

TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS DE UNA INSTITUCIÓN EDUCATIVA POR UN SISTEMA DE HUMEDALES ARTIFICIALES EN SERIE

TREATMENT OF DOMESTIC WASTEWATER FROM AN EDUCATIONAL INSTITUTION BY A SERIAL ARTIFICIAL WETLANDS SYSTEM

Mario José Romellón Cerino¹, Eliezer Cocolletzi Vázquez² y Gaspar López Ocaña³

SUMARIO: 1. Introducción. 2. Materiales y métodos. 2.1. Área de estudio. 2.2. Actividades de campo. 2.3. Actividades de laboratorio. 2.4. Eficiencia requerida del sistema. 2.5. Análisis estadístico. 3. Resultados. 3.1. Gastos de operación. 3.2. Calidad del agua en los tratamientos. 3.3. Comportamiento estadístico en los tratamientos. 3.4. Eficiencias de remoción en los tratamientos. 4. Discusión. 5. Conclusiones. 6. Fuentes de consulta.

RESUMEN

Esta investigación tuvo como objetivo evaluar los parámetros pH, temperatura del agua, SDT, color, turbiedad y DQO en un sistema de humedales artificiales conectados en serie, alimentados con aguas residuales de tipo doméstico. Los humedales artificiales han sido evaluados en diferentes tipos de climas y diseños, demostrando ser eficientes en el tratamiento de las aguas residuales domésticas. En la División Académica de Ciencias Biológicas se trata el agua proveniente de sanitarios y cafeterías con un sistema de tratamiento de aguas residuales que consiste en un cárcamo-cisterna y dos trenes de tratamiento gemelos de humedales artificiales, cada

ABSTRACT

Constructed wetlands have been evaluated in different types of climates and designs, proving to be efficient in treating domestic wastewater. In the Academic Division of Biological Sciences, water from toilets and cafeterias is treated with a sewage treatment system that has a cistern and two twin treatment trains of artificial wetlands, each train has three wetlands in series that operate with subsurface flow man-made wetland with *Pontederia cordata*, a free-flow man-made wetland with *Thalia geniculata*, and a free-flow man-made wetland with *Sagittaria lancifolia*. The operating expense is 42.29 m³/day, with a retention time of 21.8 hours. The system evaluated in May

1 Docente del Instituto Tecnológico de Villahermosa, Tabasco, México; del Departamento de Química-Bioquímica-Ambiental. Presidente de la Academia de Ingeniería Ambiental. Miembro del Sistema Estatal de Investigadores de Tabasco, del CACEI, de la SMBB, de la ABIAER y de la SOMERS. mjrccerino@gmail.com, mario.rc@villahermosa.tecnm.mx

2 Centro de EcoAlfabetización y Diálogo de Saberes, Universidad Veracruzana, México. mx.eliezer@gmail.com

3 Profesor-investigador de la División Académica de Ciencias Biológicas de la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, México. Responsable del Laboratorio de Tecnología del Agua. ocanagl77@hotmail.com

tren tiene tres humedales en serie que operan con un humedal artificial de flujo subsuperficial con *Pontederia cordata*, un humedal artificial de flujo libre con *Thalia geniculata* y un humedal artificial de flujo libre con *Sagittaria lancifolia*. El gasto de operación es de 42.29 m³/día, con un tiempo de retención de 21.8 horas. El sistema evaluado en mayo de 2020 mostró una eficiencia de remoción de DQO de 78.65%, 62.2% de turbiedad y de color 61.4%. *Sagittaria lancifolia* demostró mejores resultados. Las tres especies son de fácil mantenimiento y eficientes en la remoción de contaminantes básicos. Los valores obtenidos son referentes de una eficiencia aceptable tomando en cuenta las condiciones extraordinarias de operación, ya que la institución educativa se encontraba trabajando con un 5% de personal y estudiantes, debido a la temporada de contingencia nacional e internacional por el COVID-19.

PALABRAS CLAVE: agua residual, demanda química de oxígeno, humedales artificiales, vegetación macrófita.

1. INTRODUCCIÓN

En México, las aguas residuales domiciliarias son un problema, pues no se cuenta con la capacidad de instalaciones para su tratamiento debido a los altos costos de construcción, operación y mantenimiento de la infraestructura de las plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR) de tipo convencional. A nivel

2020 showed a COD removal efficiency of 78.65%, turbidity 62.2% and color 61.4%. *Sagittaria lancifolia* showed better results. All three species are easy to maintain and efficient in removing basic pollutants.

KEYWORDS: waste water, chemical oxygen demand, artificial wetlands, macrophyte vegetation.

nacional, el 42% de las aguas residuales generadas se descargan en los cuerpos de agua sin tratamiento alguno; esto significa que el 58% del agua es tratada (CONAGUA, 2018).

CONAGUA reporta, para 2021, que de las 2 mil 872 PTAR en operación, 230 son humedales artificiales (HA); es decir, menos

del 8% del total¹ y estos son una tecnología eficiente en la remoción de contaminantes básicos de las aguas residuales domésticas (Marín et al., 2016), ecológicamente amigables con el ambiente, de fácil diseño, de fácil operación, con bajo costo de obra y mantenimiento en comparación con otras PTAR convencionales (CONAGUA, 2016).

En los HA se han evaluado plantas ornamentales tratando aguas residuales domésticas logrando la remoción de 84% a 99% la demanda bioquímica de oxígeno (DBO), demanda química de oxígeno (DQO), fósforo, nitrógeno y coliformes totales (Calheiros et al., 2015). Del mismo modo, se ha estudiado el diseño logrando la remoción de 50% hasta 96% en nitrógeno y fósforo (Cui et al., 2015) y variando el tamaño del sustrato (medio sólido que protege y da soporte a la planta para el desarrollo de la raíz), obteniendo eficiencias de remoción de DBO, Nitrógeno y DQO que oscilan entre el 41% a 81% (Bai et al., 2017).

