

Recibido 29 de agosto de 2022. Aceptado 09 de diciembre de 2022. Publicado 23 de diciembre de 2022.

ISSN: 2448-7775

Análisis del comportamiento de *Nannochloropsis oculata* cultivada en un fotobiorreactor bajo condiciones de estrés térmico

ANDREA DE J. GÁRATE OSUNA¹, ANGEL VALDEZ ORTIZ¹, MIGUEL ANGEL FRANCO NAVA³, OSCAR JESÚS GUEVARA PEREDIA³, DAVID ULISES SANTOS BALLARDO^{2*}.

¹Doctorado en Ciencias en Biotecnología. Universidad Autónoma de Sinaloa. Culiacán, Sinaloa, México.

²Ingeniería en Energía, Universidad Politécnica de Sinaloa, Mazatlán, Sinaloa, México,

³Tecnológico Nacional de México, Campus Mazatlán. Mazatlán, Sinaloa, México.

*Autor de correspondencia: dsantos@upsin.edu.mx

RESUMEN Las microalgas son microorganismos que en los últimos años se han vuelto protagonistas en investigación debido a que son candidatas potenciales para su uso en la obtención de compuestos de interés como los lípidos, que pueden ser transformados en compuestos bioenergéticos como el biodiésel. *Nannochloropsis oculata* es una microalga marina que tiene como característica principal sus altos contenidos lipídicos, que han llegado a alcanzar hasta el 70% de su peso total. En esta investigación, se analizó el crecimiento de la microalga *N. oculata* cultivada en un fotobiorreactor piloto, bajo condiciones de estrés por temperatura (35 °C), para analizar su crecimiento mediante dos metodologías de determinación de concentración celular, se reportaron una *tasa de crecimiento específico* de 0.133 días⁻¹, un *tiempo de duplicación* de 5.2 días, valores máximos de densidad celular de 8.63 (± 0.16) x10⁶ cél mL⁻¹, y rendimientos de biomasa de 4.05 (± 0.11) g L⁻¹.

PALABRAS CLAVE— Bioenergía, fotobiorreactor, microalga, estrés térmico.

I. INTRODUCCIÓN

En la actualidad, se ha demostrado que el cambio climático es un problema que ha afectado a niveles alarmantes el medioambiente, la salud e incluso a la sociedad. Este fenómeno ha evolucionado a gran escala, ocasionando que distintas asociaciones y países se hayan visto obligados a tomar acciones y crear planes para la mitigación de la contaminación. Hoy día, gracias al desarrollo de la ingeniería y tecnología, las energías renovables han sido una excelente alternativa para contrarrestar los efectos negativos que el cambio climático ha reflejado en el mundo, teniendo entre las más destacadas la energía solar, eólica y la energía de biomasa, mediante el desarrollo de biocombustibles [1, 2, 3].

Los biocombustibles, son lo análogo a los combustibles convencionales, pero con una diferencia clave: estos son obtenidos de fuentes renovables; y al provenir de éstas, las emisiones de CO₂ son mucho menores, pudiendo llegar a ser incluso nulas, esto debido al ciclo de biomasa [1]. Además, los biocombustibles, capaces de abastecer parcial o totalmente la demanda de combustibles convencionales como gasolinas y diésel. El biodiésel, es un biocombustible obtenido de fuentes oleaginosas, y este se combina con el diésel convencional en distintas proporciones, que pueden ser desde la B5 (5% biodiésel, 95% diésel) hasta la B100 (100% biodiésel), esto dependerá del motor al que se someta la

mezcla [4,5]. Por otro lado, este biocombustible, al obtenerse de fuentes oleaginosas (ricas en lípidos), tiene un amplio espectro de fuentes que se pueden cultivar para la obtención del aceite. En la actualidad, materiales como la soya, la palma y la *Jatropha*, han sido estudiadas para la obtención de biodiésel. Sin embargo, éstos tienen como desventaja que comprometen recursos como las tierras de cultivo y el agua para su crecimiento, entrando en un conflicto social. Es por eso, que se buscan fuentes alternativas para la obtención de lípidos, que no compitan directamente con estos recursos; y entre las fuentes de mayor atracción, se encuentran las microalgas [6, 7].

