



ISSN 2448-508X

KUXULKAB'

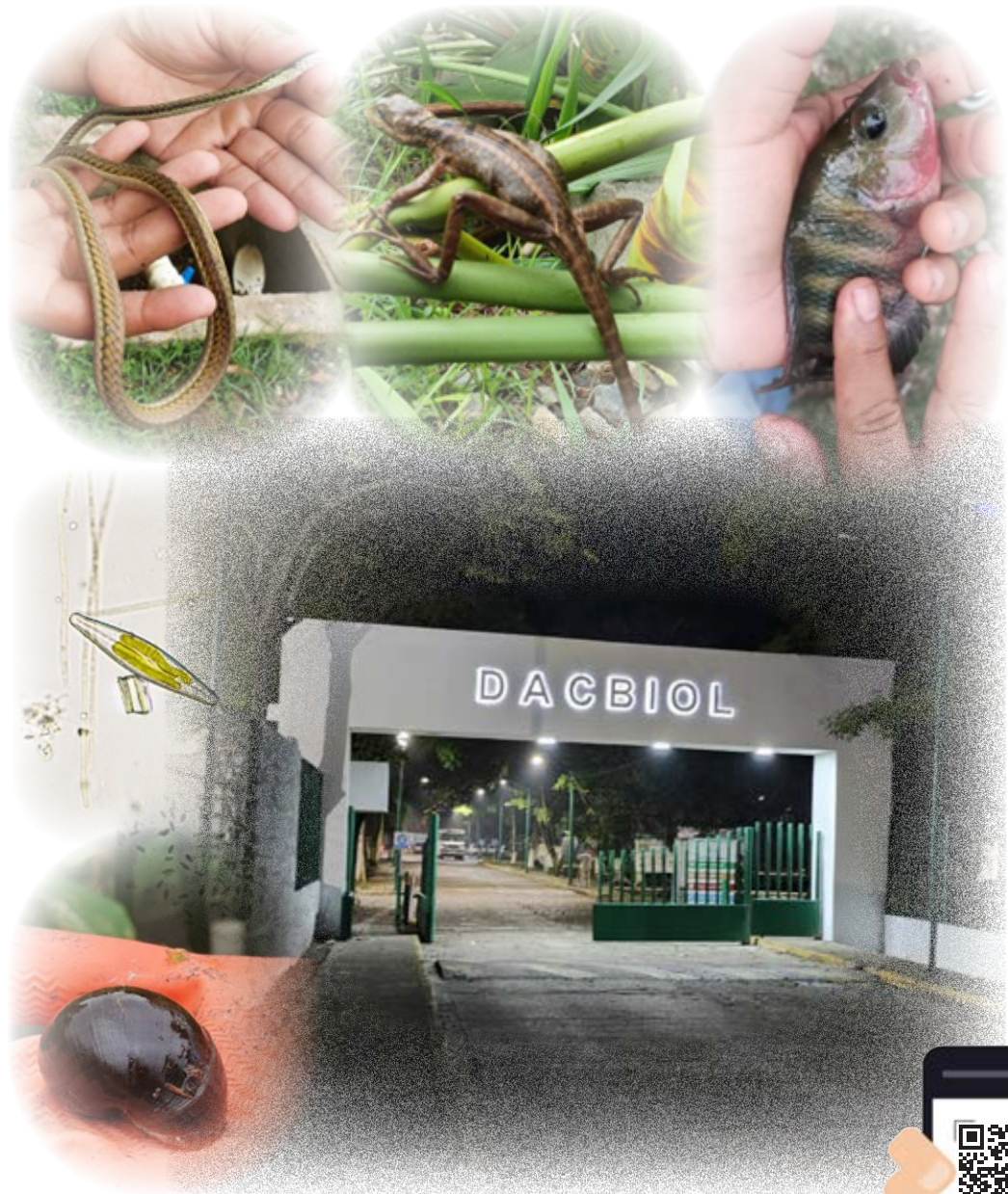
-Tierra viva o naturaleza en voz Chontal-

Volumen 30

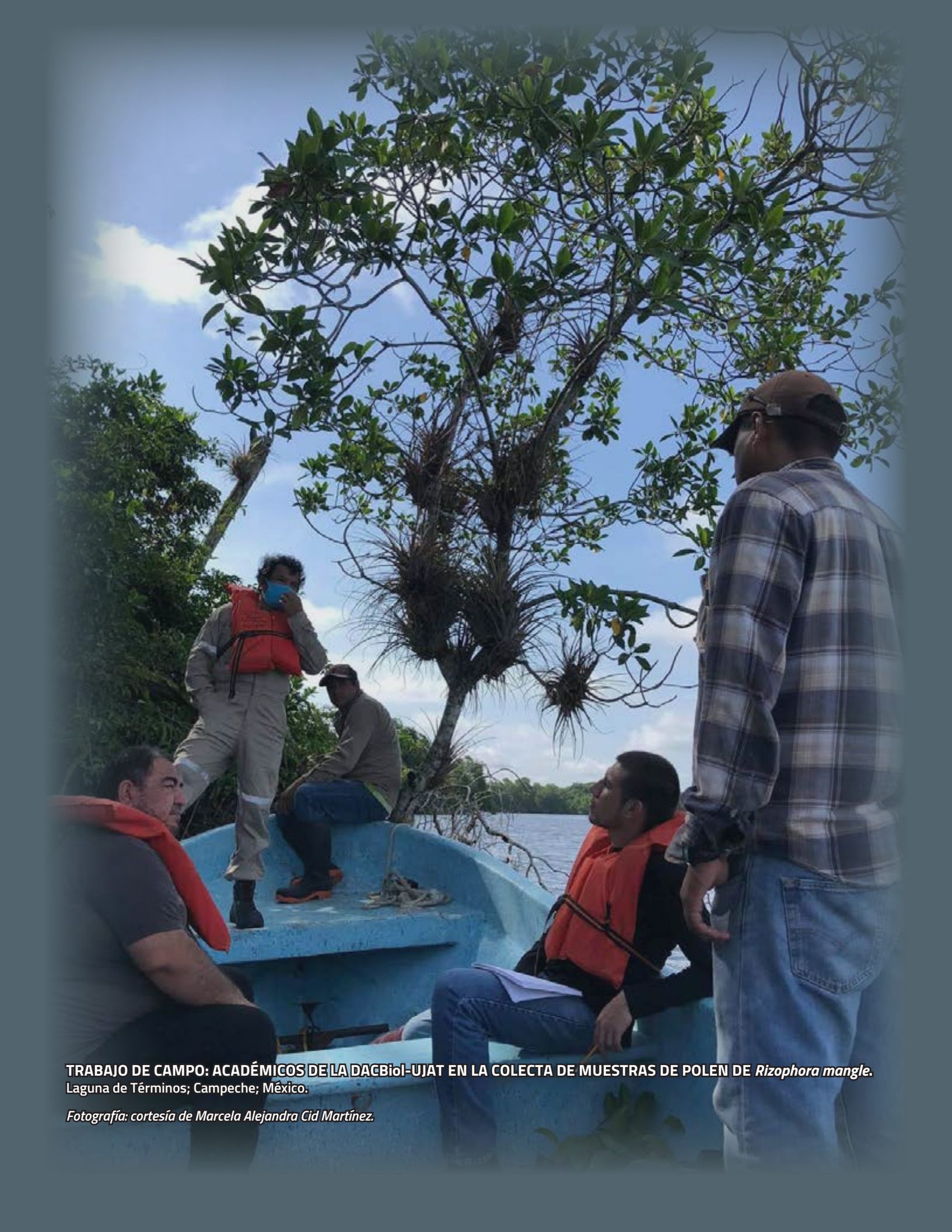
Número 67

Mayo-Agosto 2024

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco
División Académica de Ciencias Biológicas



« REVISTA DE DIVULGACIÓN CIENTÍFICA »



TRABAJO DE CAMPO: ACADÉMICOS DE LA DACBioI-UJAT EN LA COLECTA DE MUESTRAS DE POLEN DE *Rizophora mangle*.
Laguna de Términos; Campeche; México.

Fotografía: cortesía de Marcela Alejandra Cid Martínez.



UJAT

UNIVERSIDAD JUÁREZ
AUTÓNOMA DE TABASCO

“ESTUDIO EN LA DUDA. ACCIÓN EN LA FE”

DIRECTORIO

L.D. Guillermo Narváez Osorio
Rector

Dr. Luis Manuel Hernández Govea
Secretaría de Servicios Académicos

Dr. Wilfrido Miguel Contreras Sánchez
Secretaría de Investigación, Posgrado y Vinculación

Lic. Alejandro Bastar Cordero
Encargado de despacho de la Secretaría de Servicios Administrativos

Mtro. Miguel Armando Vélez Téllez
Secretaría de Finanzas

Dr. Arturo Garrido Mora
Director de la División Académica de Ciencias Biológicas

Dr. José Roberto Hernández Barajas
Coordinador de Investigación y Posgrado, DACBIOL-UJAT

L.C.P. Luz del Carmen Pulido Novero
Coordinadora Administrativa, DACBIOL-UJAT

Dra. María Elena Macías-Valadez Treviño
Coordinadora de Docencia, DACBIOL-UJAT

M.I.P.A. Araceli Guadalupe Pérez Gómez
Coordinadora de Difusión Cultural y Extensión, DACBIOL-UJAT

COMITÉ EDITORIAL DE KUXULKAB'

Dr. Andrés Reséndez Medina †
Editor fundador

Biól. Fernando Rodríguez Quevedo
Editor ejecutivo y encargado

Dra. Coral Jazvel Pacheco Figueroa

Dr. Jesús García Grajales

Dra. Carolina Zequeira Larios

Dr. Rodrigo García Morales

Dra. María Elena Macías-Valadez Treviño

Ocean. Rafael García de Quevedo Machain

M.C.A. Ma. Guadalupe Rivas Acuña

Dr. Nicolás Álvarez Pliego

Dra. Nelly del Carmen Jiménez Pérez

Dr. Marco Antonio Altamirano González Ortega

Dra. Rocío Guerrero Zárate

Dr. Eduardo Salvador López Hernández

Dra. Nadia Florencia Ojeda Robertos

Dr. Maximiano Antonio Estrada Botello

Dra. Melina del Carmen Uribe López

Dr. José Guadalupe Chan Quijano

Dra. Martha Alicia Perera García

Editores asociados

Dra. Ramona Elizabeth Sanlúcar Estrada

M.C.A. Alma Deysi Anacleto Rosas

Dra. Ena Edith Mata Zayas

M. en Pub. Magally Guadalupe Sánchez Domínguez

Correctores de estilo

M.C.A. María del Rosario Barragán Vázquez

M. en C. Leonardo Noriel López Jiménez

Dra. Violeta Ruiz Carrera

Correctores de pruebas

M.Arq. Marcela Zurita Macías-Valadez

M. en C. Sulma Guadalupe Gómez Jiménez

Traductoras

L.I.A. Ervey Baltazar Esponda

Soporte técnico institucional

Téc. Juan Pablo Quiñonez Rodríguez †

Apoyo técnico

CONSEJO EDITORIAL (EXTERNO)

Dra. Lilia María Gama Campillo

División Académica de Ciencias Biológicas, UJAT - México

Dr. Roberto Carlos González Fócil

Jefe del Departamento de Revistas Científicas, UJAT - México

Dra. Juliana Álvarez Rodríguez

División Académica de Ciencias Económico Administrativas, UJAT - México

Dr. Jesús María San Martín Toro

Universidad de Valladolid (UVA) - España

ISSN 2448-508X

KUXULKAB'

La revista KUXULKAB' (vocablo chontal que significa «tierra viva» o «naturaleza») es una publicación cuatrimestral de divulgación científica la cual forma parte de las publicaciones periódicas de la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco; aquí se exhiben tópicos sobre la situación de nuestros recursos naturales, además de avances o resultados de las líneas de investigación dentro de las ciencias biológicas, agropecuarias y ambientales principalmente.

El objetivo fundamental de la revista es transmitir conocimientos con la aspiración de lograr su más amplia presencia dentro de la propia comunidad universitaria y fuera de ella, pretendiendo igualmente, una vinculación con la sociedad. Se publican trabajos de autores nacionales o extranjeros en español, con un breve resumen en inglés.

KUXULKAB' se encuentra disponible en su portal electrónico a **texto completo** y en **acceso abierto**, así como en diversas plataformas editoriales, directorios y catálogos de revistas:



Revistas Universitarias

Portal electrónico de las publicaciones periódicas de la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco (UJAT).



Repositorio Institucional UJAT

Plataforma desarrollada con el aval del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT); cuenta con un acervo académico, científico, tecnológico y de innovación de la universidad.



Sistema Regional de Información en Línea para Revistas Científicas de América Latina, el Caribe, España y Portugal

Red de instituciones que reúnen y diseminan información sobre las publicaciones científicas seriadas producidas en Iberoamérica.



PERIÓDICA - Índice de Revistas Latinoamericanas en Ciencias

Base de datos bibliográfica de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), con registros publicados América Latina y el Caribe, especializadas en ciencia y tecnología.



Google académico - Google Scholar

Buscador de Google enfocado y especializado en la búsqueda de contenido y bibliografía científico-académica (artículos, tesis, libros, patentes, etcétera).



BASE - Bielefeld Academic Search Engine

Motor de búsqueda más voluminosos del mundo, especialmente para recursos web académicos; es operado por la biblioteca de la Universidad de Bielefeld (Bielefeld, Alemania).



MIAR - Matriz de Información para el Análisis de Revistas

Matriz con repertorio de revistas y bases de datos de indexación (citas, multidisciplinarias o especializadas), con el propósito de identificar revistas científicas.



fatcat! - Perpetual Access to the Scholarly Record

Catálogo de publicaciones de investigación que incluye artículos de revistas, actas de congresos y conjuntos de datos.



OAJI - Open Academic Journals Index

Base de datos internacional para indexar revistas científicas de acceso abierto; es manejada por la Universidad Global de Cherkas (United States of America).



Nuestra portada:

«La DACBIOL y el estudio de los humedales artificiales».

Diseño de:

Fernando Rodríguez Quevedo (DACBIOL-UJAT).

Fotografías de: Imágenes alusiva al número publicado y bajo cortesía de los autores responsables.

KUXULKAB', año 30, No. 67, mayo-agosto 2024; es una publicación cuatrimestral editada por la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco (UJAT) a través de la División Académica de Ciencias Biológicas (DACBIOL). Av. Universidad s/n, Zona de la Cultura; Col. Magisterial; Villahermosa, Centro, Tabasco, México; C.P. 86040; Tel. (993) 358 1500, 354 4308, extensión 6415; <https://revistas.ujat.mx>; kuxulkab@ujat.mx. Editor responsable: Fernando Rodríguez Quevedo. Reservas de Derechos al Uso Exclusivo No. 04-2013-090610320400-203; ISSN: 2448-508X, ambos otorgados por el Instituto Nacional del Derecho de Autor. Responsable de la última actualización de este número: Editor ejecutivo, Fernando Rodríguez Quevedo; Carretera Villahermosa-Cárdenas km 0.5; entronque a Bosques de Saloya; CP. 86039; Villahermosa, Centro, Tabasco; Tel. (993) 358 1500, 354 4308, extensión 6415; Fecha de la última modificación: 15 de mayo de 2024.

