

© 2026 Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Estudios Superiores Zaragoza.

Este es un artículo Open Access bajo la licencia CC BY-NC-ND (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

TIP Revista Especializada en Ciencias Químico-Biológicas, 29: 1-10, 2026.

<https://doi.org/10.22201/fesz.23958723e.2026.786>

Análisis del crecimiento y contenido de lípidos de la diatomea *Caloneis amphisbaena* var. *subsalina* aislada de la laguna costera “San José el Hueyate”, Chiapas, México

Melissa de la Cruz-Armenta¹, Jalsen Iván Teco-Bravo^{1*}, Edgar Tovar-Juárez¹,
María de los Ángeles López-Arroyo², Yaneth Estrada-Santos¹ y Pedro Martín Negrete-Moreno¹

¹Centro de Investigación de los Sistemas Costeros y Continentales, Universidad Autónoma de Chiapas, Calzada Escolleras s/n Fte. al Faro, Colonia Emiliano Zapata, 30830, Puerto Madero, Tapachula, Edo. de Chiapas, México. ²Tecnológico Nacional de México/IT de Tapachula, México, Carretera a Puerto Madero Km. 2 Centro 30700, Tapachula, Edo. de Chiapas, México. E-mail: *jalsen.teco@unach.mx

RESUMEN

Las diatomeas producen lípidos que por sus características son viables para uso biotecnológico, sin embargo, el crecimiento y la producción de éstos metabolitos es taxonómicamente específico. En este estudio se aisló la diatomea *Caloneis amphisbaena* var. *subsalina* de la laguna costera “San José el Hueyate”, Edo. de Chiapas, México, se evaluó su crecimiento, producción de biomasa, contenido de lípidos totales y triglicéridos. Este microorganismo no tuvo un período de adaptación y alcanzó la fase estacionaria en seis días, su tasa y velocidad de crecimiento, así como tiempo de duplicación fue de 0.94 d⁻¹; 2,436,111 células mL⁻¹ d⁻¹ y 0.73 d, respectivamente. La producción de biomasa de 3,456 mg L⁻¹ y 576 mg L⁻¹ d⁻¹, el contenido de lípidos totales de 501.33 mg L⁻¹ (83.56 mg L⁻¹ d⁻¹ y 13.52% de biomasa) y el de triglicéridos 273.82 mg L⁻¹ (45.64 mg L⁻¹ d⁻¹, 65.94% de los lípidos totales y 8.14% de biomasa). Los resultados de este estudio sugieren que *C. amphisbaena* var. *subsalina* tiene potencial para la producción de biomasa y lípidos con fines biotecnológicos, comparable con los de diatomeas modelo y con otros aislamientos obtenidos de diversas latitudes.

Palabras clave: diatomea, costa de Chiapas, laguna costera, parámetros de crecimiento, triglicéridos.

Growth analysis and lipid content of the diatom *Caloneis amphisbaena* var. *subsalina* isolated from the coastal lagoon “San José el Hueyate”, Chiapas, Mexico

ABSTRACT

Diatoms produce lipids that, due to their characteristics, are viable and have potential for biotechnological use; however, the growth and production of these metabolites are taxonomically specific. In this study, the diatom *Caloneis amphisbaena* var. *subsalina* was isolated from the sample collected from the coastal lagoon “San José el Hueyate,” Chiapas State, Mexico. This microorganism was the most abundant in the sample, did not have an adaptation phase, and reached the stationary phase in six days. Its growth, biomass production, total lipid and triglyceride content were evaluated. Its rate and growth velocity, as well as its doubling time, were 0.94 d⁻¹, 2,436,111 cells mL⁻¹ d⁻¹, and 0.73 d, respectively. Biomass production was 3,456 mg L⁻¹ and 576 mg L⁻¹ d⁻¹, total lipid production was 501.33 mg L⁻¹ (83.56 mg L⁻¹ d⁻¹ and 13.52% of biomass) and triglyceride content was 273.82 mg L⁻¹ (45.64 mg L⁻¹ d⁻¹, 65.94% of total lipids and 8.14% of biomass). The results of this study suggest that *C. amphisbaena* var. *subsalina* has potential for biomass and lipid production for biotechnological purposes, comparable to those of model diatoms and other isolates obtained from various latitudes.

Keywords: biomass, Chiapas coast, coastal lagoon, growth parameters, triglycerides.

INTRODUCCIÓN

Las diatomeas son el grupo más abundante del fitoplancton marino, responsables de producir un aproximado del 20% del oxígeno del planeta y el 40% de la productividad primaria de los océanos (Duarte, Feijão, Goessling, Caçador & Matos, 2021). Estos microorganismos han sido reconocidos por producir: **i)** lípidos, principalmente triglicéridos (TAGs); **ii)** ácidos grasos poliinsaturados de cadena larga (PUFAs); **iii)** metabolitos secundarios con gran potencial biotecnológico por ejemplo, carotenoides, vitaminas, polisacáridos y compuestos bioactivos (Dhanker *et al.*, 2024).

Debido a su contenido de TAGs, las diatomeas se pueden utilizar como alimento vivo o para producir piensos en la acuicultura. En específico, los TAGs tienen diferentes usos: culinario, materia prima para biocombustibles o aditivo en suplementos alimenticios (Alisha-Aratboni, Rafiei, Garcia-Granados, Alemzadeh & Morones-Ramírez, 2019). Este grupo del fitoplancton contiene la mayor proporción de PUFAs, con funciones estructurales en el cerebro, los ojos y de protección contra las enfermedades neurodegenerativas (Dhanker *et al.*, 2024).

Sin embargo, la industrialización de los lípidos que provienen de las microalgas no ha alcanzado la viabilidad económica deseable, porque en la mayoría de las especies su producción es inversamente proporcional al crecimiento, lo que requiere incrementarla sin disminuir las tasas de crecimiento o bien aumentar ambas simultáneamente (Shokravi *et al.*, 2020). Para solventar el problema, una estrategia es la búsqueda de nuevas cepas de especies de diatomeas con las siguientes características: altas tasas de crecimiento, corto tiempo de duplicación, una alta productividad de biomasa y de lípidos, por haberse demostrado que son taxonómicamente específicas (Morales, Aflalo & Bernard, 2021).

Los ecosistemas acuáticos estuarinos se distinguen por su alta tasa de productividad primaria y secundaria, propicios para la reproducción, desarrollo de juveniles y refugio de una gran cantidad de especies (Pérez-Jiménez, Rivas-Acuña, León-Álvarez, Campos-Campos & Quiroz-González, 2020), lo que conlleva a la posibilidad de encontrar diatomeas con las características deseables de crecimiento y de producción de lípidos.

El Estado de Chiapas, México, tiene 260 km de litoral y más de 200 km² de lagunas costeras y estuarios (Díaz-Ruiz, Aguirre-León & Cano-Quiroga, 2006; Montes-Cartas, Castillo-Agüero & López-Portillo, 1999). En estos sistemas han sido reportados 199 taxa de fitoplancton de los cuales más del 60% estuvo representado por diatomeas con 61 géneros y 59 especies (Varona-Cordero, Gutiérrez-Mendieta & Meave del Castillo, 2010). Sin embargo, existen escasos reportes de aislamiento,

cultivo y aprovechamiento biotecnológico de este germoplasma (Teco-Bravo, Tovar-Juárez, Estrada-Santos, Negrete-Moreno & López-Arroyo, 2021a; Velázquez-Sánchez *et al.*, 2023). Por lo que el objetivo de la presente investigación fue aislar y analizar el crecimiento y el contenido de lípidos de la diatomea *Caloneis amphisbaena* var. *subsalina* del sistema estuarino “San José el Hueyate”, de la costa del Edo. de Chiapas, México.