En Tabasco, México, López *et al.*, (2018), evaluaron un humedal artificial de flujo subsuperficial (HAFS) con *Thalia geniculata*, con soporte de grava de Ø de ¾ de pulgada, porosidad $n=56.3\pm 3.5$ y con un tiempo de retención hidráulica (TRH) de 4.2 días, que favoreció el 80% de remoción de DBO con una k estimada de -0.43 días^{-1} . Los resultados analizados denotaron que el humedal cumple criterios de descarga de 30 mg/L de DBO (NOM-001-SEMARNAT-1996) y esta tecnología

1 <http://sina.conagua.gob.mx/sina/tema.php?tema=plantasTratamiento&ver=grafica&o=0&n=nacional>
<http://sina.conagua.gob.mx/sina/tema.php?tema=plantasTratamiento&ver=reporte>

puede operar intermitentemente, con variaciones de cargas y caudal a diferencia de las tecnologías convencionales que son susceptibles a estos cambios (CONAGUA, 2016).

Romellón *et al.*, (2022), evaluaron el efecto de la poda de macrófitas sobre microorganismos adheridos al medio de soporte y la remoción de DBO₅ en tres humedales artificiales de flujo subsuperficial (HAFS) experimentales con especies de *Phragmites australis* (HAFS-Carrizo), *Pontederia sagittata* (HAFS-Tule) y grava como testigo (HAFS-Grava). Se utilizaron nueve unidades (con réplicas). Se estimó la remoción y el coeficiente cinético de degradación k para la DBO₅, el TRH fue de 3.1 días en todos los tratamientos. El mejor tratamiento fue HAFS-Tule: antes de la poda la biomasa de microorganismos presentó valores medianos ($N=12$) de 42931.6 mg/kg ($Q_1=40259.7$; $Q_3=54478.4$) y posterior a la poda de 33444.6 mg/kg ($Q_1=31210.9$; $Q_3=36581.8$), la biomasa vegetal retirada en la poda fue de 40.85 ± 2.58 kg, se removió 95.44% de DBO₅ con una $k=1.004 \text{ días}^{-1}$ (27.6 °C), lo que permite cumplir la NOM-001-Semarnat-1996.

En esta investigación se evaluó la eficiencia de remoción de contaminantes básicos en la PTAR de humedales artificiales de la División Académica de Ciencias Biológicas (DACBIOL) de la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco (UJAT), México, caracterizando el pH, temperatura del agua, SDT, color, turbiedad y DQO; así como volumétricamente el influente y efluente de cada HA determinado el gasto, DQO,

sólidos disueltos totales (SDT), turbiedad y color, verificando el cumplimiento normativo ambiental de descarga a cuerpos receptores. Estos resultados nos permitirán ver condiciones de operación al inicio de la pandemia por COVID 19.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 ÁREA DE ESTUDIO

La PTAR de HA está localizada en la DACBIOL-UJAT en Villahermosa, Tabasco, en la latitud norte 17°59'28.40" y longitud oeste 92°58'26.54", donde se generan y tratan aguas residuales con características domésticas provenientes de cafeterías, sanitarios, aseo general, de una población de 2500 personas (estudiantes, administrativos y profesores); en este caso, por motivos de pandemia se estima que la investigación se desarrolló con un 5% de la población debido a la suspensión de

acceso a los estudiantes por la contingencia COVID-19.

En la PTAR se establecieron tres tipos de macrófitas que previamente han sido evaluadas por su potencial de degradar contaminantes básicos en aguas residuales de origen doméstico (López et al., 2018, García et al., 2019). Se tienen dos trenes (T1 y T2) de tratamiento que trabajan en serie, de igual dimensión y se estableció el mismo tipo de vegetación a ambos lados, el primer humedal de flujo subsuperficial cuenta con la especie de *Pontederia cordata* (T1-R1 y T2-R1), El segundo humedal de flujo libre con *Thalia geniculata* (T1-R2 y T2-R2) y el tercer humedal de flujo libre con *Sagittaria lancifolia* (T1-R3 y T2-R3) (Figura 1).

2.2 ACTIVIDADES DE CAMPO

Se realizaron actividades de campo para verificar la compatibilidad del sistema,

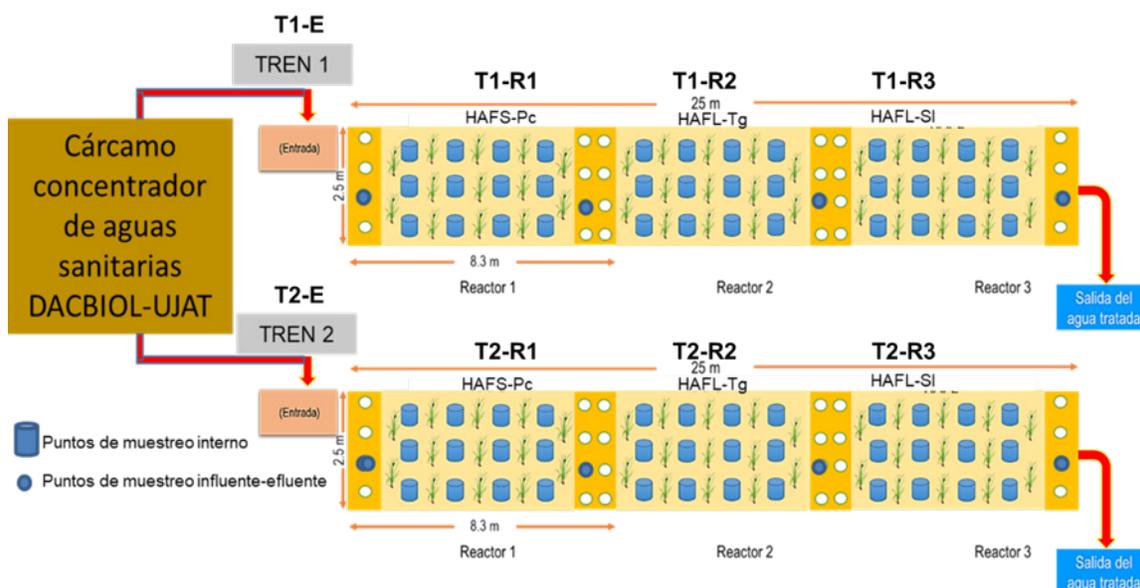


Figura 1. Diagrama de procesos de Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de la DACBIOL-UJAT. Fuente: López-Ocaña, 2018

