



Análisis técnico, económico y ambiental de dos técnicas de cultivo y cosecha de microalgas

Technical, economic and environmental analysis of two microalgae cultivation and harvesting techniques

Análise técnica, econômica e ambiental de duas técnicas de cultivo e colheita de microalgas

ARTÍCULO ORIGINAL



Escanea en tu dispositivo móvil
o revisa este artículo en:
<https://doi.org/10.33996/revistaingenieria.v10i26.139>

Pedro Noboa-Romero ¹

pnoboar@unemi.edu.ec

Antonio Parra-Freire ²

parra_antonio@brp.edu.ec

Mauricio Elizalde-Cueva ¹

melizaldec@unemi.edu.ec

César Gavin-Moyano ³

cgavin@uagraria.edu.ec

Carlos Campoverde-Pillajo ¹

ccampoverdep1@unemi.edu.ec

¹ Universidad Estatal de Milagro. Milagro, Ecuador

² Instituto Superior Tecnológico Benjamín Rosales Pareja. Guayaquil, Ecuador

³ Universidad Agraria del Ecuador. Milagro, Ecuador

Artículo recibido 17 de noviembre 2025 / Aceptado 15 de diciembre 2025 / Publicado 05 de enero 2026

RESUMEN

Las microalgas representan una biotecnología prometedora para la mitigación del cambio climático y producción de biomasa, siendo crucial optimizar sus procesos de cultivo y cosecha. El objetivo de este estudio fue analizar técnica, económica y medioambientalmente dos métodos de cultivo y cosecha de microalgas. Para ello, se cultivó Thalassiosira weissflogii mediante técnica batch con medio F/2, monitoreando densidad celular, temperatura e iluminación durante cuatro días, complementando con análisis bibliográfico del cultivo interior, flokulación y filtración. El cultivo batch alcanzó 755,000 cel/ml demostrando factibilidad operativa, mientras el cultivo interior presentó mayor productividad, pero elevados costos energéticos. La flokulación mostró viabilidad económica con costos de \$0.06/m³ y menor consumo energético, en contraste con la filtración que exhibió mayor selectividad, pero complejidades operativas. Se concluye que el método batch es más factible para escalas pequeñas-medianas con menores costos de inversión, mientras la flokulación resulta más sostenible ambientalmente. La selección óptima depende de la escala productiva y aplicación específica.

Palabras clave: Biomasa; Cultivo batch; Flokulación; Fotobioreactor; Microalgas

ABSTRACT

Microalgae represent a promising biotechnology for climate change mitigation and biomass production, making it crucial to optimise their cultivation and harvesting processes. The objective of this study was to technically, economically and environmentally analyse two methods of microalgae cultivation and harvesting. For this purpose, *Thalassiosira weissflogii* was cultivated using a batch technique with F/2 medium, monitoring cell density, temperature and lighting for four days, complemented by a bibliographic analysis of indoor cultivation, flocculation and filtration. The batch culture reached 755,000 cells/ml, demonstrating operational feasibility, while indoor cultivation showed higher productivity but high energy costs. Flocculation showed economic viability with costs of \$0.06/m³ and lower energy consumption, in contrast to filtration, which exhibited greater selectivity but operational complexities. It is concluded that the batch method is more feasible for small-medium scales with lower investment costs, while flocculation is more environmentally sustainable. The optimal selection depends on the production scale and specific application.

Key words: Biomass; Batch culture; Flocculation; Photobioreactor; Microalgae

RESUMO

As microalgas representam uma biotecnologia promissora para a mitigação das alterações climáticas e a produção de biomassa, sendo crucial otimizar os seus processos de cultivo e colheita. O objetivo deste estudo foi analisar técnica, económica e ambientalmente dois métodos de cultivo e colheita de microalgas. Para tal, a *Thalassiosira weissflogii* foi cultivada através da técnica batch com meio F/2, monitorando a densidade celular, temperatura e iluminação durante quatro dias, complementando com análise bibliográfica do cultivo interior, flocação e filtração. O cultivo batch atingiu 755.000 cel/ml, demonstrando viabilidade operacional, enquanto o cultivo interior apresentou maior produtividade, mas elevados custos energéticos. A flocação mostrou viabilidade económica com custos de \$0,06/m³ e menor consumo energético, em contraste com a filtração, que apresentou maior seletividade, mas complexidades operacionais. Conclui-se que o método em lote é mais viável para escalas pequenas-médias com menores custos de investimento, enquanto a flocação é mais sustentável ambientalmente. A seleção ideal depende da escala produtiva e da aplicação específica.

Palavras-chave: Biomassa; Cultura em lote; Flocação; Fotobioreator; Microalgas

INTRODUCCIÓN

En la actualidad, la dependencia de fuentes de energías contaminantes, como los combustibles fósiles y la explotación insostenible de los recursos naturales para el desarrollo de la humanidad, ha originado consigo una serie de consecuencias negativas y desafíos de magnitud global, principalmente el cambio en los patrones del clima y el aumento de la temperatura en el planeta. Ciertamente, el cambio climático afecta negativamente a los sistemas naturales y humanos, por lo que, es un factor de riesgo para el éxito en la reducción de la pobreza, seguridad alimentaria y en general para el desarrollo sostenible (Zamora, 2018). Es probable que el sector agrícola sea el más afectado económicamente; de hecho, en América Latina y Centroamérica sería la más perjudicada en términos de inocuidad alimentaria (Feldman y Cortés, 2016).

Por otra parte, los efectos del calentamiento global ya son evidentes, como el derretimiento de los glaciares y el consecuente aumento progresivo del nivel del mar (Caballero et al., 2007). En el ámbito de la salud, esta problemática ha alterado el equilibrio de los ecosistemas, favoreciendo la proliferación de vectores de enfermedades y la aparición de patologías emergentes (Barboza, 2013). Ante este escenario, resulta urgente acelerar la transición hacia sistemas energéticos más sostenibles como parte de las estrategias de mitigación de los gases de efecto invernadero (Bravo et al., 2017), impulsando el desarrollo de

tecnologías ambientalmente responsables, económicamente viables y técnicamente aplicables.

En este sentido, estas biotecnologías generan oportunidades de empleo y desarrollo económico, al tiempo que promueven la protección ambiental, destacándose entre ellas la energía eólica, hidráulica, solar y las tecnologías bioenergéticas. Estas últimas aprovechan la biomasa vegetal mediante la energía solar captada por la fotosíntesis y almacenada como energía química (Neumann y Jeison, 2015). Dentro de este conjunto de alternativas, los cultivos de microalgas sobresalen por su capacidad para reciclar contaminantes de medios gaseosos y líquidos, incorporándolos a su metabolismo para producir biomasa (Hernández-Pérez y Labbé, 2014). Las microalgas son microorganismos acuáticos microscópicos, mayoritariamente fotoautótrofos, aunque algunas especies presentan metabolismos mixótrofos o heterótrofos (Encarnación et al., 2023).

