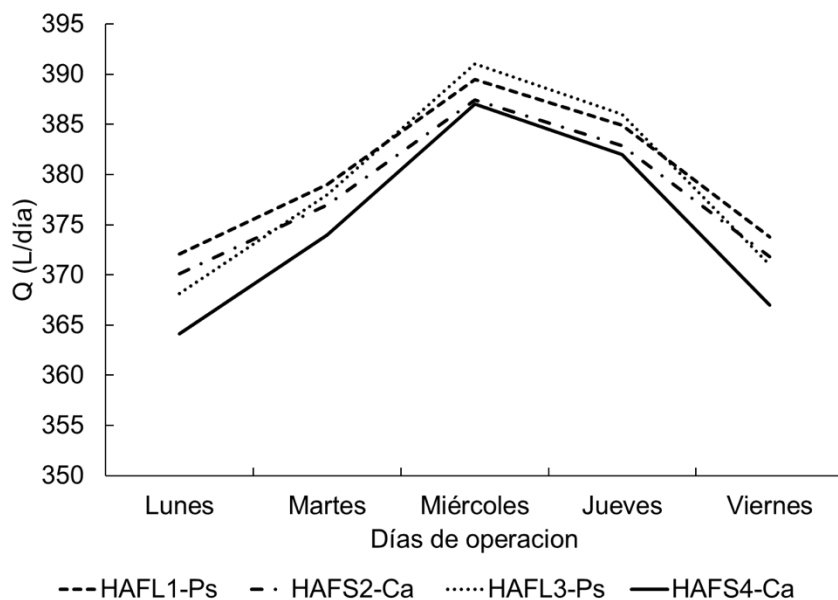


Figura 2. Caudales de operación (Q) de los humedales artificiales.

Caracterización de las especies

La Tabla 2 nos muestra el comportamiento de las especies en el tratamiento de aguas residuales domésticas, en cuanto a la *Pontederia sagittata* se pudo observar un mayor crecimiento aéreo y una mayor producción de biomasa, lo cual favorece la captación de nutrientes como nitrógeno y fósforo, a su vez ayuda a incrementar el aporte de oxígeno a la rizosfera mediante transporte radical de oxígeno coincidiendo con lo reportado por Sánchez-Galván et al. (2022) en donde establecen una alta tasa de crecimiento, una gran productividad de la especie, además de una variación estacional lo cual es recomendable para climas cálidos húmedos. En cambio el *Cyperus alternifolius* desarrolla un sistema radical más amplio, esto favoreciendo la colonización de microbiana para así mejorar el proceso de nitrificación, desnitrificación y degradación de materia orgánica aunque su producción de biomasa fue inferior, además de los beneficios establecidos por Biruk et al. (2025) donde valoraron el *Cyperus alternifolius* llegando a la conclusión que es una especie apta para tiempo de sequías por su alta capacidad de intercambiar gases para una mejor captación de CO₂.

Tabla 2. Datos de Caracterización de especies *Pontederia sagittata* y *Cyperus alternifolius*

Parámetros	Pontederia sagittata en HAFL		Cyperus alternifolius en HAFS	
	Arranque	Estabilización	Arranque	Estabilización
N° de plantas	40	30	40	15
Peso (kg)	3.70±1.37	2.7±0.9	0.77±0.33	0.67±0.38
Altura T(m)	1.96±0.28	1.5±0.2	0.93±0.25	1.31±0.19
Largo de Tallo(m)	1.56±0.21	1.6±0.7	0.75±0.27	0.74±0.28
Ancho tallo (m)	0.08±0.03	0.1±0.7	0.01±0.00	0.01±0.00
No. Tallos	14±6	14±6	15±7	15±7
No. Hojas	12±6	11±4	8±2	8±2
Ancho de raíz(m)	0.05±0.02	0.0±0.0	0.17±0.20	0.170.03±
Alto de raíz(m)	0.20±0.06	0.2±0.1	3.50±8.08	3.50±8.08
Ancho de hoja(m)	2.87±0.04	0.2±0.0	0.02±0.02	0.02±0.02
Largo de hoja (m)	0.38±0.07	0.4±0.1	0.13±0.03	0.13±0.03
Flores	3±2	3±	*	*
Peso Húmedo (kg)	0.53±0.12	0.75±0.12	0.35±0.14	0.53±0.54
Peso seco (kg)	0.45±0.3	0.63±0.58	0.12±0.56	0.15±0.32
Humedad (%)	52.40±0.8	60.83±0.36	36±0.3	50±0.21

Calidad del agua

En la Tabla 3 se muestran los valores promedio ($\pm$ DE) de cada uno de los parámetros analizados, en los dos periodos evaluados presentando concentraciones iniciales del efluente domiciliario en el arranque de color (409.8 ± 113.5) UC y turbiedad (6.0 ± 3.3) UNT así mismo concentraciones iniciales de color (1085.9 ± 245) UC y turbiedad (21.7 ± 7.4) UNT en la estabilización. El OD presentó valores de 1.2 a 1.8 mg/L, inferiores a los registrados durante el arranque (2.5 – 3.2 mg/L en las unidades de tratamiento), lo que indica el establecimiento de condiciones más reductoras asociadas con el consumo de oxígeno por la actividad microbiana y la degradación de materia orgánica. Este comportamiento es consistente con estudios recientes en humedales tropicales, donde se ha observado una disminución del OD a través del sistema debido a la respiración microbiana, actividad radical y descomposición de biomasa vegetal (Geleto *et al.*, 2025). Asimismo, estudios recientes con humedales que incorporan *Cyperus alternifolius* muestran que la vegetación puede modificar sustancialmente las condiciones de oxigenación de la rizosfera, favoreciendo procesos microbianos asociados con la transformación de nutrientes (Negi *et al.*, 2025). El POR presentó valores negativos durante la estabilización, entre -171.9 y -66.9 mV, particularmente bajos en los sistemas de flujo libre y menos negativos en los HAFS, el ORP en humedales puede presentar una elevada variabilidad espacial y temporal debido a la disponibilidad de oxígeno, actividad microbiana, flujo hidráulico y presencia de vegetación (Ji *et al.*, 2024).