MATERIALES Y MÉTODOS

Muestreo y aislamiento de microalgas

El muestreo se llevó a cabo en el sistema lagunar “San José el Hueyate” (14° 56' 10" y 14° 54' 25" N; 92° 38' 35" y 92° 35' 15" O), ubicado en el municipio de Mazatán en el sureste del Estado de Chiapas, México (INE, 1999). El sitio de estudio (**Figura 1**) es un cuerpo de agua amplio donde desembocan el río “Huixtla” y el río “Huehuetán”, con sustrato fangoso. Este cuerpo de agua se caracteriza por tener una vegetación de plantas hidrófitas (principalmente *Nymphaea ampla*, *Pistia stratiotes*, *Salvinia minimay* *Eichhornia crassipes*) que cubren la mayor parte del espejo de agua en la temporada de lluvias y en los bordes de la ribera crece el mangle rojo (*Rizophora mangle*). Los microorganismos fueron recolectados en la temporada de estiaje de la región (noviembre de 2020) a las 09:00 a.m., horario en el que la profundidad del agua fue de 50 cm, la salinidad de 0.89 ± 0.28 PSU, pH de 7.10 ± 0.05 , temperatura de 28.65 ± 0.71 °C y oxígeno disuelto de 1.70 ± 0.09 mg L⁻¹.

Debido a la escasa profundidad de la columna de agua, la muestra de fitoplancton se obtuvo al filtrar un aproximado de 200 L de agua superficial utilizando una red de plancton con luz de malla de 63 µm (SEA-GEAR, FL USA). El transporte se hizo en frío, protegidas de la luz y se dejaron sedimentar en el laboratorio durante un periodo de 24 h a una temperatura de 12 °C.

El aislamiento de la diatomea se realizó a partir de la muestra sedimentada mediante el método de diluciones seriadas con agua destilada estéril en proporción de 1:10 (v:v) y un total de seis diluciones sucesivas (10⁻⁶). A fin de incrementar el número de células aisladas, se inocularon alícuotas de la dilución 10⁻⁶ en 1 mL de medio de cultivo Guillard's F/2 (Sigma-Aldrich, G0154, UK) a pH 8, suplementado con 15 mg L⁻¹ de Na₂SiO₃·9H₂O e incubadas en un agitador rotatorio a 140 rpm, 25 ± 2 °C, con fotoperiodo de 16h:8h (luz:oscuridad) e iluminación de 20 µmol/m²/s (Velázquez-Sánchez *et al.*, 2023). Para conservar el aislado se sembró en cajas Petri y al mismo medio de cultivo se le adicionó agar (15 g L⁻¹), bajo las condiciones mencionadas previamente, con recambios del medio cada 15 días.

Identificación de la diatomea

Previo a la identificación de la diatomea se hizo la limpieza de la frústula con base en el protocolo de Lara-Villa, Moreno-Ruiz & Amaro-Mauricio (1996). Posteriormente se observaron

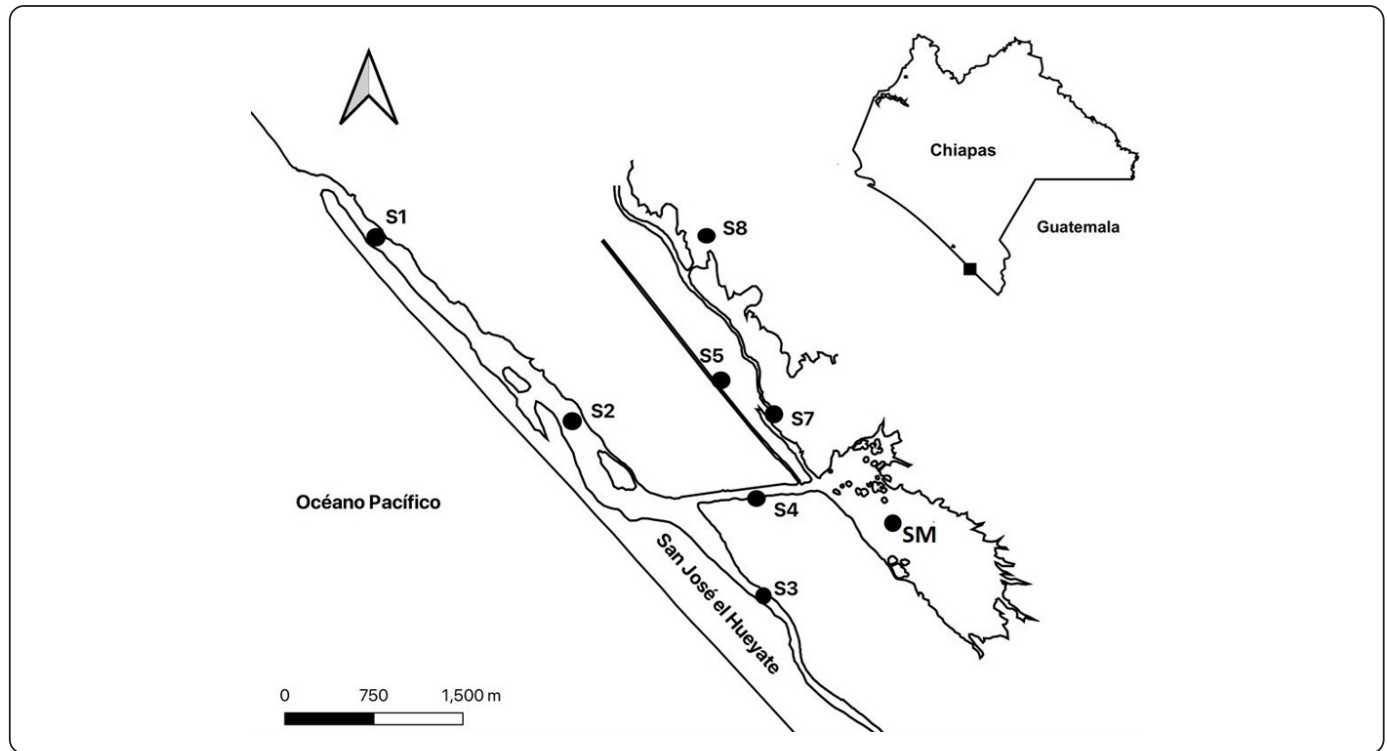


Figura 1. Ubicación de la laguna costera “San José el Hueyate”, Chiapas, México. Ver el sitio de muestreo (SM).

en un microscopio invertido (VELAB™ PRIME, VE-41, VelaQuin, México) con el objetivo a 40× para identificarla a nivel de especie mediante las descripciones morfológicas de Cleve (1894); Moreno, Licea & Santoyo (1996) y Vázquez, Aké-Castillo & Orduña-Medrano (2021); los detalles de la clasificación taxonómica se vieron con el apoyo de la base de datos “AlgaeBase” (<https://www.algaebase.org/>).

Bioensayos

En los bioensayos se utilizaron matraces Erlenmeyer de 250 mL a los que se les agregó 50 mL de medio de cultivo Guillard’s F/2 a pH 8 (Sigma–Aldrich, G0154, UK) preparado con agua de mar filtrada estéril y suplementado con 15 mg L⁻¹ de Na₂SiO₃·9H₂O, a estos se les 5×10⁵ células mL⁻¹ de diatomeas en crecimiento exponencial y se incubaron durante 10 días bajo las condiciones descritas previamente en la sección de muestreo y aislamiento. Todos los bioensayos se realizaron por triplicado y las unidades experimentales se distribuyeron al azar.