Además, las microalgas son altamente eficientes en la bioconversión de energía luminosa y en el aprovechamiento de nutrientes como nitrógeno, potasio y fósforo (Colorado et al., 2013), además de desempeñar un papel clave en la mitigación del CO₂ mediante su transformación en biomasa (Guzmán et al., 2021). Aunque su aplicación industrial no es reciente, los avances tecnológicos han impulsado su aceptación, posicionando a la biotecnología de microalgas como un campo en expansión

Pedro Noboa-R. y cols.

orientado al desarrollo de bioprocessos para atender necesidades específicas. Este crecimiento ha permitido diversificar sus aplicaciones y consolidarlas como una plataforma biotecnológica estratégica.

Por ello, las microalgas se emplean principalmente en la producción de alimentos, aunque actualmente destacan por nuevas aplicaciones orientadas a la sostenibilidad, como la agricultura, la ganadería, el tratamiento de aguas residuales y la producción de biocombustibles (Acién et al., 2018). Su biotecnología ha impulsado el desarrollo de nuevas especies y la ampliación de aplicaciones en los ámbitos químico, ambiental, farmacéutico e industrial (Gómez, 2007). Este interés se debe a su rápido crecimiento y alto potencial productivo, condicionado a la disponibilidad de un medio de cultivo adecuado (Santos et al., 2014).

Un medio de cultivo es un entorno artificial para el crecimiento de microalgas que busca reproducir sus condiciones naturales (Escobedo y Calderón, 2021). Estas pueden cultivarse en sistemas abiertos o cerrados con parámetros controlados, incluso en zonas no aptas para la agricultura, contribuyendo a la conservación de suelos y a altos rendimientos energéticos, ya que pueden producir hasta 30 veces más biocombustible que las oleaginosas terrestres (Cerón, 2013; González-Lazo et al., 2019). Los sistemas se clasifican en abiertos y cerrados, como lagunas tipo carrusel y fotobioreactores tubulares o de paneles planos (Collahuazo y Araujo, 2019). La elección del sistema influye directamente en la productividad, los costos

operativos y la calidad de la biomasa obtenida.

De este modo, las microalgas más cultivadas a nivel industrial incluyen Spirulina, Chlorella, Dunaliella y Haematococcus, las cuales pueden desarrollarse en distintos sistemas bajo condiciones adecuadas (Sánchez et al., 2020). La configuración del sistema depende de los requerimientos de la cepa y debe asegurar condiciones óptimas de cultivo, así como una eficiente mezcla y transferencia de masa. Entre las variables clave que influyen en el crecimiento se encuentran la temperatura, la radiación solar, el pH y el oxígeno disuelto (Rodríguez et al., 2019). Aunque los reactores abiertos son los más utilizados, presentan desventajas al estar expuestos a contaminantes y a las condiciones ambientales externas (González et al., 2022).

En contraste, los sistemas cerrados o fotobioreactores (FBR) evitan el contacto de las microalgas con el medio externo y ofrecen ventajas frente a los sistemas abiertos, especialmente por la reducción de la contaminación (Martínez y Ramírez, 2017). Estos dispositivos permiten el cultivo de microorganismos fotosintéticos bajo condiciones controladas de luz, pH, CO₂, mezclado y temperatura (García-Romeral et al., 2017). Dado que las microalgas se desarrollan en medios acuosos diluidos, la cosecha es necesaria para separar la biomasa y sus productos, cuyo objetivo es eliminar grandes volúmenes de agua y recuperar biomasa, siendo la floculación y la filtración las técnicas más empleadas (Sandoval y Rubio, 2016; Peralta-Ruiz et al., 2012; Rubio y Leon, 2024). La eficiencia de estas técnicas

determina en gran medida la viabilidad económica del proceso.

Como bien se ha mencionado, las microalgas pueden ser empleadas en una diversidad de aplicaciones y obteniendo excelentes beneficios sobre todo medioambientales, al ser una biotecnología que viene en un crecimiento continuo y mayor aceptación por la población actualmente. No obstante, el implementar una técnica de cultivo y cosecha no es un proceso sencillo, ya que abarca innumerables obstáculos metodológicos para obtener una productividad significativa y de manera rentable. Por ello, la selección adecuada de técnicas y su evaluación comparativa se vuelve un aspecto crítico para el desarrollo de bioprocessos eficientes.

Desde una perspectiva técnica, el acondicionamiento de medios para el cultivo y reproducción de microalgas presenta alta complejidad, especialmente por la necesidad de mantener parámetros ambientales adecuados. Asimismo, la cosecha de biomasa resulta tecnológicamente desafiante debido al tamaño microscópico de los microorganismos en grandes volúmenes de agua, lo que implica un elevado consumo energético y costos significativos que pueden comprometer la viabilidad y el aprovechamiento de sus beneficios (Custódio et al., 2013).

Aunque existen diversos métodos de siembra y extracción, las dificultades son en gran medida comunes y afectan tanto a pequeña como a gran escala. Por ello, resulta fundamental investigar y optimizar continuamente las técnicas de cultivo y cosecha, a fin de mejorar su eficiencia y

viabilidad, permitiendo que las microalgas se consoliden como una alternativa económicamente sostenible y competitiva frente a otras biotecnologías. En este marco, se plantea la necesidad de realizar análisis integrales que consideren simultáneamente los aspectos técnicos, económicos y ambientales. Por tanto, el objetivo de este estudio fue analizar técnica, económica y medioambientalmente dos métodos de cultivo y cosecha de microalgas.

MÉTODO

El presente estudio se desarrolló mediante un enfoque mixto que combinó trabajo experimental y revisión bibliográfica. Esta metodología resulta particularmente adecuada para alcanzar los objetivos propuestos, ya que permite integrar datos empíricos con evidencia científica consolidada, proporcionando una perspectiva integral sobre las técnicas de cultivo y cosecha de microalgas.