Tabla 3. Valores Promedio ($\pm$ DE) en ambos periodos evaluados en los efluentes de las Unidades de Tratamiento (N=30)

Parámetros	Periodo de arranque					LPM	Referencias
	T. séptico	HAFL1-Ps	HAFS2-Ca	HAFL3-Ps	HAFS4-Ca		
pH (UpH)	7.9 ± 0.4	7.8 ± 0.2	7.6 ± 0.3	7.5 ± 0.3	7.6 ± 0.2	6-9	A
T (°C)	29.4 ± 0.9	27.9 ± 1.1	26.4 ± 26	26.9 ± 1.1	26.1 ± 1.3	35	A
CE (μ S/cm)	1041.1 ± 179	1155.1 ± 1246	842.2 ± 842	833.0 ± 96	836.3 ± 173	1000	B
SDT (mg/L)	517.5 ± 85.4	456.9 ± 456	417.7 ± 417	414.1 ± 47	415.8 ± 88	500	B
Color (UC)	409.8 ± 113.5	372.2 ± 156	297.4 ± 297	285.8 ± 155	276.1 ± 181	75	C
Turbiedad (UNT)	6.0 ± 3.3	7.8 ± 7.7	6.3 ± 6.3	4.5 ± 3.9	4.2 ± 4.5	10	C
OD (mg/L)	1.9 ± 0.8	3.2 ± 1.4	2.7 ± 2.7	2.5 ± 0.7	2.9 ± 1	—	—
POR (mV)	-27.2 ± 199.7	-22.8 ± 120.2	-58.6 ± 58	-105.2 ± 239	-13.0 ± 83	—	—

Parámetros	Periodo de estabilización					LPM	Referencias
	T. séptico	HAFL1-Ps	HAFS2-Ca	HAFL3-Ps	HAFS4-Ca		
pH (UpH)	8.1 ± 0.4	8.1 ± 0.3	7.7 ± 0.4	7.7 ± 0.3	7.8 ± 0.2	6-9	A
T (°C)	20.8 ± 1.5	20.7 ± 1.3	20.8 ± 1.2	20.3 ± 2.1	20.9 ± 1.7	35	A
CE (μ S/cm)	1554.3 ± 138	1445.6 ± 124	1130.3 ± 248	1094.0 ± 248	988.2 ± 289	1000	B
SDT (mg/L)	778.7 ± 49	713.7 ± 61	562.7 ± 122	546.8 ± 125	491.8 ± 143	500	B
Color (UC)	1085.9 ± 245	698.2 ± 120	384.2 ± 109	346.2 ± 106	261.2 ± 81	75	C
Turbiedad (UNT)	21.7 ± 7.4	13.6 ± 5.3	4.4 ± 2.3	4.0 ± 2.2	2.5 ± 1.9	10	C
OD (mg/L)	1.4 ± 0.4	1.2 ± 0.5	1.2 ± 0.5	1.6 ± 0.6	1.8 ± 0.5	—	—
POR (mV)	-208.7 ± 56.7	-171.9 ± 84.7	-125.4 ± 77.5	-87.3 ± 50.9	-66.9 ± 51	—	—
DQO (mg/L)	228.22 ± 2.95	—	—	—	32.4 ± 2.03	150	A

Nota: A: NOM-001-SEMARNAT-2021, B: Criterios Ecológicos de Calidad del Agua - CE-CCA-001 89, C: Ley Federal de Derechos Disposiciones Aplicables en Materia de Aguas Nacionales 2019.

Calidad del agua periodo de arranque

En el periodo de arranque se evaluó el pH el cual se llevó a cabo con el método de Kruskal-Wallis donde se tienen datos no normales ($P < 0.0000$), el valor mediano más bajo se encontró en el tratamiento HAFL3-Ps 7.5 ($Q_1 = 7.33$ - $Q_3 = 7.67$) UpH, seguido el HAFS2-Ca 7.7 ($Q_1 = 7.4$ - $Q_3 = 7.86$) UpH, para HAFS4-Ca 7.56 ($Q_1 = 17.46$ - $Q_3 = 7.65$) UpH, seguido el HAFL1-Ps 7.69 ($Q_1 = 7.63$ - $Q_3 = 7.9$) UpH, por otro lado, el Tanque. S tiene 7.92 ($Q_1 = 7.56$ - $Q_3 = 8.2$) UpH y el valor más alto del tratamiento es el Cárcamo con 8.035 ($Q_1 = 7.34$ - $Q_3 = 8.18$) UpH. Del mismo modo para temperatura se utilizó la prueba de Kruskal-Wallis donde se tienen datos no normales ($P < 0.0615$) el valor mediano más bajo se encontró en el tratamiento HAFS4-Ca 26.0 ($Q_1 = 25.2$ - $Q_3 = 27.0$) C°, seguido HAFS2-Ca 26.05 ($Q_1 = 25.9$ - $Q_3 = 26.5$) C°, seguido HAFL3-Ps

26.65 ($Q_1=26.0 - Q_3=27.9$) $^{\circ}\text{C}$, para HAFL1-Ps 27.7 ($Q_1=27.3 - Q_3=28.7$) $^{\circ}\text{C}$, por otro lado el Cárcamo tiene valor 29.1 ($Q_1=28.5 - Q_3=30.0$) $^{\circ}\text{C}$ y el valor más alto del tratamiento es el Tanque.S con 29.6 ($Q_1=28.7 - Q_3=30.1$) $^{\circ}\text{C}$.

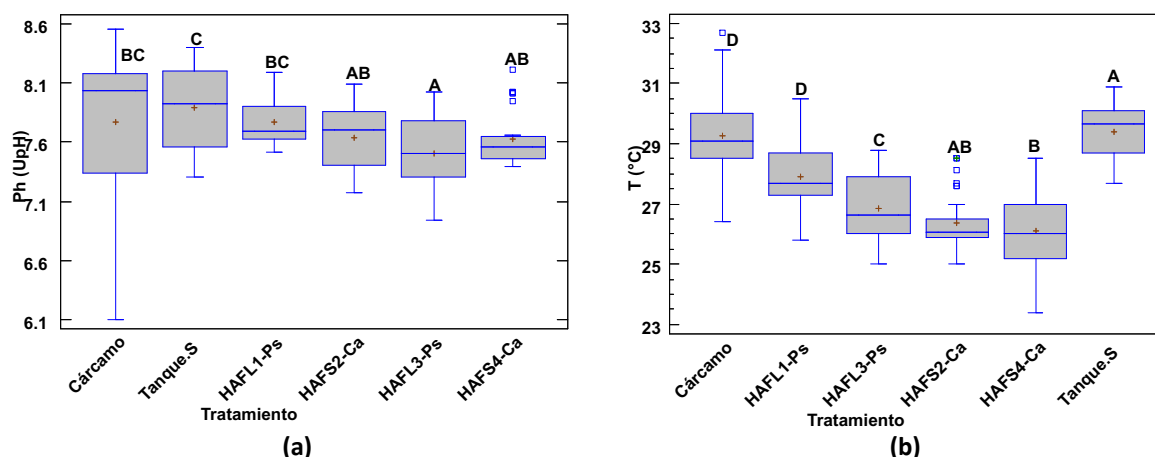


Figura 3. (a) Valores medianos ($Q_1 - Q_3$) para la variable de pH (UpH) y (b) Temperatura ($^{\circ}\text{C}$).