El uso de microalgas en la actualidad ha despertado el interés de la investigación e industria, debido a que se considera una fuente prometedora para el desarrollo de distintos bioproductos en sectores como la nutrición, la cosmética y la energía; esto debido a sus propiedades de altas tasas de crecimiento, acumulación de compuestos de interés (como lípidos que pueden transformarse a biocombustibles), además de que se pueden obtener grandes cantidades de biomasa en áreas relativamente pequeñas; sin comprometer recursos como tierras de cultivo y agua dulce. Una de las ventajas del uso de estos microorganismos, es que se tiene una gran variedad de especies que pueden ser estudiadas, de acuerdo con las necesidades que se planteen [8, 9, 10]. Para un enfoque bioenergético, específicamente para la obtención

de biocombustibles como biodiésel, las especies de microalgas con alto potencial son aquellos que pueden acumular grandes cantidades de lípidos, como lo son los géneros *Dunaliella*, *Nannochloropsis*, *Isochrysis*, *Scenedesmus*, *Tetraselmis*, *Chlorella*, entre otros [11, 12, 13, 14].

Nannochloropsis oculata es una microalga de agua salada que tiene como características ser una rica fuente de lípidos, tiene altas tasas de crecimiento y alta tolerancia a temperaturas altas y soporta distintas condiciones de salinidad [15]. Esta microalga tiene una importancia puntual en la producción de biocombustibles ya que esta puede acumular hasta el 54% de lípidos (peso seco). También, se ha reportado que esta microalga cultivada bajo condiciones de estrés de temperatura presenta mejoras en el rendimiento de biomasa y acumulación de lípidos [16, 17]. Además, puede contener altas concentraciones de ácidos grasos saturados (mirístico y palmítico) y monoinsaturados (palmitoleico y oleico), que son una buena fuente para obtención de biodiésel, ya que pueden beneficiar algunas propiedades como la estabilidad a la oxidación; igualmente se ha observado la presencia de ácidos grasos como: linoleico, araquidónico, eicosapentaenoico, docosahexaenoico; que en pequeñas cantidades ayuda a parámetros como la calidad y la viscosidad del biodiésel [18, 19, 20, 21].

En la presente investigación, se analizó el crecimiento de la microalga *Nannochloropsis oculata* bajo condiciones de estrés térmico en un fotobiorreactor (FBR) piloto con monitoreo y control de parámetros, esto con el fin de analizar si sus rendimientos de biomasa son factibles para su uso potencial en la industria de los biocombustibles.

II. DESARROLLO

En este apartado se plantea la información correspondiente a los materiales y métodos empleados para la realización de esta investigación, los resultados obtenidos, así como una breve discusión de estos.

A. MATERIALES Y MÉTODOS

1. Material celular

Se utilizó la microalga *Nannochloropsis oculata*, obtenida del laboratorio de Bioenergía de la Unidad Académica de Ingeniería en Energía de la Universidad Politécnica de Sinaloa (UPSIN), ubicada en Mazatlán, Sinaloa.

2. Medios de cultivo microalgal

Se utilizó el medio de crecimiento F/2 reportado por Guillard & Ryther [22] para el cultivo de la microalga en estudio, dicho medio consistió en agua de mar filtrada y esterilizada, con una solución de nutrientes cuya composición final por litro es: 75 mg KNO₃, 5.65 mg

NaH₂PO₄•2H₂O, 4360 mg EDTA, 3150 mg FeCl₃•6H₂O, 0.010 mg CuSO₄•5H₂O, 0.022 mg ZnSO₄•7 H₂O, 0.010 mg CoCl₂•6H₂O, 0.180mg MnCl₂•4H₂O, 0.006 mg Na₂MoO₄•2H₂O, 2 g cianocobalamina cristalina (B12), 0.100 mg tiamina-HC (B1) y 0.001 mg biotina cristalina [22].

B. METODOLOGÍA

1. Cultivo de microalgas

Se realizó el cultivo en un FBR bajo condiciones controladas, teniendo como parámetros fijos una salinidad de 35 (±0.0) g L⁻¹, una temperatura de 35 (±0.2) °C, iluminación de 19x10³ lux, durante 24 h. Además, se suministró aire al cultivo de forma continua y constante (120 L/minuto flujo nominal). Todos estos parámetros eran controlados mediante instrumentación y software, manteniéndolos dentro del límite establecido según lo reportado por Jiménez-González, *et al.* [23]. Las microalgas que se utilizaron como inóculo se colectaron en su etapa de crecimiento exponencial a través de la técnica de transferencias sucesivas [11], donde se creció desde matraces de 500 mL, hasta llegar a un volumen de operación de 80 L en el FBR; comenzando el cultivo con una densidad celular de 5.0 x10⁶ cél mL⁻¹.