Cinética de crecimiento

Para obtener la curva de crecimiento, se cuantificó el número de células por matraz cada 24 h, durante 10 días con un hemocitómetro de Neubauer en un microscopio óptico a 40× (Duarte *et al.*, 2021). Se graficaron los valores del tiempo (días), como variable independiente, contra los valores de la concentración celular, como variable dependiente, para identificar las fases de adaptación exponencial y estacionaria

y la concentración celular máxima de la diatomea en el medio de cultivo (Madigan, Martinko & Parker, 2004). Se calculó la tasa de crecimiento específica (μ), la velocidad de crecimiento (V) y el tiempo de duplicación (TD) con las ecuaciones 1, 2 y 3, respectivamente (Khan *et al.*, 2021).

$$\mu(d^{-1}) = \frac{(\ln X_2 - \ln X_1)}{(t_2 - t_1)} \quad (1)$$

$$V(\text{células mL}^{-1} d^{-1}) = \frac{X_2 - X_1}{t_2 - t_1} \quad (2)$$

$$TD(d) = \frac{\ln(2)}{\mu} \quad (3)$$

Donde X_1 y X_2 son el número de células al inicio y al final de la fase exponencial (células mL⁻¹), respectivamente, t_1 y t_2 son el tiempo de inicio y final de la fase exponencial (días), respectivamente.

Producción de biomasa

La biomasa se obtuvo por centrifugación a 3,000 rpm durante 5 minutos y deshidratación en un horno eléctrico a 70 °C hasta tener un peso constante. La concentración (B) y la productividad (P) de biomasa fue calculado con las ecuaciones 4 y 5, respectivamente (Qin *et al.*, 2016).

$$B(\text{mgL}^{-1}) = \frac{W}{V} \quad (4)$$

$$P(\text{mgL}^{-1} \text{d}^{-1}) = \frac{B_s - B_i}{T} \quad (5)$$

Donde W es el peso seco de la biomasa (mg); V es el volumen del cultivo (L); B_s y B_i son la biomasa final e inicial, respectivamente, T es la duración de la fase exponencial (d).

Contenido de lípidos totales

Se extrajeron los lípidos totales de la biomasa seca con 15 mL de una mezcla de cloroformo: metanol (2:1, v/v) por cada 38 mg de biomasa seca pulverizada. La mezcla se mantuvo en agitación a 150 rpm durante 3 h en un agitador rotatorio (CRM Gisbe, CRM-OS1). El sobrenadante fue recuperado por centrifugación a 1,500 rpm durante 3 minutos, se evaporaron los solventes a temperatura ambiente y se obtuvo el peso constante a 60 °C en un horno eléctrico. La biomasa residual pasó por un segundo proceso de extracción para una completa recuperación de los lípidos (Widjaja, Chien & Ju, 2009). El peso de los lípidos totales y el porcentaje respecto a la biomasa se calcularon por gravimetría. El contenido (L_c) y la productividad (L_p) de lípidos totales se calcularon con la ecuación 6 y 7 (Nascimento *et al.*, 2013).

$$L_c(\text{mgL}^{-1}) = \frac{LW}{V} \quad (6)$$

$$L_p(\text{mgL}^{-1} \text{d}^{-1}) = P \times L_c \quad (7)$$

Donde LW es el peso de los lípidos totales (mg); V es el volumen del cultivo (L); P es la productividad de biomasa ($\text{mgL}^{-1} \text{d}^{-1}$) y L_c es el contenido de lípidos totales (mg L^{-1}).

Contenido de triglicéridos (TAGs)

Para la cuantificación de TAGs en el extracto lipídico se utilizó la espectrofotometría (Teco-Bravo, Barahona-Pérez, Reyes-Sosa, Ku-González, Herrera-Valencia & Peraza-Echeverría, 2019) y el kit comercial *Triglycerides Mono SL New* (ELITech Clinical Systems, Sées, Francia). Previamente, los lípidos totales estuvieron resuspendidos en 2 mL de cloroformo y se prosiguió conforme a las instrucciones del fabricante. Las absorbancias se midieron con un espectrofotómetro marca Hach (DR1900, USA), la concentración de triglicéridos (CT) con la ecuación 8, provista por el fabricante y la productividad de TAGs (PT) con la ecuación 9. El porcentaje en peso de los triglicéridos, respecto a la biomasa seca y a los lípidos totales, se obtuvo por gravimetría.

$$CT(\text{mgL}^{-1}) = \frac{A_M}{A_E} \times n \quad (8)$$

$$PT(\text{mgL}^{-1} \text{d}^{-1}) = \frac{CT}{T} \quad (9)$$

Donde A_M es la absorbancia de la muestra, A_E es la absorbancia del estándar, n es la concentración del estándar (200 mg dL^{-1}), CT es la concentración de triglicéridos (mg L^{-1}) y T es la duración de la fase exponencial (d).

Análisis estadísticos

Con los datos de las variables evaluadas se calcularon los siguientes parámetros de estadística descriptiva básica: la media y la desviación estándar, con el software Excel versión 2016 (Microsoft Corporation, USA).

RESULTADOS

Identificación

La diatomea aislada e identificada como *Caloneis amphisbaena* var. *subsalina* (Figura 2) pertenece a las categorías taxonómicas: Phylum: Bacillariophyta, Subphylum: Bacillariophytina, Clase: Bacillariophyceae, Subclase: Bacillariophycidae, Orden: Naviculales, Suborden: Naviculineae, Familia: Naviculaceae, Género: *Caloneis* (Vázquez *et al.*, 2021; <https://www.algaebase.org>). Es una diatomea biráfida simétrica con valvas elípticas ligeramente capitadas, un rafe central recto con los extremos centrales ligeramente curvos, nódulo central y estrías muy finas dispuestas de forma transversal al eje apical (Figura 2).

Cinética de crecimiento

En la curva de crecimiento de *C. amphisbaena* var. *subsalina* (Figura 3) se ve un incremento de la concentración celular respecto al tiempo de cultivo sin presentar una etapa de adaptación, ya que la fase exponencial inició desde las primeras



Figura 2. *Caloneis amphisbaena* var. *subsalina* (Donkin) Cleve (1894), de la laguna costera "San José el Hueyate", Chiapas, México; vista al microscopio (40×).

horas de cultivo, hasta llegar a la estacionaria a los seis días (**Figura 3**) con una concentración celular máxima de $14,666,666 \pm 2,565,800$ células mL^{-1} .

La tasa de crecimiento específica de $0.94 \pm 0.02 \text{ d}^{-1}$, velocidad de crecimiento de $2,436,111 \pm 427,633$ células $\text{mL}^{-1} \text{ d}^{-1}$ y un tiempo de duplicación de $0.73 \pm 0.02 \text{ d}$.

Producción de biomasa

La producción y productividad de biomasa de $3,456 \pm 1,338 \text{ mg L}^{-1}$ y $576 \pm 223 \text{ mg L}^{-1} \text{ d}^{-1}$, respectivamente.

Contenido de lípidos totales

El contenido de lípidos totales de *C. amphisbaena* var. *subsalina* fue de $501.33 \pm 348.05 \text{ mg L}^{-1}$, equivalente al $13.52 \pm 4.18 \%$ de la biomasa y una productividad de lípidos de $83.56 \pm 58.01 \text{ mg L}^{-1} \text{ d}^{-1}$.

Contenido de triglicéridos

El contenido de triglicéridos de $273.82 \pm 90.40 \text{ mg L}^{-1}$, representó el $65.94 \pm 30.78 \%$ de los lípidos totales y el $8.14 \pm 2.10 \%$ de su biomasa. La productividad de triglicéridos fue de $45.64 \pm 15.07 \text{ mg L}^{-1} \text{ d}^{-1}$.