como son equipos y reactores con sus especies (Figura 1). Este estudio se efectuó en mayo de 2020. Fue necesario conocer el gasto de operación para lo cual se empleó el método volumétrico: midiendo el tiempo de llenado (t) de un recipiente de volumen conocido (v), donde se colecta la descarga (Briones y García, 2014). La medición del gasto se realizó durante las campañas de monitoreo de la calidad del agua, en horario de 8 a 18 h con intervalos de 2 h.

Durante la fase de evaluación del sistema de tratamiento, se tomaron muestras de agua en el afluente y efluente de las unidades de proceso durante diez días (del 11 al 22 de mayo), tomando una muestra simple diaria (14 h) de los efluentes del cárcamo y los humedales para verificar el comportamiento de estas variables en el sistema.

2.3 ACTIVIDADES DE LABORATORIO

La caracterización fue restringida por ser un periodo de contingencia sanitaria y sólo se determinaron los parámetros de control de la planta (pH, temperatura del agua, SDT, color, turbiedad, DQO). Esta se realizó por procedimientos analíticos señalados en los métodos estandarizados por la EPA. Para reducir errores experimentales y aplicar las pruebas estadísticas, las determinaciones se efectuaron por triplicado. Los métodos usados para la medición de los parámetros fueron: pH (SM 4500 B), temperatura (SM 2550 B), SDT (SM 2540), los cuales fueron medidos con el equipo Hanna® HI98129. La turbiedad se determinó por el método SM 2130B, utilizando el equipo Hanna® HI 98703 con precisión de 0.01 UNT. El color se

determinó mediante el método APHA 2120, con el equipo Lamotte® con una precisión de 0.1 UC (Unidad de Color) modelo LTC y la DQO (USEPA 410.4) fue medida con el equipo Hanna® HI839800-01.

2.4 EFICIENCIA REQUERIDA DEL SISTEMA

La eficiencia de proceso para cualquier sustancia dada se puede aplicar el cálculo de eficiencia requerida y eficiencia de proceso de remoción mediante la siguiente ecuación respectivamente (García et al., 2019).

$$\eta_p = \frac{C_1 - C_2}{C_1} * 100$$

Dónde: η_p = eficiencia de remoción de una sustancia dada (%), C_1 = Concentración de entrada de la sustancia al sistema (mg/L), C_2 = Concentración de salida de la sustancia del sistema (mg/L).

2.5 ANÁLISIS ESTADÍSTICO

Para determinar diferencias estadísticamente significativas entre las secciones de la PTAR se realizó un análisis de varianza de Kruskal - Wallis para los datos no paramétricos y un contraste de medianas W de Mann - Whitney para determinar diferencias estadísticamente significativas para las variables pH, temperatura, SDT y la turbiedad. Y para color se determinaron diferencias estadísticamente significativas mediante un análisis estadístico ANOVA de una vía por cumplir con postulados de normalidad y homocedasticidad.

Todos los datos fueron analizados con el software STATGRAPHICS versión 16.1, el número de repeticiones fue de tres

por cada tratamiento. A las variables de color que se comportaron paramétricas (normales y homocedásticas), se les determinó un ANOVA simple, y las que no son paramétricas (pH, temperatura, CE, SDT y turbiedad) se les determinó un contraste de medianas de Kruskal-Wallis.

3. RESULTADOS

3.1 GASTOS DE OPERACIÓN

En este periodo, la generación de aguas residuales con la que operó el tren 1 presentó un gasto medio (Q_{med}) con $22.17 \text{ m}^3/\text{día}$, un gasto mínimo (Q_{min}) con $6.22 \text{ m}^3/\text{día}$ y un gasto máximo instantáneo ($Q_{maxinst}$) de $40.95 \text{ m}^3/\text{día}$. El tren 2 operó con un Q_{med} de $20.12 \text{ m}^3/\text{día}$, un Q_{min} con $6.32 \text{ m}^3/\text{día}$ y un $Q_{maxinst}$ de $40.37 \text{ m}^3/\text{día}$ (Figura 2). El gasto de operación en ambos trenes es similar y esto se debe al buen control de las válvulas globo de control de 3" de \varnothing en la entrada de los trenes.

3.2 CALIDAD DEL AGUA EN LOS TRATAMIENTOS

Los resultados promedio de calidad del agua en los trenes de tratamiento se presentan en la Tabla 1. Esta caracterización muestra que el agua residual, durante este periodo, presenta características de carga débil como lo establece Metcalf y Eddy (1996), estas están clasificadas en rangos de DQO de 250 a 500 mg/L, encontrándose que en el cárcamo se reciben en promedio 373 mg/L de este contaminante.