2. Cinéticas de crecimiento

Se realizaron mediciones diarias por triplicado durante un periodo de 8 días, que corresponde a la fase de crecimiento exponencial (determinada en ensayos preliminares internos de la microalga de *N. oculata*); para esto, se desarrollaron dos metodologías de medición de densidad celular: (1) conteos celulares, mediante un hematocitómetro (Cámara de Neubauer de doble línea brillante) y un microscopio Labomed Cx1, determinando la densidad celular como el número de células por mililitro (cel mL⁻¹) [25], y (2) determinación de la absorbancia espectrofotométrica, midiendo la absorbancia de las células en suspensión, utilizando un espectrofotómetro JENWAY 6405 UV/Vis, a dos longitudes de onda, de acuerdo a un barrido espectrofotométrico realizado desde los 400 hasta los 700 nm, donde se eligieron los picos de 490 y 685 nm, respectivamente, por ser en las longitudes de onda donde se presentaba mayor absorbancia [26]. Con los datos obtenidos de la cinética de crecimiento, se calculó la tasa de crecimiento específico (μ) Ec. (1), y el tiempo de duplicación (td) Ec. (2) [24, 25], mediante las siguientes ecuaciones:

Tasa de crecimiento específico:

$$\mu = \frac{\ln X - \ln X_0}{t} \quad (1)$$

Tiempo de duplicación:

$$td = \frac{\ln 2}{\mu} \quad (2)$$

donde X es la concentración final y X₀ la concentración inicial, y t el tiempo transcurrido en días.

3. Colecta de biomasa microalgal

La biomasa microalgal se colectó mediante un proceso de floculación-sedimentación. El pH del cultivo se elevó hasta 11 con NaOH (1N) y se dejó reposar durante un periodo de 24 h a temperatura ambiente (25 °C). Posteriormente, para recuperar la pasta microalgal, esta se centrifugó a 5000 rpm x 5 min, y se almacenó a -20 °C. Los rendimientos se calcularon de acuerdo con el total de pasta microalgal obtenida durante el experimento [12].

III. RESULTADOS Y DISCUSIONES

1. Cinéticas de crecimiento

Se realizaron mediciones por triplicado con cada una de las metodologías de determinación de concentración celular, los resultados se muestran en la [Tabla I](#), así como también en la [Fig. 1](#) (gráfica conteos celulares) y [Fig. 2](#) (gráfica conteos celulares vs. absorbancia). Las cinéticas de crecimiento alcanzaron una densidad celular máxima en el día 7, con $8.633 (\pm 0.16) \times 10^6$ cel mL⁻¹, mientras que, con el método espectrofotométrico, la absorbancia máxima se presentó en el día 7, con 0.387 ± 0.002 , esto para la longitud de onda de 490 nm, mientras que para la longitud de onda de 685 nm el valor máximo se reportó en el día 9, siendo de 0.363 ± 0.001 ; sin embargo, en el día 7 se presentó una absorbancia alta con un valor muy similar (0.352 ± 0.001).

El crecimiento de a microalga a 35 °C, concuerda con lo reportado con Navarro-Peraza [26], donde analizó el cultivo de *Nannochloropsis* sp. bajo cuatro tratamientos distintos, donde el tratamiento de medio F/2 a 35°C coincide con el comportamiento encontrado en esta investigación, donde la microalga no superó los 10.0×10^6 cél mL⁻¹, para el día 8 de su cinética. De igual manera, Hernández-Molejón, *et al.* [27], obtuvieron el mismo comportamiento que en esta investigación para la microalga *Nannochloropsis gaditana*, alcanzado una densidad celular inferior a 10 millones de células por mililitro a los 35 °C.

El crecimiento de la microalga se analizó por un periodo de 9 días, como se visualiza en las [Figs. 1 y 2](#), donde la cantidad de días transcurridos son 8 días netos. Se observó un comportamiento de la microalga típico de los microorganismos, presentando valores de tasa de crecimiento específico (μ) de 0.133 días⁻¹, y un tiempo de duplicación (td) de 5.2 días.

Estos resultados se pueden comparar con lo obtenido por distintos autores, Navarro-Peraza, *et al.* [26] obtuvo una μ de 0.165 d⁻¹, para *Nannochloropsis* sp. a 35 °C en medio F/2, un valor muy similar a lo obtenido en este trabajo. También, Peng, *et al.* [28] obtuvo una μ de 0.30 d⁻¹, siendo una tasa mejor de lo encontrada en esta investigación, a la misma temperatura (35 °C). Para *Nannochloropsis* sp., Kawaroe, *et al.* [29], encontraron una μ dentro del rango de 0.19 - 0.30 d⁻¹, y una td de 2.27 - 3.51 d, sin embargo, es importante destacar

que esta microalga no fue sometida a estrés térmico, por lo que estos parámetros de eficiencia no se ven afectados, ya que, al incrementar la temperatura, puede haber un decremento en la concentración celular [29, 30].