DISCUSIÓN

C. amphisbaena var. *subsalina* se desarrolla en ambientes salobres y está ampliamente distribuida en diferentes regiones del planeta, ha sido reportada en ecosistemas costeros de Europa (Miho & Witkowski, 2005), Asia (Kaleli & Akçaalan, 2021) y Norteamérica (Eberle, 2016). En México, se ha encontrado en las lagunas costeras del Golfo de California (Moreno *et al.*, 1996) y del Golfo de México (Vázquez *et al.*, 2021). No obstante, éste es el primer reporte para los sistemas lagunares de la costa de Chiapas. En Croacia, la identificaron por primera vez Jasprica & Hafner (2005), en el delta del río Neretva.

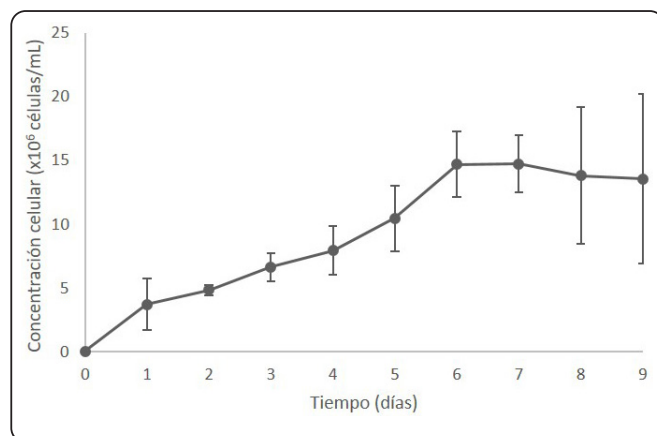


Figura 3. Curva de crecimiento de la diatomea *C. amphisbaena* var. *subsalina*. Valores promedio $\pm$ desviación estándar ($n = 3$).

El método de aislamiento utilizado en esta investigación permitió obtener a la microalga más abundante de la muestra, lo que permite sugerir que *C. amphisbaena* var. *subsalina* era una de las especies con más presencia en el sistema estuarino “San José el Hueyate” durante la temporada de muestreo. Igual sucedió con una especie del mismo género (*Caloneis permagna* durante la temporada de estiaje en los sistemas lagunares estuarinos de Chantuto-Panzacola y Carretas-Pereyra, ambos de la costa de Chiapas (Varona-Cordero *et al.*, 2010) mientras que el género *Caloneis* fue reportado entre los más representados en los sistemas costeros del Golfo de México por Vázquez *et al.* (2021).

Aunque *C. amphisbaena* var. *subsalina* es una especie ticoplanctónica, la presencia de esta en la columna de agua es favorecida durante la temporada de estiaje, cuando se reduce la descarga de los ríos, ya que la intrusión de la marea es más fuerte que en la temporada de lluvias lo que contribuye a la resuspensión del sedimento donde se encuentran, además el viento y la baja profundidad de los sistemas estuarinos incrementan el efecto (Lucas, Widdows, Brinsley, Salkeld & Herman, 2000; Shanks & McCulloch, 2003). Por otra parte, Heckman (1985) identificó a *C. amphisbaena* var. *subsalina* como una de las dos microalgas más abundantes en el sedimento de las marismas, observó que migra verticalmente hacia el fondo en los estuarios durante la marea baja evitando ser arrastrada hacia el mar y que migra hacia la superficie durante la marea alta para ser resuspendida por el agua. La escasa profundidad de 0.5 m y la ausencia de lluvias durante la temporada de muestreo (estiaje) pudo haber favorecido la abundancia de esta diatomea en el sistema estuarino de “San José el Hueyate”. El dominio de las diatomeas ticoplanctónicas se vio antes en los sistemas lagunares estuarinos más grandes de la costa de Chiapas, Chantuto-Panzacola y Carretas-Pereyra (Varona-Cordero *et al.*, 2010; Varona-Cordero & Gutiérrez-Mendieta, 2006).

Aunado a lo anterior, en un estudio de variación temporal, Jasprica & Hafner (2005) identificaron a *C. amphisbaena* var. *subsalina* sólo durante el verano en los ecosistemas acuáticos con características similares a los de la laguna San José el Hueyate, respecto a la escasa profundidad de 0.5 m, baja salinidad (0.89 PSU) y pH neutro (7.1).

La diversidad y abundancia de las diatomeas en los ecosistemas estuarinos depende de la tasa de crecimiento y de los factores ambientales como la concentración de nutrientes, la temperatura, la intensidad lumínica, la depredación, la estabilidad del sustrato y las descargas (Çelekli, Toudjani, Gümüş, Kayhan, Lekesiz & Çetin, 2019; Varona-Cordero & Gutiérrez-Mendieta, 2006). En la laguna costera “San José el Hueyate” desembocan los ríos “Huixtla” y “Huehuetán” cuyas cuencas atraviesan terrenos de agricultura intensiva lo que podría ser una fuente de nutrientes esenciales para el crecimiento de las diatomeas, es bien conocido que los estuarios son ecosistemas en los que se descargan

escorrentías continentales, generalmente con alto contenido de nutrientes y de materia orgánica, provenientes de ambientes naturales y antropizados, en los que su alta productividad primaria es una de las características más distintivas (Cañavate, Van Bergeijk, González-Ortegón & Vilas, 2021; Lemley, Adams & Bate, 2016). Esta posible disponibilidad de nutrientes, así como su alta tasa de crecimiento específica pudieron haber favorecido la abundancia de *C. amphisbaena* var. *subsalina* en la laguna “San José el Hueyate”.

La concentración celular, la tasa de crecimiento específica, la producción de biomasa, el contenido de lípidos totales y de los TAGs de la diatomea en estudio son competitivos al comparar con otras aisladas de las costas de diversas regiones del planeta y las que son modelo ampliamente estudiadas con fines biotecnológicos como *Phaeodactylum tricornutum* y el género *Nitzschia*, reconocido globalmente por sus características de crecimiento, producción de biomasa y contenido de lípidos y de TAGs (Oliver *et al.*, 2021).

Por ejemplo, *C. amphisbaena* var. *subsalina* tuvo una tasa de crecimiento específica similar a la de la diatomea cosmopolita *Thalassiosira weissflogii* (0.9 d^{-1}), (Groß, Boersma & Meunier, 2021) y a la de la diatomea modelo *P. tricornutum* (1.3 d^{-1}), (Gillard, Hernandez, Contreras, Francis & Cabrales, 2021), pero alcanzó su máximo crecimiento en menor tiempo y tuvo tanto mayor concentración celular como tasa de crecimiento específica que: *Amphora* sp. ($440,000 \text{ cel mL}^{-1}$ y 0.60 d^{-1}); *Skeletonema* sp. ($3,830,000 \text{ cel mL}^{-1}$ y 0.55 d^{-1}); *Nitzschia alexandrina* (8 d; $38,533,333 \text{ cel mL}^{-1}$ y 0.69 d^{-1}); *Entomoneis paludosa* (11 d, $3,976,666 \text{ cel mL}^{-1}$ y 0.46 d^{-1}); *Nitzschia* sp. 13 d; $1,088,888 \text{ cel mL}^{-1}$ y 0.39 d^{-1}); *Staurosira* sp. (13 d; $7,433,333 \text{ cel mL}^{-1}$ y 0.44 d^{-1}); *Nitzschia* sp. ($1,800,000 \text{ cel mL}^{-1}$ y 0.15 d^{-1}) y *Nanofrustulum shiloi* ($6,500,000 \text{ cel mL}^{-1}$ y 0.099 d^{-1}), aisladas en el oriene de la India; occidente de Australia; sureste de Indonesia; Países del Loria, Francia y el mar adriático, respectivamente (Cointet, Séverin, Couzinnet-Mossion, Méléder, Gonçalves & Wielgosz-Collin, 2021; Grubišić *et al.*, 2022; Indrayani, Moheimani, de Boer, Bahri & Borowitzka, 2020a; Indrayani, Haslianti, Asmariani, Muskita & Balubi, 2020b).