3.3 ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LOS TRATAMIENTOS

La prueba de Kruskal-Wallis establece que existen diferencias estadísticamente significativas entre las medianas con un nivel del 95% de confianza. El valor de la mediana de pH más bajo se encuentra en el tratamiento T1-R3 con un pH de 8.29 UpH con cuartiles inferior 8.12 y superior 8.47, seguido del tratamiento T2-R3 con un

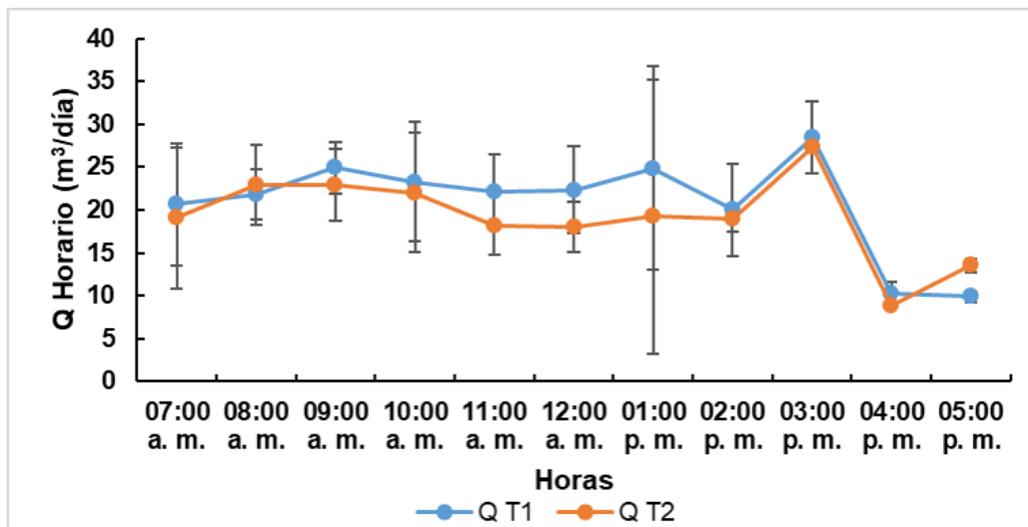


Figura 2. Gastos de operación en los trenes de tratamiento en la PTAR

Tratamiento	pH	T. Agua	SDT	Color	Turbiedad	DQO
	UpH	°C	mg/L	UC	UTN	mg/L
Cárcamo	8.634	25.26	950.5	1305.1	96.37	373
T1-E	8.54	25.32	950	1319.4	92.593	342
T1-R1	8.628	25.69	987.1	946.9	65.88	222.5
T1-R2	8.433	24.43	1016	495.5	42.85	175.5
T1-R3	8.287	24.12	994.6	509	35	76.5
T2-E	8.7	25.1	955.0	1292.3	94.2	380.0
T2-R1	8.444	25.04	985	821	67.27	213
T2-R2	8.351	24.47	1007	661.2	50.23	136
T2-R3	8.316	24.72	1015.4	624.9	63.98	71

T1: Tren 1 T2: Tren 2 E: Entrada R1: Reactor 1 R2: Reactor 2 R3: Reactor 3

Tabla 1. Valores promedio de los contaminantes básicos en los efluentes de las unidades de tratamientos de la PTAR

valor de 8.34 UpH con cuartiles 8.03 y 8.57, El valor de la mediana de temperatura mientras que el valor mediano más alto se presentó en T2-E con un pH de 8.78 con T1-R3 con una temperatura de 24.3 °C, cuartiles 8.16 y 8.95 (Figura 3). con cuartiles inferior (21.69°C) y superior

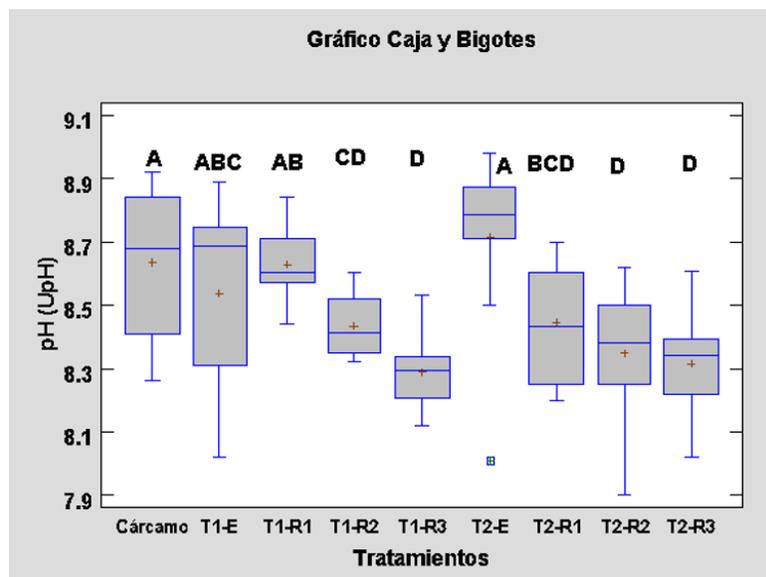


Figura 3. Valores de medianas ($\pm Q1, Q3$) para pH (N=10). Letras diferentes indican diferencias estadísticamente significativas entre tratamiento ($p < 0.05$), al 95 % nivel de confianza

(26.58 °C), seguido del tratamiento T2-R2 con un valor de 24.4 °C, con cuartiles 22.12 y 26.54 °C; mientras que el valor mediano más alto se presentó en Cárcamo con una temperatura de 25.85 con cuartiles 22.39 y 27.13 °C (Figura 4).

entre la medida de color (UC) entre un nivel de tratamientos y otro, con un nivel del 5% de significación. El promedio (\pm DE) más bajo se reporta en el tratamiento T1-R2 con 495.5 ± 213.2 UC, seguido de T1-R3 con 509.0 ± 195.2 UC, y el tratamiento más alto