Las opiniones expresadas por los autores no necesariamente reflejan la postura del editor de la revista, ni de la DACBIOL y mucho menos de la UJAT. Queda estrictamente prohibida la reproducción total o parcial de los contenidos e imágenes de la publicación sin previa autorización de la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.



Editorial

Estimados lectores:

Deseario se encuentren bien, en esta oportunidad nos dirigimos para presentar el segundo número de **Kuxulkab'** para este 2024; siguiendo en reforzar los esfuerzos para mantener nuestra presencia, en esta ocasión se exponen dos aportaciones donde, contamos con datos sobre dos estudios relacionados a las ciencias ambientales, uno respecto a la formación de microalgas como un recurso natural para uso alternativo; el segundo una descripción respecto al monitoreo y verificación de un humedal artificial y su cumplimiento ambiental de uso.

De costumbre a la forma de trabajo de la revista, proporcionamos una sinopsis de las aportaciones que conforman esta publicación:

«**EL INCREÍBLE VIAJE DE UNA MICROALGA: UN BAILE CON NUTRIENTES PARA UN CRECIMIENTO EXCEPCIONAL**»; texto que presume el análisis del crecimiento de una microalga en ambientes controlados empleando recetas nutricionales y monitorear indicadores físicos como la turbidez, color y sólidos suspendidos.

«**INDICADORES Y BIOINDICADORES DE LA CALIDAD DE AGUA EN HUMEDALES ARTIFICIALES: CASO DE ESTUDIO EN CENTRO, TABASCO**», aportación que describe el manejo y desarrollo (físicoquímico, volumétrico) de la planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR) de humedal artificial (HA) de la DACBIOL-UJAT; con el propósito de verificar el cumplimiento ambiental vigente.

La consolidación de este número es un esfuerzo en conjunto con autores, evaluadores, editores asociados y demás miembros del comité editorial de esta revista. Agradecemos, a cada uno de ellos, su apoyo y entusiasmo de colaborar en la divulgación de la ciencia con estándares de calidad emanados por esta casa de estudios. Esperamos vernos pronto.

Arturo Garrido Mora
DIRECTOR DE LA DACBIOL-UJAT

Fernando Rodríguez Queredo
EDITOR EJECUTIVO DE KUXULKAB'

Contenido

EL INCREÍBLE VIAJE DE UNA MICROALGA: UN BAILE CON NUTRIENTES PARA UN CRECIMIENTO EXCEPCIONAL e5953

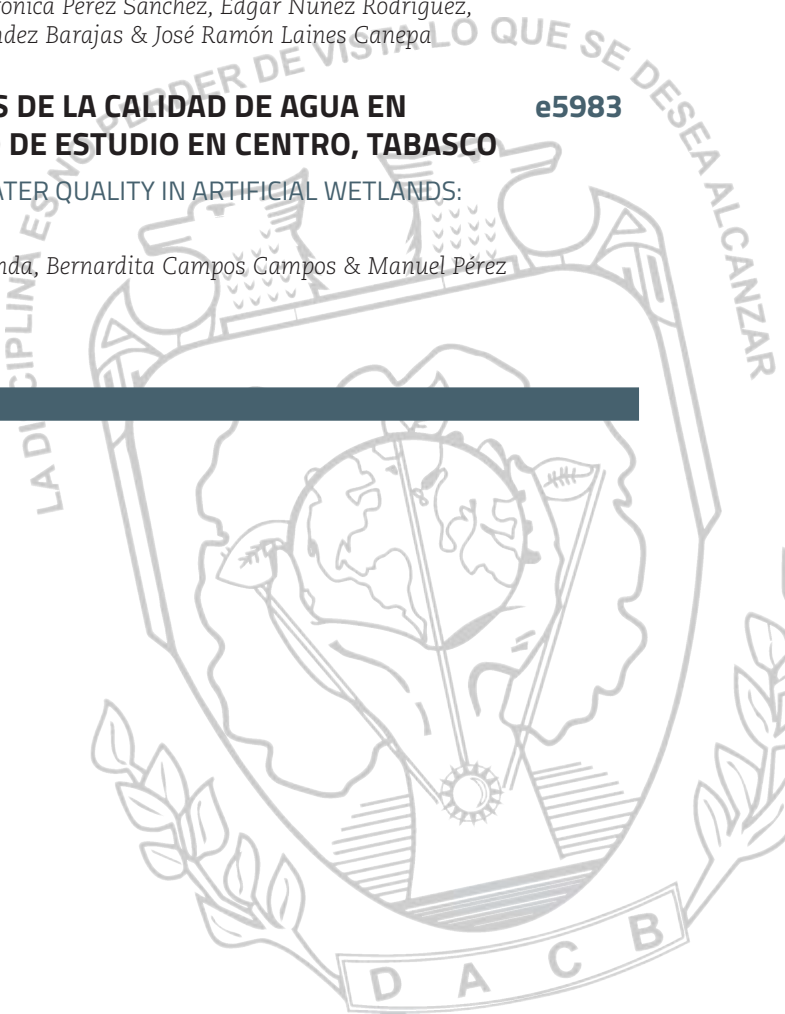
THE INCREDIBLE JOURNEY OF A MICROALGAE: A DANCE WITH NUTRIENTS FOR EXCEPTIONAL GROWTH

Sandra Karina Hernández Márquez, Rosa Veronica Pérez Sánchez, Edgar Nuñez Rodriguez, José Aurelio Sosa Olivier, José Roberto Hernández Barajas & José Ramón Laines Canepa

INDICADORES Y BIOINDICADORES DE LA CALIDAD DE AGUA EN HUMEDALES ARTIFICIALES: CASO DE ESTUDIO EN CENTRO, TABASCO e5983

INDICATORS AND BIOINDICATORS OF WATER QUALITY IN ARTIFICIAL WETLANDS: CASE STUDY IN CENTRO, TABASCO

Gaspar López Ocaña, Marilyn Calderón Miranda, Bernardita Campos Campos & Manuel Pérez de la Cruz



EL INCREÍBLE VIAJE DE UNA MICROALGA: UN BAILE CON NUTRIENTES PARA UN CRECIMIENTO EXCEPCIONAL

THE INCREDIBLE JOURNEY OF A MICROALGAE: A DANCE WITH NUTRIENTS FOR EXCEPTIONAL GROWTH

Sandra Karina Hernández Márquez¹, Rosa Veronica Pérez Sánchez², Edgar Nuñez Rodríguez³, José Aurelio Sosa Olivier⁴, José Roberto Hernández Barajas⁵ & José Ramón Laines Canepa⁶*

¹Egresada de la Licenciatura en Ingeniería Ambiental de la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco (UJAT). Estudiante de Ingeniería en Biotecnología de la División de Ciencias de la Salud, Biológicas y Ambientales de la Universidad Abierta y a Distancia de México (UnADM). ²Ingeniera Bioquímica por el Instituto Tecnológico de Villahermosa (ITVH); estudiante de la Maestría en Ciencias Ambientales de la División Académica de Ciencias Biológicas (DACBiol-UJAT). ³Licenciado en Gestión Ambiental por la Universidad Alfa y Omega; Técnico docente del Colegio de Estudios Científicos y Tecnológicos del Estado de Tabasco (CECyTE). ⁴Ingeniero Ambiental y Maestro en Ciencias Ambientales por la UJAT. Integrante del Sistema Estatal de Investigadores, del Consejo de Ciencia y Tecnología del Estado de Tabasco (CCYTET); así como también de la Asociación Mexicana de Ingeniería, Gestión y Ciencias Ambientales (AMICA A.C.). Actualmente profesor-investigador de la DACBiol-UJAT. ⁵Ingeniero Químico por el Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez (Chiapas); Doctor en Ciencias por el Instituto Tecnológico de Celaya (Guanajuato); Predoctoral en Ingeniería Química y Bioquímica en la Universidad de Western Ontario (Canadá). Hoy profesor-investigador de la DACBiol-UJAT. ⁶Doctor en Ciencias en Ecología y Manejo de Sistemas Tropicales por la UJAT. Especialista en el campo de la ingeniería ambiental con enfoque en prevención de la contaminación, así como en el manejo de los residuos. En el momento profesor-investigador DACBiol-UJAT.

Laboratorio Planta Piloto #3, Tratamiento Atmosférico y de Residuos Sólidos, División Académica de Ciencias Biológicas (DACBiol); Universidad Juárez Autónoma de Tabasco (UJAT); Carretera Federal #180 (Villahermosa-Cárdenas) km 0.5 S/N; entronque a Bosques de Saloya; C.P. 86150. Villahermosa, Tabasco; México.

✉ jose.laines@ujat.mx

 ¹ 0009-0003-3962-0346  ² 0009-0001-6269-3223  ³ 0000-0002-4957-5652
 ⁴ 0000-0001-6786-0521  ⁵ 0000-0002-3037-3188  ⁶ 0000-0002-6770-5596

Como referenciar:

Hernández Márquez, S.K.; Pérez Sánchez, R.V.; Nuñez Rodríguez, E.; Sosa Olivier, J.A.; Hernández Barajas, J.R. & Laines Canepa, J.R. (2024). El increíble viaje de una microalga: un baile con nutrientes para un crecimiento excepcional. *Kuxulkab'*, 30(67): e5953, mayo-agosto. <https://doi.org/10.19136/kuxulkab.a30n67.5953>

Disponible en:

<https://revistas.ujat.mx> • <https://revistas.ujat.mx/index.php/kuxulkab>
<https://revistas.ujat.mx/index.php/kuxulkab/article/view/5953>

DOI:

<https://doi.org/10.19136/kuxulkab.a30n67.5953>

Resumen

En el reino de las microalgas, "*Nannochloropsis oculata*" destaca por su adaptabilidad a diversas dietas. Se ha explorado su crecimiento en fotobiorreactores "airlift" y variados medios de cultivo. El objetivo fue analizar este crecimiento en ambientes controlados, empleando cuatro recetas nutricionales. Además del crecimiento, se monitorearon indicadores como turbidez, color aparente y sólidos suspendidos, asegurando un control preciso. Resultados emocionantes emergieron; este estudio revela la relación de "*N. oculata*" con nutrientes. Hallazgos que descubren misterios del cultivo de microalgas y prometen un futuro verde. Este increíble viaje anticipa más maravillas microscópicas.

Palabras clave: Microalgas; Biorreactor; Nutriente; Cinética de crecimiento; Medios de cultivo.

Abstract

In the kingdom of microalgae, "*Nannochloropsis oculata*" stands out for its adaptability to various diets. Its growth in airlift photobioreactors and various culture media has been explored. The objective was to analyze this growth in controlled environments, using four nutritional recipes. In addition to growth, indicators such as turbidity, apparent color, and suspended solids were monitored, ensuring precise control. Exciting results emerged; this study reveals the relationship of "*N. oculata*" with nutrients. Findings that uncover mysteries of microalgae cultivation and promise a green future. This incredible journey anticipates more microscopic wonders.

Keywords: Microalgae; Bioreactor; Nutrient; Growth kinetics; Culture media.

En el mágico mundo de lo microscópico, las microalgas destacan como diminutos seres que, al igual que nosotros, necesitan su propio entorno especial: agua, luz y dióxido de carbono (CO_2), para tejer su increíble crecimiento.

El cultivo de microalgas despliega su versatilidad a través de distintos enfoques nutricionales, entre ellos el autotrófico, donde estas diminutas maravillas pueden cocinar su propio manjar gracias a la magia de la fotosíntesis; Otra estrategia es la heterotrofia, en la cual las microalgas no pueden preparar su propio banquete de carbono a través de la fotosíntesis, por lo que se nutren a partir de otras fuentes en su entorno y un enfoque aún más asombroso es el mixotrofismo, donde estas microalgas ingeniosas tienen el poder de abastecerse de energía metabólica tanto a través de la fotosíntesis como de otras fuentes en su entorno, ¡una estrategia verdaderamente versátil para mantener su vitalidad! (Rehmanji, Suresh, Nesamma & Jutur, 2021).

En la producción de materia orgánica, el empleo de fotobiorreactores (FBR) "airlift" y la técnica de conteo rápido de células emerge como un dúo fundamental, estas herramientas no solo aumentan la eficiencia del proceso, sino que también impulsan la calidad del resultado final.

Un mundo de posibilidades se ha explorado en busca del entorno ideal para el florecimiento de las microalgas. Durante esta travesía, se han examinado diversos senderos en la búsqueda del escenario óptimo para el florecimiento de las microalgas. Entre estos caminos, resaltan el famoso medio F/2 (Parsy, Sambusiti, Baldoni-Andrey, Elan, & Périé, 2020; Minhas, Gaur & Adholeya, 2023), el mediático medio de cultivo Zarrouk (Andrade, Cardoso, Assis, Costa, Druzian & da Cunha, 2019; de Medeiros, Pimentel, Varandas, Dos Santos, de Souza, da Costa, da Conceição & Magnani, 2020), el confiable medio

basal de Bold (Chuah, Dasan, Cheng, Lim, Ho, Tan, Yew, Kiew, Leong & Lam, 2020), el bien reconocido medio de cultivo WC (Minhas *et al.*, 2023) y hasta el digestato líquido nacido del proceso de digestión anaerobia; todos ellos brillantes fuentes de nutrientes que prometen nutrir a estas pequeñas maravillas verdes (Parsy *et al.*, 2020).

Se ha constatado que las variadas composiciones de estos medios de cultivo ejercen una influencia de gran magnitud en el desarrollo y la composición química de la materia orgánica de las microalgas. Los ingredientes de estos caldos nutricionales desempeñan un papel crucial en la evolución de estas diminutas maravillas verdes.

La microalga ("*Nannochloropsis oculata*") demuestra su habilidad para prosperar en ambientes acuáticos con una salinidad que oscila entre los 5 y 35 partes por trillón (ppt), a una cálida temperatura de 30 grados Celsius ($^{\circ}\text{C}$) y un nivel de pH de 9. Estos números revelan su capacidad asombrosa para adaptarse a condiciones diversas y desafiantes. En el ámbito industrial, esta especie demuestra su necesidad de condiciones luminosas fotosintéticas, este proceso implica un inicio suave con luz tenue durante las primeras semanas, seguido de un aumento gradual en la intensidad lumínica, evitando la exposición directa a la luz solar.