TABLA I. PARÁMETROS DE CRECIMIENTO DE LA MICROALGA N. OCLATA.

MÁX D (cél mL ⁻¹)	$8.63 \pm 0.16 \times 10^6$
Día MÁX ^a	7
MÁX Abs 490 nm (u.a.)	0.387 ± 0.002
Día MÁX ^b 490 nm	7
MÁX Abs 685 nm (u.a.)	0.363 ± 0.001
Día MÁX ^b 685 nm	9
μ (días ⁻¹)	0.133
td (días)	5.20
Rendimiento (g L ⁻¹)	4.05 ± 0.11
Productividad (g L ⁻¹ día ⁻¹)	0.506 ± 0.14

MÁX D: Densidad celular máxima; MÁX ABS: Absorbancia máxima; DÍA MÁX: Día de cultivo con el máximo reportado; U.A.: Unidad arbitraria; CÉL: Células; ML: Mililitro; a: Valor correspondiente a densidad celular; b: Valor correspondiente a absorbancia.

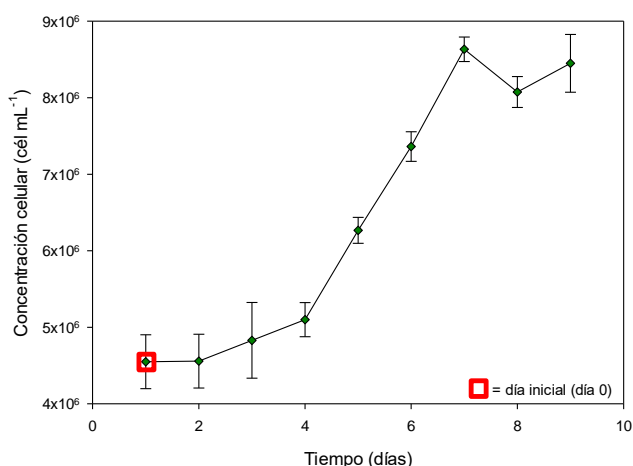


Fig. 1. Cinética de crecimiento *Nannochloropsis oculata* a 35 °C en FBR por conteos celulares con hematocítmetro.

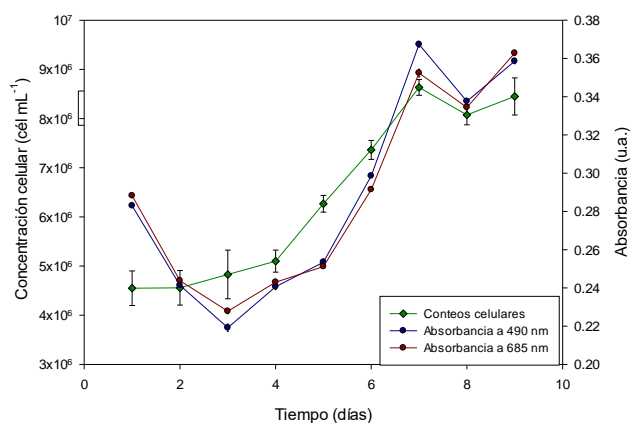


Fig. 2. Cinética de crecimiento *Nannochloropsis oculata* a 35 °C en FBR (conteos celulares vs. absorbancias).

Con respecto a los rendimientos obtenidos en el trabajo, se obtuvo un rendimiento total de 4.05 g L^{-1} de biomasa húmeda al final de cada lote (8 días), y una productividad de biomasa de $0.506 \text{ g L}^{-1} \text{ día}^{-1}$. Esto se puede comparar con lo reportado por Peng, *et al.* [28] donde obtuvieron rendimientos más bajos de lo obtenido en esta investigación, teniendo $0.63 \pm 0.03 \text{ g L}^{-1}$ para la microalga *Nannochloropsis* sp. También, Sirin & Sillanp [31], obtuvieron una productividad de biomasa de $0.49 \text{ g L}^{-1} \text{ día}^{-1}$ para *N. oculata*, menor que la que se encontró en esta investigación. Además, autores como Gouveia & Oliveira [30], y Montero-Sánchez, *et al.* [32], para la microalga *Nannochloropsis* sp., que obtuvieron una productividad de biomasa mucho menor, con resultados de 0.003 y $0.09 \text{ g L}^{-1} \text{ día}^{-1}$.

Comparándolas con otros géneros de microalgas que se consideran competencia, tenemos que Sydney, *et al.* [33], para la microalga *Dunaliella tertiolecta*, obtuvo una productividad de $0.42 \text{ g L}^{-1} \text{ día}^{-1}$, valores cercanos a lo obtenido en este trabajo con *N. oculata*. Para la especie *Tetraselmis suecica*, Santos-Ballardo, *et al.* [2] obtuvo una productividad de biomasa de $0.22 \text{ g L}^{-1} \text{ día}^{-1}$.