La selección de un enfoque mixto se justifica porque la investigación en biotecnología de microalgas requiere validación experimental de los procesos, lo que se logra mediante la fase experimental controlada. De igual forma, la comparación con otras técnicas no implementadas experimentalmente demanda un análisis bibliográfico riguroso que permita contextualizar los resultados dentro del estado del arte. Esta combinación metodológica es especialmente relevante en estudios de viabilidad técnica, económica y ambiental, donde la información experimental debe complementarse con análisis comparativos basados en literatura

Pedro Noboa-R. y cols.

especializada (Escobedo y Calderón, 2021; Norsker et al., 2011). Asimismo, el enfoque mixto permite triangulación de datos, mejorando la confiabilidad de las conclusiones al confrontar hallazgos experimentales con evidencia bibliográfica (Guzmán et al., 2021).

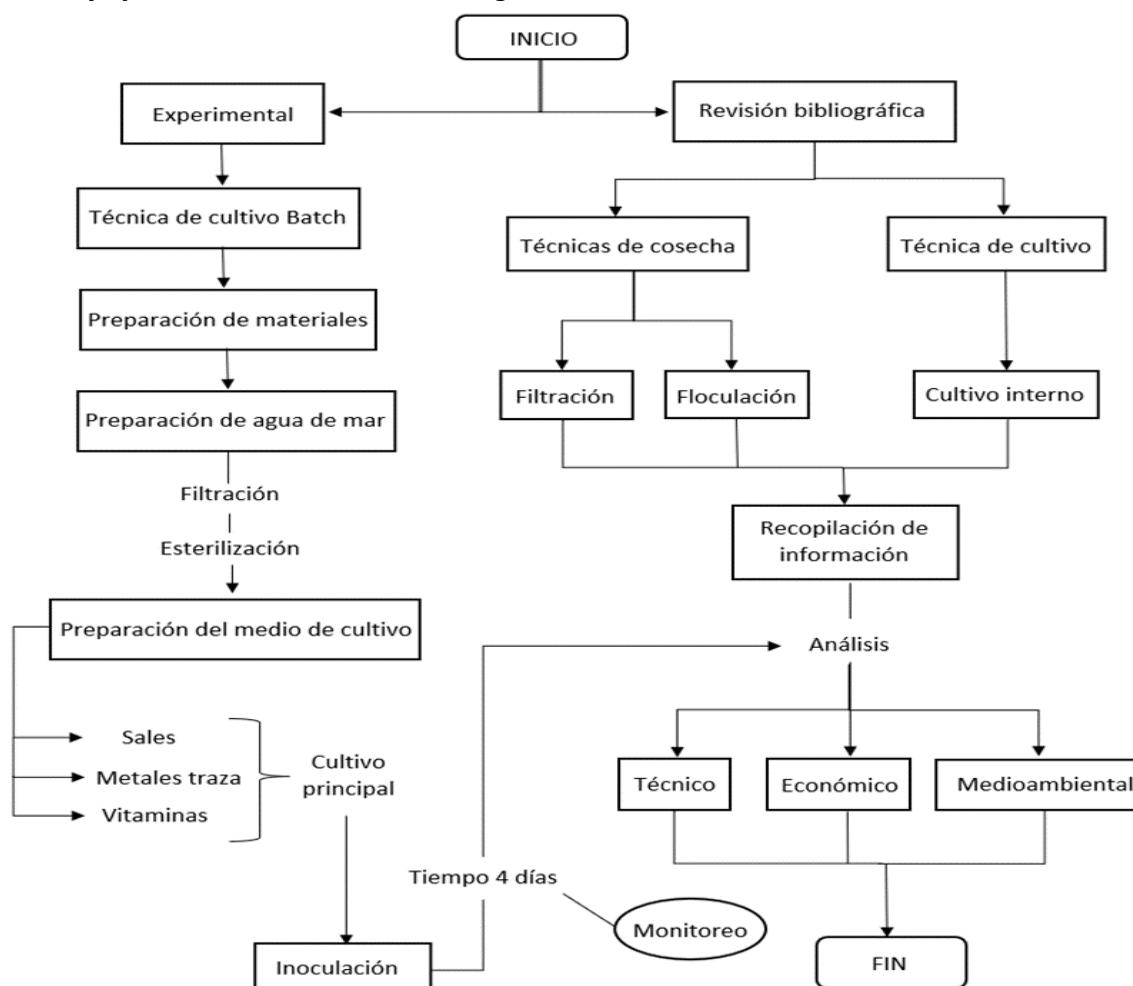
El diseño de estudio es descriptivo-comparativo a escala piloto, lo que resulta apropiado para esta investigación ya que permite documentar el comportamiento real del cultivo batch bajo condiciones controladas, generando datos cuantitativos de densidad celular, temperatura e iluminación; asimismo, facilita la comparación sistemática de diferentes técnicas de cultivo y cosecha mediante criterios técnicos, económicos y ambientales estandarizados. También, proporciona información suficiente para la toma de decisiones informadas sin requerir la inversión de recursos en estudios a escala industrial, reduciendo costos y tiempo; y es coherente con investigaciones previas en biotecnología de microalgas que han utilizado diseños similares para evaluar viabilidad de nuevas técnicas (Acién et al., 2018; Matter et al., 2019).

La fase experimental se realizó en las instalaciones de la empresa FITOSERVICE, implementando la técnica de cultivo batch a escala piloto, mientras que el análisis de las técnicas de cultivo interior, floculación y filtración se realizó mediante revisión de literatura científica especializada. Esta estrategia dual permite validar experimentalmente el método más accesible (batch) mientras se aprovecha el conocimiento acumulado en literatura para

evaluar técnicas más complejas o de mayor costo operativo.

Se seleccionó la cepa *Thalassiosira weissflogii*, una diatomea céntrica de rápido crecimiento y elevado valor nutricional, proporcionada en una fiola madre de 450 ml. El proceso inició con la preparación y esterilización de materiales mediante horno a 180 °C durante 30 minutos y autoclave a 120 °C a 15 PSI. Se trataron 60 litros de agua de mar mediante filtración con polipropileno a 10, 5 y 1 µm, adición de 2 ml de cloro por litro para desinfección, ajuste de salinidad a 25 ppt, y eliminación del cloro con 1 ml de tiosulfato de sodio por cada 4,5 L, añadiendo finalmente 1 g de EDTA por cada 50 L.

El medio de cultivo utilizado fue el F/2 de Guillard y Ryther, preparando tres soluciones principales: sales (nitrato de sodio 15 g, cloruro de amonio 5,3 g, bifosfato de sodio 1,3 g y metasilicato de sodio 3 g), metales traza (sulfato de cobre 1 g, sulfato de zinc 2,2 g, cloruro de cobalto 1 g, cloruro de manganeso 4,5 g, molibdato de sodio 0,6 g, cloruro férrico 5 g y EDTA 5 g), y vitaminas (biotina 0,1 g, cianocobalamina 0,1 g y tiamina 0,2 g). Todas las soluciones se esterilizaron mediante filtración a 0,22 µm y autoclave a 121 °C y 15 PSI durante 15 minutos. Se acondicionaron tres garrafones de 20 L como fotobioreactores, añadiendo 20 ml de cada solución nutritiva preparada. La inoculación se realizó reproduciendo la fiola madre en tres fiolas de 150 ml, que posteriormente se agregaron a cada garrafón.