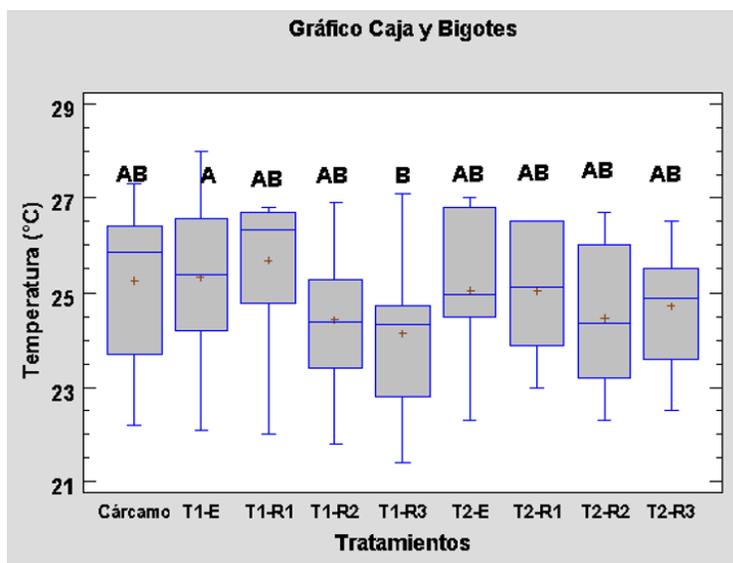


Figura 4. Valores de medianas (\pm Q1, Q3) para temperatura (N=10). Letras diferentes indican diferencias estadísticamente significativas entre tratamiento ($p < 0.05$), al 95 % nivel de confianza

El valor de la mediana de SDT más bajo se encuentra en el tratamiento cárcamo con SDT de 950.0 mg/L con cuartiles inferior (795.82 mg/L) y superior (1134.58 mg/L), y el T1-E con SDT de 950.0 mg/L con cuartiles 846.48 y 1026.76 mg/L; seguido del tratamiento T2-E con SDT de 965.0 mg/L con cuartiles 869.46 y 1027.02 mg/L, mientras que el valor mediano más alto se presentó en T1-R2 con SDT de 1035.0 mg/L con cuartiles 919.2 y 1080.27 mg/L (Figura 5).

El ANOVA reporta que el valor-P de la prueba-F es menor que 0.05, existe una diferencia estadísticamente significativa

se presenta en T1-E con 1319.4 ± 229.8 UC (Figura 6).

El valor de la mediana de turbiedad más bajo se encuentra en el tratamiento T1-R3 con 33.75 UNT con cuartiles inferior (17.63 UNT) y superior (54.83 UNT), seguido del tratamiento T1-R2 con 40.8 UNT con cuartiles 25.60 y 70.33 UNT, mientras que el valor mediano más alto se presentó en cárcamo con 97.5 UNT con cuartiles 84.98 y 107.70 UNT (Figura 7).

El valor de la mediana de DQO más bajo se encuentra en el tratamiento T2-R3 con 72 mg/L con cuartiles inferior de 56.49 mg/L y superior de 77.0 mg/L, seguido

del tratamiento T1-R4 con 77 mg/L con cuartiles 56.49 y 90.70 mg/L; mientras que el valor mediano más alto se presentó en cárcamo con 370.0 mg/L con cuartiles 313.24 y 446.76 mg/L (Figura 7).

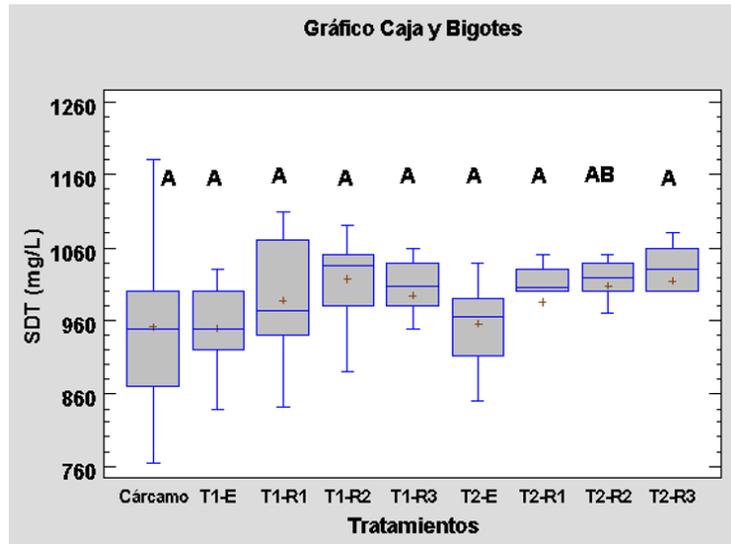


Figura 5. Valores de medianas (\pm Q1, Q3) para SDT (N=10). Letras diferentes indican diferencias estadísticamente significativas entre tratamiento ($p < 0.05$), al 95 % nivel de confianza.

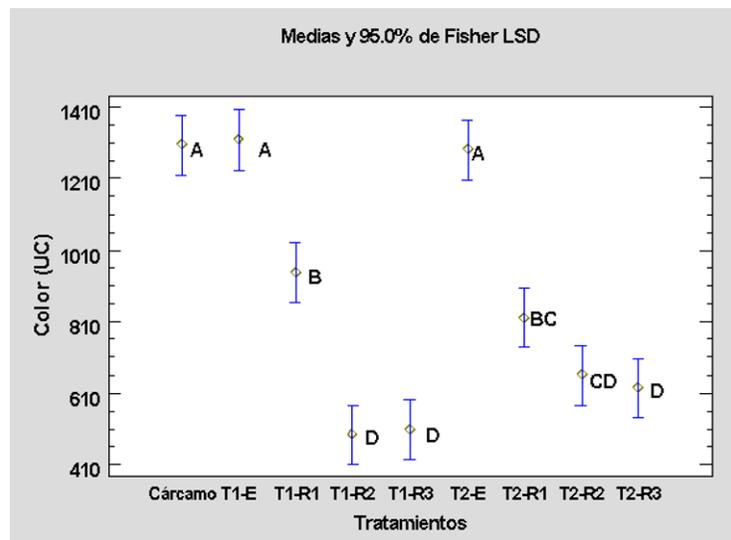


Figura 6. Valores de promedio \pm DE para color. (N=10). Letras diferentes indican diferencias estadísticamente significativas entre tratamiento ($p < 0.05$), al 95 % nivel de confianza