Las condiciones de cultivo fueron controladas con sistemas externos acoplados al FBR, tales son como la salinidad y temperatura. El sistema de medición de luxes, se acopló en el FBR de manera que su función fuera como un indicador de crecimiento. Este se posicionaba en la pared del fotobiorreactor, y a medida que existía un crecimiento microalgal, este leía menos luxes. Estos comportamientos se pueden visualizar en la Fig. 3.

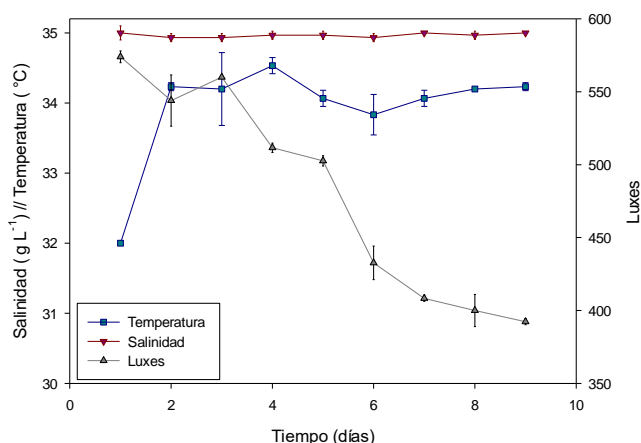


Fig. 3. Monitoreo de parámetros durante la cinética de crecimiento de *Nannochloropsis oculata* a 35°C en FBR.

Con respecto a los parámetros de cultivo en control, es importante tomarlos en cuenta ya que variaciones en éstos podrían influenciar directamente en (1) el comportamiento del crecimiento de las microalgas, (2) el rendimiento de biomasa, (3) la acumulación de lípidos, y (4) el perfil de ácidos grasos presente [33, 34, 35]. Algunos autores mencionan que el estrés por temperatura podría aumentar la cantidad de lípidos presentes; por ejemplo, menciona que al

bajar mucho la temperatura podría aumentar la cantidad de aceites, sin embargo, disminuye significativamente el número de células por mililitro, y eso afecta directamente la productividad de biomasa [17]. Es muy importante mencionar que tiene que existir un buen equilibrio entre la productividad de biomasa y la productividad de lípidos, ya que una buena sinergia entre estas podría garantizar su uso potencial en el sector bioenergético [12]. La salinidad es un factor importante en la acumulación de lípidos, ya que se ha demostrado que, si se mantiene en los primeros días de cultivo y después se aumenta, podría beneficiar a la acumulación de lípidos (ya en fase estacionaria) [16]. Con lo discutido anteriormente, es de suma importancia que estos parámetros se estén monitoreando y en medida de lo posible que exista un control, ya que variaciones dentro del cultivo podría comprometer factores tan importantes como productividad de biomasa y de lípidos [36].

IV. CONCLUSIONES

Lo observado en esta investigación del cultivo de *N. oculata* bajo estrés térmico en un FBR con parámetros controlados, fueron coincidentes con lo reportado anteriormente en cuanto a los valores de concentración celular alcanzados, y se obtuvieron mejores rendimientos de biomasa que en investigaciones previas realizadas por distintos autores. Esto puede indicar que la microalga, además de ser una candidata de interés para la aplicación en sectores de bioenergía (específicamente para la creación de biocombustibles como biodiésel), bajo un estrés térmico de 35°C , abre un panorama para que esta especie sea capaz de escalarla a cultivos al exterior, siendo así un paso para optimizar recursos y que esta tecnología tenga un mejor alcance y mayor factibilidad técnico-económica.