Nota: Letras diferentes indican diferencias estadísticamente significativas (N = 15).

En el periodo de arranque se evaluó la CE la cual se llevó a cabo con el método de Kruskal-Wallis donde se tienen datos no normales ($P < 0.0000$), el valor mediano más bajo se encontró en el tratamiento en el HAFS4-Ca 771.0 ($Q_1=741.0 - Q_3=828.0$) $\mu\text{S}/\text{cm}$, para HAFS2-Ca 806.0 ($Q_1=753.0 - Q_3=954.0$) $\mu\text{S}/\text{cm}$, seguido HAFL3-Ps 816.0 ($Q_1=749.0 - Q_3=912.0$) $\mu\text{S}/\text{cm}$, para HAFL1-Ps 925.0 ($Q_1=797.0 - Q_3=1009.0$) $\mu\text{S}/\text{cm}$, por otro lado, Cárcamo tiene valor 956.0 ($Q_1=625.0 - Q_3=1183.0$) $\mu\text{S}/\text{cm}$ y el valor más alto del tratamiento es en el Tanque. S 1043.0 ($Q_1=866.0 - Q_3=1163.0$) $\mu\text{S}/\text{cm}$. Del mismo modo para SDT se utilizó la prueba de Kruskal-Wallis donde se tienen datos no normales ($P < 0.0000$), el valor mediano más bajo se encontró en el tratamiento del HAFS4-Ca 381.5 ($Q_1=368.0 - Q_3=412.0$) mg/L, para HAFS2-Ca 398.5 ($Q_1=374.0 - Q_3=475.0$) mg/L, seguido HAFL3-Ps 409.5 ($Q_1=375.0 - Q_3=460.0$) mg/L, para HAFL1-Ps 456.0 ($Q_1=393.0 - Q_3=500.0$) mg/L, por otro lado el Cárcamo tiene valor 475.5 ($Q_1=329.0 - Q_3=588.0$) mg/L y el valor más alto del tratamiento es el Tanque.S con 515.5 ($Q_1=476.0 - Q_3=580.0$) mg/L.

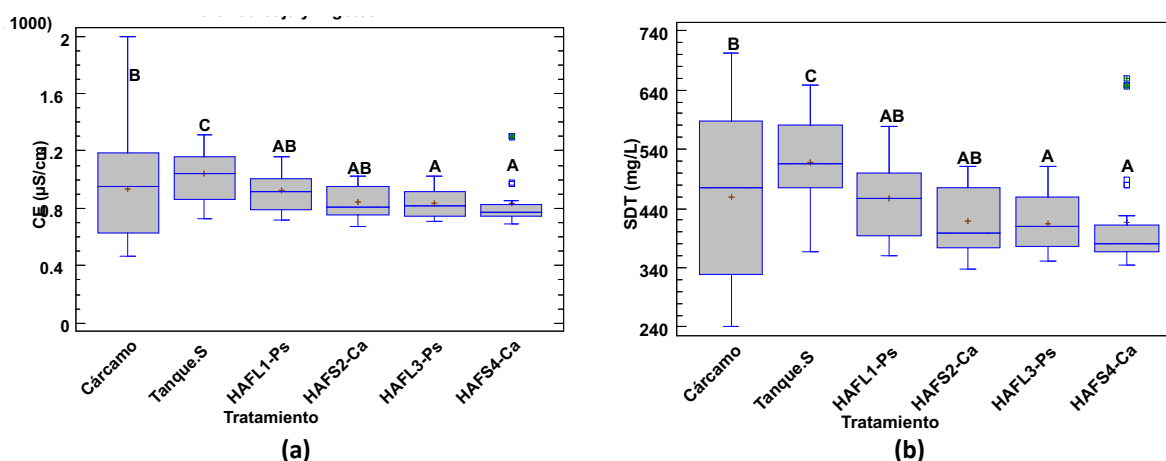


Figura 4. (a) Valores medianos ($Q_1 - Q_3$) para la variable de CE ($\mu\text{S}/\text{cm}$) y (b) SDT (mg/L).

Nota: Letras diferentes indican diferencias estadísticamente significativas (N = 15).

En el periodo de arranque se evaluó el color el cual se llevó a cabo con el método de Kruskal-Wallis donde se tienen datos no normales ($P < 0.0000$), el valor mediano más bajo se encontró en el tratamiento HAFS4-Ca 185.0 ($Q_1=139.0 - Q_3=478.0$) UC, para HAFS2-Ca 217.5 ($Q_1=160.0 - Q_3=474.0$) UC, seguido HAFL3-Ps 223.0 ($Q_1=183.0 - Q_3=385.0$) UC, para HAFL1-Ps 305.0 ($Q_1=262.0 - Q_3=458.0$) UC, por otro lado el Tanque. S tiene valor 424.0 ($Q_1=320.0 - Q_3=513.0$) UC y el valor más alto del tratamiento es el Cárcamo 536.0 ($Q_1=217.0 - Q_3=706.0$) UC. Del mismo modo para Turbiedad se utilizó la prueba de Kruskal-Wallis donde se tienen datos no normales ($P < 0.0000$), el valor mediano más bajo se encontró en el tratamiento en el HAFS2-Ca 2.0 ($Q_1=1.2 - Q_3=12.0$) UNT, para HAFL3-Ps 2.8 ($Q_1=1.4 - Q_3=7.6$) UNT,

seguido HAFS4-Ca 2.25 ($Q_1=1.1 - Q_3=6.5$) UNT, para HAFL1-Ps 3.2 ($Q_1=2.3 - Q_3=13.0$) UNT, por otro lado el Tanque. S tiene valor 4.55 ($Q_1=3.4 - Q_3=8.4$) UNT y el valor más alto del tratamiento es el Cárcamo 6.85 ($Q_1=3.1 - Q_3=12.9$) UNT.