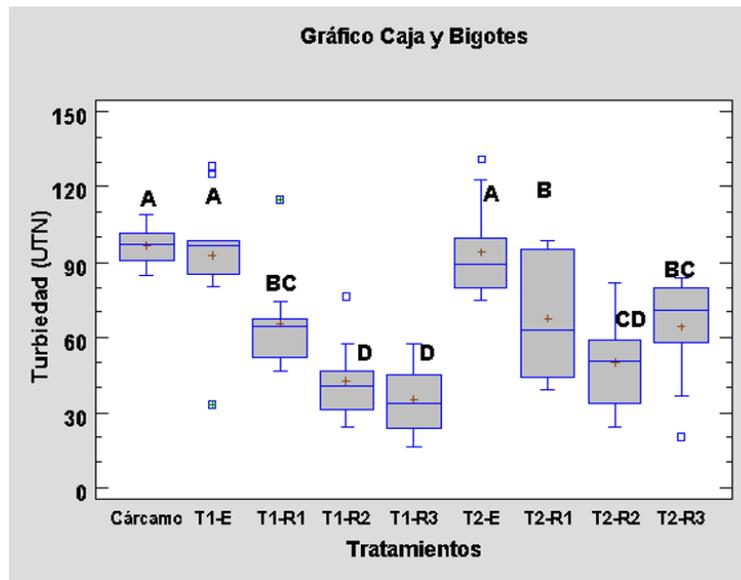


Figura 7. Valores de medianas ($\pm Q1, Q3$) para turbiedad (N=10). Letras diferentes indican diferencias estadísticamente significativas entre tratamiento ($p < 0.05$), al 95 % nivel de confianza

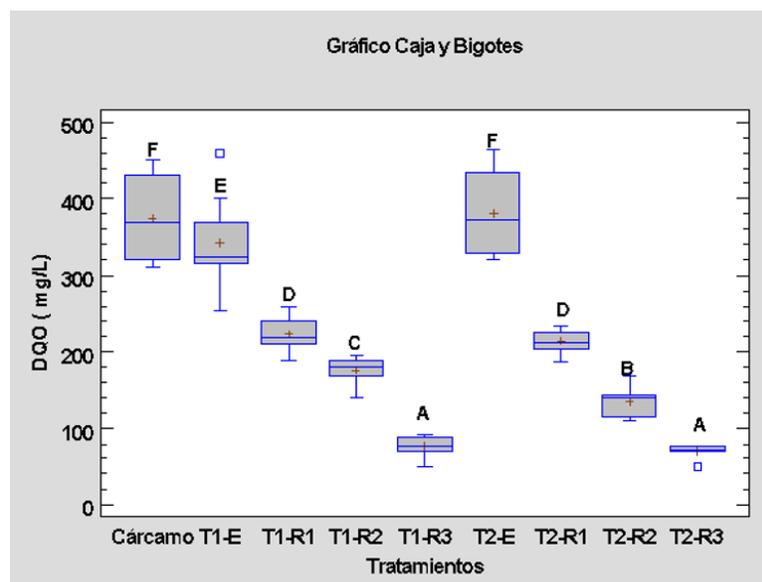


Figura 8. Valores de medianas ($\pm Q1, Q3$) para DQO (N=10). Letras diferentes indican diferencias estadísticamente significativas entre tratamiento ($p < 0.05$), al 95 % nivel de confianza

3.4 EFICIENCIAS DE REMOCIÓN EN LOS TRATAMIENTOS

La Tabla 2 muestra los resultados promedio de eficiencia de remoción en ambos trenes

de tratamiento. El parámetro de DQO alcanzó una eficiencia total de 78.65%, siendo los reactores R1 los que reportan mayor remoción con 38.95 %, seguido de

R3 con 24.85% y el de menor remoción R2 con 21.15%.

En cuanto a los otros parámetros de importancia, el sistema alcanza a remover un 62.2% de turbiedad y de color, 61.4%. Cabe aclarar que los parámetros con signo negativo (-) indican que la concentración de salida en ese parámetro es más alta que en la entrada, fenómeno de estabilización de microorganismos (pH y temperatura) y para SDT un fenómeno de corto circuito al incrementar la concentración de iones en el efluente (Crites y Tchobanoglous, 2000).

En esta institución (DACBIOL), generalmente las condiciones de agua residual van de carga media a fuerte, como lo establece Rodríguez Osorio (2018), quien evaluó la remoción de contaminantes básicos en aguas residuales en dos trenes de tratamiento con humedales artificiales de flujo libre y subsuperficial utilizando *Thalia geniculata* y en condiciones normales de operación. La remoción de los contaminantes básicos como la DQO, está en rango del 91% al 96%; la remoción de los SST de 81%, el fósforo hasta en un 87% y de nitrógeno con 67%.

Parámetro	Unidad	ERR1	ERR2	ERR3	ETP (%)
pH	UpH	-1.0	2.3	1.7	3.0
Temp. agua	°C	-1.5	4.9	1.3	4.7
SDT	mg/L	-3.9	-2.9	2.1	-4.7
Color	UC	28.2	47.7	-2.7	61.4
Turbiedad	UTN	28.8	35.0	18.3	62.2
DQO	mg/L	38.05	21.15	24.85	78.65

Tabla 2. Valores promedio de la eficiencia de remoción de los contaminantes básicos en el efluente de la PTAR

4. DISCUSIÓN

En el periodo de evaluación, la PTAR presentó valores bajos de carga de contaminantes en el agua residual (Metcalf y Eddy 1996, Crites y Tchobanoglous, 2000), esto debido a las condiciones extraordinarias de ingreso a la institución en un 5% que se dieron, ya que el suministro de agua residual se vio disminuido significativamente debido a la emergencia del COVID 19, que obligó a suspender actividades.