Figura 1
Diagrama de flujo del desarrollo de la investigación


El monitoreo se efectuó tres veces diarias hasta alcanzar la fase exponencial, evaluando temperatura (valor óptimo 20-24 °C) mediante termómetro de inmersión, intensidad de luz (valor óptimo 600-800 lux) con luxómetro, y densidad celular utilizando una cámara de Neubauer con microscopio. Para el conteo celular, se utilizó la cámara de Neubauer, un dispositivo de vidrio con una cuadrícula de dimensiones conocidas que permite contar células en un volumen específico de líquido. El cálculo se realizó mediante la fórmula: Nº cel/ml = (Nº cuadro A + Nº cuadro B + Nº cuadro C + Nº cuadro D) · 2500, presentando un margen de error de ± 25%. Adicionalmente, se trasladaron 6

L del cultivo en fase de aceleración a los laboratorios para evaluación complementaria.

Para el análisis técnico de las técnicas de cultivo se evaluaron la productividad de biomasa, eficiencia en mezcla, eficiencia en iluminación, control de temperatura, control de contaminaciones y montaje. En los métodos de cosecha se analizaron eficiencia de cosecha, selectividad, montaje, control y seguridad.

En cuanto al análisis económico, este contempló costos de inversión inicial, costos operativos, costos de insumos e ingresos, calculando el Valor Actual Neto (VAN) y la relación Beneficio/Costo (B/C) con tasa de

Pedro Noboa-R. y cols.

descuento del 9%. El análisis medioambiental evaluó consumo de energía, generación de residuos, eficiencia en el uso de recursos e impacto en la biodiversidad local.

Las técnicas de filtración, floculación y cultivo interno se valoraron mediante escalas cualitativas (alta, baja, media, factible, complejo) conforme a literatura científica analizada, mientras que el método batch experimental se evaluó mediante datos cuantitativos obtenidos durante el periodo de cultivo de cuatro días.

celular satisfactorio. La densidad celular máxima y mínima alcanzadas fueron de 755,000 cel/ml y 667,500 cel/ml respectivamente, coincidiendo en el día cuatro (Tabla 1). Estos valores evidencian un crecimiento consistente y permiten validar la eficiencia del sistema batch en condiciones controladas. En comparación, Gárate et al. (2022) reportaron densidades máximas de $3.39 \pm 0.22 \times 10^6$ cel/ml en el día 12, lo que confirma que los resultados obtenidos en este estudio, aunque menores, son representativos y técnicamente viables.

RESULTADOS

Análisis técnico

Los resultados obtenidos en el cultivo experimental mediante la técnica batch de *Thalassiosira weissflogii* mostraron un desarrollo

Tabla 1

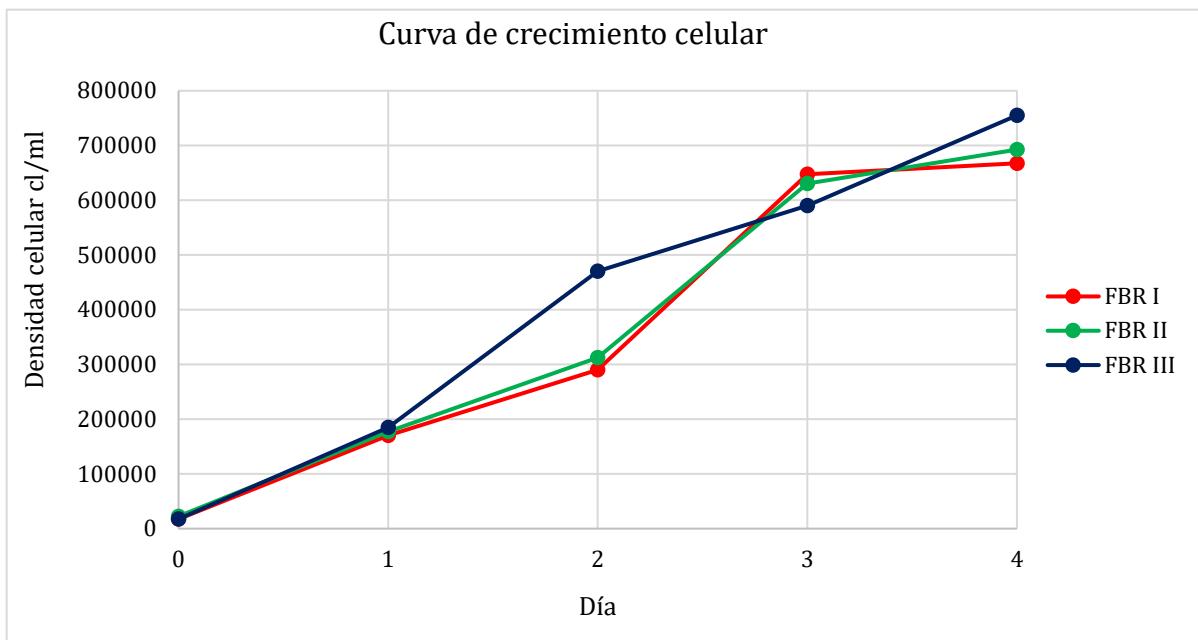
Resultados de los parámetros de monitoreo del cultivo

Parámetro	Día 0	Día 1	Día 2	Día 3	Día 4	Día 5	Día 6	Día 7
FBR I								
(Contaminado)								
Temperatura (°C)	22,9	21,5	22,7	21,3	22	-	-	-
Intensidad de luz (Lux)	609	720	627	759	771	-	-	-
Densidad celular (cel/ml)	17500	170000	29000	647500	667500	-	-	-
FBR II								
Temperatura (°C)	21,2	20	22,6	20,9	23,4	-	-	-
Intensidad de luz (Lux)	658	763	689	799	531	-	-	-

Densidad celular (cel/ml)	22500	177500	33250	692500	692500	-	-	-
FBR III								
Temperatura (°C)	23,7	21,6	23,4	24	21,1	-	-	-
Intensidad de luz (Lux)								
Densidad celular (cel/ml)	657	758	763	741	801	-	-	-
Muestra de 6 L								
Temperatura (°C)	-	-	-	-	-	27	28	27,7
Intensidad de luz (Lux)	-	-	-	-	-	137	249	311
Densidad celular (cel/ml)	-	-	-	-	-	807000	81400	81450
						0	0	

El cultivo batch resultó práctico para el escalonamiento, utilizando garrafones como fotobiorreactores y bombas de aire para el mezclado y oxigenación. El control de la luz y la temperatura fue adecuado, aunque no se registraron parámetros como pH y nutrientes. Se detectó contaminación por protozoarios en el

fotobiorreactor I al tercer día, evidenciando la susceptibilidad del sistema. La fase de latencia se presentó entre los días 0 y 1, seguida de un crecimiento acelerado del día 1 al 4. La fase de latencia se presentó entre los días 0 y 1, seguida de un crecimiento exponencial del día 1 al 4, lo que confirma la capacidad adaptativa de la cepa bajo condiciones iniciales controladas.