(2024). iStock.com | [greenleaf123]
Fotobiorreactor en la industria de biocombustibles de combustible de algas de laboratorio...
<https://www.istockphoto.com/es/foto/fotobiorreactor-en-la-industria-de-biocombustibles-de-combustible-de-algas-de-gm1151361649-31202838>

En la esfera de la producción masiva, se recurre al uso de agua residual secundaria en conjunción con agua de mar o incluso un medio derivado de biocombustibles. La "*Nannochloropsis*" se erige como una auténtica joya en términos de impacto y potencial biotecnológico. Su habilidad para acumular niveles sobresalientes de ácidos grasos poliinsaturados la posiciona como una de las microalgas más prometedoras en este ámbito.

Las células de esta alga exhiben modestas dimensiones, midiendo alrededor de 2 micrómetro o micras (μm), por lo general, permanecen inmóviles y ostentan un tono verde. Su distinción radica en la ausencia de clorofila b, un pigmento vital para la fotosíntesis que expande el rango de luz aprovechable, así como la carencia de clorofila c, otro pigmento que les otorga la capacidad de aclimatare a distintas condiciones de luz en hábitats acuáticos específicos.

Mencionadas características las separan de sus contrapartes microalgales. Estas micrófitas demuestran una asombrosa habilidad para almacenar diversos pigmentos, como astaxantina, zeaxantina y cantaxantina, los cuales desempeñan un papel crucial al conferir los colores distintivos que las caracterizan. Además, estos pigmentos cumplen una función esencial en la captación de luz, y a la vez, la especie muestra una sorprendente capacidad de crecimiento celular en una variedad de medios de cultivo (Galina, Porto & Freitas, 2018; Lubián, Montero, Moreno-Garrido, Huertas, Sobrino, González-del Valle & Parés, 2000).

La sorprendente versatilidad metabólica de las microalgas les concede una destreza única para aclimatare a una amplia gama de ecosistemas y procesos biotecnológicos, en tiempos recientes, ha habido un notable incremento en el interés hacia la utilización de fotobiorreactores en diversas aplicaciones biotecnológicas, con especial enfoque

en el cultivo de microalgas. Esta tendencia refleja el potencial que estas pequeñas maravillas tienen para moldear el panorama de la biotecnología.

Los recientes progresos en la ingeniería de fotobiorreactores han intensificado el enfoque en la reducción de los costos de producción y en la exploración plena del potencial algal. Estos ingeniosos dispositivos, llamados fotobiorreactores, son recintos sellados y bañados en luz diseñados para generar materia orgánica bajo un control riguroso. Al encontrarse aislados del entorno exterior, minimizan la exposición a sustancias tóxicas y ofrecen un entorno optimizado en términos de pH, que refleja la acidez o alcalinidad de una sustancia, temperatura, luz y concentración de dióxido de carbono. (Sirohi, Kumar, Ranganathan, Singh, Udayan, Kumar, Hoang, Chilakamarry, Kim & Sim, 2022).

Dentro de la gama de fotobiorreactores, los modelos tipo "airlift" han capturado gran interés gracias a su destreza para cultivar poblaciones celulares densas. La adopción de estos fotobiorreactores ha sido objeto de investigación en el cultivo de microalgas, gracias a su habilidad para ofrecer un entorno de cultivo homogéneo y meticulosamente controlado. Tales fotobiorreactores presentan un diseño de biorreactor clásico, compuesto por un contenedor de doble zona interconectadas. A lo largo del tiempo, se han erigido fotobiorreactores "airlift" con múltiples configuraciones, moldeadas por los procesos a implementar. Estos dispositivos pueden ser categorizados según su método de circulación, aportando flexibilidad y adaptabilidad a diversas aplicaciones.

En comparación con los fotobiorreactores de tanque agitado, presentan ventajas notables, como una distribución de estrés más suave y su construcción y escalabilidad sencillas, todo ello a un costo reducido.

Sin embargo, la ausencia de un mecanismo de agitación también conlleva desventajas, como una mezcla deficiente en cultivos altamente viscosos y una propensión significativa a la formación excesiva de espuma bajo condiciones de alta aireación. Dharmaraja, Shobana, Huy, Vatland, Ashokkumar & Kumar (2023) mencionan que un fotobiorreactor "airlift" en forma rectangular presenta una eficacia fotosintética efectiva, aunque su diseño complejo y los desafíos en su expansión plantean ciertos inconvenientes. Esto ha motivado la exploración de diversas configuraciones de fotobiorreactores "airlift", incluyendo la opción de los biorreactores de columna con burbujas internas (Gilmour & Zimmerman, 2020), otras alternativas en esta búsqueda incluyen los biorreactores de tubo de burbuja (Zhou, Lu, Han & Li, 2020) y los biorreactores de doble burbuja (Yaqoubnejad, Rad & Taghavijeloudar, 2021).

En lo que respecta a la técnica de conteo rápido de células, esta se ha empleado exitosamente para lograr una estimación precisa de la densidad celular en los cultivos de microalgas. Este método se apoya en la captura de la luz emitida por las células vivas y su separación de las señales de fondo, permitiendo una medición confiable de la concentración celular (Subía & Rubio, 2018; Chuka-ogwude, Ogbonna & Moheimani, 2021; Greses, Tomás-Pejó, Markou & González-Fernández, 2022).

Hoy en día, los medios de cultivo sintéticos, a pesar de su alta eficacia, generan preocupaciones en la comunidad científica y ambiental debido a su potencial impacto ambiental. El continuo desarrollo de nuevas sustancias químicas plantea riesgos tanto para el entorno como para la salud humana y animal. En busca de alternativas más sostenibles y respetuosas con el medio ambiente, se exploran medios de cultivo naturales y formulados a partir de residuos orgánicos para mitigar estos efectos negativos.

Propósito del análisis

El enfoque principal radica en investigar cómo diversos tipos de medios de cultivo impactan la velocidad de crecimiento de la "*Nannochloropsis oculata*", mientras se cultiva en fotobiorreactores "airlift", este estudio busca revelar las influencias clave que determinan el desarrollo de esta especie en un entorno de cultivo controlado.

Se realizó una comparación exhaustiva entre la tasa de crecimiento de la microalga y parámetros físicos de control. Los resultados arrojados por esta comparativa podrían desentrañar medios de cultivo naturales de alta eficacia, al mismo tiempo que proporcionan datos valiosos sobre la velocidad de crecimiento específica de la microalga en cada medio examinado.

Este tipo de análisis, que evalúa la interacción entre medios de cultivo y el crecimiento de microalgas en fotobiorreactores "airlift" utilizando la técnica de conteo rápido de células, desempeña un papel esencial en la optimización de la producción de estas microalgas con aplicaciones diversificadas en múltiples sectores industriales. Este rango de investigación abarca un espectro amplio de posibilidades, que se extiende desde la producción de biocombustibles hasta la manufactura de alimentos y productos cosméticos derivados de estas pequeñas pero prometedoras formas de vida.

Área de exploración

Este estudio fue desarrollado en las instalaciones del «Laboratorio Planta Piloto #3 'Tratamiento Atmosférico y de Residuos Sólidos'» de la División Académica de Ciencias Biológicas (DACBiol) en la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco (UJAT), y que se encuentra ubicada en el municipio de Centro, Tabasco, México.

Para dar inicio, se llevó a cabo una búsqueda meticulosa y selectiva de información relevante sobre los temas en cuestión, incluyendo el cultivo de la microalga ("*Nannochloropsis oculata*"), fotobiorreactores "airlift", medios de cultivo, parámetros de crecimiento, cinética de crecimiento, nutrientes y el incremento de microalgas.

Diseño de los fotobiorreactores (FBR)

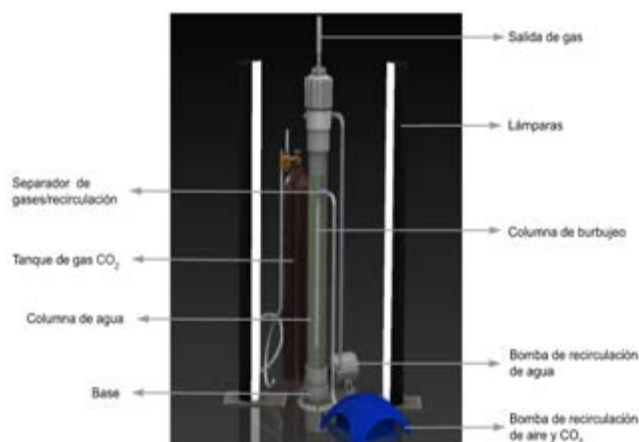
Se implementaron específicamente FBR "airlift" de diseño tubular en plástico, los cuales se dispusieron en una configuración vertical. La elección de FBR de sistema cerrado se hizo con el propósito de lograr un control óptimo a lo largo del proceso biológico, esto permitió supervisar el movimiento y flujo del cultivo, es decir, la circulación del líquido, reduciendo así el riesgo de contaminación por microorganismos no deseados.

Esta decisión tuvo el beneficio adicional de minimizar el consumo de agua, proporcionar una notable relación superficie-volumen, asegurar una alta productividad de materia orgánica y potenciar la capacidad de captura del dióxido de carbono.

Para el proceso de agitación, se incorporaron bombas de recirculación y se empleó una bomba de aireación. En la parte superior, se integró un dispositivo eliminador de gases, diseñado para facilitar la liberación de los gases producidos dentro de los fotobiorreactores. La configuración del FBR "airlift" empleado involucra varios componentes clave, estos incluyen la base del FBR, las lámparas, la columna de agua, la columna de burbujeo, las bombas de recirculación de aire y dióxido de carbono, la salida del gas (eliminador de gas), la bomba de recirculación de agua, el separador de gases/recirculación y el tanque de gas de dióxido de carbono (fotografía 1).

En el proceso de cultivo, los parámetros críticos para el desarrollo óptimo de la microalga comprenden la luz, la temperatura y el pH. Para la iluminación, se emplearon lámparas LED de luz blanca neutra de 17 watts (W) que generan 900 lúmenes cada una en un fotoperiodo de 12/12 horas y se adaptaron mediante un dispositivo que mide la longitud de onda de la luz, el valor de longitud de onda fue de 550.0 nanómetros.

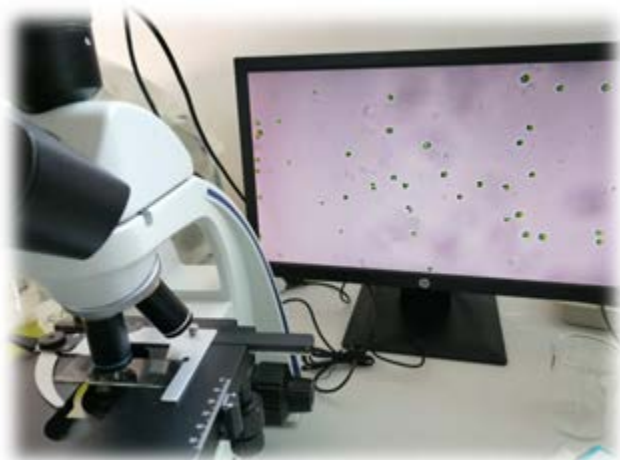
La temperatura experimentó variaciones en el rango de 24 a 30 grados Celsius (°C), mientras que el pH se mantuvo en un rango de valores entre 8 y 9. Se contó con un dispositivo portátil Sension® MM156 para la medición y control en el entorno de cultivo.



Fotografía 1. Partes características de un fotobiorreactor "airlift" (imagen de Laines Canepa, J.R.).

Origen de muestras y cultivos

Las muestras de "*Nannochloropsis oculata*" se obtuvieron del banco de microalgas de la Universidad de Texas. Para evaluar la pureza y calidad de estas, se empleó un microscopio óptico con la finalidad de cuantificar la cantidad de microorganismos iniciales requeridos para dar inicio al proceso de cultivo (fotografía 2).



Fotografía 2. "*Nannochloropsis oculata*" observada a través del microscopio óptico (imagen propia de los autores).

Es de suma importancia asegurarse de que la cantidad inicial de microalgas sea adecuada, ya que un número muy bajo podría desencadenar pérdidas debido a la exposición a la luz, mientras que una cantidad excesiva podría resultar en pérdidas ocasionadas por la respiración o un aprovechamiento ineficaz de la energía lumínica.

Siguiendo este enfoque, se agregaron 50 mililitros por litro (mL/L) de inóculo a tres fotobiorreactores "airlift", excluyendo el FBR de referencia. Luego de completar el montaje de los fotobiorreactores y cultivar la microalga, se llevaron a cabo las primeras mediciones para mantener un seguimiento del crecimiento en cada uno y para permitir una comparación al final.

A lo largo de este proceso, es fundamental verificar la calidad de la muestra en cada etapa de las diversas escalas de cultivo.

Medios de cultivo. Durante el estudio se evaluaron medios de cultivo combinados de diferentes maneras: el medio F/2 Guillard sintético, BiolCatre® y multivitaminicos.

Estos medios proveen los nutrientes esenciales para promover el desarrollo óptimo de la microalga "*Nannochloropsis oculata*".

El medio F/2 Guillard constituye una mezcla estandarizada de diversos compuestos y diseñada para fomentar el crecimiento máximo de las algas. De manera similar, se empleó el *Biol*, un biodigestato obtenido a través de un proceso de digestión biológica anaeróbica con diversas excretas como borrego, cerdo, rumen, gallina ponedora y vaca, producido en el Centro de Acopio y Tratamiento de Residuos (CATRE) de la División Académica de Ciencias Biológicas (DACBiol) de la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco (UJAT) (fotografía 3) y registrado bajo el nombre de BiolCatre®, útil como fuente natural de elementos y nutrientes ideales para el crecimiento de las microalgas.

Tener un entendimiento de los componentes químicos fundamentales presentes en cada medio de cultivo resulta de suma relevancia (cuadro 1).

Se establecieron cuatro grupos experimentales en fotobiorreactores "airlift", a cada uno de los cuales se les añadió 2.5 litros (L) de agua destilada y 35 g/L de sal adquirida en la Universidad de Texas. El primer fotobiorreactor (FBR 1 blanco) recibió 930 microlitro (μL) de medio F/2 Guillard sintético y 930 μL de multivitaminicos (vitaminas B12, tiamina y biotina), pero no se añadieron algas.

El segundo fotobiorreactor (FBR 2) recibió 930 μL de medio F/2 Guillard sintético, multivitaminicos y algas (50 mL/L de inóculo). El tercer fotobiorreactor (FBR 3) recibió 930 μL de Biol (BiolCatre®), multivitaminicos y algas (50 mL/L de inóculo). El último fotobiorreactor (FBR 4) recibió 930 μL de Biol (BiolCatre®) y algas (50 mL/L de inóculo).



Fotografía 3. Centro de Acopio y Tratamiento de Residuos (CATRE) en la DACBiol-UJAT.