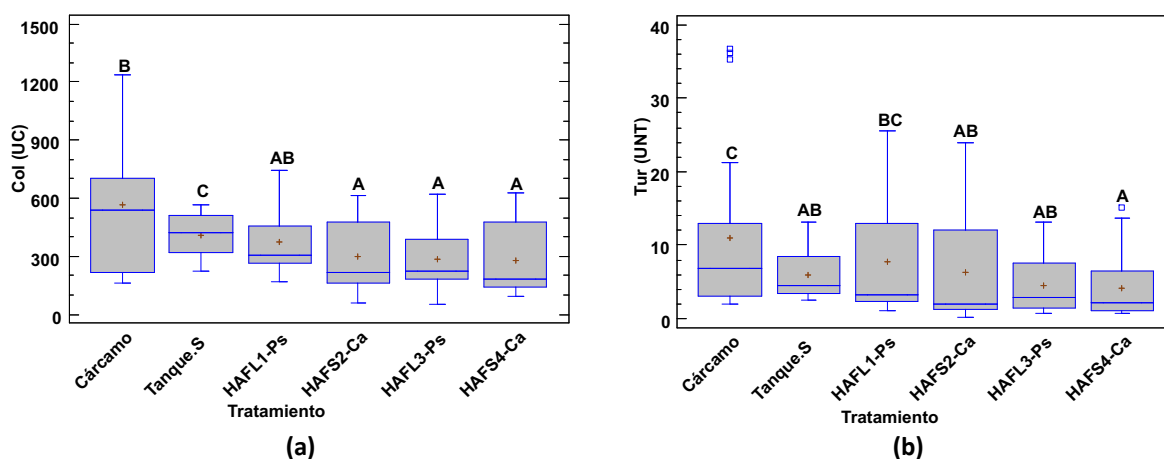


Figura 5. (a) Valores medianos ($Q_1 - Q_3$) para la variable de Color (UC) y (b) Turbiedad (UNT).

Nota: Letras diferentes indican diferencias estadísticamente significativas ($N = 15$).

En el periodo de arranque se evaluó el POR el cual se llevó a cabo con el método de Kruskal-Wallis donde se tienen datos no normales ($P < 0.0002$), el valor mediano más bajo se encontró en el tratamiento el Cárcamo -224.0 ($Q_1=-290.0 - Q_3=-114.0$) mV, seguido Tanque. S -93.5 ($Q_1=-139.0 - Q_3=-25.0$) mV, para HAFL1-Ps -37.5 ($Q_1=-71.0 - Q_3=-5.0$) mV, seguido HAFL3-Ps -32.5 ($Q_1=-132.0 - Q_3=20.0$), para HAFS4-Ca 3.0 ($Q_1=-31.0 - Q_3=85.0$), por otro lado el valor más alto del tratamiento HAFS2-Ca tiene valor 10.0 ($Q_1=-44.0 - Q_3=55.0$) mV. Para OD se utilizó la prueba de ANOVA más prueba de Fisher LSD donde se tienen datos normales ($P < 0.0012$), el valor promedio (DE) más bajo se encontró en el tratamiento Tanque. S 1.93333 (0.762633) mg/L, seguido Cárcamo 2.08 (0.6835) mg/L, para HAFL3-Ps 2.53467 (0.74532) mg/L, seguido HAFSS3-Ca 2.66 (0.799828) mg/L, para HAFSS4-Ca 2.87667 (1.00642) mg/L, por otro lado el valor más alto del tratamiento es HAFL1-Ps 3.15 (1.35462) mg/L.

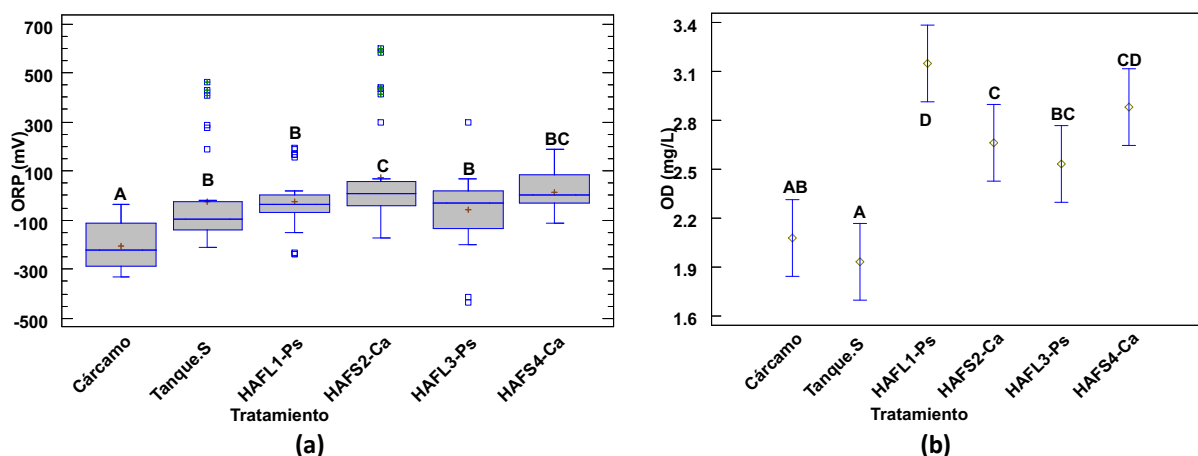


Figura 6. (a) Valores medianos ($Q_1 - Q_3$) para la variable de POR mV y (b) OD (mg/L).

Nota: Letras diferentes indican diferencias estadísticamente significativas ($N = 15$).

Calidad del agua periodo de estabilización

En el periodo de estabilización se evaluó el pH el cual se llevó a cabo con el método de Kruskal-Wallis donde se tienen datos no normales ($P < 0.3652$), el valor mediano más bajo se encontró en el tratamiento HAFS2-Ca 7.8 ($Q_1= 6.9 - Q_3= 7.97$) UpH, seguido HAFL3-Ps 7.84 ($Q_1= 7.07 - Q_3=7.98$) UpH, seguido HAFS4-Ca 8.87 ($Q_1=7.79 - Q_3=7.95$) UpH, para HAFL1-Ps 8.01 ($Q_1=7.6 - Q_3= 8.57$) UpH, por otro lado el Tanque.S tiene valor 8.31 ($Q_1=7.43 - Q_3=8.70$) UpH y el valor más alto del tratamiento es el Cárcamo con 8.55 ($Q_1=7.65 - Q_3=8.98$) UpH. Del mismo modo para temperatura se utilizó la prueba de Kruskal-Wallis donde se tienen datos no normales ($P < 0.3279$), el valor mediano más bajo se encontró en

el tratamiento HAFL1-Ps 20.7 ($Q_1=18.74 - Q_3=22.55$) $^{\circ}\text{C}$, seguido el HAFS2-Ca 20.7 ($Q_1=19.13 - Q_3=23.03$) $^{\circ}\text{C}$, para el HAFL3-Ps 20.9 ($Q_1=17.0 - Q_3=22.7$) $^{\circ}\text{C}$, par HAFS4-Ca 21.0 ($Q_1=18.4 - Q_3=22.5$) $^{\circ}\text{C}$, por otro lado el Tanque.S tiene valor 21.1 ($Q_1=18.8 - Q_3=22.9$) $^{\circ}\text{C}$ y el valor más alto del tratamiento es el Cárcamo con 21.8 ($Q_1=19.6 - Q_3=28.2$) $^{\circ}\text{C}$.