Figura 2*Curva de crecimiento celular*

La muestra de 6 L trasladada a los laboratorios presentó resultados desfavorables. Los parámetros monitoreados no fueron los adecuados para el desarrollo óptimo del cultivo (Tabla 1). Las temperaturas registradas oscilaron entre 27-28,3 °C, superando el rango óptimo de 20-24 °C, mientras que la intensidad lumínica fue significativamente inferior (137-311 lux) comparada con el rango deseado de 600-800 lux. A pesar de estas condiciones adversas, la densidad celular mostró un leve incremento, alcanzando 814,500 cel/ml en el día siete, aunque sin adición de nutrientes complementarios.

En contraste, la literatura científica indica que el cultivo cerrado o interno es un sistema más eficiente e innovador en acuicultura, especialmente en términos productivos. Acién Fernández et al. (2018) reportan productividades de biomasa de 1.9 g/L/día para Spirulina, 1.1

g/L/día para Haematococcus pluvialis y entre 1.5 y 5.0 g/L/día para Scenedesmus. Esta mayor productividad se atribuye al control preciso de los parámetros de crecimiento mediante fotobioreactores, que permiten un manejo optimizado y automatizado, con alta eficiencia de mezcla y recirculación, particularmente en sistemas tubulares. No obstante, una limitación técnica relevante es la complejidad de su montaje, que exige personal especializado. La Tabla 2 presenta el análisis técnico comparativo de ambos métodos de cultivo y cosecha.

Tabla 2

Análisis técnico comparativo de los métodos de cultivo y cosecha

Técnica	Productividad	Eficiencia en mezcla	Eficiencia en iluminación	Control de temperatura	Control de agentes contaminantes	Montaje en extracción	Eficiencia	Selectividad	Escalabilidad	Control	Seguridad
Cultivo Batch	Mediana	Justo	Alto	Mediana	Bajo	Factible	-	-	-	-	-
Cultivo Interno	Alto	Uniforme	Alto	Alto	Alto	Complejo	-	-	-	-	-
Floculación	-	-	-	-	-	-	Alto	Medio	Factible	Alto	Alto
Filtración	-	-	-	-	-	-	Alto	Alto	Complejo	Medio	Alto

Respecto a los métodos de cosecha, la literatura indica que la opción más eficiente depende de factores como la especie, la densidad celular y el producto final. Brennan y Owende (2010) señalan que la floculación es una alternativa adecuada para la extracción de biomasa por su operación simple y bajos requerimientos de equipo y mantenimiento. Sin embargo, presenta limitaciones en la calidad de la biomasa debido al uso de floculantes químicos.

Por otra parte, la filtración, aunque es altamente selectiva, puede presentar dificultades operativas, especialmente por el taponamiento al tratar microalgas de bajo tamaño micrométrico. La Tabla 2 expone la evaluación técnica de ambos métodos según los parámetros establecidos, evidenciando que no existe una alternativa universalmente superior, sino que la elección debe ajustarse a las condiciones de producción y a los objetivos comerciales definidos.

Análisis económico

Los resultados económicos obtenidos para el método de cultivo batch realizado experimentalmente se detallan en la Tabla 3, con una inversión inicial de \$100 para la obtención de la cepa, medio de cultivo y bomba de aire, costos de producción de \$40 para tratamiento de agua, y costos fijos de \$6 por consumo eléctrico y agua. Se generaron ingresos de \$60 por la venta de 60 litros de microalga. Los egresos totales ascendieron a \$46, resultando en un VAN de \$14 y una relación B/C de 0.14. Este indicador confirma que la técnica no es rentable en el corto plazo, aunque su bajo costo inicial la convierte en una alternativa accesible para pequeños productores.

Tabla 3

Análisis económico y de rentabilidad de las técnicas de cultivo y cosecha

Técnica	Inversión inicial	Costos operativos	Costos de insumos	Ingresos	VAN	B/C
Cultivo Batch	Mediana	Bajo	Mediana	Mediana	\$14	0.14
Cultivo Interno	Alto	Alto	Bajo	Alto	-	-
Filtración	Alto	Mediana	Bajo	Alto	-	-
Floculación	Mediana	Bajo	Mediana	Mediana	-	-

Una relación B/C menor a 1 indica que la técnica no es rentable en el corto plazo; no obstante, al tratarse de proyectos de largo plazo, la mejora en productividad permite proyectar escenarios a partir de octavo ciclo donde se evidencia viabilidad económica inicial. En contraste, el cultivo interior, aunque más productivo, presenta elevados costos de energía, mantenimiento e inversión inicial, lo que constituye una barrera importante para su adopción generalizada, especialmente en países en desarrollo o para pequeños productores (Norsker et al., 2011).

En la extracción de biomasa, considerada la fase de mayor complejidad económica, la filtración es el método más empleado, aunque presenta altos costos energéticos y de mantenimiento debido al bombeo continuo y al frecuente reemplazo de membranas. Pese a los altos costos, la floculación requiere menor consumo energético y ofrece diversas alternativas; sin embargo, presenta limitaciones relacionadas con los altos costos y corta vida útil de algunos floculantes, los efectos negativos sobre la biomasa y la dependencia de la especie en otros casos (Matter et al., 2019).

No obstante, algunos autores destacan una visión más favorable de la floculación. Peralta-Ruiz et al. (2012) señalan que este método es económicamente viable, con un costo de recolección de \$0.06 USD/m³ de caldo de cultivo, lo que constituye una ventaja relevante frente a otros métodos de cosecha. La Tabla 3 presenta el análisis económico comparativo de los métodos evaluados.