Medición y registro de valores

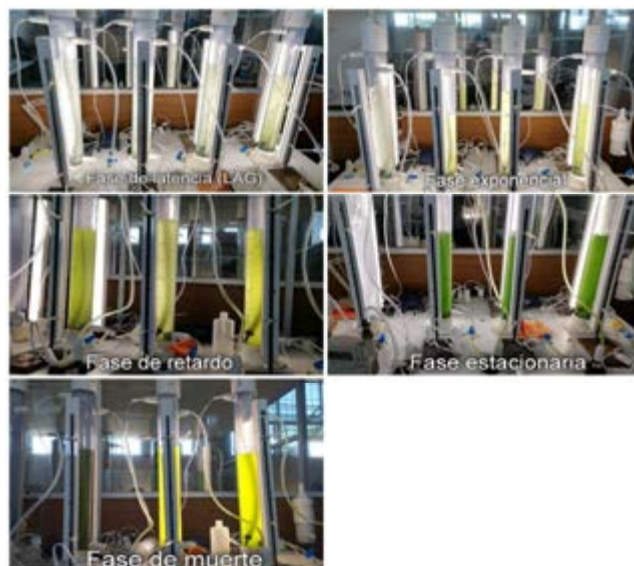
A lo largo del período de análisis de 21 días, se llevaron a cabo mediciones diarias de los parámetros correspondientes en los fotobiorreactores.

Los parámetros de control que se midieron incluyeron la temperatura, pH, turbidez, color aparente y sólidos suspendidos totales. Con el fin de regular los valores elevados de pH, se introdujeron 200 mL de dióxido de carbono (CO_2) durante un lapso de 30 segundos, seguido de un período de espera de 15 minutos antes de llevar a cabo una nueva medición. La cuantificación de las microalgas se efectuó mediante el método de Neubauer, mientras que la absorción de luz se registró mediante el uso de un espectrofotómetro, un dispositivo de laboratorio que mide la cantidad de luz absorbida o transmitida por una muestra.

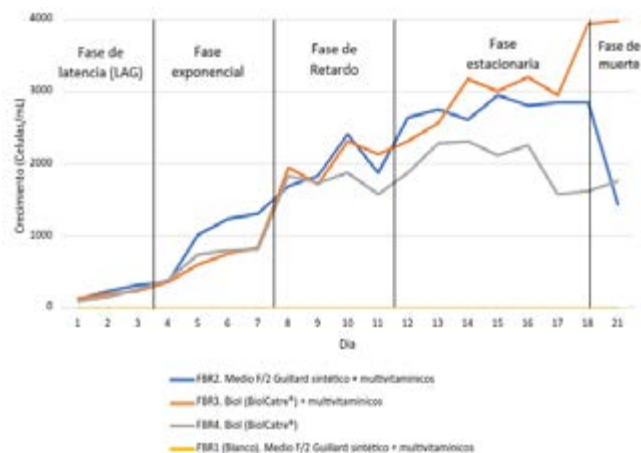
Fases de crecimiento de la microalga. A lo largo del proceso de cultivo se pudieron apreciar claramente las diferentes fases de crecimiento de la *Nannochloropsis* ("*N. oculata*") (fotografía 4). Se muestra la representación gráfica del ritmo diario de crecimiento (gráfica 1), en la que se distingue la fase inicial de latencia en todos los FBR, seguida por una etapa de crecimiento exponencial en los FBR 2, 3 y 4.

Estos últimos corresponden a los casos en los que se añadió la muestra inicial de microalgas y se utilizaron diversas combinaciones de medios de cultivo. En el caso del FBR 1, empleado como referencia y en el cual no se incorporaron microalgas, no se detectó crecimiento, lo que sugiere la ausencia de contaminación por microorganismos no deseados.

Durante la fase estacionaria, que se presentó aproximadamente en el día 11, se observó una disminución en la tasa de crecimiento de las microalgas en todos los fotobiorreactores "airlift" a partir del día 15. Sin embargo, el FBR 3, que contenía el medio de cultivo BioCatre® con multivitamínicos, mantuvo un crecimiento diario elevado a lo largo de toda la fase. Se notó una diferencia de 453.2 células/mL con respecto al FBR 2 y 693.6 células/mL en comparación con el FBR 4 al finalizar esta etapa.



Fotografía 4. Desarrollo de la microalga en el laboratorio (imagen propia de los autores).



Gráfica 1. Cinética de crecimiento (diario) del cultivo de microalgas en diferentes medios de cultivo.

Estos hallazgos concuerdan con investigaciones anteriores que han resaltado la relevancia de los nutrientes en el desarrollo de las microalgas, incluyendo aquellos de origen natural (Morales, Álvarez, Burelo, Centeno & Amador-del Ángel, 2018). Asimismo, los resultados señalan que el medio de cultivo que incorpora BiolCatre® fue el más eficaz para sostener un crecimiento continuado de "*N. oculata*" durante la fase estacionaria.

Proceso de crecimiento. Los resultados relativos al incremento en el número de células se correlacionaron con los parámetros de control rápido, como la turbidez, el color aparente y los sólidos suspendidos totales. También se estableció una conexión al relacionar la absorción de luz mediante un modelo de regresión. Este modelo, en forma de fórmula matemática, contribuye a la comprensión de cómo un factor varía en respuesta a cambios en otro factor.

Parámetros físicos de control rápido. Se llevaron a cabo análisis de turbidez, color aparente y sólidos suspendidos totales (SST) en los tres medios de cultivo sometidos a evaluación.

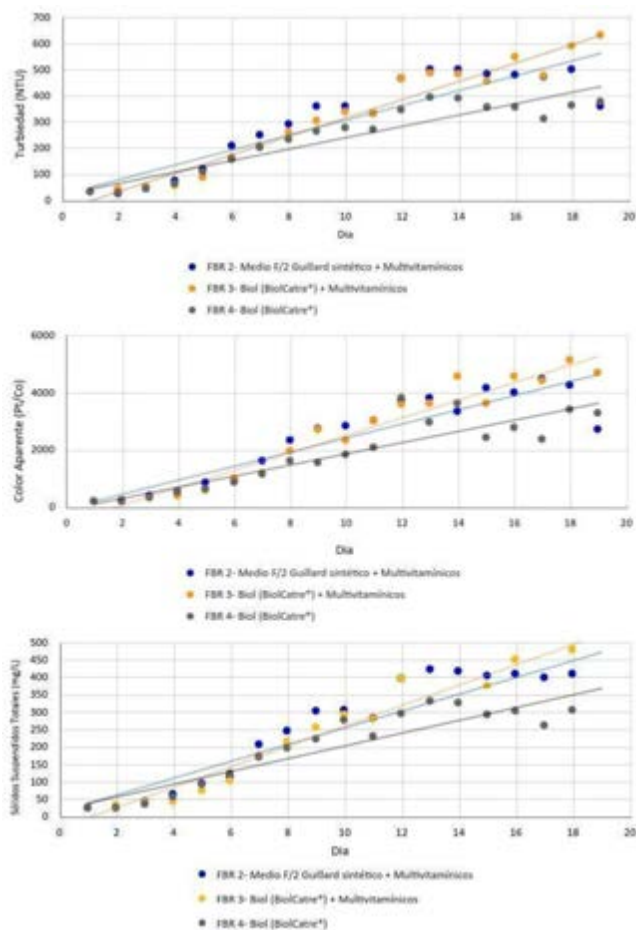
Se observó que en el FBR 3, donde se empleó BiolCatre® con multivitamínicos, se registraron los niveles más elevados. Esto sugiere que esta combinación es especialmente propicia para el crecimiento de las microalgas.

En contraste, los valores más bajos se obtuvieron en el FBR 4, que contenía exclusivamente BiolCatre®. Además, se presentan las ecuaciones que caracterizan la cinética química de los parámetros de medición diarios (gráfica 2). Estos resultados insinúan que la combinación de BiolCatre® con multivitamínicos es crucial para la optimización de las variables físicas y la facilitación de un crecimiento microalgal más eficaz.

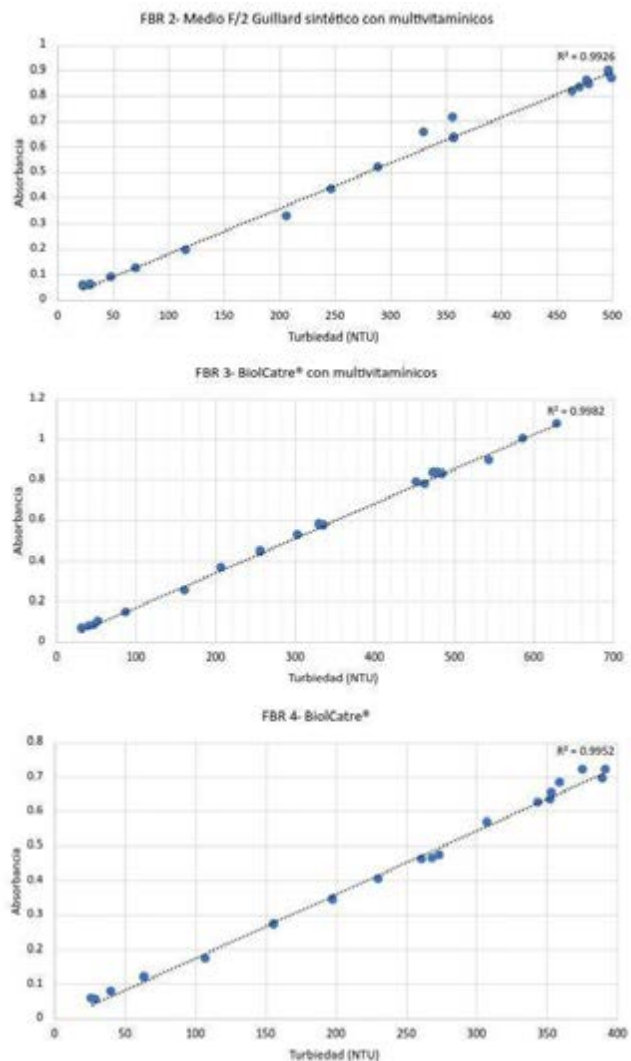
Los valores obtenidos concuerdan con investigaciones anteriores que han identificado una relación entre la turbidez y la densidad de microalgas (Martínez, Mairé & Bernard, 2018; Thoré, Schoeters, Spit & Van, 2021).

Proceso químico de parámetros. En relación con cada ecuación de velocidad de crecimiento (cuadro 2), se emplearon los coeficientes de determinación (R^2) como una forma de evaluar la calidad del ajuste de los puntos en una línea.

Al examinar los resultados, se constató que en el FBR 3, en el cual se empleó BiolCatre® con multivitamínicos y microalgas, se alcanzaron los valores más elevados de R^2 para la turbiedad (0.961), color aparente (0.953) y sólidos suspendidos totales (0.949). Por otro lado, el FBR 2, que utilizó el medio de cultivo F/2 Guillard sintético con multivitamínicos, exhibió los coeficientes de R^2 más bajos para la turbidez (0.825) y los sólidos suspendidos totales (0.819). Finalmente, en el caso del FBR 4, donde se empleó exclusivamente BiolCatre® y microalga, se registró el coeficiente de R^2 más bajo para el color aparente (0.814).



Gráfica 2. Evaluación de parámetros físicos de control rápido.



Gráfica 3. Correlación de turbiedad y absorbancia de FBR evaluados.

Estos coeficientes brindan una idea de cuán ajustados están los datos a las ecuaciones y ayudan a entender la relación entre los factores de crecimiento y los parámetros evaluados en el estudio.

Relación entre turbiedad y absorción de luz. Los resultados de la asociación entre estos dos elementos (gráfica 3) indican que la conexión más sólida se evidencia en el medio de cultivo del FBR 3, con un coeficiente de correlación (R^2) de 0.998. La figura también ilustra una correlación positiva y fuerte entre ambos durante el incremento en la población de microalgas.

A medida que los datos aumentan, las variables también lo hacen, lo que indica un mayor rendimiento de las muestras cultivadas en el medio de BiolCatre® con multivitamínicos en comparación con los otros medios analizados.

Cierre del estudio

Los resultados respaldan la premisa de que la elección de un medio de cultivo óptimo es esencial para alcanzar un alto crecimiento y densidad microalgal. Se observó que la combinación del medio BiolCatre® con multivitamínicos tuvo un impacto positivo en la microalga oculata ("*Nannochloropsis oculata*").

Adicionalmente, se confirmó que la turbidez puede servir como un indicador indirecto de la concentración en los tres medios evaluados, debido a la fuerte relación entre la turbidez y la densidad microalgal.

Estos hallazgos revisten importancia para la mejora de técnicas de producción más sostenibles y eficientes de estos microorganismos, además de abrir oportunidades para explorar sus aplicaciones potenciales en diversas industrias.

Agradecimientos

Al personal docente y técnicos de la Planta Piloto #3 Tratamiento Atmosférico y de Residuos Sólidos de la División Académica de Ciencias Biológicas (DACBioI), en la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco (UJAT).

Cuadro 1. Componentes esenciales de medios de cultivo utilizados para el crecimiento de microalgas (Torrentera & Tacón, 1989).

Componente	Concentración		
	F/2 Guillard ¹	BiolCatre® ²	Multivitamínico ³
Nitrato de sodio: N (NaNO ₃)	75 g/L	1.0 g/L	
Fosfato monosódico monohidratado: P (NaH ₂ PO ₄ ·H ₂ O)	15 g/L	0.1 g/L	
Silicato de sodio: Si (Na ₂ SiO ₃ ·9H ₂ O)	30 g/L		
Cloruro férrico hexahidratado: Fe (FeCl ₃ ·6H ₂ O)	3.5 g/L	34 g/L	
Sulfato de cobre pentahidratado: Cu (CuSO ₄ ·5H ₂ O)	0.98 g/100 mL	9.4 g/L	
Cloruro de manganeso tetrahidratado: Mn (MnCl ₂ ·4H ₂ O)	18.0 g/100 mL	22 g/L	
Sulfato de zinc tetrahidratado: Zn (ZnSO ₄ ·4H ₂ O)	2.20 g/100 mL	35 g/L	
Molibdato de sodio dihidratado: Na (Na ₂ MoO ₄ ·2H ₂ O)	0.63 g/100 mL		
Boro (B)		3.4 g/L	
Azufre (S)		0.1 g/L	
Vitamina B ₁₂			1.0 mg/L
Biotina			1.0 mg/L
Tiamina HCl			20.0 mg/L

Nota: ¹Solución de referencia del medio F/2 obtenida de la tabla 14 «Medio de Guillard» 14 (Stein 1979, citado por Torrentera & Tacón 1989);

²Solución concentrada; ³Solución en un 1 L de agua destilada (Schone & Schone 1982, citado por Torrentera & Tacón 1989).

Cuadro 2. Relación entre los indicadores de control y el crecimiento celular: resultados del análisis de regresión lineal.