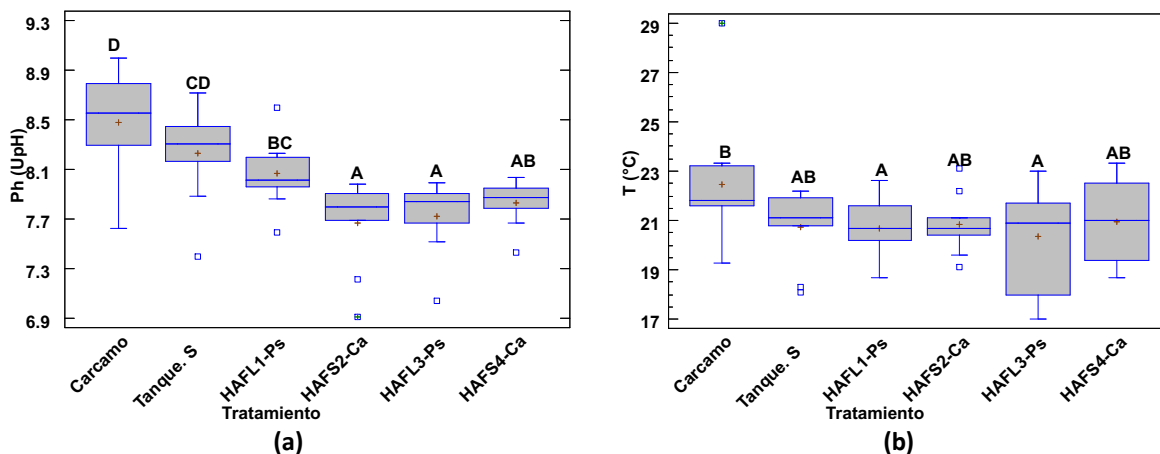


Figura 7. (a) Valores medianos ($Q_1 - Q_3$) para la variable de pH (UpH) y (b) Temperatura ($^{\circ}\text{C}$).

Nota: Letras diferentes indican diferencias estadísticamente significativas (N = 15).

En el periodo de estabilización se evaluó la CE la cual se llevó a cabo con el método de ANOVA más prueba de Fisher LSD donde se tienen datos normales ($P < 0.0279$), el valor promedio (DE) más bajo se encontró en el tratamiento del HAFS4-Ca 988.222 (289.227) $\mu\text{S}/\text{cm}$, para HAFL3-Ps 1094.0 (248.497) $\mu\text{S}/\text{cm}$, seguido el Cárcamo 1094.67 (360.24) $\mu\text{S}/\text{cm}$, para HAFS2-Ca 1130.33 (248.11) $\mu\text{S}/\text{cm}$, por otro lado HAFL1-Ps tiene valor 1445.56 (124.835) $\mu\text{S}/\text{cm}$ y el valor más alto del tratamiento es en el Tanque. S 1554.33 (138.373) $\mu\text{S}/\text{cm}$. Del mismo modo para SDT se utilizó la prueba de Kruskal-Wallis donde se tienen datos no normales ($P < 0.0006$), el valor mediano más bajo se encontró en el tratamiento del HAFS4-Ca 482.0 ($Q_1=425.0 - Q_3=600.0$) mg/L, para el Cárcamo 490.0 ($Q_1=431.0 - Q_3=745.0$) mg/L, seguido HAFS2-Ca 513.0 ($Q_1=487.0 - Q_3=654.0$) mg/L, para HAFL3-Ps 516.0 ($Q_1=475.0 - Q_3=648.0$) mg/L, por otro lado HAFL1-Ps tiene valor 722.0 ($Q_1=689.0 - Q_3=727.0$) mg/L y el valor más alto del tratamiento es el Tanque. S con 763.0 ($Q_1=736.0 - Q_3=802.0$) mg/L.

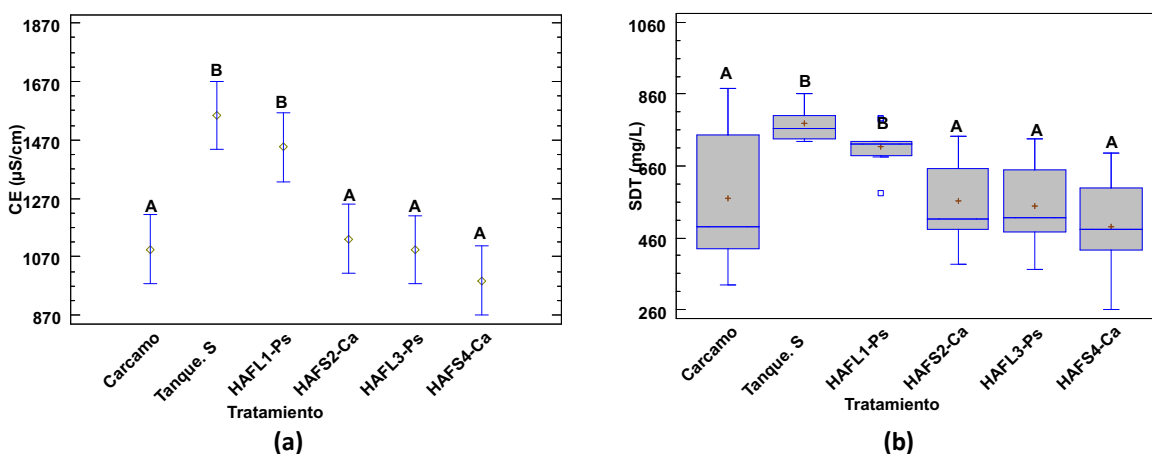


Figura 8. (a) Valores medianos ($Q_1 - Q_3$) para la variable de CE ($\mu\text{S}/\text{cm}$) y (b) SDT (mg/L).

Nota: Letras diferentes indican diferencias estadísticamente significativas (N = 15).

En el periodo de estabilización se evaluó el color el cual se llevó a cabo con el método de Kruskal-Wallis donde se tienen datos no normales ($P < 0.0813$), el valor mediano más bajo se encontró en el tratamiento del HAFS4-Ca 262.0 ($Q_1=235.0 - Q_3=305.0$) UC, para el HAFL3-Ps 325.0 ($Q_1=288.0 - Q_3=383.0$) UC, seguido HAFS2-Ca 371.0 ($Q_1=320.0 - Q_3=420.0$) UC, para el Cárcamo 688.0 ($Q_1=634.0 - Q_3=751.0$) UC, por otro lado el HAFL1-Ps tiene valor 720 ($Q_1=667.0 - Q_3=777.0$) UC y el valor más alto del tratamiento es el Tanque. S 1071.0 ($Q_1=960.0 - Q_3=1145.0$) UC. Del mismo modo para Turbiedad se utilizó la prueba de Kruskal-Wallis donde se tienen datos no normales ($P < 0.0108$), el valor mediano más bajo se

encontró en el tratamiento del HAFS4-Ca 2.1 ($Q_1=1.2 - Q_3=4.5$) UNT, para HAFL3-Ps 3.7 ($Q_1=2.9 - Q_3=5.21$) UNT, seguido HAFS2-Ca 3.8 ($Q_1= 2.9 - Q_3=6.7$) UNT, para el Cárcamo 12.0 ($Q_1=6.8 - Q_3=14.2$) UNT, por otro lado el HAFL1-Ps tiene valor 13.3 ($Q_1= 10.4 - Q_3=18.4$) UNT y el valor más alto del tratamiento es el Tanque. S 21.3 ($Q_1=18.1 - Q_3=25.0$) UNT.