Los criterios para seleccionar a las diatomeas candidatas para la producción de lípidos y otros metabolitos de interés biotecnológico son: cortos tiempos de duplicación y altas tasas de crecimiento para alcanzar la fase estacionaria y producir biomasa en poco tiempo, ya que en esa etapa se detiene el crecimiento e incrementa la biosíntesis de las moléculas de reserva de energía, principalmente lípidos y polisacáridos (Sacristán-de Alva, Luna-Pabello, Orta-Ledesma & Cruz-Gómez, 2018; Salama *et al.*, 2017).

Respecto a la producción de la biomasa de *C. amphisbaena* var. *subsalina*, resultó similar a *Skeletonema costatum*

(3.51 g L^{-1}), (Bastos, Maia, Pereira, Navalho & Varela, 2022) y mayor a *Amphora* sp. (0.30 g L^{-1} y $0.17 \text{ g L}^{-1} \text{ d}^{-1}$); *Skeletonema* sp. (0.62 g L^{-1} y $0.29 \text{ g L}^{-1} \text{ d}^{-1}$); *T. weissflogii* (1.7 g L^{-1} y $290 \text{ mg L}^{-1} \text{ d}^{-1}$); *Amphora copulata* (550 mg L^{-1} y $43.3 \text{ mg L}^{-1} \text{ d}^{-1}$); *Chaetoceros calcitrans* (2.03 g L^{-1}); *N. shiloi* (0.10 g L^{-1} y $12.8 \text{ mg L}^{-1} \text{ d}^{-1}$) y *Nitzschia* sp. (0.28 g L^{-1} y $19.74 \text{ mg L}^{-1} \text{ d}^{-1}$), (Bastos *et al.*, 2022; Govindan *et al.*, 2021; Grubišić *et al.*, 2022; Indrayani *et al.*, 2020a; Indrayani *et al.*, 2020b; Marella & Tiwari, 2020).

La biomasa de las diatomeas, además de lípidos, contiene otros metabolitos de alto valor agregado con potencial uso biotecnológico como los carotenoides, con amplia demanda en la industria de los alimentos para consumo humano y animal; los polisacáridos; polifenoles, esteroides y péptidos/proteínas con actividad antioxidante, antiinflamatoria, neuroprotectora, antiproliferativa, inmunoestimulante, antiviral, antihemolítica y fotoprotectora (Nieri, Carpi, Esposito, Costantini & Zupo, 2023). Por lo tanto, es necesario el estudio de la composición de la biomasa, de *C. amphisbaena* var. *subsalina*, porque su alta productividad justifica la hipótesis de que sería una fuente potencial para la producción de otros metabolitos de interés biotecnológico, además de los lípidos, y con ello su industrialización enfocada a la biorefinería.

El contenido de lípidos totales de *C. amphisbaena* var. *subsalina* (porcentaje respecto a la biomasa) es similar a *Opephora* sp. (14.32%) y *N. alexandrina* (15.75%), (Cointet *et al.*, 2021) y mayor a *Nitzschia* sp. (7.76%), *Amphora* sp. (11.35%) y *E. paludosa* (12.34%), (Grubišić, Šantek, Kuzmić, Čož-Rakovac & Ivančić Šantek, 2024). Aunque se conocen diatomeas con mayor porcentaje de lípidos totales (respecto a la biomasa), en la especie de este trabajo la productividad de estos fue mayor comparado, por ejemplo, con *T. weissflogii* (19.5% y $56.5 \text{ mg L}^{-1} \text{ d}^{-1}$); *Amphora* sp. (57.69% y $0.081 \text{ g L}^{-1} \text{ d}^{-1}$); *Skeletonema* sp. (25%, 0.15 g L^{-1} y $0.066 \text{ g L}^{-1} \text{ d}^{-1}$); *Staurosira* sp. (40.92%); *Amphora copulata* (39.5% y $17.1 \text{ mg L}^{-1} \text{ d}^{-1}$) y *N. shiloi* (33.65%), (Cointet *et al.*, 2021; Govindan *et al.*, 2021; Grubišić *et al.*, 2024; Indrayani *et al.*, 2020a y 2020b; Marella & Tiwari, 2020).

Por otra parte, el contenido de los TAGs de *C. amphisbaena* var. *subsalina* (respecto a los lípidos totales) es también similar a *Nitzschia* sp. (59.11%), (Cointet *et al.*, 2021), mayor al de *N. shiloi* (0.71%), (Grubišić *et al.*, 2022), *Amphora* sp. (22.55%), (Grubišić *et al.*, 2024); *Opephora* sp. (28.98%), *N. alexandrina* (39.18%) y *E. paludosa* (46.70%), pero menor al de *Staurosira* sp. (76.40%), (Cointet *et al.*, 2021).

Aunque el contenido de TAGs en *C. amphisbaena* var. *subsalina* (respecto a los lípidos totales) es alto (65%), el bajo contenido de TAGs respecto a la biomasa (8.14%) sugiere que la producción de estas moléculas podría ser incrementada. Está demostrado que en condiciones óptimas de crecimiento

se produce una biomasa algal con bajo contenido de TAGs, por lo contrario, en condiciones adversas de crecimiento o estrés, la proliferación celular se limita y se sintetizan TAGs como una forma de almacenamiento de carbono y energía, ya que la producción de biomasa y la biosíntesis de TAGs compiten por los asimilados fotosintéticos (Sarayloo *et al.*, 2017). Esto sucede cuando al disminuir la proliferación celular se produce un exceso de NADPH y la biosíntesis de TAGs actúa como sumidero de electrones para la reoxidación del NADPH y así evitar la sobreredución de la cadena transportadora de electrones fotosintética, de los lípidos de membrana y de las proteínas, ya que los TAGs son moléculas altamente reducidas (Hu *et al.*, 2008).

Los lípidos son los principales compuestos de almacenamiento de carbono en las diatomeas (Yi, Xu, Di, Brynjolfsson & Fu, 2017). Los ácidos grasos poliinsaturados de cadena larga, los glicolípidos, los fosfolípidos, los TAGs, los esteroides metilados, los terpenos, los aldehídos poliinsaturados, los alcoholes grasos y los isoprenoides (hidrocarburos) son los principales lípidos con potenciales aplicaciones biotecnológicas, los TAGs representan la fracción más abundante, como la producción de biocombustibles, compuestos bioactivos, nutraceuticos, piensos, fármacos y cosméticos, principalmente (Sharma *et al.*, 2021; Tanaka, Yoneda & Maeda, 2022; Teco-Bravo, Barahona-Pérez, Peraza-Echeverría, Baas-Espínola, Reyes-Sosa & Herrera-Valencia, 2021b).