Grupo experimental	Parámetro de control	Parámetros de regresión lineal	
		Ecuaciones ¹	R ²
FBR 2: Medio F/2 Guillard con multivitamínicos	Turbiedad	$C = 5.5382 TUR + 56.4293$	0.9551
	Color	$C = 0.6467 COLOR + 191.1615$	0.9454
	SST	$C = 6.4633 SST + 108.2006$	0.9453
FBR 3: BiolCatre® con multivitamínicos	Turbiedad	$C = 6.2980 TUR - 68.9162$	0.9609
	Color	$C = 0.7237 COLOR + 96.9637$	0.9559
	SST	$C = 7.5143 SST - 38.8787$	0.9551
FBR 4: BiolCatre®	Turbiedad	$C = 5.5562 TUR + 47.1420$	0.9049
	Color	$C = 0.5475 COLOR + 355.0992$	0.7545
	SST	$C = 6.5712 SST + 40.2836$	0.9131

Nota: ¹C= Crecimiento celular (células/mL); TUR= Turbiedad (NTU), COLOR= Color aparente (unidades Pt-Co), SST= Sólidos suspendidos totales (mg/L)

Referencias

- Andrade, B.B.; Cardoso, L.G.; Assis, D.J.; Costa, J.A.V.; Druzian, J.I. & da Cunha Lima, S.T. (2019). Production and characterization of "*Spirulina* sp." LEB 18 cultured in reused Zarrouk's medium in a *raceway*-type bioreactor. *Bioresource Technology*, 284: 340–348. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.03.144>
- Chuah, S.Y.; Dasan, Y.K.; Cheng, Y.W.; Lim, J.W.; Ho, Y.C.; Tan, I.S.; Yew Foo, H.C.; Kiew, P.L.; Leong, S.S. & Lam, M.K. (2020). The potential of attached growth of microalgae on solid surface for biomass and lipid production. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 965(1): 012001. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/965/1/012001>
- Chuka-ogwude, D.; Ogbonna, J.C. & Moheimani, N.R. (2021). Depth optimization of inclined thin layer photobioreactor for efficient microalgae cultivation in high turbidity digestate. *Algal Research*, 60: 102509. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2021.102509>
- de Medeiros, V.P.B.; Pimentel, T.C.; Varandas, R.C.R.; Dos Santos, S.A.; de Souza Pedrosa, G.T.; da Costa Sassi, C.F.; da Conceição, M.M. & Magnani, M. (2020). Exploiting the use of agro-industrial residues from fruit and vegetables as alternative microalgae culture medium. *Food Research International*, 137: 109722. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2020.109722>
- Dharmaraja, J.; Shobana, S.; Huy, M.; Vatland, A.K.; Ashokkumar, V. & Kumar, G. (2023). Chapter 2 - Design and scale-up of photobioreactors. In: Sirohi, R.; Pandey, A.; Sim, S.; Chang, J.S. & Lee, D.J. (Eds.); *Current developments in biotechnology and bioengineering - Photobioreactors: design and applications* (pp. 11–32). Elsevier Inc. ISBN 978-0-323-99911-3. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-99911-3.00010-5>
- Galina, D.; Porto P.S. da S. & Freitas, R.R. (2018). Estudo das tecnologias para produção de biodiesel a partir de microalgas do gênero "*Nannochloropsis*". *Research, Society and Development*, 7(12): e5712482. <https://doi.org/10.33448/rsd-v7i12.482>
- Gilmour, D.J. & Zimmerman, W.B. (2020). Chapter One - Microbubble intensification of bioprocessing. *Advances in Microbial Physiology*, 77: 1–35. <https://doi.org/10.1016/bs.ampbs.2020.07.001>
- Greses, S.; Tomás-Pejó, E.; Markou, G. & González-Fernández, C. (2022). Microalgae production for nitrogen recovery of high-strength dry anaerobic digestion effluent, *Waste Management*, 139: 321–329. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2021.12.043>
- Lubián, L.M.; Montero, O.; Moreno-Garrido, I.; Huertas, I.E.; Sobrino, C.; González-del Valle, M. & Parés, G. (2000). "*Nannochloropsis*" (Eustigmatophyceae) as a source of commercially valuable pigments. *Journal of Applied Phycology*, 12(3-5): 249–255. <https://doi.org/10.1023/A:1008170915932>
- Martínez, C.; Mairet, F. & Bernard, O. (2018). Theory of turbid microalgae cultures. *Journal of Theoretical Biology*, 456: 190–200. <https://doi.org/10.1016/j.jtbi.2018.07.016>
- Minhas, A.K.; Gaur, S. & Adholeya, A. (2023). Influence of light intensity and photoperiod on the pigment and, lipid production of "*Dunaliella tertiolecta*" and "*Nannochloropsis oculata*" under three different culture médium. *Heliyon*, 9(2): e12801. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e12801>
- Morales Martínez, A.L.; Álvarez Cardoza, P.D.; Burelo Magaña, M.Á.; Centeno Metelín, A.M. & Amador-del Ángel, L.E. (2018). Crecimiento de "*Nannochloropsis* sp." a tres concentraciones de inóculo cultivada con medio F/2 y el biofertilizante Biol-CATRE. En: Perera García, M.A.; Pérez Vega, M.H. & Gómez Díaz-Durán, L.M. (Eds.); *Producción y manejo de los recursos acuáticos en el trópico* (Edición digital; pp. 2–15). ISBN: 978-607-606-447-4. https://archivos.ujat.mx/2018/DACA/publicaciones/Produccion_y_Manejo_de_los_Recurso_Acuaticos_en_el_Tropico/180307%20Produccion%20y%20Manejo%20de%20Recursos%20Acuaticos.pdf
- Parsy, A.; Sambusiti, C.; Baldoni-Andrey, P.; Elan, T. & Périé, F. (2020). Cultivation of "*Nannochloropsis oculata*" in saline oil & gas wastewater supplemented with anaerobic digestion effluent as nutrient source. *Algal Research*, 50: 101966. <https://doi.org/10.1016/J.ALGal.2020.101966>

Rehmanji, M.; Suresh, S.; Nesamma, A.A. & Jutur, P.P. (2021). Microalgal cell factories, a platform for high-value-added biorenewables to improve the economics of the biorefinery. *Microbial and Natural Macromolecules: Synthesis and Applications*, 689–731. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-820084-1.00027-2>

Sirohi, R.; Kumar Pandey, A.; Ranganathan, P.; Singh, S.; Udayan, A.; Kumar Awasthi, M.; Hoang, A.T.; Chilakamarthy, C.R.; Kim, S.H. & Sim, S.J. (2022). Design and applications of photobioreactors- a review. *Bioresource Technology*, 349, 126858. <https://doi.org/10.1016/J.BIORTECH.2022.126858>

Subía, S. & Rubio, J. (2018). Evaluación de biomasa de microalgas de la laguna Limoncocha como materia prima para la obtención de biocombustibles. *Enfoque UTE*, 9(2): 106–116. <https://doi.org/10.29019/enfoqueute.v9n2.199>

Thoré, E.S.J.; Schoeters, F.; Spit, J. & Van Miert, S. (2021). Real-Time Monitoring of Microalgal Biomass in Pilot-Scale Photobioreactors Using Nephelometry. *Processes*, 9(9): 1530. <https://doi.org/10.3390/pr9091530>

Torrentera Blanco, L. & Tacón, A.G.J. (1989). II. Cultivo de microalgas. En: Autores; *La producción de alimento vivo y su importancia en acuicultura: una diagnosis* (Documento preparado para el proyecto GCP/RLA/075/ITA en apoyo a las actividades regionales de acuicultura para America latina y el Caribe). Organización de las Naciones Unidad para la Alimentación y la Agricultura (FAO) – [Web]. <https://www.fao.org/4/AB473S/AB473S02.htm>

Yaqoubnejad, P.; Rad, H.A. & Taghavijeloudar, M. (2021). Development a novel hexagonal airlift flat plate photobioreactor for the improvement of microalgae growth that simultaneously enhance CO₂ bio-fixation and wastewater treatment. *Journal of Environmental Management*, 298: 113482. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.113482>

Zhou, W.; Lu, Q.; Han, P. & Li, J. (2020). Microalgae cultivation and photobioreactor design. *Microalgae Cultivation for Biofuels Production*, 31–50. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-817536-1.00003-5>

INDICADORES Y BIOINDICADORES DE LA CALIDAD DE AGUA EN HUMEDALES ARTIFICIALES: CASO DE ESTUDIO EN CENTRO, TABASCO

INDICATORS AND BIOINDICATORS OF WATER QUALITY IN ARTIFICIAL WETLANDS: CASE STUDY IN CENTRO, TABASCO

Gaspar López Ocaña^{1✉}, Marilyn Calderón Miranda², Bernardita Campos Campos³ & Manuel Pérez de la Cruz⁴

¹Ingeniero Ambiental, Maestro en Ingeniería y Protección Ambiental (MIPA); Doctor en Ciencias en Ecología y Manejo de Sistemas Tropicales por la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco (UJAT). Actualmente profesor-investigador y responsable del Laboratorio de Tecnología del Agua; así como integrante del Cuerpo Académico de Ingeniería y Tecnología Ambiental (especialidad en ingeniería ambiental y tecnología del agua) de la División Académica de Ciencias Biológicas (DACBiología) en la UJAT. ²Estudiante de Licenciatura en Biología y colaboradora en la colección de insectos de la DACBiología-UJAT. ³Bióloga y MIPA por la UJAT. Colaboradora del Laboratorio de Ecología y Conservación Tropical (especialidad en protozoos, algas y briofitas). Hoy académica jubilada de la DACBiología-UJAT. ⁴Biólogo por la UJAT; Maestro en Ciencias en Producción Agroalimentaria en el Trópico y Doctor en Ciencias con especialidad en Entomología y Acarología, ambos por el Colegio de Postgraduados (COLPOS campus Tabasco). En este momento, profesor-investigador y responsable del Laboratorio de Colecciones: colección de insectos (especialidad entomología) de la DACBiología en la UJAT.

Laboratorio de Tecnología del Agua, División Académica de Ciencias Biológicas (DACBiología); Universidad Juárez Autónoma de Tabasco (UJAT): Carretera Federal #180 (Villahermosa-Cárdenas) km 0.5 S/N; entronque a Bosques de Saloya; C.P. 86150. Villahermosa, Tabasco; México.

✉ ocanagl77@hotmail.com

 0000-0002-8402-8160  0000-0002-4381-5555  0000-0002-0886-3025

Como referenciar:

López Ocaña, G.; Calderón Miranda, M.; Campos Campos, B. & Pérez de la Cruz, M. (2024). Indicadores y bioindicadores de la calidad de agua en humedales artificiales: caso de estudio en Centro, Tabasco. *Kuxulkab'*, 30(67): e5983, mayo-agosto. <https://doi.org/10.19136/kuxulkab.a30n67.5983>

Disponible en:

<https://revistas.ujat.mx> • <https://revistas.ujat.mx/index.php/kuxulkab>
<https://revistas.ujat.mx/index.php/kuxulkab/article/view/5983>

DOI:

<https://doi.org/10.19136/kuxulkab.a30n67.5983>

Resumen

La DACBiología-UJAT cuenta con cárcamo-cisterna y dos trenes (T1 y T2) con tres humedales en serie de flujo subsuperficial con "*Potenderia cordata*", de flujo libre con "*Thalia geniculata*" y un segundo de flujo libre con "*Sagittaria lancifolia*". La eficiencia de remoción de DQO en ambos trenes fue del 98 %. "*S. lancifolia*" demostró mejor desempeño en el T1 y "*T. geniculata*" en el T2. Las tres especies son de fácil mantenimiento y eficientes en la remoción de contaminantes básicos y los humedales con "*S. lancifolia*" presentan el mayor número de organismos que se consideran bioindicadores en los humedales artificiales.

Palabras clave: Aguas residuales; Macrófitas; Demanda química de oxígeno; Eficiencia de remoción; Cumplimiento ambiental.

Abstract

The DACBiología-UJAT has a sump-tank and two trains (T1 and T2) with three wetlands in series of subsurface flow with "*Potenderia cordata*", free flow with "*Thalia geniculata*" and a second free flow with "*Sagittaria lancifolia*". The COD removal efficiency in both trains was 98 %. "*S. lancifolia*" showed better performance in T1 and "*T. geniculata*" in T2. The three species are easy to maintain and efficient in removing basic contaminants and wetlands with "*S. lancifolia*" present the greatest number of organisms that are considered bioindicators in artificial wetlands.

Keywords: Wastewater; Macrophytes; Chemical oxygen demand; Removal efficiency; Environmental compliance.

El mayor problema que hoy enfrenta la humanidad es la disponibilidad del agua para actividades básicas como el consumo humano (higiene y alimentación) y diversas actividades antropogénicas (agricultura, ganadería e industria), siendo más crítico en algunas regiones por el cambio climático y el crecimiento poblacional, sobre todo en países en vías de desarrollo por la falta de tratamiento adecuado a las aguas residuales (AR) provenientes de estas actividades (OMS, 2023).

En ese sentido hoy se aplica la tecnología de los humedales artificiales (HA) para el tratamiento de AR domésticas e industriales, pues presentan bajos costos, no requieren sustancias químicas para eliminar los contaminantes, eliminan malos olores, presentan mínima emisión de gases de efecto invernadero, son estéticos, de operación y mantenimiento sencillos, tienen un mínimo consumo de energía eléctrica y se aplican en zonas rurales y urbanas (CONAGUA, 2019).

Pantanos artificiales

Los humedales —también llamados pantanos o ciénegas— artificiales (HA) son tratamientos de aguas residuales ecológicos que combinan procesos físicos, químicos y biológicos diseñados para simular a los humedales naturales y deben ser bien administrados para una exitosa operación. De acuerdo con la circulación del agua pueden ser humedales de flujo superficial o libre (HAFL), donde el agua circula por entre los tallos de las macrófitas y humedales de flujo subsuperficial (HAFS), cuando el agua circula por debajo de un medio de soporte, pudiendo ser la dirección del flujo en este horizontal o vertical (Delgadillo, Camacho, Pérez & Andrade, 2010).

Las plantas son el principal componente en los HA favoreciendo la eliminación de contaminantes, los otros elementos de importancia son el medio de

soporte o filtrante y los microorganismos. Los mecanismos de remoción y transformación de contaminantes en los HA son la bioconversión bacteriana (anaerobias y facultativas), filtración, sedimentación, nitrificación/desnitrificación, asimilación vegetal (por las raíces), remoción de patógenos, predación y excreción de antibióticos por las raíces de las plantas (Crites & Tchobanoglous, 2000).

Aplicaciones de la tecnología

En Colombia, Carvajal, Ortiz & Vega (2017) muestran que la eficacia de la avecula ("*Heliconia psittacorum*") es mayor (79 %) que el bambú común ("*Bambusa sp.*") (73 %) en humedales artificiales (HA). El afluente presentó 768 miligramos por litro (mg/L) de demanda química de oxígeno (DQO), el humedal de flujo subsuperficial (HAFS) con bambú disminuyó la concentración a 288 mg/L y la avecula a 44.8 mg/L. La demanda bioquímica de oxígeno (DBO) en el afluente fue de 446 mg/L y con el bambú alcanzó 186 mg/L y la planta de control de 24 mg/L; los sólidos suspendidos totales (SST) en el afluente fue de 1,407.5 mg/L, el bambú de 557.5 mg/L y la avecula de 516.25 mg/L. Entre los parámetros físicos, en el afluente el color y turbidez fue de 688 y 235 unidades, respectivamente, el HA con bambú aumentó las concentraciones a 3,976 y 920 en ambos parámetros, mientras que con la avecula disminuyó a 247 y 97.7 unidades respectivamente.