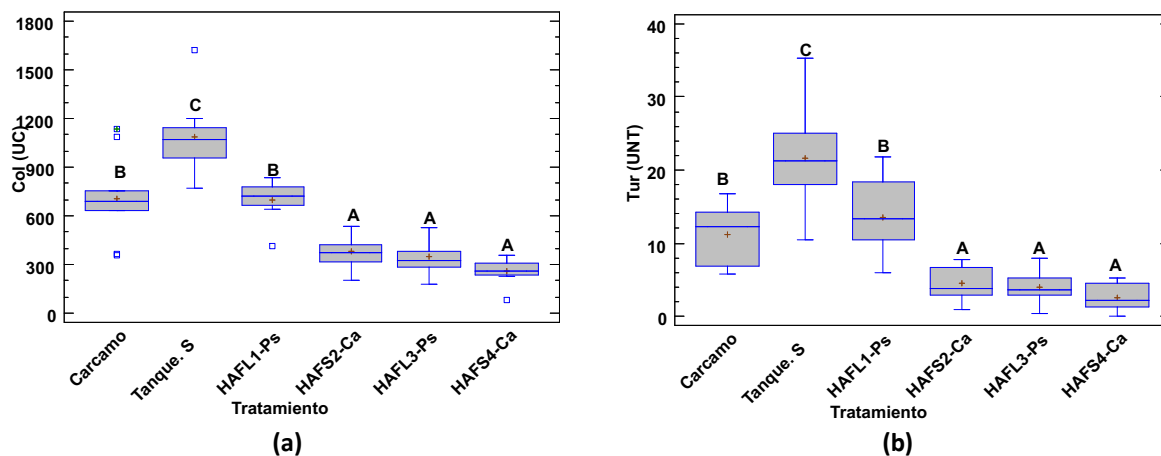


Figura 9. (a) Valores medianos ($Q_1 - Q_3$) para la variable de Color (UC) y (b) Turbiedad (UNT).

Nota: Letras diferentes indican diferencias estadísticamente significativas (N = 15).

En el periodo de estabilización se evaluó el POR el cual se llevó a cabo con el método de Kruskal-Wallis donde se tienen datos no normales ($P < 0.0025$), el valor mediano más bajo se encontró en el tratamiento Tanque. S $-222.0 \pm$ ($Q_1=-250.0 - Q_3=-165.0$) mV, seguido HAFL1-Ps $-181.0 \pm$ ($Q_1=-229.0 - Q_3=-145.0$) mV, para el Cárcamo $-130.0 \pm$ ($Q_1=-138.0 - Q_3=-8.0$) mV, seguido HAFSS3-Ca $-129.0 \pm$ ($Q_1=-153.0 - Q_3=-76.0$) mV, para el HAFL2-Ps $-95.0 \pm$ ($Q_1=-128.0 - Q_3=-57.0$) mV, por otro lado el HAFSS4-Ca tiene valor $-72.0 \pm$ ($Q_1=-105.0 - Q_3=-31.0$) mV y el valor más alto del tratamiento es la DF $-57 \pm$ ($Q_1=-96.0, Q_3=-5.0$) mV. Del mismo modo para OD se utilizó la prueba de ANOVA más prueba de Fisher LSD donde se tienen datos normales donde se tienen datos no normales ($P < 0.0126$), el valor mediano más bajo se encontró en el tratamiento HAFS2-Ca 1.0 ($Q_1=0.9 - Q_3=1.4$) mg/L, seguido HAFL1-Ps 1.1 ($Q_1=0.9 - Q_3=1.4$) mg/L, para el Tanque. S 1.3 ($Q_1=1.2 - Q_3=1.4$) mg/L, seguido HAFL3-Ps 1.5 ($Q_1=1.4 - Q_3=1.5$) mg/L, para el HAFS4-Ca tiene valor 2.0 ($Q_1= 1.9 - Q_3=2.0$) mg/L y el valor más alto del tratamiento es el Cárcamo con 3.0 ($Q_1=1.8 - Q_3=3.3$) mg/L.

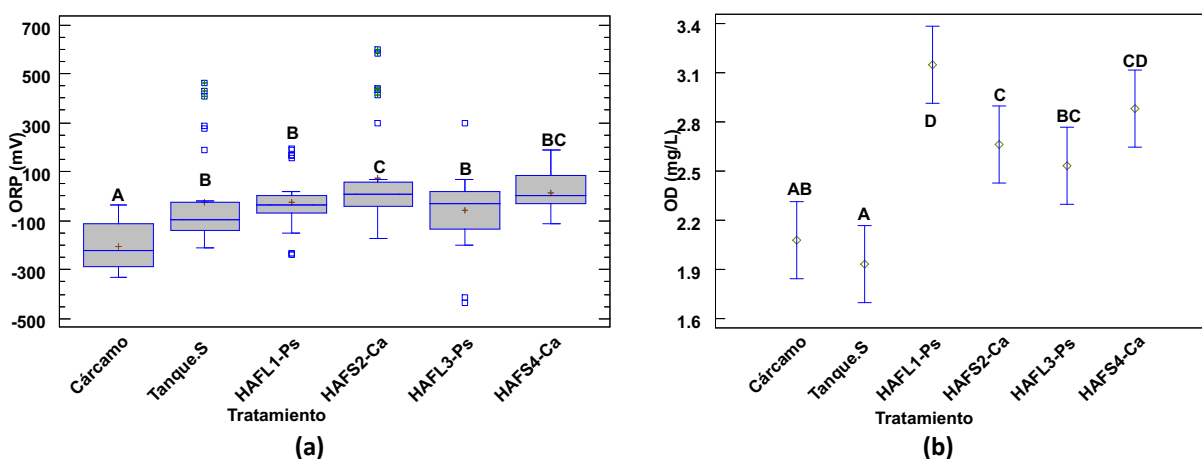


Figura 10. (a) Valores medianos ($Q_1 - Q_3$) para la variable de POR (mV) y (b) OD (mg/L).

Nota: Letras diferentes indican diferencias estadísticamente significativas (N = 15).