La *Pontederia cordata* que fue evaluada por Marín et al., en 2016, obtuvo eficiencias de hasta 95% en remoción de color, turbiedad y DQO, en nuestro caso el R1 que opera con esta especie removió cerca del 28% en turbiedad y color y hasta un 38% en DQO. Estos valores bajos se obtuvieron con las condiciones de operación extraordinarias, entre los tratamientos con los HA en serie y podría ser debido a la falta de un suministro adecuado de agua residual y carga, pues han desestabilizado a los microorganismos y a las especies de macrófitas presentes.

Comparando la presente remoción de DQO con otros estudios reportados por Merino (2017), Konnerup et al., (2009), Paulo et al., (2009), Sinhg et al., (2009) y Zurita (2008), que son del 56.5%, 42% al 83%, 44%, 51.4 % y del 77.1 al 79.8% respectivamente, es posible observar que fue un valor superior al obtenido por ellos en algunos casos y aunque en esta ocasión no se pudo medir la concentración de nutrientes (N y P), estos también son removidos con la carga orgánica como se establece en la reducción de DQO, se puede observar esta correlación en los estudios realizados por Solís et al., (2016).

Solís et al., (2016), reportaron remociones de turbiedad, color, DQO, DBO5, NT, PT y SST de 94,8; 71,5; 94,7; 94,8; 92,7; 52,2 y 93,0% respectivamente en humedales artificiales de flujo subsuperficial en serie empleando *Paspalum paniculatum* (camalote) y *Cyperus articulatus* L (chintul) lo cual está por encima de las eficiencias obtenidas en el tren empleado en este proyecto, esto debido a las situaciones extraordinarias de COVID-19, pues, al no existir la población regular, no hay suficiente caudal y carga orgánica para tratar, por lo cual se plantea evaluar de nueva cuenta para conocer los resultados en condiciones normales de operación.

En cuanto al cumplimiento normativo, los parámetros establecidos por la NOM-001-SEMARNAT-2021 sobre temperatura y pH, se establece que estos cumplen con los criterios de descarga, pues la temperatura es menor a 35°C y el rango de pH es de 6 a 9 UpH. La DQO sí cumple con los criterios de descarga establecidos por la norma

mencionada, que establece un límite de descarga de 100 mg/L para este parámetro, el cual se cumple satisfactoriamente al descargar por debajo de este rango.

Dentro del tratamiento del agua residual, el pH y la temperatura son importantes para mantener los microorganismos activos dentro de los HA. En el presente sistemas, el rango de pH (8.0-8.6) y temperatura (24-26 °C) permitió establecer colonias de microorganismos mesófilos, los cuales son responsables de la degradación de la materia orgánica en la depuración del agua residual (Kadlec y Wallace, 2009; Romellón et al., 2022). En el caso de los SDT, son iones en el agua residual y se incrementaron en los reactores R1 y R2, principalmente por la liberación de estos del medio de soporte, la degradación de la materia orgánica (mineralización) y por la descomposición de las macrófitas que han cumplido con su ciclo de vida dentro de los humedales (López et al., 2018).

El color en las aguas residuales es causado por sólidos suspendidos, material coloidal y sustancias en solución (Crites & Tchobanoglous, 2000). En los estudios de la PTAR de la DACBiol se obtuvo 1305.1 UC correspondientemente al cárcamo, al final se removió el 61.4% del color lo que está dentro de lo requerido en la NOM-001-SEMARNAT-2021 que establece el 15% de pureza en vertidos de aguas tratadas a bienes nacionales. En el caso aquí analizado, los reactores R3 incrementan el color por la descomposición de *Sagittaria lancifolia*.

La turbiedad es una medida de las propiedades de dispersión de la luz de

las aguas, es usado para indicar la calidad de aguas naturales y aguas residuales tratadas con relación al material residual en suspensión coloidal (Crites & Tchobanoglous, 2000). El valor promedio obtenido para turbiedad antes de tratamiento fue de 96.4 UNT, la remoción fue de 62.2% y no fue mayor, ya que hay factores que pueden estar interfiriendo en esto, como son desechos de vegetación en descomposición, una alta turbidez también se puede deber a microorganismos, parásitos, etcétera, Según Lamori (2019), la disminución de la turbiedad está asociada a una menor concentración de organismos patógenos; que, aunque la remoción de turbiedad en este estudio es del 62.2%, es un valor aceptable.

ya que no requieren energía eléctrica, ni equipos costosos para su funcionamiento; demandan poca capacitación para sus operadores y, por ser un sistema natural, sus costos de tratamiento son más bajos que los tratamientos convencionales.

5. CONCLUSIONES

A pesar de las modificaciones en las condiciones de operación por la contingencia sanitaria, la PTAR alcanza una eficiencia de remoción de DQO de 78.65%, 62.2% de turbiedad y de color 61.4%. Los reactores R1 y R2 presentan mayor liberación de iones y esto se debe a la desestabilización de las macrófitas y microorganismos al cambiar las concentraciones y volumen del agua residual.

En esta emergencia sanitaria, se demostró que los HA son una buena alternativa para el tratamiento de estas aguas residuales, pues son capaces de soportar condiciones de operación intermitentes con variaciones de carga y caudal, por varios meses.