Maitlo, Kandhro, Karim, Sttar & Qayoom (2018) implementaron en Pakistán un HAFS con carrizo ("*Phragmites australis*") durante un año, reduciendo eficientemente la DQO, DBO₅ (a los cinco días), SST, turbidez, fósforo total (P_T), nitrógeno total (N_T) de las aguas residuales, que fue aproximadamente 92.3, 93, 96, 96.4 y 74 %, respectivamente. Con un caudal promedio (Q_{med}) de 3 metros cúbicos por día (m³/día) y un tiempo de retención hidráulica (TRH) de 7.4 días.

En el municipio de Centro, capital del estado de Tabasco, se evaluaron dos HAFL y dos HAFS con popal ("*Thalia geniculata*") y camalote ("*Paspalum paniculatum*") en el tratamiento de aguas residuales sanitarias de la División Académica de Ciencias Biológicas (DACBIOL) de la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco (UJAT). El Q_{med} de tratamiento fue de 400 litros por día (L/d) con un TRH de 6.5 a 7.5 días. El mejor tratamiento fue el HAFS con popal con valores de efluente de 9.74 mg/L de SST, 2.37 mg/L de N_T , 0.43 mg/L de P_T y 27.76 mg/L de DBO_5 . El HAFL con camalote reportó en el efluente 19.97 mg/L de SST, 4.84 mg/L de N_T , 0.86 mg/L de P_T y 56.93 mg/L de DBO_5 (Jiménez-López, López-Ocaña, Bautista-Margulis, Castelán-Estrada, Guerrero-Peña, Hernández-Barajas, Torres-Balcázar, De la Cruz-Luna, Romellón-Cerino & Solís-Silvan, 2017).

Otro estudio en Villahermosa, Tabasco, evaluó las especies cola de golondrina ("*Sagittaria latifolia*") y cola de pato ("*Sagittaria lancifolia*") en nueve HAFL, tres sin vegetación (HAFL-Control), tres con cola de pato (HAFL-S-Lan) y tres con cola de golondrina (HAFL-S-Lat), tratando aguas residuales sanitarias de la División Académica de Ciencias Biológicas (DACBIOL) en la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco (UJAT). Las unidades experimentales utilizadas son de 2.5 metros (m) de largo, 1.2 de ancho y un tirante operativo de 0.5 m, con medio de soporte de grava de río de entre 2.36 y 19 milímetros (mm) de diámetro, con espesor de 10 centímetros (cm). Todas las unidades operaron con un Q_{med} de 0.26 metros cúbicos por día (m^3/d) y un TRH de 6 días.

Las eficiencias de remoción alcanzadas con cola de golondrina para SST, DBO_5 , DQO y coliformes fecales (CF) fue de 94, 97, 96 y 99 %, respectivamente; mientras que para cola de pato fue de 97, 94, 93 y 99.9 %, respectivamente. (Gallegos-Rodríguez, López-Ocaña, Bautista-Margulis & Torres-Balcázar, 2018).

Institución universitaria

La División Académica de Ciencias Biológicas (DACBIOL) de la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco (UJAT) es un campus comprometido con la conservación del medio ambiente y mantiene un control de sus desechos con un compromiso riguroso al estar en un proceso constante de auditoría ambiental por la Procuraduría Federal de Protección al Ambiente (PROFEPA), del cual ha tenido el distintivo de Certificación Ambiental (2015-2018), siendo la única universidad en México en tener este nombramiento (PROFEPA, 2015).

La DACBIOL mantuvo el tratamiento de sus aguas residuales de 2005 a 2016 mediante una planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR) con tecnología de coagulación floculación y filtración con zeolita, operando con un caudal promedio (Q_{med}) de 40 $m^3/día$ y la institución generaba un Q_{med} de 190 $m^3/día$, quedando rebasada y presentando una remoción de sus contaminantes desde -108 a 86 % (López-Ocaña, Bautista-Margulis, Méndez-Angulo, Hernández-Barajas, Torres-Balcázar, Padrón-López, de la Cruz-Luna & Ferrer-Sánchez, 2014), las eficiencias negativas son cortos circuitos por el alto caudal que disminuye el tiempo de retención hidráulica (TRH) de la PTAR (Vázquez & López, 2011).

Para el año 2016, se inició la construcción y en el 2017 se arrancó la operación de la nueva PTAR de humedal artificial (HA) el cual consta de una cisterna rehabilitada para operar como tanque séptico y dos trenes (dos módulos gemelos) de tratamiento de HA en serie con un humedal de flujo subsuperficial (HAFS) y dos humedales de flujo superficial o libre (HAFL). La figura 1 muestra cómo queda integrada la planta piloto de humedales artificiales del Laboratorio de Tecnología del Agua y la PTAR de la DACBIOL-UJAT (López, Torres, López, Bautista, Pampillón, Valdés A. & Ramos, 2021).

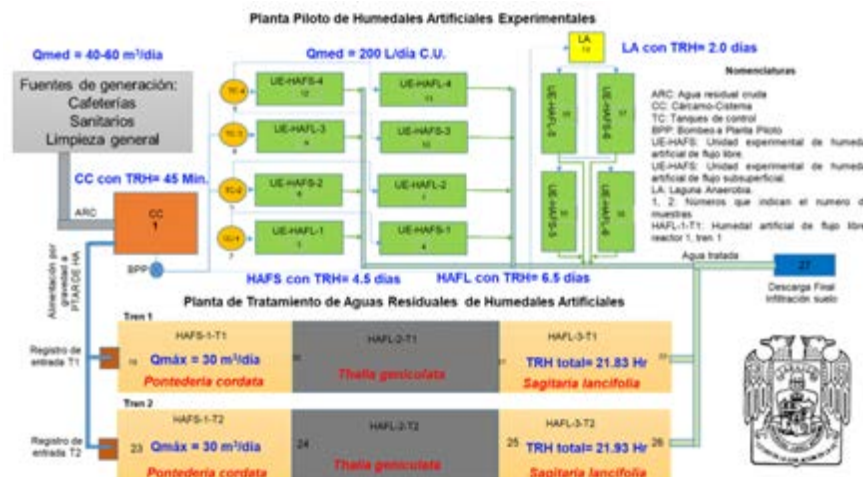


Figura 1. Distribución de planta piloto y la PTAR de la DACBIOL-UJAT (elaboración propia).

La PTAR de la DACBIOL. La planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR) de humedal artificial (HA) está localizada en la DACBIOL-UJAT en Villahermosa, Centro (capital del estado de Tabasco), donde se generan y tratan aguas residuales (AR) domésticas provenientes de cafeterías, sanitarios y aseo general, de una población de 2,500 personas (entre estudiantes, administrativos y profesores).

En la PTAR se establecieron tres tipos de macrófitas por su potencial de degradación de contaminantes en aguas residuales domésticas (García, López & Torres, 2019; López-Ocaña, Bautista-Margulis, Valdes, Torres-Balcazar, López-Vidal, Pérez-Sánchez & Pampillón-González, 2019). Cuenta con dos trenes (T1 y T2) operando en serie, de igual dimensión y se estableció el mismo tipo de vegetación a ambos lados, el primer humedal subsuperficial cuenta con tule ("*Potentilla cordata*") (HAFS-Pc-1-T1 y HAFS-Pc-1-T2); el segundo humedal de flujo libre (HAFL-Tg-2-T1 y HAFL-Tg-2-T2) con popal ("*Thalia geniculata*") y el tercer humedal de flujo libre (HAFL-SI-3-T1 y HAFL-SI-3-T2) con cola de pato ("*Sagittaria lancifolia*") (figura 2).

El medio de soporte es grava de $\frac{3}{4}$ de pulgada, con una porosidad de 0.52, con 0.25 m el tirante (altura) de grava en los HAFL y de 0.5 m en los HAFS. Los humedales son de 8.33 m de largo, 2.5 m de ancho y 1 m de altura.

Romellón-Cerino, Estrada-Pérez & López-Ocaña (2022), reportan que para octubre del 2021 la DACBIOL operó en modelo híbrido por la contingencia sanitaria

COVID-19. En este periodo el AR con la que operó el tren 1 fue de 6.4 m³/día y el tren 2 con 6.5 m³/día. El TRH de ambos módulos fue de 3.14 días y la remoción de la demanda química de oxígeno (DQO) fue de 76.7 % en el tren 1 y de 70.7 % en el tren 2, cumpliendo la NOM-001-SEMARNAT-2021 que es de 100 mg/L para la infiltración o descarga al suelo. Las constantes cinéticas de reacción (K) para el tren 1 se estimaron en 0.49 días⁻¹ para color, 0.53 días⁻¹ para turbiedad y en 0.53 días⁻¹ para DQO. Para el tren 2 las constantes cinéticas con las que operó con en 0.24 días⁻¹ para color, 0.46 días⁻¹ para turbiedad y en 0.46 días⁻¹ para DQO.

Propósito del estudio

En este texto se describe el comportamiento fisicoquímico y volumétrico de la planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR) de humedal artificial (HA) de la DACBIOL-UJAT, cuantificando indicadores de calidad de agua como la demanda química de oxígeno (DQO), los bioindicadores (macrófitas, invertebrados, peces, reptiles y anfibios) así como la eficiencia de remoción de contaminantes básicos. Todo ello con el propósito de verificar el cumplimiento ambiental vigente (NOM-001-SEMARNAT-2021).

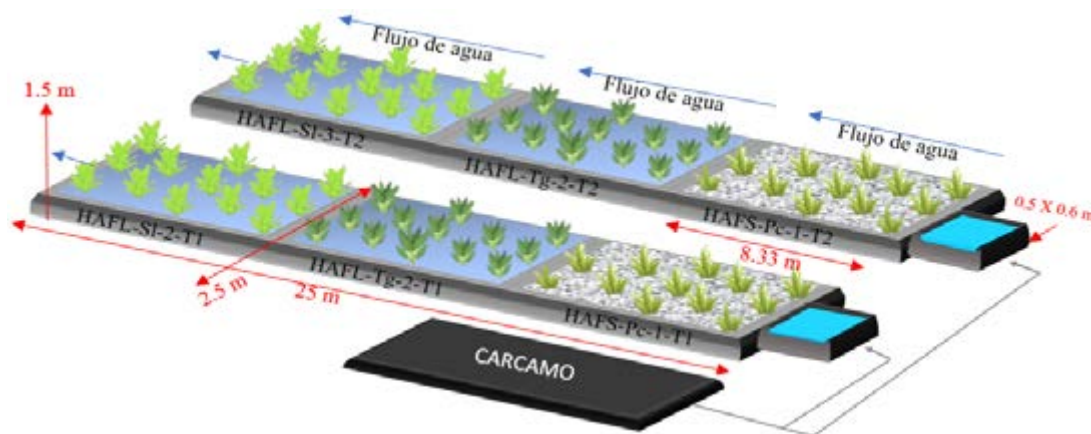


Figura 2. Diagrama de la PTAR de la DACBIOL-UJAT (Hernández, Estrada & López, 2021).

Realización del estudio

Durante mayo y junio del 2023 se verificó el estado de los equipos y reactores con sus especies (figura 1). Se midió el gasto de operación en la planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR) empleando el método volumétrico (volumen/tiempo) (Briones & García, 2014), en un horario de 08:00 a 18:00 horas con intervalos de dos horas. Se tomaron muestras de aguas residuales (AR) en la entrada y salida de cada elemento de la PTAR, durante 10 días tomando una muestra simple diaria (12:00 horas).

La caracterización fisicoquímica se realizó por procedimientos analíticos de la normatividad oficial mexicana y los métodos estandarizados de la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos "United States Environmental Protection Agency (EPA)", dentro del Laboratorio de Tecnología del Agua. Para reducir los errores experimentales y aplicar las pruebas estadísticas, las pruebas 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), turbiedad (SM 2130 B), color (APHA 2120 y la DQO (USEPA 410.4). La eficiencia de remoción se determinó conforme a lo expuesto por García *et al.* (2019).

El análisis de datos fue mediante un diseño simple dirigido a los tratamientos, analizando las variables dependientes, determinando diferencias estadísticamente significativas con un análisis de la varianza (ANOVA) simple para las variables paramétricas y con un análisis de varianza de Kruskal-Wallis para datos no paramétricos.

Finalmente se procedió a realizar la identificación de organismos (bioindicadores) acuáticos, insectos, arácnidos, diplópodos (comúnmente conocidos como milpies), moluscos, crustáceos, peces, reptiles, anfibios, aves y microorganismos, también identificando el reactor en el que se encuentran establecidos.

De manera particular, la clasificación de los organismos acuáticos se realizó con apoyo del «Laboratorio de Ecología y Conservación Tropical», así como del «Laboratorio de Colecciones: colección de insectos», ambos en la División Académica de Ciencias Biológicas (DACBIOL) de la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco (UJAT).

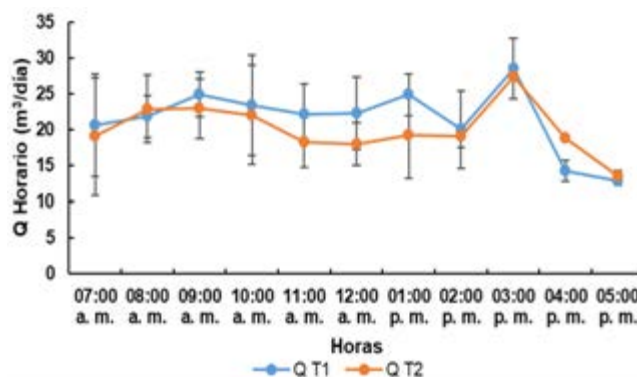
Resultados

Para el primer semestre del 2023 las actividades presenciales continúan normalizándose después del periodo de COVID-19, los humedales artificiales (HA) trataban 41.5 m³/día, siendo para el T1 21.4 m³/día y el T2 con 20.1 m³/día (gráfica 1).

El agua residual (AR) que está suministrándose a la planta de tratamiento (PTAR) presenta una concentración media por tener concentraciones entre 300 y 500 mg/L de demanda química de oxígeno (DQO) según lo establecen Metcalf & Eddy, (2003) y Crites & Tchobanoglous. La calidad del agua de la cuadro 1 son del tren 1 y cuadro 2 son del tren 2, mostrando parámetros referentes a la eficiencia de una PTAR con lagunas de estabilización y HA (Medales, Vázquez, López, Torres & López, 2019).