Análisis medioambiental

En el análisis ambiental, el método batch presentó un consumo energético moderado por el uso de aireación, control térmico e iluminación artificial; no obstante, optimiza el aprovechamiento de nutrientes y agua. Su impacto local es bajo, al emplear especies nativas y aplicar un enfoque de economía circular mediante la reutilización o comercialización de fotobiorreactores que no alcanzan la densidad requerida.

Por su parte, el cultivo interno presenta un mayor consumo energético debido al control estricto de los parámetros de crecimiento y al aislamiento del cultivo del medio externo, lo que garantiza condiciones óptimas de reproducción (de Jesus et al., 2017). No obstante, estos sistemas optimizan eficientemente los recursos, generan pocos residuos y minimizan el impacto ambiental asociado a posibles contaminaciones, gracias a su operación en sistemas cerrado.

Desde el enfoque ambiental, la floculación se perfila como la técnica de cosecha más favorable, al permitir el uso de biofloculantes o la autofloculación mediante el control del pH según la especie cultivada (Matter et al., 2019). Este método reduce el uso de químicos, evita problemas de biodegradabilidad y presenta un menor consumo energético en comparación con otras técnicas.

Por su parte, la filtración requiere un alto consumo energético, aunque permite un uso eficiente de los recursos y genera mínimos residuos gracias a su elevada selectividad en la separación de biomasa. La Tabla 4 presenta el

análisis ambiental de las técnicas evaluada.

Tabla 4

Análisis medioambiental de las técnicas de cultivo y cosecha.

Técnica	Consumo de energía	Generación de residuos	Eficiencia en el uso de recursos	Impacto en la biodiversidad local
Cultivo Batch	Mediano	Bajo	Alto	Bajo
Cultivo Interno	Alto	Bajo	Alto	Bajo
Filtración	Alto	Bajo	Alto	Mediano
Floculación	Bajo	Mediano	Mediano	Mediano

Los resultados indican que la selección de técnicas de cultivo y cosecha de microalgas debe equilibrar factibilidad técnica, viabilidad económica y sostenibilidad ambiental. El cultivo batch se presenta como una opción accesible para pequeñas y medianas escalas, con baja inversión inicial, aunque con limitaciones en productividad y control de contaminaciones. En contraste, el cultivo interior ofrece mayor productividad y control operativo, pero enfrenta restricciones económicas y energéticas que limitan su adopción a gran escala.

En la etapa de cosecha, la floculación se perfila como la alternativa más equilibrada, al combinar viabilidad económica (\$0.06/m³), bajo consumo energético y potencial para el uso de biofloculantes. En contraste, la filtración, aunque más selectiva y eficiente, presenta altos costos operativos y exigencias de mantenimiento que limitan su aplicación. En conjunto, estos resultados indican que la optimización de las técnicas de recolección de microalgas debe

ajustarse a las condiciones técnicas, económicas y ambientales específicas de cada contexto.

DISCUSIÓN

Los hallazgos de este estudio proporcionan una perspectiva comparativa sobre la viabilidad de diferentes técnicas de cultivo y cosecha de microalgas, un campo de creciente interés por su potencial en la sostenibilidad (Acién Fernández et al., 2018). La factibilidad operativa del cultivo batch demostrada, alcanzando una densidad celular de 755,000 cel/ml, es un resultado prometedor para aplicaciones a pequeña y mediana escala. No obstante, esta densidad es moderada si se compara con las productividades reportadas para sistemas cerrados, los cuales, como señalan Escobedo y Calderón (2021), permiten un control más estricto de los parámetros de cultivo. Este estudio confirma empíricamente esa afirmación, ya que el cultivo interior, aunque analizado teóricamente, se

asocia con una mayor productividad, pero a expensas de elevados costos energéticos, una barrera significativa para su implementación generalizada, como ya fue advertido por Norsker et al. (2011).

La susceptibilidad a la contaminación observada en uno de los fotobiorreactores experimentales es una limitación práctica importante de los sistemas menos controlados, un riesgo que González et al. (2022) identifican como una de las principales desventajas de los reactores abiertos. Este hallazgo subraya la necesidad de fortalecer las estrategias de bioseguridad y monitoreo, dado que la presencia de contaminantes compromete tanto la productividad como la calidad de la biomasa.

En cuanto a la cosecha, la viabilidad económica de la floculación, con un costo de \$0.06/m³, se alinea con las conclusiones de Peralta-Ruiz et al. (2012), quienes la posicionan como una alternativa rentable. Sin embargo, el uso de floculantes químicos plantea desafíos ambientales y de calidad de biomasa, lo que abre la discusión hacia el desarrollo de biofloculantes como opción sostenible. Brennan y Owende (2010), advierten sobre estas limitaciones, mientras que Matter et al. (2019) resaltan la promesa de biofluctuantes como solución innovadora. La filtración, por su parte, ofrece alta selectividad, pero sus costos operativos y energéticos que limitan su aplicabilidad, configurando un dilema entre eficiencia técnica y viabilidad económica que caracteriza gran parte de las decisiones en bioprocessos.

Entre las limitaciones del presente estudio, se debe reconocer que los experimentos se realizaron a escala piloto, por lo que la extrapolación de los resultados a una producción industrial a gran escala debe hacerse con cautela. El corto período de monitoreo (cuatro días para el cultivo principal) puede no ser representativo de los desafíos operativos a largo plazo. Asimismo, el análisis económico se basa en un único ciclo de producción y en precios de mercado específicos que pueden variar. Finalmente, el enfoque en una sola especie, *Thalassiosira weissflogii*, limita la generalización de los hallazgos a otras microalgas con diferentes características de crecimiento y cosecha. Estas limitaciones, lejos de restar valor al estudio, señalan áreas de mejora y futuras líneas de investigación.

Las implicaciones de esta investigación son tanto prácticas como teóricas. A nivel práctico, ofrece una guía para que los productores seleccionen tecnologías de cultivo y cosecha basadas en un equilibrio entre la inversión inicial, los costos operativos y la sostenibilidad ambiental. El cultivo batch, por su simplicidad y bajo costo, se confirma como un punto de partida viable, mientras que la floculación se destaca como un método de cosecha económicamente atractivo.

A nivel teórico, el estudio refuerza la necesidad de continuar investigando en la optimización de sistemas de cultivo cerrados para reducir su consumo energético y en el desarrollo de biofloculantes eficientes y económicos que minimicen el impacto ambiental. En última

instancia, la selección de una técnica sobre otra no es una decisión universal, sino que debe surgir de un análisis contextualizado que pondere los objetivos productivos y las capacidades específicas de cada proyecto. En última instancia, la selección de una técnica sobre otra no puede ser universal, sino que debe surgir de un análisis contextualizado que considere los objetivos productivos, las capacidades técnicas y las condiciones socioeconómicas de cada proyecto.