REFERENCIAS

- [1] Santos-Ballardo, D. U., Valdez-Ortiz, Á., & Mejías-Brizuela, N. Y. (2017). Análisis del uso potencial de microalgas marinas para el desarrollo de biorefinerías energéticas en México. En J. E. Sánchez-Cano, N. Y. Mejías-Brizuela, & M. d. Sánchez-Carreira, Estudios Estratégicos del Sector Energético (1ra ed., págs. 86-126). México, México: Martínez Editorial.
- [2] Santos-Ballardo, D. U., Valdez-Ortiz, Á., & Rossi-Heras, S. (2016). Energía verde a partir de microalgas: Biogás como estrategia para una biorefinería sustentable. Antecedentes, retos y fundamentos. Saarbrücken, Deutschland / Alemania.: Editorial Académica Española.
- [3] Hernández-Pérez, A., & Labbé, J. (2014). Microalgas, cultivos y beneficios. Revista de Biología Marina y Oceanografía, 49(2), 157-173.
- [4] Ganduglia, F., León, J. G., Gasparini, R., Huarte, G., Estrada, J., Rodríguez, M., & Filguerías, E. (2009). Manual de Biocombustibles. Montevideo, Uruguay: ARPEL ICA.
- [5] Medina Ramírez, I., Chávez Vela, A., & Jágueri Rincón, J. (2010). Biodiesel, un combustible renovable. Investigación y Ciencia, 55, 62-70.
- [6] Loera-Quezada, M. M., & Olguín, E. J. (2010). Las microalgas oleaginosas como fuente de biodiesel: retos y oportunidades. Revista Latinoamericana de Biotecnología Ambiental y Algal., 91-116.
- [7] Vanthoor-Koopmans, M., Wijffels, R. H., Barbosa, M. J., & Eppink, M. H. (2013). Biorefinery of microalgae for food and fuel. Bioresource Technology, 135, 142-149.
- [8] Chew, K. W., Yap, J. Y., Show, P. L., Suan, N. H., Juan, J. C., Ling, T. C., & Chang, J.-S. (2017). Microalgae biorefinery: high value products perspectives. Bioresource technology, 01-43.