Aunque el contenido y el perfil de lípidos de los microorganismos citados y, en general, de las microalgas son taxa justificados a nivel de Phylum y Clase (Lang, Hodac, Friedl & Feussner, 2011), está demostrado que las condiciones de cultivo pueden alterar el contenido y la composición de lípidos. Entre las estrategias probadas para incrementar el contenido intracelular de TAGs están: **i)** el cultivo en condiciones de estrés abiótico utilizando salinidad, iluminación, oscuridad, acidez, alcalinidad y temperatura, principalmente (Suparmaniam *et al.*, 2023); **ii)** el cultivo con limitación de nutrientes, principalmente nitrógeno, fósforo y sílice, es otra opción con resultados positivos (Tanaka *et al.*, 2022); **iii)** la ingeniería genética es otra herramienta ampliamente utilizada no solo para incrementar la producción y alterar el perfil de lípidos sino también para la identificación de genes relacionados con el metabolismo de estos compuestos con el fin de desarrollar herramientas de biología sintética para una ingeniería de genomas a gran escala utilizando técnicas como la mutagénesis (física, química e integraciones del DNA exógeno) y mediante la atenuación, el silenciamiento y/o la sobreexpresión de genes (Li, Deng, Walker, Karas & Mock, 2025). Por lo tanto, la producción de TAGs de la diatomea de este trabajo podría ser incrementada *in vitro* mediante estrategias probadas mencionadas en líneas anteriores (Zhu, Sun, Fa, Liu & Lindblad, 2022). Previamente, nuestro grupo de investigación reportó la efectividad de la mutagénesis física para incrementar el contenido de TAGs y PUFAs (Teco-

Bravo *et al.*, 2019), así como para alterar el perfil de lípidos, en particular la abundancia de hidrocarburos, terpenoides y alcoholes grasos en la microalga *Chlorella saccharophila* (Teco-Bravo *et al.*, 2021b).

Hasta ahora, no hay publicaciones sobre el aislamiento, el cultivo, el análisis del crecimiento, el contenido y el perfil de lípidos de *C. amphisbaena* var. *subsalina* aislada de otros ecosistemas y/o latitudes que permita comparar la curva y los parámetros de crecimiento, así como el contenido de lípidos totales y de TAGs reportados en esta investigación. Éste es el primer trabajo que aborda el estudio de los metabolitos en esta diatomea cosmopolita, sin embargo, para conocer completo su potencial biotecnológico es necesario, primero la partición de los lípidos totales, así como la composición de cada fracción mediante la cromatografía de gases acoplada a la espectrometría de masas. No obstante, el aislamiento, la purificación y la cinética de crecimiento reportados en esta investigación, así como la conservación de este microorganismo es la línea base que permitirá profundizar en el estudio y aprovechamiento de este germoplasma con fines biotecnológicos.

Los resultados, de la presente investigación, demuestran que la bioprospección de las diatomeas, de las lagunas costeras es una estrategia útil mediante el aislamiento de cepas nativas, adaptadas a las condiciones ambientales locales, que tengan altas tasas y velocidades de crecimiento, corto tiempo de duplicación así como alta productividad de biomasa y de lípidos que puede contribuir en el logro de una producción económicamente viable a escala industrial, ya que aun con un estimado de la existencia de aproximadamente 200,000 especies, este grupo del fitoplancton ha sido poco estudiado y, por lo tanto, permanece como un recurso natural subaprovechado para la producción de lípidos y otros metabolitos de alto valor agregado (Bhattacharjya, Kiran Marella, Tiwari, Saxena, Kumar Singh & Mishra, 2020; Cointet, Wielgosz-Collin, Méléder & Gonçalves, 2019; Sharma *et al.*, 2021).

CONCLUSIONES

En la recolección de fitoplancton, *C. amphisbaena* var. *subsalina* fue la especie más abundante y con gran potencial para la producción de lípidos y biomasa con fines biotecnológicos por presentar una alta tasa de crecimiento, corto tiempo de duplicación y alta productividad de biomasa y de lípidos en comparación con diatomeas modelo ampliamente estudiadas y aisladas de otras latitudes. Sin embargo, es necesario profundizar en el estudio de la composición de la biomasa y de los lípidos de esta especie para conocer el perfil de metabolitos y de ácidos grasos e implementar estrategias que incrementen el contenido de triglicéridos.

AGRADECIMIENTOS

Al Instituto de Ciencia, Tecnología e Innovación del Estado de Chiapas (ICTIECH), por el financiamiento otorgado para

el desarrollo de proyectos de investigación en la convocatoria de apoyos únicos 2021. A Néstor Barrios Morales por su colaboración en la recolección y el procesamiento de la muestra.

REFERENCIAS

- Alishah-Aratboni, H., Rafiei, N., Garcia-Granados, R., Alemzadeh, A. & Morones-Ramírez, J. R. (2019). Biomass and lipid induction strategies in microalgae for biofuel production and other applications. *Microbial Cell Factories*, **18**(1), 178. <https://doi.org/10.1186/s12934-019-1228-4>
- Bastos, C. R. V., Maia, I. B., Pereira, H., Navalho, J. & Varela, J. C. S. (2022). Optimisation of Biomass Production and Nutritional Value of Two Marine Diatoms (Bacillariophyceae), *Skeletonema costatum* and *Chaetoceros calcitrans*. *Biology*, **11**(4), 594. <https://doi.org/10.3390/biology11040594>
- Bhattacharjya, R., Kiran Marella, T., Tiwari, A., Saxena, A., Kumar Singh, P. & Mishra, B. (2020). Bioprospecting of marine diatoms *Thalassiosira*, *Skeletonema* and *Chaetoceros* for lipids and other value-added products. *Bioresource Technology*, **318**, 124073. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.124073>
- Cañavate, J. P., van Bergeijk, S., González-Ortegón, E. & Vilas, C. (2021). Contrasting fatty acids with other indicators to assess nutritional status of suspended particulate organic matter in a turbid estuary. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, **254**, 107329. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2021.107329>
- Celekli, A., Toudjani, A., Gümüş, E. Y., Kayhan, S., Lekesiz, H. & Cetin, T. (2019). Determination of trophic weight and indicator values of diatoms in Turkish running waters for water quality assessment. *Turkish Journal of Botany*, **43**(1), 90-101. <https://doi.org/10.3906/bot-1704-40>
- Cleve, P. T. (1894). Synopsis of the Naviculoid Diatoms: Presented to the R. Swedish Academy of Sciences May 10, 1893. Norstedt.
- Cointet, E., Séverin, E., Couzinet-Mossion, A., Méléder, V., Gonçalves, O. & Wielgosz-Collin, G. (2021). Assessment of the lipid production potential of six benthic diatom species grown in airlift photobioreactors. *Journal of Applied Phycology*, **33**(4), 2093-2103. <https://doi.org/10.1007/s10811-021-02490-4>
- Cointet, E., Wielgosz-Collin, G., Méléder, V. & Gonçalves, O. (2019). Lipids in benthic diatoms: A new suitable screening procedure. *Algal Research*, **39**, 101425. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2019.101425>
- Dhanker, R., Saxena, A., Tiwari, A., Singh, P. K., Patel, A. K., Dahms, H. U. & Parra-Saldívar, R. (2024). Towards sustainable diatom biorefinery: Recent trends in cultivation and applications. *Bioresource Technology*, **391**, 129905. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2023.129905>
- Díaz-Ruiz, S., Aguirre-Leon, A. & Cano-Quiroga, E. (2006). Evaluación ecológica de las comunidades de peces en dos sistema lagunares estuarinos del sur de Chiapas, México. *Hidrobiológica*, **16**(2), 197-210.
- Duarte, B., Feijão, E., Goessling, J. W., Caçador, I. & Matos, A. R. (2021). Pigment and Fatty Acid Production under Different Light Qualities in the Diatom *Phaeodactylum tricornutum*. *Applied Sciences*, **11**(6), 2550. <https://doi.org/10.3390/app11062550>
- Eberle, M. E. (2016). Recent diatoms reported from the central United States: register of taxa and synonyms. *State Biological Survey of Kansas*, (Report Number 77). https://scholars.fhsu.edu/biology_facpubs/5
- Gillard, J. T. F., Hernandez, A. L., Contreras, J. A., Francis, I. M. & Cabrales, L. (2021). Potential for Biomass Production and Remediation by Cultivation of the Marine Model Diatom *Phaeodactylum tricornutum* in Oil Field Produced Wastewater Media. *Water*, **13**(19), 2700. <https://doi.org/10.3390/w13192700>
- Govindan, N., Maniam, G., Ab. Rahim, M., Sulaiman, A., Ajit, A., Chatsungnoen, T. & Chisti, Y. (2021). Production of Renewable Lipids by the Diatom *Amphora copulata*. *Fermentation*, **7**(1), 37. <https://doi.org/10.3390/fermentation7010037>
- Groß, E., Boersma, M. & Meunier, C. L. (2021). Environmental impacts on single-cell variation within a ubiquitous diatom: The role of growth rate. *PLOS ONE*, **16**(5), e0251213. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0251213>
- Grubišić, M., Šantek, B., Kuzmić, M., Čož-Rakovac, R. & Ivančić Šantek, M. (2024). Enhancement of Biomass Production of Diatom *Nitzschia* sp. S5 through Optimisation of Growth Medium Composition and Fed-Batch Cultivation. *Marine Drugs*, **22**(1), 46. <https://doi.org/10.3390/md22010046>
- Grubišić, M., Šantek, B., Zorić, Z., Čošić, Z., Vrana, I., Gašparović, B., Čož-Rakovac, R. & Ivančić Šantek, M. (2022). Bioprospecting of Microalgae Isolated from the Adriatic Sea: Characterization of Biomass, Pigment, Lipid and Fatty Acid Composition, and Antioxidant and Antimicrobial Activity. *Molecules*, **27**(4), 1248. <https://doi.org/10.3390/molecules27041248>
- Heckman, C. W. (1985). The development of vertical migration patterns in the sediments of estuaries as a strategy for algae to resist drift with tidal currents. *Internationale Revue der gesamten Hydrobiologie und Hydrographie*, **70**(1), 151-164. <https://doi.org/10.1002/iroh.19850700112>
- Hu, Q., Sommerfeld, M., Jarvis, E., Ghirardi, M., Posewitz, M., Seibert, M. & Darzins, A. (2008). Microalgal triacylglycerols as feedstocks for biofuel production: Perspectives and advances. *The Plant Journal*, **54**(4), 621-639. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3113X.2008.03492.x>
- INE (Instituto Nacional de Ecología) (1999). Programa de Manejo de la Reserva de la Biosfera de La Encrucijada. SEMARNAP, México. https://www.conanp.gob.mx/datos_abiertos/DGCD/50.pdf
- Indrayani, I., Moheimani, N. R., de Boer, K., Bahri, P. A. & Borowitzka, M. A. (2020a). Temperature and salinity effects