CONCLUSIONES

El análisis técnico, económico y ambiental de las técnicas de cultivo y cosecha de microalgas permitió caracterizar de manera integral las fortalezas y limitaciones de cada método, cumpliendo con el objetivo general del estudio. Desde el punto de vista técnico, el cultivo batch demostró ser el más factible por su implementación, debido a su simplicidad operativa y menores requerimientos de infraestructura. No obstante, presentó limitaciones asociadas al control de parámetros críticos y a la susceptibilidad a contaminaciones, evidenciadas por la presencia de protozoarios y por el impacto negativo de condiciones ambientales inadecuadas sobre el crecimiento del cultivo.

En contraste, el cultivo interno mostró productividades significativamente superiores y un mayor control de los parámetros de crecimiento, reduciendo el riesgo de contaminación externa. Sin embargo, su complejidad técnica y la necesidad de personal especializado constituyen barreras relevantes

para su adopción a gran escala. En cuanto a la cosecha, la floculación se posicionó como la técnica más adecuada desde el enfoque técnico, por su operación simple y segura, mientras que la filtración, aunque altamente selectiva, enfrenta dificultades operativas relacionadas con el taponamiento y la escalabilidad.

Desde la perspectiva económica, el método batch destacó por su accesibilidad y bajos costos de inversión y mantenimiento, aunque presenta baja rentabilidad en el corto plazo. Sin embargo, las proyecciones indican viabilidad económica en escenarios de largo plazo, lo que confirma la necesidad de evaluar este tipo de proyectos con horizontes temporales amplios. Por su parte, el cultivo interno mostró limitaciones económicas significativas debido a los altos costos de operación, energía y mantenimiento, lo que restringe su aplicación comercial, especialmente en contextos con recursos limitados.

En la etapa de cosecha, la floculación se consolidó como la alternativa económicamente más viable, con costos de recolección considerablemente bajos, mientras que la filtración presentó mayores costos operativos asociados al consumo energético y al mantenimiento frecuente de los sistemas.

Desde el enfoque ambiental, el cultivo batch mostró un impacto reducido, con consumo energético moderado y un uso eficiente de nutrientes y agua, reforzado por prácticas de reutilización y economía circular. El cultivo interno, si bien maximiza los recursos productivos, evidenció un mayor impacto ambiental debido a su elevado consumo

energético. De manera similar, la filtración presentó limitaciones ambientales asociadas a su alta demanda de energía. En este contexto, la floculación emergió como la técnica de cosecha más favorable ambientalmente, gracias a su bajo consumo energético y al potencial uso de biofloculantes o autofloculación, aunque su efectividad depende de la especie cultivada.

Finalmente, se recomienda complementar los análisis bibliográficos con evaluaciones experimentales de las técnicas de cultivo interno, floculación y filtración, a fin de validar los resultados técnicos, económicos y ambientales bajo condiciones locales. La información generada en este estudio constituye una base relevante para la toma de decisiones informadas y posiciona a la biotecnología de microalgas como una alternativa viable, sostenible y competitiva para aplicaciones energéticas, ambientales e industriales.

Como futuras líneas de investigación, se propone explorar la integración de sistemas de cultivo, combinando las ventajas de los sistemas abiertos y cerrados para optimizar la productividad y reducir costos. Es primordial investigar el desarrollo y aplicación de biofloculantes de bajo costo y alta eficiencia para diferentes especies de microalgas, así como evaluar el potencial de la autofloculación inducida por cambios de pH. Adicionalmente, se recomienda realizar análisis de ciclo de vida completos para cuantificar de manera más precisa el impacto ambiental de cada tecnología y explorar la valorización de la biomasa residual para la obtención de subproductos de alto valor,

mejorando así la rentabilidad y sostenibilidad global del proceso.

REFERENCIAS

- Acién, F., Fernández, M., y Molina, E. (2018). Contribution of microalgae to the bioeconomy. *Mediterranea Económica*, 31(SPE), 315-331. https://www.mediterraneaeconomica.it/images/documenti/e-journal_2018_3_estratto_acien.pdf
- Barboza, O. (2013). Calentamiento Global: “La Máxima Expresión de la Civilización Occidental”. *Revista DEHESA*, (1), 35-38. [https://www2.congreso.gob.pe/sicr/cendocbib/con4_uibd.nsf/BE2351285423ED3E05257C12005B4331/\\$FILE/Barboza_Lizano_O_Calentamiento_Global.pdf](https://www2.congreso.gob.pe/sicr/cendocbib/con4_uibd.nsf/BE2351285423ED3E05257C12005B4331/$FILE/Barboza_Lizano_O_Calentamiento_Global.pdf)
- Bravo, H., Castro, J. C., Gutiérrez, M., y Omaña, E. (2017). Evaluación de una política de sustitución de energías fósiles para reducir las emisiones de CO₂ en Colombia. *Criterio Libre*, 15(27), 137-164. <https://doi.org/10.18041/1900-0642/criteriolibre.2017v15n27.3090>
- Brennan, L., y Owende, P. (2010). Biofuels from microalgae-A review of technologies for production, processing, and extractions of biofuels and co-products. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(2), 557-577. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2009.10.009>
- Caballero, M., Lozano, S., y Ortega, B. (2007). Efecto invernadero, calentamiento global y cambio climático: Una perspectiva desde las ciencias de la tierra. *Revista Digital Universitaria*, 8(10), 1-12. <http://www.revista.unam.mx/vol.8/num10/art78/int78.htm>
- Cerón, M. (2013). Producción de microalgas con aplicaciones nutricionales para humanos y animales. *Cuadernos de Estudios Agroalimentarios*, (5), 79-102. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=5605892>
- Collahuazo, V., y Araujo, S. (2019). Producción de biofertilizantes a partir de microalgas. *Revista Científica y Tecnológica UPSE*, 6(2), 75-80. <https://doi.org/10.26423/rctu.v6i2.483>

Pedro Noboa-R. y cols.