- [9] Koyande, A. K., Show, P.-L., Guo, R., Tang, B., Ogino, C., & Chang, J.-S. (2019). Bio-processing of algal bio-refinery: a review on current advances and future perspectives. *Bioengineered*, 10(2), 574-592.
- [10] Chisti, Y. (2007). Biodiesel from microalgae. *Biotechnol*, 294-306.
- [11] Santos-Ballardo, D., Font-Segura, X., Sánchez-Ferrer, A., Barrena, R., Rossi, S., & Valdez-Ortiz, A. (2015a). Valorization of biodiesel production wastes: Anaerobic digestion of residual *Tetraselmis suecica* biomass and codigestion with glycerol. *Waste Management and Research*, 250-257.
- [12] Gárate-Osuna, A.J., Santos-Ballardo, D.U., Valdez-Ortiz, A., Ambríz-Pérez, D.L., & Luna-Avelar, K.D. (2020). Análisis del potencial de la microalga *Dunaliella tertiolecta* para producción de biodiesel. *Identidad Energética* (3) 2020 (págs. 41-47), Guanajuato, México.
- [13] Guldhe, A., Ansari, F., Singh, P., & Bux, F. (2017). Heterotrophic cultivation of microalgae using aquaculture wastewater: A biorefinery concept for biomass production and nutrient remediation. *Ecological Engineering*, 47-53.
- [14] Francavilla, M., Kamaterou, P., Intini, S., Monteleone, M., & Zabaniotou, A. (2018). Cascading microalgae biorefinery: Fast pyrolysis of *Dunaliella tertiolecta* lipid extracted-residue. *Algal Research*, 184-193.
- [15] Dagnino, E., Medina, C., Beligni, M., & Chamorro, E. (2014). Evaluación de Lípidos Extraídos de Microalgas *Nannochloropsis oculata* para la Producción de Biodiesel. *Revista Tecnología y Ciencias* (pág 87-92). Mar del Plata, Argentina.
- [16] Chiu SY, Kao CY, Tsai MT, Ong SC, Chen CH, Lin CS. Lipid accumulation and CO₂ utilization of *Nannochloropsis oculata* in response to CO₂ aeration. *Bioresour Technol*. 2009;100(2):833-838.
- [17] Converti A, Casazza A, Ortiz E, Perego P, Borghi M. Effect of temperature and nitrogen concentration on the growth and lipid content of *Nannochloropsis oculata* and *Chlorella vulgaris* for biodiesel production. *Chem Eng Process*. 2009;48(6):1146-1151.
- [18] Knothe, G. (2005). Cetane numbers. Heat of combustion. -- Why vegetable oils and their derivatives are suitable as a diesel fuel. En G. Knothe, J. Van Gerpen, & J. Krahl, *The biodiesel handbook* (págs. 76-80). Urbana, IL.: Elsevier, AOCS Press.
- [19] Hoekman, S., Broch, A., Robbins, C., Cenicerros, E., & Natarajan, M. (2012). Review of biodiesel composition, properties, and specifications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 143-169.
- [20] Tejeda-Benitez, L., Henao-Argumedo, D., Alvear-Alayón, M., & Castillo-Saldarriaga, C. R. (2015). Caracterización y perfil lipídico de aceites de microalgas. *Revista Facultad de Ingeniería*, 43-54.
- [21] Montero-Sánchez, Y., Gallo, A., Gómez, L., Álvarez, I., Sabina, L., Támara, Y., & Ramírez, L. (2012). Productividad de lípidos y composición de ácidos grasos de cinco especies de microalgas. *Investigación y Saberes*, 1(2), 37-43.
- [22] Bligh, E. G., & Dyer, W. J. (1959). A rapid method of total lipid extraction and purification. *Can. J. Biochem. Physiol*. 37(8): 911-917.
- [23] Jiménez-González, A., Adam-Medina, M., Franco-Nava, M. A., & Guerrero-Ramírez, G. V. (2017). Grey-box model identification of temperature dynamics in a photobioreactor. *Chemical Engineering Research and Design* (2017), <http://dx.doi.org/10.1016/j.cherd.2017.03.004>
- [24] Godoy-Hernández, G., & Vázquez-Flota, F. A. (2006). Estimation of Cell Division and Cell Expansion. En V. M. Loyola-Vergas, & F. Vázquez-Flota, *Plant Cell Culture Protocols* (págs. 51-58). Yucatán, México: Humana Press Inc.
- [25] Mikschofsky, H., Hammer, M., Schmidtke, J., König, P., Keil, G., Schirmeier, H., & Broer, I. (2009). Optimization of growth performance of freshly induced carrot suspensions concerning PMP production. *In Vitro Cellular and Developmental Biology Plant*, 45, 740-749.
- [26] Navarro-Peraza, R.S.; Soto-León, S.; Contreras-Andrade, I.; Piñal-Valdez, P.; ViverosGarcía, T.; Cuevas-Rodríguez, E.O.; Nieves-Soto, m. (2017) Effects of temperature and nitrogen limitation on growth kinetics, proximate composition and fatty acid profile of *Nannochloropsis* sp. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, vol. 16, núm. 2, pp. 359-369 Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Iztapalapa Distrito Federal, México.
- [27] Hernández-Molejón, O.G., Álvarez-Lajonchere, L., Comas-González, A., Martínez-Almeida, V. (1996) Efecto de la temperatura y la iluminación sobre el crecimiento de dos microalgas: *Nannochloropsis gaditana* Lubian 1982 y *Tetraselmis tetraethele* (west) Butcher, 1959. *Hidrobiológica* 6(1-2): 43-47.
- [28] Peng, X., Meng, F., Wang, Y. et al. Effect of pH, Temperature, and CO₂ Concentration on Growth and Lipid Accumulation of *Nannochloropsis* sp. *MASCC 11. J. Ocean Univ. China* 19, 1183–1192 (2020).
- [29] Kawaroe, M., Hwangbo, J., Augustine, D., & Putra, H. (2018). Comparison of density, specific growth rate, biomass weight, and doubling time of microalgae *Nannochloropsis* sp. cultivated in Open Raceway Pond and Photobioreactor. *Aquaculture, Aquarium, Conservation & Legislation International Journal of the Bioflux Society (AACL BIOFLUX)*, 740-750.
- [30] Gouveia, L., & Oliveira, A. C. (2009). Microalgae as a raw material for biofuels production. *Journal of Industrial Microbiology and Biotechnology*, 269-274.
- [31] Şirin, S., & Sillanp, M. (2015). Cultivating and harvesting of marine alga *Nannochloropsis oculata* in local municipal wastewater for biodiesel. *Bioresour Technology*, 191, 79-87. doi: 10.1016/j.biortech.2015.04.094.
- [32] Montero-Sanchez, Y., Gallo, A., Gómez, L.M., Álvarez, I., Sabina, L.C., Támara, Y., Álvarez, A., Alfonso, M.C., Ramirez, L.R. (2012) Productividad de lípidos y composición de ácidos grasos de cinco especies de microalgas. *Investigación y saberes* (1, 2): 37-43.
- [33] Sydney, E. B., Stum, W., Carvalho, J. C., Thomaz-Soccol, V., Larroche, C., Pandey, A., & Soccol, C. R. (2010). Potential carbon dioxide fixation by industrially important microalgae. *Bioresour Technology*, 5892–5896.
- [34] Martínez Roldán Aj, Ponce-Noyola Mt, Esparza García F, Cristiani Urbina E, Torzillo G, Cañizares Villanueva Ro. (2011). Efecto de la concentración de NaCl sobre el crecimiento, consumo de nutrientes y contenido específico de lípidos en *Nannochloropsis* sp. *Bol Soc Argent Bot*. 2011;46(Supl.2):43-44.
- [35] Pal D, Khozin-Goldberg I, Cohen Z, Boussiba S. (2011). The effect of light, salinity, and nitrogen availability on lipid production by *Nannochloropsis* sp. *Appl Microbiol Biotechnol*. 2011;90(4):1429-1441.
- [36] Torzillo G, Giannelli L, Martinez Roldan Aj, Verdone N, De Filippis P, Scarsella M. (2010). Microalgae culturing in thin-layer photobioreactors. *Chen Eng Trans*. 2010;20(45):265-270.