- on growth and fatty acid composition of a halophilic diatom, *Amphora* sp. MUR258 (Bacillariophyceae). *Journal of Applied Phycology*, **32**, 977-987.
- Indrayani, I., Haslianti, H., Asmariani, A., Muskita, W. & Balubi, A. M. (2020b). Growth, biomass and lipid productivity of a newly isolated tropical marine diatom, *Skeletonema* sp. UHO29, under different light intensities. *Biodiversitas Journal of Biological Diversity*, **21(4)**, 1498-1503. <https://doi.org/10.13057/biodiv/d210430>
- Jasprica, N. & Hafner, D. (2005). Taxonomic composition and seasonality of diatoms in three Dinaric karstic lakes in Croatia. *Limnologica*, **35(4)**, 304-319. <https://doi.org/10.1016/j.limno.2005.08.003>.
- Kaleli, A. & Akçaalan, R. (2021). Checklist of marine diatoms from the Turkish coastal waters with updated nomenclature. *Aquatic Research*, **4(1)**, 88-115. <https://doi.org/10.3153/AR21008>
- Khan, M. J., Bawra, N., Verma, A., Kumar, V., Pugazhendhi, A., Joshi, K. B. & Vinayak, V. (2021). Cultivation of diatom *Pinnularia saprophila* for lipid production: A comparison of methods for harvesting the lipid from the cells. *Bioresource Technology*, **319**, 124129. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.124129>
- Lang, I., Hodac, L., Friedl, T. & Feussner, I. (2011). Fatty acid profiles and their distribution patterns in microalgae: a comprehensive analysis of more than 2000 strains from the SAG culture collection. *BMC Plant Biology*, **11(1)**, 124. <https://doi.org/10.1186/1471-2229-11-124>.
- Lara Villa, M. A., Moreno Ruiz, J. L. & Amaro Mauricio, E. J. (1996). Fitoplancton: conceptos básicos y técnicas de laboratorio. Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Iztapalapa, Ciudad de México, México
- Lemley, D. A., Adams, J. B. & Bate, G. C. (2016). A review of microalgae as indicators in South African estuaries. *South African Journal of Botany*, **107**, 12-20. <https://doi.org/10.1016/j.sajb.2016.04.008>.
- Li, Y., Deng, L., Walker, E. J. L., Karas, B. J. & Mock, T. (2025). Genetic engineering in diatoms: advances and prospects. *The Plant Journal*, **121(6)**, e70102. <https://doi.org/10.1111/tpj.70102>.
- Lucas, C., Widdows, J., Brinsley, M., Salkeld, P. & Herman, P. (2000). Benthic-pelagic exchange of microalgae at a tidal flat. 1. Pigment analysis. *Marine Ecology Progress Series*, **196**, 59-73. <https://doi.org/10.3354/meps196059>
- Marella, T. K. & Tiwari, A. (2020). Marine diatom *Thalassiosira weissflogii* based biorefinery for co-production of eicosapentaenoic acid and fucoxanthin. *Bioresource Technology*, **307**, 123245. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.123245>
- Madigan, M. T., Martinko, J. M. & Parker, J. (2004). *Brock, biología de los microorganismos*. (p. 1011). Pearson, USA.
- Miho, A. & Witkowski, A. (2005). Diatom (Bacillariophyta) Flora of Albanian Coastal Wetlands Taxonomy and Ecology: A Review. *Proceedings of the California Academy of Sciences*, **56(12)**, 129-145.
- Montes-Cartas, C. G., Castillo-Argüero, S. & López-Portillo, J. (1999). Distribución del manglar en cuatro sistemas lagunares en la costa de Chiapas, México. *Botanical Sciences*, **64**, 25-34. <https://doi.org/10.17129/botsoci.1579>
- Morales, M., Aflalo, C. & Bernard, O. (2021). Microalgal lipids: A review of lipids potential and quantification for 95 phytoplankton species. *Biomass and Bioenergy*, **150**, 106108. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2021.106108>
- Moreno-Ruiz, J. L., Licea, S. & Santoyo, H. (1996). Diatomeas del golfo de California. Universidad Autónoma de Baja California Sur, SEP-FOMES/PROMARCO. pp. 1-273.
- Nascimento, I. A., Marques, S. S. I., Cabanelas, I. T. D., Pereira, S. A., Druzian, J. I., De Souza, C. O., Vich, D. V., De Carvalho, G. C. & Nascimento, M. A. (2013). Screening Microalgae Strains for Biodiesel Production: Lipid Productivity and Estimation of Fuel Quality Based on Fatty Acids Profiles as Selective Criteria. *BioEnergy Research*, **6(1)**, 1-13. <https://doi.org/10.1007/s12155-012-9222-2>
- Nieri, P., Carpi, S., Esposito, R., Costantini, M. & Zupo, V. (2023). Bioactive Molecules from Marine Diatoms and Their Value for the Nutraceutical Industry. *Nutrients*, **15(2)**, 464. <https://doi.org/10.3390/nu15020464>
- Oliver, A., Podell, S., Pinowska, A., Traller, J. C., Smith, S. R., McClure, R., Beliaev, A., Bohutskyi, P., Hill, E. A., Rabines, A., Zheng, H., Zeigler Allen, L., Kuo, A., Grigoriev, I. V., Allen, A. E., Hazlebeck, D. & Allen, E. E. (2021). Diploid genomic architecture of *Nitzschia inconspicua*, an elite biomass production diatom. *Scientific Reports*, **11(1)**, 15592. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-95106-3>
- Pérez-Jiménez, G. M., Rivas-Acuña, Ma. G., León Álvarez, D., Campos Campos, B. & Quiroz-González, N. (2020). Macroalgas de la laguna «El Carmen», Tabasco, México. *Acta Botanica Mexicana*, **127** (e1606), 1-12. <https://doi.org/10.21829/abm127.2020.1606>
- Qin, L., Wang, Z., Sun, Y., Shu, Q., Feng, P., Zhu, L., Xu, J. & Yuan, Z. (2016). Microalgae consortia cultivation in dairy wastewater to improve the potential of nutrient removal and biodiesel feedstock production. *Environmental Science and Pollution Research*, **23(9)**, 8379-8387. <https://doi.org/10.1007/s11356-015-6004-3>
- Sacristán-de Alva, M., Luna-Pabello, V. M., Orta-Ledesma, M. T. & Cruz-Gómez, M. J. (2018). Carbon, nitrogen, and phosphorus removal, and lipid production by three saline microalgae grown in synthetic wastewater irradiated with different photon fluxes. *Algal Research*, **34**, 97-103. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2018.07.006>
- Salama, E.-S., Kurade, M. B., Abou-Shanab, R. A. I., El-Dalatony, M. M., Yang, I.-S., Min, B. & Jeon, B.-H. (2017). Recent progress in microalgal biomass production coupled with wastewater treatment for biofuel generation. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **79**, 1189-1211. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.091>