- Colorado, M., Moreno, D., y Pérez, J. (2013). Desarrollo, producción y beneficio ambiental de la producción de microalgas. La experiencia en La Guajira-Colombia. *Ambiente y Desarrollo*, 17(33), 113-128. <https://revistas.javeriana.edu.co/index.php/ambiente y desarrollo/article/view/6049>
- Custódio, L., Pinheiro, I., Serpa da Cruz, R., Lapa, C., de Almeida, J., y Silva Menezes, R. (2013). Biodiesel de microalgas. Avanços e Desafios. *Química Nova*, 36(3), 437-444. <https://doi.org/10.1590/S0100-40422013000300015>
- de Jesus, S. S., Moreira Neto, J., y Maciel Filho, R. (2017). Hydrodynamics and mass transfer in bubble column, conventional stirred and stirred tank bioreactors, using viscous fluid: A comparative study. *Biochemical Engineering Journal*, 119, 70-81. <https://doi.org/10.1016/j.bej.2016.11.019>
- Encarnación, S. A., Figueroa Torres, M. G., Ferrara Guerrero, M. J., Malpica Sánchez, A. del R., y Ángeles Vázquez, J. R. (2023). Microalgas asociadas a un vertedero de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales Cerro de la Estrella, sobre un canal de Xochimilco, Ciudad de México. *Hidrobiológica*, 33(1), 73-86. <https://doi.org/10.24275/uam/itz/dcbs/hidro/2023v33n1/Figueroa>
- Escobedo, M., y Calderón, A. (2021). Microalgal biomass with high potential for the biofuel industry. *Scientia Agropecuaria*, 12(2), 265-282. <https://doi.org/10.17268/sci.agropecu.2021.030>
- Feldman, J., y Cortés, A. (2016). Cambio climático y agricultura: Una revisión de la literatura con énfasis en América Latina. *Trimestre Económico*, 83(332), 459-496. <https://doi.org/10.20430/ete.v83i332.231>
- Gárate, D., Ambríz, D., Valdez, A., Avelar, K., Germán, A., y Salazar, D. (2022). Análisis del potencial de la biomasa de Dunaliella tertiolecta para la obtención de ácidos grasos. *La Sociedad Académica*, 30(59). <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.151105>
- García-Romeral, J., Pavía-Gómez, M., García Sainz, T., Chirivella-Martorell, J., y Serrano-
- Aroca, Á. (2017). Principios de biotecnología y bioingeniería en cultivo de microalgas: hidrodinámica, problemas tecnológicos, tipos de sistemas de cultivo, crecimiento, factores limitantes, selección, aislamiento, escalado y caracterización bioquímica. *Revista Iberoamericana Interdisciplinar de Métodos, Modelización y Simulación*, 9, 115-129. <https://polipapers.upv.es/index.php/MMS/article/view/8279>
- Gómez, L. (2007). Microalgas: aspectos ecológicos y biotecnológicos. *Revista Cubana de Química*, XIX(2), 3-20. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=443543711001>
- González, J., Rodríguez, E., Sánchez, G., Fernández, G., y Viso, A. (2022). Optimización de temperatura en reactores raceway para la producción de microalgas mediante regulación de nivel. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática industrial*, 19(2), 164-173. <https://doi.org/10.4995/riai.2021.15586>
- González-Lazo, Y., Rodríguez-Ramos, P. A., Sánchez-Borrotto, Y., Teresa-Lombardi, A., & Cancio, C. (2019). Diseño y simulación de un fotobioreactor para el cultivo de la microalga Chlorella vulgaris. *Ingeniería Mecánica*, 22(3), 168-177. <http://www.ingenieriamecanica.cujae.edu.cu/index.php/revistaim/article/view/675>
- Guzmán, J. L., Acién, F. G., y Berenguel, M. (2021). Modelling and control of microalgae production in industrial photobioreactors. *RIAI - Revista Iberoamericana de Automática e Informática industrial*, 18(1), 1-18. <https://doi.org/10.4995/riai.2020.13604>
- Hernández-Pérez, A., y Labbé, J. I. (2014). Microalgas, cultivo y beneficios. *Revista de Biología Marina y Oceanografía*, 49(2), 157-173. <https://dx.doi.org/10.4067/S0718-19572014000200001>
- Martínez, L., y Ramírez, L. (2017). Estado actual de las empresas productoras de microalgas destinadas a alimentos y suplementos alimenticios en América Latina. *Revista Venezolana de Ciencia y Tecnología de Alimentos*, 8(2), 130-147. <https://www.rvcta.org/index.php/rvcta/article/view/e8203>

- Matter, I. A., Hosny, G., Jurg, M., Seo, J. Y., Kim, Y. E., Lee, Y. C., y Oh, Y. K. (2019). Flocculation harvesting techniques for microalgae: A review. *Applied Sciences (Switzerland)*, 9(15), 3069. <https://doi.org/10.3390/app9153069>
- Neumann, P., y Jeison, D. (2015). Contribución energética de la digestión anaerobia al proceso de producción de biodiesel a partir de microalgas. *Revista Chilena de Ingeniería*, 23(2), 276-284. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-33052015000200013>
- Norsker, N. H., Barbosa, M. J., Vermuë, M. H., y Wijffels, R. H. (2011). Microalgal production—A close look at the economics. *Biotechnology Advances*, 29(1), 24-27. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2010.08.005>
- Peralta-Ruiz, Y., Pardo, Y., Canchila, D., y Kafarov, V. (2012). Implementación de la metodología de síntesis y análisis de procesos a la etapa de cosecha de microalgas para la producción de biodiesel. *Prospectiva*, 10(1), 132-144. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=496250751015>
- Rodríguez, E., Guzmán, J. L., Acién, F. G., y Berenguel, M. (2019). Control System for pH in Raceway Photobioreactors Based on Wiener Models. *Processes*, 7(7), 449. <https://doi.org/10.3390/pr7070449>
- Rubio, A., y Leon, B. (2024). Actividades Deportivas para Mejorar el Aprendizaje de la Matriz de Pasos. *Revista Científica de Salud Y Desarrollo Humano*, 5(2), 398-409. <https://doi.org/10.61888/r.s.d.h.v5i2.139>
- Sánchez, J., Loaiza, J., Agualongo, M., y Espinoza, K. (2020). Técnicas de cultivo y métodos de extracción de ácidos grasos a base de microalgas en beneficio de la humanidad. *Agroindustrial Science*, 10(3), 319-328. <https://doi.org/10.17268/agroind.sci.2020.03.15>
- Sandoval, J., y Rubio, D. (2016). Revisión de artículos sobre floculación de microalgas. *Revista de Investigación. Fundación Universidad de América*, (1), 114-132. https://doi.org/10.5909/rc_1.633.59
- Santos, A., González-Arechavala, Y., y Martín-Sastre, C. (2014). Uso y aplicaciones potenciales de las microalgas. *Anales de Mecánica y Electricidad*, 91(1), 20-28. https://www.icae.es/contenidos/publicaciones/anales_get.php?id=3008
- Zamora, M. (2018). Cambio Climático. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 9(Suplemento), 4-7. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v9i0.244>