En términos de mantenimiento y operación, los HA son amigables con el medio ambiente,

6. FUENTES DE CONSULTA

- Bai, S., Lyu, T., Ding, Y., Li, Z., Wang, D., You, S., & Xie, Q. (2017). Campus sewage treatment in multilayer horizontal subsurface flow constructed wetlands: Nitrogen removal and microbial community distribution. *Clean-Soil, Air, Water*, 45, 1-11. <https://doi.org/10.1002/clen.201700254>
- Briones, S. G. & García, C. I. (2014). *Aforo del Agua en Canales y Tuberías*. Editorial Trillas-Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. 100 p. ISBN: 978-968-24-7488-0. Tercera edición, reimpresso 2014.
- Calheiros, C.S.C., Bessa, V.S., Mesquita, R.B.R., Brix, H., Rangel, A.O.S.S., & Castro, P.M.L. (2015). Constructed wetland with a polyculture of ornamental plants for wastewater treatment at a rural tourism facility. *Ecological Engineering*, 79, 1-7. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2015.03.001>
- Comisión Nacional del Agua, CONAGUA (2016). *Manual de agua potable, alcantarillado y saneamiento, introducción al tratamiento de las aguas residuales municipales, Diseño de plantas de tratamiento de aguas residuales municipales: Humedales artificiales*. Libro 30. Comisión Nacional del Agua. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. ISBN: 978-607-626-010-4. Recuperado de: <http://aneas.com.mx/wp-content/uploads/2016/04/SGAPDS-1-15-Libro30.pdf>
- Comisión Nacional del Agua, CONAGUA. (2018). *Estadísticas del Agua en México (2018th ed.)*. Ciudad De México. Retrieved from http://sina.conagua.gob.mx/publicaciones/EAM_2018.pdf
- Crites, R. W. & Tchobanoglous, G. (2000). *Small and Decentralized Wastewater Management Systems*, McGraw Hill Co. New York, NY.
- Cui, L., Ouyang, Y., Yang, W., Huang, Z., Xu, Q., & Yu, G. (2015). Removal of nutrients from septic tank effluent with baffle subsurface-flow constructed wetlands. *Journal of Environmental Management*, 153, 33-39. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2015.01.035>
- García, O.J.A., López-Ocaña, G., Torres-Balcázar, C.A. (2019). Evaluación de medios de soporte en humedales artificiales con vegetación *Sagittaria latifolia* en la remoción de contaminantes básicos. *Revista Iberoamericana de las Ciencias Biológicas y Agropecuarias*. Vol. 8, Núm. 15. 1-36. DOI: 10.23913/ciba.v8i15.82.
- Kadlec, R.H., & Wallace, S.D. (2009). *Treatment wetlands*, Second Ed. crc press/taylor & francis group, Boca raton, fl 33487-2742, USA.
- Konnerup, D., Koottatep, T., Brix, H. (2009). Treatment of domestic wastewater in tropical, subsurface flow constructed wetlands planted with *Canna* and *Heliconia*. *Ecol. Eng.*, 35, 248-257.
- Lamori J. G., Xue. J., Rachmadi A. T., Lopez G. U., Kitajima. M., Gerba C. P., Pepper I.L., Brooks J.P., Sherchan. S. (2019). Removal of fecal indicator

- bacteria and antibiotic resistant genes in constructed wetlands. *Environmental Science and Pollution Research*. DOI:10.1007/s11356-019-04468-9
- López-Ocaña, G., Bautista-Margulis, R. G., Ramos-Herrera, S., Torres-Balcazar, C. A., López-Vidal R. & Pampillón-González, L. (2018). Phytoremediation of wastewater with *Thalia geniculata* in constructed wetlands: basic pollutants distribution. En: S. Hernández & S. Mambretti (Eds). *Water Pollution XIV* (pp. 53-63). UK, Vol 228, WIT Press. doi:10.2495/WP180071.
- Llagas, W., & Guadalupe, E. (2006). Diseño de humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales en la Universidad Nacional Mayor de San Marcos. *Revista del Instituto de Investigaciones Facultad De Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica Y Geográfica*, 15 (2): 85-96.
- Marín A. C., Solís S. R., López O. G., Bautista M. R. G., & Romellón C. M. J. (2016). Tratamiento de aguas residuales por humedales artificiales tropicales en Tabasco, México. *CIBA*. Vol. 5, 1-20.
- Merino S, María de la Luz (2017) Mecanismos de remoción de materia orgánica y nutrientes en un sistema de tratamiento pasivo de aguas residuales municipales (Tesis Doctoral). Centro de Investigación y Asistencia en Tecnología y Diseño del Estado de Jalisco, A. C. Guadalajara, Jalisco. México.
- NOM-001-SEMARNAT-2021. Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales. *Diario Oficial de la Federación DOF*: 11/003/2022.
- Paulo, P.L., Begosso, L., Pansonato, N., Sherestha, R.R., Boncz, M.A. (2009). Design and configuration criteria for wetland systems treating greywater. *Water Sci. Technol.*, 60(8), 2001-2007.
- Rodríguez, O.B. (2018) Evaluación de la remoción de contaminantes básicos en aguas residuales mediante humedales artificiales de flujo libre y sub-superficial utilizando *Thalia geniculata* I. Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. División Académica de Ciencias Biológicas. Tabasco, México.
- 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>
- Singh, S., Haberl, R., Moog, O., Shrestha, R.R., Shrestha, P., Shrestha, R. (2009). Performance of an anaerobic baffled reactor and hybrid constructed wetland treating high-strength wastewater in Nepal – A model for DEWATS. *Ecol. Eng.*, 35, 654-660.
- Solís S. R. López O. G., Bautista M. R. G., Hernández B. J. R., & Romellón C. M. J. (2016). Evaluación de humedales artificiales de flujo libre

y subsuperficial en la remoción de contaminantes de aguas residuales utilizando diferentes especies de vegetación macrófita. *Interciencia*. Vol 41, 1-8.

- Tchobanoglous G., & Metcalf E. (1996). *Ingeniería de aguas residuales. Tratamiento, vertido y purificación. Volumen 1 y Volumen 2 Tercera edición*. Editorial Mc Graw Hill, Reimpresión de 2000. México DF. 1485 páginas. ISBN 970-10-1005-1.
- Zurita, F., (2008). *Tratamiento de aguas residuales domésticas por humedales artificiales de tipo subsuperficial con plantas de ornato de interés comercial (tesis doctoral)*. CIATEJ, Guadalajara, Jalisco, México.