En el periodo de estabilización se evaluó el DQO el cual se llevó a cabo con el método de Kruskal-Wallis donde se tienen datos no normales ($P < 0.0370$), el valor mediano más bajo se encontró en el tratamiento del HAFS4-Ca 30.0 ($Q_1=10.7 - Q_3=50.92$) mg/L, por otro lado, Cárcamo tiene un valor 225.0 ($Q_1=81.13 - Q_3=363.61$) mg/L y el valor más alto del tratamiento es el Tanque. S 375.0 ($Q_1=172.48 - Q_3=823.3$) mg/L.

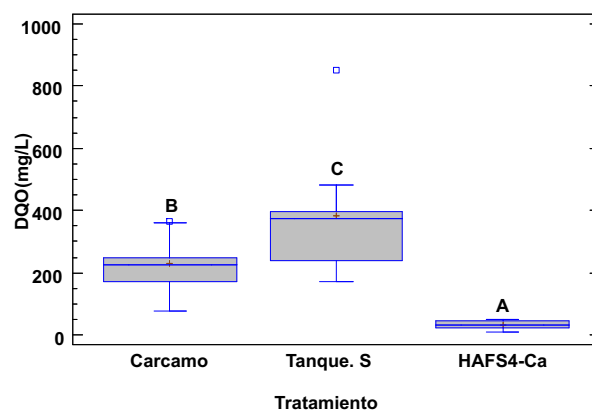


Figura 11. (a) Valores medianos ($Q_1 - Q_3$) para la variable de DQO (mg/L).

Nota: Letras diferentes indican diferencias estadísticamente significativas ($N = 5$).

Cinética de degradación de DQO

El sistema experimental evaluado demostró una alta capacidad de estabilización de la materia orgánica, registrando una concentración inicial de Demanda Química de Oxígeno (DQO) de 228.2 mg/L y un valor efluente final de 32.4 mg/L, lo que representa una eficiencia global de remoción del 85.80%. De acuerdo con la clasificación clásica de Metcalf & Eddy, Inc. (2014), el influente se catalogó como un agua residual doméstica de carga orgánica baja a media. Bajo estas condiciones cinéticas (0.33 días^{-1}) donde concentraciones bajas suelen ralentizar la transferencia de masa hacia la biopelícula, el sistema superó las restricciones reportadas por Kadlec y Wallace (2009), manteniendo una alta afinidad biológica por el sustrato remanente.

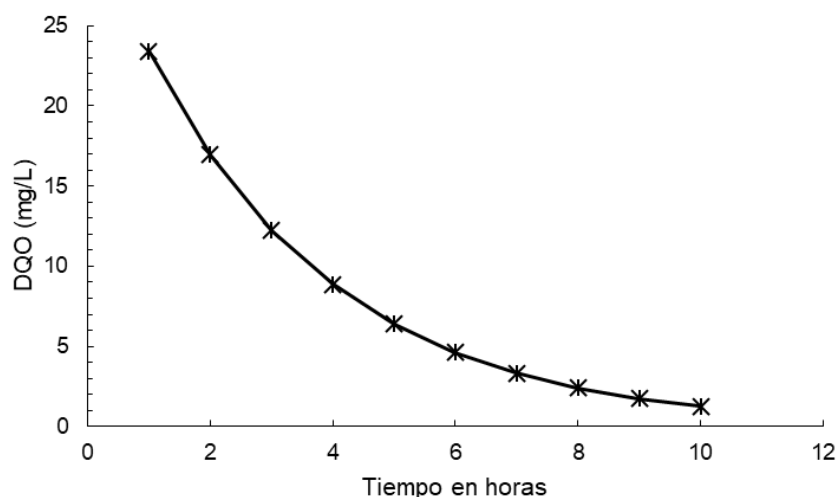


Figura 12. Cinética de degradación k (días^{-1}) para DQO (a) en el sistema-Lo con $k = 0.33$.

Eficiencia de remoción

En la Tabla 4 se presentaron las eficiencias de remoción en las dos temporalidades del estudio, teniendo eficiencias de remoción de color para HAFL1-Ps de 9.16%, HAFL3-Ps de 3.90%, HAFS2-Ca de 20.09% y HAFS4-Ca de 3.41% así como eficiencias de remoción de turbiedad para HAFL1-Ps de 31.04%, HAFL3-Ps de 29.15%, HAFS2-Ca de 19.20% y HAFS4-Ca de 6.42% en el primero periodo, al evaluar el segundo periodo se pudo observar un aumento en las eficiencias de remoción en cuanto al color para HAFL1-Ps de 35.70%, HAFL3-Ps de 9.89%, HAFS2-Ca de 44.97% y HAFS4-Ca de 24.55% así como eficiencias de remoción de turbiedad para HAFL1-Sp de 37.27%, HAFL3-Ps de 40%, HAFS2-Ca de 67.40% y HAFS4-Ca de 36.79%. Para el fenómeno del dato negativo de HAFL1-Ps (CE: -10.95%) es importante aclarar que durante el arranque el flujo de agua arrastra sales, sólidos y compuestos solubles atrapados en el material filtrante nuevo, aportando iones al efluente, además que al ser un flujo libre la lámina de agua expuesta al sol sufre una fuerte

evaporación, en comparación con los flujos subsuperficiales presentan mejores eficiencias el CE y SDT al fluir el agua través de una medio poroso cerrado, se reduce la pérdida agua por evaporación directa, evitando el efecto de concentración iónica, el mayor área de contacto con el medio de soporte incrementa la filtración física de partículas finas. Estudios recientes, como el de Amponsah et al. (2026), demuestran que durante las primeras fases de filtración en humedales artificiales, la conductividad eléctrica del efluente puede ser significativamente más alta que la del afluente (generando eficiencias negativas significadas por un p-valor < 0.001) debido a la liberación inicial de minerales disueltos del propio medio filtrante.