BIOGRAFÍAS



ANDREA DE J. GÁRATE OSUNA Ingeniera en Energía de profesión. Maestra en Ciencias Aplicadas con área de acentuación en Desarrollo Sustentable y Bioenergía. Actualmente cursando el Doctorado en Ciencias en Biotecnología, enfocado a la línea de investigación de medioambiente, donde ha desarrollado un proyecto de investigación para el aprovechamiento de biomasa de microalgas marinas, para la creación de bioenergía y bioproductos de alto nivel comercial en sectores alimenticios, nutricosmético, y de salud, bajo un concepto de biorrefinerías; con el fin de promover las energías limpias como una alternativa para mitigar los estragos que ha dejado el cambio climático. Autora de artículos de revistas arbitradas y de divulgación científica.



ANGEL VALDEZ ORTIZ Lic. en Ingeniería Bioquímica en UAS; Doctor en Biotecnología de Plantas en CINVESTAV-IPN; Especialización en Ing. Genética Vegetal en EUA y La India; Post-Doctorado en CINVESTAV-IPN (Unidad Irapuato). Miembro del Sistema Nacional de Investigadores desde 2006; Perfil Deseable PROMEP/PRODEP desde 2009; y Sist. Sinaloense de Investigadores y Tecnólogos desde 2012. Premio "Sol al Mérito" 2008, Categoría Ciencia y Tecnología, entregado por la Organización Editorial Mexicana; Dos Premios Nacionales de Ciencia y Tecnología de Alimentos otorgados por CONACYT/COCA COLA (2013 y 2014); Autor de múltiples artículos de investigación en revistas indizadas y de divulgación.



MIGUEL ÁNGEL FRANCO NAVA Ingeniero en Alimentos Marinos; Maestro en Ciencias; Doctor en Ciencias Pesqueras y Acuicultura, por la École Nationale Supérieure Agronomique de Rennes, France. Profesor-Investigador del Tecnológico Nacional de México Campus Mazatlán; Membro del programa de Liderazgo en Energías Renovables y Eficiencia Energética de In-trust y la Universidad de Harvard, USA. Miembro del Sistema Sinaloense de Investigadores y Tecnólogos; Miembro de la Red Mexicana de Bioenergía y de la Red Temática de Bioenergía; Autor de publicaciones científicas en revistas indizadas, actualmente desarrollando investigación relacionada con el desarrollo de tecnologías limpias, energías renovables, específicamente Ingeniería de

Biorreactores que promuevan la sostenibilidad de diversos procesos en sistemas agropecuarios, acuícolas, ambientales y bioenergéticos. Divulgador de la Ciencia.



OSCAR JESÚS GUEVARA PEREDIA Ingeniero en Alimentos Marinos por el Instituto Tecnológico de Mazatlán, Tesista de la Maestría en Ciencias Aplicadas en el área de acentuación en Desarrollo Sustentable y Bioenergía por Universidad Politécnica de Sinaloa. Miembro del cuerpo académico “Biotecnología y Aprovechamiento Integral de Recursos Marinos” ITMAZ-CA-6 en Formación. Con participación en el proyecto de Investigación: Obtención de tortilla de maíz enriquecida con proteína de pescado. En publicaciones de memorias, artículos de difusión y divulgación, e informes técnicos en las líneas de cultivo de microalgas en fotobiorreactores piloto para la obtención de lípidos y ácidos grasos. Participación en la XV Reunión Nacional de la Red Mexicana de Bioenergía (REMBIO, 2019).



DAVID U. SANTOS BALLARDO Ingeniero Bioquímico; Maestro en Ciencia y Tecnología de Alimentos; Doctor en Biotecnología Ambiental, por la Universidad Autónoma de Sinaloa; Profesor-Investigador de la Universidad Politécnica de Sinaloa; Miembro del Sistema Nacional de Investigadores desde 2017; Miembro del Sistema Sinaloense de Investigadores y Tecnólogos como Investigador Honorífico ;Miembro de la Red Mexicana de Bioenergía y de la Red Temática de Bioenergía; Autor de publicaciones científicas en revistas indizadas, actualmente desarrollando investigación relacionada con el desarrollo de energías renovables, específicamente biocombustibles de segunda y tercera generación, así como el desarrollo de biorrefinerías que promuevan la sostenibilidad de diversos procesos para la generación de bioproductos de alto valor.