El tren 1 presentó remoción de 58 % para color, 30 % en turbiedad y 98 % para DQO (cuadro 3). El tren 2 presentó una remoción de 64 % para color, 42 % para turbiedad y 98 % para DQO (cuadro 4). Cabe aclarar que hay eficiencias negativas (-), estas se presentan cuando la concentración de un contaminante dado es mayor en la salida que en la entrada, fenómeno que se conoce como «corto circuito» y es indicativo de que la unidad que presenta este resultado necesita mantenimiento preventivo-correctivo o presenta un incremento de caudal que provoca el arrastre del material (contaminantes) que se separa en la unidad de tratamiento (Metcalf & Eddy).

Los humedales artificiales (HA) son ecosistemas muy productivos pues a través de la fotosíntesis secuestran y acumulan carbono, como biomasa en las plantas o como materia orgánica en el suelo. La acumulación de agua dentro del HA provee un ambiente anóxico en donde el carbono es acumulado, dando lugar a un sumidero (Laiho, 2006).



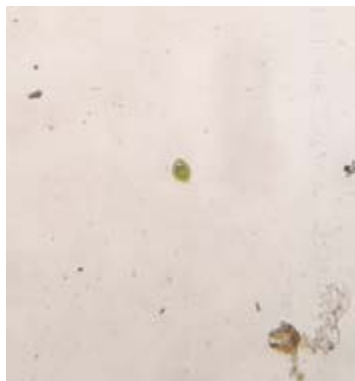
Gráfica 1. Gastos de operación en los trenes de tratamiento en la PTAR (N= 10).

Las especies macrófitas en la PTAR a seis meses de su sembrado presentan tallas de importancia por la asimilación de nutrientes y carbono atmosférico. El tule ("*Potenderia cordata*") presentó un peso húmedo de 5.9 kilogramos (kg) y un peso seco de 2.3 kg; el popal ("*Thalia geniculata*") presentó un peso húmedo de 2.8 kg y un peso seco de 1.6 kg, y la cola de pato ("*Sagittaria lancifolia*") presentó un peso húmedo de 2.9 kg y un peso seco de 0.9 kg. En la cuadro 5 se presentan las variables morfométricas de las especies.

Los organismos acuáticos encontrados en los HA son algunos tipos de protozoos que favorecen la degradación de materia orgánica, pueden ser productores primarios o alimento de otros organismos, por lo que son parte de las bacterias saprófitas que degradan la materia orgánica y otros productos (nitrógeno y fósforo) de las aguas residuales (AR) mediante la digestión anaerobia y aerobia (Kadlec & Wallace, 2009). En la cuadro 6 y 7 se presentan los organismos acuáticos identificados bajo diferentes medios de cultivos en los humedales artificiales así como algunas muestras fotografías alusivas (fotografía 1 a la 6).



Fotografía 1. Ciliophora.



Fotografía 2. "*Phacus* sp."



Fotografía 3. Criptomónidos.



Fotografía 4. Euglenidos.



Fotografía 5. Clase Bacillariophyceae. Género "*Navicula* sp."



Fotografía 6. "*Codosiga* sp."

Nota (fotografías 1-6): se observaron muchos ciliados, por su tamaño no se lograron identificar a nivel de género. Fotografías por cortesías de: Bernardita Campos Campos, Luis Yahir Collado Ascencio, Yolanda Pamela de León Osorio, María Fernanda González Hernández, David Alexis Hernández Oramas, Javier Tosca Ramos & Reyna Priscila Vázquez Martínez.

Las especies animales son importantes en los humedales artificiales (HA), estos representan menos biomasa que las plantas de HA, pero son capaces de alterar los flujos de energía y de masa desproporcionando la contribución de biomasa. Cuando aparecen las plagas de insectos en HA, pantanos enteros y sistemas acuáticos flotantes las plantas son defoliados, interrumpiendo los ciclos de minerales y el rendimiento en el tratamiento del agua (Brown, Kreissl, Gearheart, Kruzic, Boyle & Otis, 2000).

El cuadro 8 resume las especies animales encontrados en los HA que integran la PTAR de la DACBIOL y presentamos las fotografías (fotografía 7 a la 12) de algunos animales registrados durante este periodo de estudio.



Fotografía 8. "*Kinosternon leucostomum*".
Cortesía: Marilyn Calderón Miranda.



Fotografía 9. "*Basiliscus vittatus*".
Cortesía: Marilyn Calderón Miranda.



Fotografía 7. "*Mayaheros urophthalmus*".
Cortesía: Gaspar López Ocaña.



Fotografía 10. "*Pomacea canaliculata*".
Cortesía: Marilyn Calderón Miranda



Fotografía 11. "*Leptophis mexicanus*".
Cortesía: Marilyn Calderón Miranda.



Fotografía 12. "*Quiscalus mexicanus*" (zanate).
Cortesía: Marilyn Calderón Miranda

Conclusiones

En la planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR) de la División Académica de Ciencias Biológicas (DACBIOL) en la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco (UJAT), el cárcamo-cisterna (retiene sólidos suspendidos) constituyen el tratamiento primario, los humedales artificiales (HA) son el tratamiento secundario con un tiempo de retención hidráulica (TRH) de 22.96 horas (T1) y 24.44 horas (T2).

La remoción de la demanda química de oxígeno (DQO) es de 98 % (10 mg/L en la salida) lo que le permite cumplir con el criterio de descarga que establece la Norma Oficial Mexicana «NOM-001-SEMARNAT-2021», que es de 100 mg/L como principal indicador de calidad del agua.

El humedal de flujo subsuperficial (HAFS) con tule ("*Potenderia cordata*"), y el humedal de flujo superficial o libre (HAFL) con popal ("*Thalia geniculata*") y la cola de pato ("*Sagittaria lancifolia*"), son de fácil manejo en la poda y cosecha, por ser de trópico húmedo no han presentado plagas en este periodo, por lo que estas especies son viables de aplicar en humedales artificiales (HA) en estas regiones y contribuyen a la captura del carbono.

El mayor número de especies de animales está en los HAFL-3 (cola de pato) y son bioindicadores de calidad del agua, pues estos humedales tienen la mejor calidad del agua, seguido de los HAFL-2 (popal).

En este sentido, los humedales artificiales son una alternativa óptima para el tratamiento de aguas de esta institución de educación superior, pues son aptos para caudales discontinuos, siendo técnicamente viables y económicamente factibles para el instituto.

Agradecimientos

Reconocemos a los alumnos de la asignatura «Protozoarios» de la Licenciatura en Biología a cargo de la profesora Bernardita Campos Campos (ciclo febrero-agosto 2023) por facilitarnos y brindar el acervo fotográfico de los organismos descritos en este texto.

De igual manera, al profesor Marco Antonio López Luna por apoyarnos en la identificación de los reptiles expuestos igualmente en este documento.

Cuadro 1. Comportamiento de la calidad del agua en el tren 1 (N= 10).

Unidades	pH (UpH)	Temp. (°C)	SDT (mg/L)	Turb. (UNT)	Color (UC)	OD (mg/L)	DQO (mg/L)
Cárcamo	9.1	26.4	640.5	22.2	2,019.6	2.8	447.0
T. Séptico	9.0	26.5	804.4	14.3	1,459.9	3.0	238.0
HAFS-Pc-1-T1	8.7	26.3	775.7	7.3	795.4	2.8	150.0
HAFL-Tg-2-T1	8.6	25.6	797.4	11.4	645.6	2.9	84.0
HAFL-SI-3-T1	8.4	25.7	735.3	15.6	855.6	3.0	10.0

Cuadro 2. Comportamiento de la calidad del agua en el tren 2 (N= 10).

Unidades	pH (UpH)	Temp. (°C)	SDT (mg/L)	Turb. (UNT)	Color (UC)	OD (mg/L)	DQO (mg/L)
Cárcamo	9.1	26.4	640.5	22.2	2,019.6	2.8	447.0
T. Séptico	9.0	26.5	804.4	14.3	1,459.9	3.0	238.0
HAFS-Pc-1-T2	8.4	25.7	797.0	12.4	816.4	2.0	126.0
HAFL-Tg-2-T2	8.4	25.6	800.6	13.4	950.4	2.7	18.0
HAFL-SI-3-T2	8.4	25.6	712.4	12.8	718.9	3.1	10.0

Cuadro 3. Eficiencia de remoción de contaminantes en el tren 1 (N= 10).

Unidades	T. Séptico ER (%)	HAFS-Pc-1-T1 ER (%)	HAFL-Tg-2-T1 ER (%)	HAFL-SI-3-T1 ER (%)	ETP (%)
SDT (mg/L)	-25.6	3.6	-2.8	7.8	-15
Turbiedad (UNT)	35.6	49.0	-56.2	-37.3	30
Color (UC)	27.7	45.5	18.8	-32.5	58
DQO (mg/L)	46.8	37.0	44.0	88.1	98

Cuadro 4. Eficiencia de remoción de contaminantes en el tren 2 (N= 10).

Unidades	T. Séptico ER (%)	HAFS-Pc-1-T2 ER (%)	HAFL-Tg-2-T2 ER (%)	HAFL-SI-3-T2 ER (%)	ETP (%)
SDT (mg/L)	-25.58	0.9	-0.4	11.0	-11
Turbiedad (UNT)	35.63	12.8	-7.9	4.8	42
Color (UC)	27.72	44.1	-16.4	24.4	64
DQO (mg/L)	46.76	47.1	85.7	44.4	98

Cuadro 5. Características de las especies en el HA durante el periodo de estudio (N= 10).

Parámetro	Tule				Popal				Cola de golondrina			
	Sembrado		Cosecha		Sembrado		Cosecha		Sembrado		Cosecha	
	X	±DE	X	±DE	X	±DE	X	±DE	X	±DE	X	±DE
Peso (kg)	6.8	1.9	12.5	3.5	7.8	0.7	9.0	1.3	2.2	1.7	3.1	1.5
L. Tallo (cm)	47.8	10.4	141.2	14.0	167.8	73.1	282.5	23.8	93.3	20.5	106.1	24.4
D. Tallo (cm)	5.7	1.6	6.2	1.0	8.3	1.9	4.5	0.5	7.8	2.1	8.1	0.6
L. Raíz (cm)	19.6	11.4	28.4	14.4	20.0	4.1	26.0	3.0	26.4	12.6	30.4	9.6
D. Raíz (cm)	31.3	13.2	48.7	16.8	26.9	10.2	123.4	25.6	23.6	11.0	34.8	14.8
N Hojas	0.0	0.0	41.0	6.9	3.7	2.7	37.1	14.4	1.3	1.7	8.9	1.4
Núm. Tallos	8.6	3.4	51.4	8.7	8.5	2.5	44.9	5.8	8.5	2.5	9.5	1.6
L. Hojas (cm)	0.0	0.0	26.1	4.6	37.7	19.4	64.8	3.4	23.8	11.3	44.8	13.5

Cuadro 6. Organismos identificados en el humedal artificial en la DACBioI-UJAT (N= 9).

Humedales	HAFS-Pc	HAFL-Tg-	HAFL-SI
Organismos	Ciliados. Clase Bacillariophyceae (diatomea). Género <i>Navicula</i> sp.	Clase Bacillariophyceae (diatomea). Género <i>Navicula</i> sp. División Euglenophyta, Género <i>Euglena</i> sp.	División Euglenophyta, Género <i>Euglena</i> sp.

Nota: corte a marzo del 2023.

Cuadro 7. Organismos del HA en la DACBioI-UJAT en diferentes medios de cultivo (N= 9).

Cultivo	HAFS-Pc	HAFL-Tg	HAFL-SI
Avena	División Euglenophyta, Género <i>Euglena</i> sp. Phylum Ciliophora, Ciliados.	División Euglenophyta. Género <i>Euglena</i> sp. División Crisophyta, Clase Bacillariophyceae (diatomea). Género <i>Navicula</i> sp. Phylum ciliophora, Ciliados	
Musgo	Phylum Ciliophora, Ciliados División Crisophyta, Clase Bacillariophyceae (diatomea). Género <i>Navicula</i> sp.		
Maíz	Sin organismos.	Sin organismos.	Sin organismos.
Arroz		División Euglenophyta. Género <i>Euglena</i> sp.	
Frijol			Subreino sarcomastigota. Phylum Choanozoa. Género <i>Codosiga</i> (Cavalier-Smith 1981).
Jamaica			Phylum Ciliophora, Ciliados. División Euglenophyta. Género <i>Phacus</i> sp. División Criptophyta, Orden Cryptomonadales, Género <i>Chlorogonium</i> sp.

Nota: corte a marzo del 2023.

Cuadro 8. Especies de animales encontrados dentro del HA en la DACBioI).

Organismo	Nombre científico	Nombre común	Humedal
Insectos	<i>Danaus sp</i>	Falsa monarca	HAFS, HAFL-2, HAFL-3
	<i>Manduca sexta</i>	Gusano del tabaco	HAFS, HAFL-2, HAFL-3
	<i>Dinia eagrus</i>	Polilla imitadora de la avispa de punta escarlata	HAFL-3
	<i>Nannotrigona perilampoides</i>	Abeja Melipona	HAFL-3
	<i>Cycloneda sanguinea</i>	Vaquita roja	HAFL-2, HAFL-3
	<i>Corydalis cornutus</i>	Mosca Dobson	HAFL-2, HAFL-3
	<i>Dysdercus</i>	Gran chinche de algodóncillo	HAFL-2, HAFL-3
	<i>Dryadula phaetusa</i>	Mariposa bandas naranja	HAFL-2, HAFL-3
	<i>Phyciodes phaon</i>	Mariposa luna faón	HAFL-3
	<i>Polites vibex</i>	Saltarina remolino	HAFL-3
	<i>Anartia fatima</i>	Mariposa luna faón	HAFL-3
	<i>Cornops acuaticum</i>	<i>Saltamontes Jacinto de agua</i>	HAFL-2, HAFL-3
	<i>Rhetus arcus</i>	<i>Mariposa de cola larga</i>	HAFL-3
	<i>Anartia jatrophae</i>	<i>Pavo real blanco</i>	HAFS, HAFL-2, HAFL-3
	<i>Theretra oldenlandiae</i>	La polilla del halcón impatiens	HAFL-3
Arácnidos	<i>Leucauge argyra</i>	La araña de jardín	HAFS, HAFL-2, HAFL-3
	<i>Pisaurina mira</i>	Araña de tela de vivero	
	<i>Micrathena sagittata</i>	Araña punta de flecha	
Diplopodos	<i>Diplopoda</i>	Milpiés	HAFS
Moluscos	<i>Bithynia tentaculata</i>	Bitinia del barro	HAFL-2, HAFL-3
	<i>Pomacea canaliculata</i>	Caracol manzano	HAFL-2, HAFL-3
Crustáceos	<i>Faxonius virilis</i>	El cangrejo de río viril	HAFL-3
Peces	<i>Vieja melanura</i>	Mojarra paleta	HAFL-2, HAFL-3
	<i>Mayaheros urophthalmus</i>	Castarrica	HAFL-3
	<i>Atherinella alvarezi</i>	Charal	HAFL-2, HAFL-3
Reptiles	<i>Kinosternon leucostomum</i>	Pochitoque	HAFS
	<i>Trachemys venusta</i>	Hírotea	HAFL-3
	<i>Crocodylus moreletii</i>	Cocodrilo de pantano	HAFS, HAFL-2, HAFL-3
	<i>Iguana iguana</i>	Iguana verde	HAFL-3
	<i>Leptophis mexicanus</i>	Ranera Bronceada	HAFL-2, HAFL-3
	<i>Drymobius margaritiferus</i>	Serpiente corredora de petatillos	HAFL-2, HAFL-3
	<i>Boa imperator</i>	Mazacuata	HAFL-2, HAFL-3
	<i>Claudius angustatus</i>	Taiman	HAFL-2, HAFL-3
	<i>Smilisca baudinii</i>	Rana Arborícola Mexicana	HAFL-2, HAFL-3
Aves	<i>Basiliscus vittatus</i>	Toloque	HAFS
	<i>Amazilia candida</i>	Colibrí cándido	HAFS, HAFL-2, HAFL-3
	<i>Quiscalus mexicanus</i>	Zanate	HAFS, HAFL-2, HAFL-3

Nota: corte marzo-mayo del 2023.