Tabla 4. Eficiencias de remoción de las unidades de tratamiento para ambos periodos(N=30)

Eficiencias de remoción periodo de arranque (ER %)				
Parámetros	HAFL1-Ps	HAFS2-Ca	HAFL3-Ps	HAFS4-Ca
CE (μS/cm)	-10.95	27.09	1.08	40
SDT (mg/L)	11.72	8.58	0.85	41
Color (UC)	9.16	20.09	3.90	3.41
Turbiedad (UNT)	31.04	19.20	29.15	6.42
Eficiencias de remoción periodo de estabilización (ER %)				
Parámetros	HAFL1-Ps	HAFS2-Ca	HAFL3-Ps	HAFS4-Ca
CE (μS/cm)	7	21.81	3.21	49
SDT (mg/L)	8.35	21.16	2.82	50
Color (UC)	35.70	44.97	9.89	24.55
Turbiedad (UNT)	37.27	67.40	40	36.79
DQO (mg/L)	-	-	-	91.55

Conclusiones

La evaluación del humedal artificial de flujo pistón se considera una alternativa viables para el tratamiento de aguas residuales domésticas, en cuanto al crecimiento de las especies la *Pontederia sagittata* presento mayor desarrollo aéreo y producción de biomasa, mientras que el *Cyperus alternifolius* pudo desarrollar un sistema radical más amplio, favoreciendo los procesos biológicos del proceso, la calidad del agua evidencio un decremento de los parámetros de color y turbiedad a lo largo de las unidades del proceso, las mayores eficiencias de remoción se obtuvieron durante la estabilización destacando, HAFS1-Ca con remociones de 44.99% en color y 67.40% en turbiedad, lo que confirma que la combinación del flujo subsuperficial y el establecimiento de la vegetación incremento el desempeño del sistema. Los resultados respaldan el uso de humedales artificiales como una tecnología sostenible y de bajo costo para comunidades descentralizadas. Sin embargo, su eficiencia no debe atribuirse exclusivamente a la especie vegetal, sino a la integración de ésta con una configuración hidráulica adecuada, la posición estratégica de las unidades, el tipo de flujo, la concentración de entrada y un TRH acorde con las características del agua residual. La configuración hidráulica determina la trayectoria y distribución del agua dentro del humedal, condicionando el contacto entre el agua residual, el medio de soporte, las raíces y las comunidades microbianas responsables de procesos como la biodegradación, nitrificación, desnitrificación, sedimentación y adsorción

Bibliografía

- Biruk, L. N., Tomasella, M., Petruzzellis, F., & Nardini, A. (2025). Better safe than sorry: The unexpected drought tolerance of a wetland plant (*Cyperus alternifolius* L.). *Physiologia Plantarum*, 177(1), e70027. <https://doi.org/10.1111/ppl.70027>
- Comisión Nacional del Agua. (2016). *Manual de agua potable, alcantarillado y saneamiento. Diseño de plantas de tratamiento de aguas residuales municipales: Humedales artificiales*. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. <https://files.conagua.gob.mx/conagua/mapas/SGAPDS-1-15-Libro30.pdf>
- Comisión Nacional del Agua. (2023). *Sistema Nacional de Información del Agua (SINA)*. <https://sinav30.conagua.gob.mx:8080/portaltip.html>
- Comisión Nacional del Agua. (2024). *Inventario nacional de plantas municipales de potabilización y de tratamiento de aguas residuales en operación*. Diciembre 2024. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.

- <https://www.gob.mx/conagua/documentos/inventario-de-plantas-municipales-de-potabilizacion-y-de-tratamiento-de-aguas-residuales-en-operacion>
- Domínguez-Montero, L. E., Poggi-Varaldo, H. M., Cañizares-Villanueva, R. O., Padilla Viveros, A. A., Rinderknecht-Seijas, N., Caffarel-Méndez, S., & de la Cruz-Burelo, E. (2024). Regulaciones para la descarga de aguas residuales de México: Comparación con otros países y su cumplimiento en plantas de tratamiento seleccionadas. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 40, 289–312. <https://doi.org/10.20937/RICA.54362>
- Geleto, M., Ulsido, M. D., & Berego, Y. S. (2025). Wastewater treatment in tropical, vertical up-flow constructed wetlands with selected macrophytes species: A preliminary analysis. *Heliyon*, 11(1), e41207. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e41207>
- Humanante Cabrera, J. J., Moreno Alcivar, L. C., Grijalva-Endara, A., Saldoya Tinedo, R. W., & Suárez Tomalá, J. A. (2022). Eficiencia de remoción e impacto del sistema de tratamiento de aguas residuales del sector urbano y rural de la Provincia de Santa Elena. *Manglar*, 19(2), 177–187. <https://doi.org/10.17268/manglar.2022.022>
- Ji, M., Zhang, X., Heng, J., Tanveer, M., Zhang, J., Guo, Z., & Hu, Z. (2024). New insights for simultaneous nutrient removal enhancement and greenhouse gas emissions reduction of constructed wetland by optimizing its redox environment through manganese oxide addition. *Water Research*, 253, 121348. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2024.121348>
- Kadlec, R. H., & Wallace, S. D. (2009). *Treatment wetlands* (2.ª ed.). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781420012514>
- López Ocaña, G., Estrada Pérez, N., Aguilar Pérez, G., Alonso Mendoza, E. C., & Torres Balcázar, C. A. (2023). Degradación de contaminantes en humedales artificiales en serie con especies macrófitas del trópico húmedo. *CIBA Revista Iberoamericana de las Ciencias Biológicas y Agropecuarias*, 12(24), 19–48. <https://doi.org/10.23913/ciba.v12i24.122>
- Metcalf & Eddy, Inc., Tchobanoglous, G., Stensel, H. D., Tsuchihashi, R., & Burton, F. L. (2014). *Wastewater engineering: Treatment and resource recovery* (5.ª ed.). McGraw-Hill Education.
- Negi, D., Bhadury, P., & Daverey, A. (2025). Comparative study of *Acorus calamus* and *Cyperus alternifolius* in rice husk biochar integrated constructed wetland systems for nitrogen removal. *Applied Water Science*, 15, 274. <https://doi.org/10.1007/s13201-025-02626-8>
- Romellón Cerino, M. J., Cocolletzi Vázquez, E., & López Ocaña, G. (2023). Tratamiento de aguas residuales domésticas de una institución educativa por un sistema de humedales artificiales en serie. *Universita Ciencia*, 11(30), 147–162. <https://doi.org/10.5281/zenodo.7843244>
- Romellón Cerino, M. J., López Ocaña, G., Reyes Osorio, J., Romellón Cerino, J. C., & Arias Peregrino, V. M. (2022). Efecto de la poda de macrófitas sobre microorganismos adheridos al medio de soporte y la carga orgánica en humedales artificiales. *CIBA Revista Iberoamericana de las Ciencias Biológicas y Agropecuarias*, 11(21), 1–33. <https://doi.org/10.23913/ciba.v11i21.111>
- Sánchez-Galván, G., Olguín, E. J., Melo, F. J., Jiménez-Moreno, D., & Hernández, V. J. (2022). *Pontederia sagittata* and *Cyperus papyrus* contribution to carbon storage in floating treatment wetlands established in subtropical urban ponds. *Science of the Total Environment*, 832, 154990. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.154990>
- Secretaría de Comercio y Fomento Industrial. (1980). *NMX-AA-003-1980. Aguas residuales. Muestreo*. Dirección General de Normas. <https://platiica.economia.gob.mx/normalizacion/nmx-aa-003-1980/>