- Sarayloo, E., Tardu, M., Unlu, Y. S., Simsek, S., Cevahir, G., Erkey, C. & Kavakli, I. H. (2017). Understanding lipid metabolism in high-lipid-producing *Chlorella vulgaris* mutants at the genome-wide level. *Algal Research*, **28**, 244-252. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2017.11.009>
- Shanks, A. L. & McCulloch, A. (2003). Fortnightly periodicity in the abundance of diatom and dinoflagellate taxa at a coastal study site. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, **296**(1), 113-126. [https://doi.org/10.1016/S0022-0981\(03\)00320-4](https://doi.org/10.1016/S0022-0981(03)00320-4)
- Sharma, N., Simon, D. P., Diaz-Garza, A. M., Fantino, E., Messaabi, A., Meddeb-Mouelhi, F., Germain, H. & Desgagné-Penix, I. (2021). Diatoms biotechnology: various industrial applications for a greener tomorrow. *Frontiers in Marine Science*, **8**, 636613. <https://doi.org/10.3389/fmars.2021.636613>
- Shokravi, Z., Shokravi, H., Chyuan, O. H., Lau, W. J., Koloor, S. S. R., Petru, M. & Ismail, A. F. (2020). Improving 'Lipid Productivity' in Microalgae by Bilateral Enhancement of Biomass and Lipid Contents: A Review. *Sustainability*, **12**(21), 9083. <https://doi.org/10.3390/su12219083>
- Suparmaniam, U., Lam, M. K., Lim, J. W., Yusup, S., Tan, I. S., Lau, S. Y. & Kachhwaha, S. S. (2023). Influence of environmental stress on microalgae growth and lipid profile: a systematic review. *Phytochemistry Reviews*, **22**(4), 879-901. <https://doi.org/10.1007/s11101-022-09810-7>
- Tanaka, T., Yoneda, K. & Maeda, Y. (2022). Lipid metabolism in diatoms. In Falcatore & Mock (Eds). *The Molecular Life of Diatoms* (pp. 493-527) Paris: Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-92499-7>
- Teco-Bravo, J. I., Barahona-Pérez, L. F., Reyes-Sosa, C. F., Ku-González, Á. F., Herrera-Valencia, V. A. & Peraza-Echeverría, S. (2019). Enhanced production of triacylglycerols and polyunsaturated fatty acids in novel acid-tolerant mutants of the green microalga *Chlorella saccharophila*. *Bioprocess and Biosystems Engineering*, **42**(10), 1561-1571. <https://doi.org/10.1007/s00449-019-02153-2>
- Teco-Bravo, J. I., Tovar-Juárez, E., Estrada-Santos, Y., Negrete-Moreno, P. M. & López-Arroyo, M. de los Á. (2021a). Aislamiento y cinética de crecimiento de microalgas de la laguna costera «Pampa el Cabildo», Puerto Madero, Chiapas, México. *La Ciencia Aplicada en Chiapas*, **7**, 29-39.
- Teco-Bravo, J. I., Barahona-Pérez, L. F., Peraza-Echeverría, S., Baas-Espínola, F. M., Reyes-Sosa, C. F. & Herrera-Valencia, V. A. (2021b). Lipid profiles of acid-tolerant mutants of the green microalga *Chlorella saccharophila* reveal hydrocarbons and high-value lipids with potential industrial applications. *Bioresource Technology Reports*, **13**, 100636. <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2021.100636>
- Varona-Cordero, F. & Gutiérrez-Mendieta, F. J. (2006). Composición estacional del fitoplancton de dos lagunas costeras del Pacífico tropical. *Hidrobiológica*, **16**(2), 159-174.
- Varona-Cordero, F., Gutierrez-Mendieta, F. J. & Meave Del Castillo, M. E. (2010). Phytoplankton assemblages in two compartmentalized coastal tropical lagoons (Carretas-Pereyra and Chantuto-Panzacola, Mexico). *Journal of Plankton Research*, **32**(9), 1283-1299. <https://doi.org/10.1093/plankt/fbq043>
- Vázquez, G., Aké-Castillo, J. A. & Orduña Medrano, R. E. (2021). *Phytoplankton Catalog of Coastal Systems of the Gulf of Mexico and Caribbean Sea* (1.^a ed.). EPOMEX-UAC. <https://doi.org/10.26359/epomex.cemie102021>
- Velázquez-Sánchez, I. G., Tovar Juárez, E., Estrada Santos, Y., Negrete Moreno, P. M., Herrera Valencia, V. A., Peraza Echeverría, S. & Teco Bravo, J. I. (2023). Nitrogen and phosphorus removal coupled to CO₂ fixation by two green microalgae, *Chlorella* sp. and *Quadrigula* sp., native to the coast of Chiapas, Mexico. *Mexican Journal of Biotechnology*, **8**(4), 68-89. <https://doi.org/10.29267/mxjb.2023.8.4.68>
- Widjaja, A., Chien, C.-C. & Ju, Y.-H. (2009). Study of increasing lipid production from fresh water microalgae *Chlorella vulgaris*. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, **40**(1), 13-20. <https://doi.org/10.1016/j.jtice.2008.07.007>
- Yi, Z., Xu, M., Di, X., Brynjolfsson, S. & Fu, W. (2017). Exploring valuable lipids in diatoms. *Frontiers in Marine Science*, **4**, 17. <https://doi.org/10.3389/fmars.2017.00017>
- Zhu, Z., Sun, J., Fa, Y., Liu, X. & Lindblad, P. (2022). Enhancing microalgal lipid accumulation for biofuel production. *Frontiers in Microbiology*, **13**, 1024441. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2022.1024441>