Referencias

- Briones Sánchez, G. & García Casillas, I. (2014). *Aforo del agua en canales y tuberías* (3ª Ed., reimpresión 2024; p. 100). Editorial Trillas & Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. ISBN: 978-968-24-7488-0.
- Brown, D.S.; Kreissl, J.F.; Gearheart, R.A.; Kruzic, A.P.; Boyle, W.C. & Otis, R.J. (2000). *Manual - Constructed wetlands treatment of municipal wastewaters* (EPA/625/R-99/010 (NTIS PB2001-101833); p. 165). United States Environmental Protection Agency (EPA). https://cfpub.epa.gov/si/si_public_record_report.cfm?Lab=NRMRL&dirEntryID=64144
- Carvajal Arias, C.E.; Ortiz, P. & Vega Beltran, A.L. (2017). Propuesta de tratamiento de aguas residuales domésticas implementando un humedal artificial de flujo subsuperficial empleando "*Bambusa* sp." en la finca el recreo ubicado en Tauramena, Casanare. *Revista de Tecnología*, 16(1): 65–76. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=6546150>
- CONAGUA (Comisión Nacional del Agua). (2019). *Manual de agua potable, alcantarillado y saneamiento: introducción al tratamiento de aguas residuales municipales* (Libro #25; p. 280). Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT); Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). ISBN 978-607-626-015-9. <https://files.conagua.gob.mx/conagua/mapas/SGAPDS-1-15-Libro25.pdf>
- Crites R. & Tchobanoglous, G. (2000). *Tratamiento de aguas residuales en pequeñas poblaciones* ("Small and decentralized wastewater management systems", Camargo, M.; Pardo, L.P. & Mejía, G. (Trad.); p. 776). McGraw-Hill interamericana, S.A. ISBN original 0-07-289087-8; ISBN reimpresión 958-41-0042-4. <https://pdfcoffee.com/tratamiento-de-aguas-residuales-en-pequeas-poblaciones-7-pdf-free.html>
- Delgadillo, O.; Camacho, A.; Pérez, L.F. & Andrade, M. (2010). *Depuración de aguas residuales por medio de humedales artificiales* (Serie técnica; Antequera Durán, N. (Ed.); p. 105). Centro Andino para la Gestión y Uso del Agua (Centro AGUA). ISBN: 978-99954-766-2-5. https://blogdelagua.com/wp-content/uploads/2013/02/depuracion_de_aguas_residuales_por_medio_de_humedales_artificiales.pdf
- Gallegos-Rodríguez, J.; López-Ocaña, G.; Bautista-Margulis, R.G. & Torres-Balcázar, C.A. (2018). Evaluation of free flow constructed wetlands with "*Sagittaria latifolia*" and "*Sagittaria lancifolia*" in domestic wastewater treatment (Evaluación de humedales artificiales de flujo libre con "*Sagittaria latifolia*" y "*Sagittaria lancifolia*" en el tratamiento de aguas residuales domésticas). *Ingeniería Agrícola y Biosistemas*, 10(2): 49–65. <https://doi.org/10.5154/r.inagbi.2017.03.005>
- García Ocaña 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. *CIBA Revista Iberoamericana de las Ciencias Biológicas y Agropecuarias*, 8(15): 16–51. <https://doi.org/10.23913/ciba.v8i15.82>
- Hernández Almeida, M.F.; Estrada Pérez, N. & López Ocaña, G. (2021). Tratamiento de agua residual doméstica en una institución educativa vía humedales artificiales. En: Academia Journals & Instituto Tecnológico de Chetumal (Eds.); *Memorias del Congreso Internacional de Investigación Academia Journals* (Chetumal Quintana Roo, México; Volumen 13, tomo 3; pp. 338–343). eLibro online con ISSN: 1946-5351. <https://www.academiajournals.com/pubchetumal2021>
- Jiménez-López, E.C.; López-Ocaña, G.; Bautista-Margulis, R.G.; Castelán-Estrada, M.; Guerrero-Peña, A.; Hernández-Barajas, J.R.; Torres-Balcázar, C.A.; De la Cruz-Luna, E.; Romellón-Cerino, M.J. & Solís-Silvan, R. (2017). Wastewater treatment by constructed wetlands with "*Thalia geniculata*" and "*Paspalum paniculatum*" in a tropical system of Mexico. *International Journal of Sustainable Development and Planning*, 12(1): 42–50. <https://doi.org/10.2495/SDP-V12-N1-42-50>
- Kadlec, R.H. & Wallace, S.D. (2009). *Treatment wetlands* (2nd ed.; p. 348). CRC Press / Taylor & Francis Group LLC. ISBN 13: 978-1-56670-526-4. https://sswm.info/sites/default/files/reference_attachments/KADLEC%20WALLACE%202009%20Treatment%20Wetlands%202nd%20Edition_0.pdf

Laiho, R. (2006). Decomposition in peatlands: reconciling seemingly contrasting results on the impacts of lowered water levels. *Soil Biology and Biochemistry*, 38(8): 2011–2024. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2006.02.017>

López Ocaña G.; Torres Balcázar, C.A.; López Vidal, R.; Bautista Margulis, R.G.; Pampillón González, L.; Valdés Manzanilla, A. & Ramos Herrera, S. (2021). *Estudio cinético de humedales artificiales en serie para el tratamiento de aguas residuales domésticas en la DACBioL-UJAT* (Informe técnico). División Académica de Ciencias Biológicas, Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.

López-Ocaña, G.; Bautista-Margulis, R.G.; Méndez-Angulo, S.; Hernández-Barajas, J.R.; Torres-Balcázar, C.A.; Padrón-López, R.M.; de la Cruz-Luna, E. & Ferrer-Sánchez, M.I. (2014). Optimization and evaluation of a domestic wastewater treatment system by dual combination of metallic salts and zeolites filtration. In: Brebbia, C.A. (Ed.); *Water Pollution XII* (Twelfth International Conference on Modelling, Monitoring and Management of Water Pollution; Volumen 182; pp. 245–256). Wessex Institute of Technology, UK. ISBN 1743-3541; eISBN 978-1-84564-777-3. <https://www.witpress.com/books/978-1-84564-776-6>

López-Ocaña, G.; Bautista-Margulis, R.G.; Valdes Manzanilla, A.; Torres-Balcázar, C.A.; López-Vidal, R.; Pérez-Sánchez, E. & Pampillón-González, L. (2019). Spatial distribution behavior of basic pollutants in a subsurface-flow wetland with "*Thalia geniculata*". *International Journal of Environmental Impacts*, 2(2): 145–160. <https://www.witpress.com/elibrary/ei-volumes/2/2/2427>

Maitlo, G.; Kandhro, G.A.; Karim Shah, A.; Sttar Jatoi, A. & Qayoom Memon, A. (2018). Treatment of municipal wastewater through horizontal flow constructed wetland. *Pakistan Journal of Analytical & Environmental Chemistry*, 19(2): 135–145. <https://pdfs.semanticscholar.org/ad6b/690f4356316fa720a5ba9e042a8b108316e7.pdf>

Medales Martínez, A.G.; Vázquez González, M.B.; López Vidal, R., Torres Balcázar, C.A. & López Ocaña, G. (2019). Tratamiento de aguas residuales domésticas con laguna anaerobia y humedales artificial de flujo libre. *Visum Mundi*, 3(2): 187–195. <https://www.academiajournals.com/visum/#V3N2>

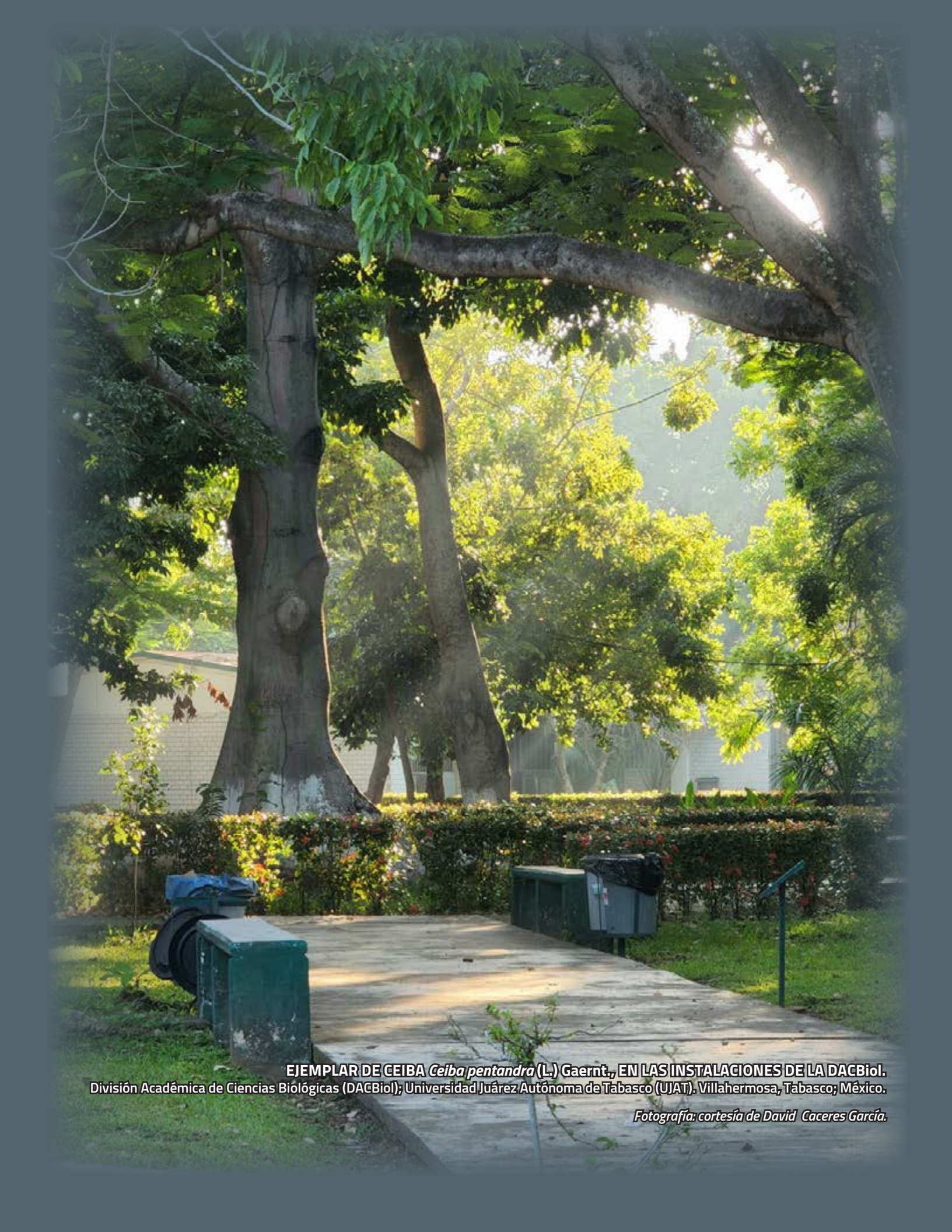
Metcalf & Eddy, Inc. (2003). *Wastewater engineering treatment and reuse* (4th ed.; Tchobanoglous, G.; Burton, F.L. & Stensel, H.D. (Rev.); p. 1819). McGraw-Hill Companies, Inc. ISBN 0-07-112250-8.

OMS (Organización Mundial de la Salud). (2023, septiembre 13). Agua para consumo humano. *Centro de prensa/Notas descriptivas/Detalle - OMS* [Web]. Consultado en <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/drinking-water>

PROFEPA (Procuraduría Federal de Protección al Ambiente). (2015, julio 2015). *Certificado de Calidad Ambiental México, Nivel de Desempeño 1 «Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, División Académica de Ciencias Biológicas»*. Certificado: NC2712276, No. Oficio: 0663, No. SIIP:11966, SAAEL:4521.

Romellón-Cerino, M.J.; Estrada-Pérez, N. & López-Ocaña, G. (2022). Remoción y cinética de contaminantes básicos en humedales artificiales en serie. *Renewable Energy, Biomass & Sustainability (REB&S)*, 3(1): 24–34. https://aldeser.org/uploads/1/3/0/8/130818527/a3_v3n1_reb_s.pdf

Vázquez González, M.B. & López Ocaña, G. (2011). Evaluación técnica de un tanque IMHOFF para el tratamiento de aguas residuales en Centro, Tabasco. *UNACAR Tecnociencia*, 5(1): 32–47. <https://biblat.unam.mx/hevila/UNACARtecnociencia/2011/no1/5.pdf>



EJEMPLAR DE CEIBA *Ceiba pentandra* (L.) Gaertn., EN LAS INSTALACIONES DE LA DACBIOL.
División Académica de Ciencias Biológicas (DACBIOL); Universidad Juárez Autónoma de Tabasco (UJAT), Villahermosa, Tabasco; México.

Fotografía: cortesía de David Caceres García.

«La disciplina es no perder de vista lo que se desea alcanzar»

DACBIOL



ILUMINACIÓN NOCTURNA DE LA ENTRADA PRINCIPAL Y FACHADA DE LA DACBIOL-UJAT.

División Académica de Ciencias Biológicas (DACBIOL); Universidad Juárez Autónoma de Tabasco (UJAT). Villahermosa, Tabasco; México.

Fotografía: cortesía de David Cáceres García.



KUXULKAB'

División Académica de Ciencias Biológicas; Universidad Juárez Autónoma de Tabasco

☎ +52 (993) 358 1500, 354 4308 ext. 6415

✉ kuxulkab@ujat.mx

🌐 www.revistas.ujat.mx

Carretera Villahermosa-Cárdenas km 0.5, entronque a Bosques de Saloya. C.P. 86039.
Villahermosa, Tabasco. México.