

Recuperación preliminar de biomasa de *Chlorella vulgaris* y *Phaeodactylum tricornutum* mediante floculación alcalina: estrategia ecoeficiente para sistemas de producción sostenibles

Preliminary recovery of *Chlorella vulgaris* and *Phaeodactylum tricornutum* biomass through alkaline flocculation: an eco-efficient strategy for sustainable production systems

Jorge Bautista Correa^{1,2 *}, Max Castañeda Franco²,
Arturo Mires-Reyes², Paul Baltazar Guerrero^{1,2 *}

1 Carrera de Biología Marina, Ciencias Veterinarias y Biológicas, Universidad Científica del Sur. Lima, Perú.
2 Grupo de Investigación en Acuicultura Sostenible (GIAS), Laboratorio de Investigación en Cultivos Marinos (LICMA), Dirección General de Investigación, Desarrollo e Innovación, Universidad Científica del Sur. Lima, Perú.



Citar como: Bautista Correa *et al.* (2025). «Recuperación preliminar de biomasa de *Chlorella vulgaris* y *Phaeodactylum tricornutum* mediante floculación alcalina: estrategia ecoeficiente para sistemas de producción sostenibles». *South Sustainability*, 6(2), e130.
DOI: 10.21142/SS-0602-2025-e130

Artículo recibido: 1/7/2025
Revisado por pares
Artículo aceptado: 5/9/2025



© Los autores, 2025. Publicado por la Universidad Científica del Sur (Lima, Perú)

* E-mail de correspondencia:
jbautista@cientifica.edu.pe

RESUMEN

El crecimiento poblacional y la creciente demanda de recursos hacen de las microalgas una alternativa sostenible para la producción de biomasa de interés alimentario, energético y ambiental. Sin embargo, la cosecha representa hasta el 30 % de los costos de producción, debido al pequeño tamaño celular y a la baja concentración de biomasa. Entre las estrategias disponibles, la floculación alcalina destaca por su simplicidad, bajo costo y menor impacto ambiental. Este estudio evaluó la recuperación de biomasa de *Chlorella vulgaris* y *Phaeodactylum tricornutum* mediante la adición de NaOH (0.5 M) en condiciones controladas. Se obtuvo una sedimentación completa en 30 minutos y eficiencias de floculación del 80 % y 92 %, respectivamente. Los análisis gravimétricos confirmaron un rendimiento significativo, especialmente en *P. tricornutum*. Esta investigación aporta a la sostenibilidad global al demostrar una técnica que reduce el consumo energético, limita el uso de químicos y permite reutilizar recursos, promoviendo sistemas de producción resilientes y circulares. Se fortalece así la transición hacia modelos biotecnológicos alineados con la economía circular y los Objetivos de Desarrollo Sostenible, especialmente en producción responsable (ODS 12) y acción climática (ODS 13).

Palabras clave: microalgas, hidróxido de sodio, sostenible, cosecha, floculación, economía circular

ABSTRACT

Population growth and the increasing demand for resources position microalgae as a sustainable alternative for biomass production, with applications in the food, energy and environmental sectors. However, due to the small cell size and low biomass concentration, harvesting can account for up to 30% of production costs. Among the strategies available, alkaline flocculation is notable for its simplicity, low cost and lower environmental impact. In this study, we evaluated the biomass recovery of *Chlorella vulgaris* and *Phaeodactylum tricornutum* through the addition of NaOH (0.5 M) under controlled conditions. Complete sedimentation was achieved within 30 minutes, with flocculation efficiencies of 80% and 92%, respectively. Gravimetric analyses confirmed significant yields, particularly for *P. tricornutum*. This research contributes to global sustainability by demonstrating a technique that reduces energy consumption, minimizes chemical use, and enables resource reuse, thereby supporting resilient and circular production systems. This contributes to the transition toward biotechnological models aligned with the circular economy and the Sustainable Development Goals, particularly those associated with responsible production (SDG 12) and climate action (SDG 13).

Keywords: Microalgae, sodium hydroxide, sustainable, harvesting, flocculation, circular economy



Introducción

Se proyecta que la población mundial superará los 9700 millones para 2050 (United Nations, Department of Economic and Social Affairs, 2022), lo que representa un gran desafío para el desarrollo sostenible y la disponibilidad de recursos naturales en la tierra. Esta situación incrementará drásticamente la demanda de alimentos y energía (Van Dijk, 2021), y presionará aún más los sistemas de producción.

Las microalgas, organismos unicelulares fotoautotróficos, poseen la capacidad de acumular biomasa mediante la captura de energía solar y la fijación de dióxido de carbono (CO_2), lo que las convierte en un biorrecurso innovador y altamente prometedor para enfrentar desafíos globales, como el cambio climático, la seguridad alimentaria y la producción sostenible (Udayan et al., 2017; Iñiguez-Moreno et al., 2025). Esta capacidad las posiciona como una alternativa estratégica frente a materias primas convencionales en bioprocesos industriales.

La sostenibilidad en los sistemas de producción de biomasa microalgal no solo depende de la eficiencia técnica o la productividad, sino también del uso racional de recursos hídricos, la minimización de residuos y la posibilidad de reutilizar medios de cultivo. Estos elementos son esenciales para cumplir con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS). En particular, contribuyen al ODS 12 (producción y consumo responsables) y al ODS 13 (acción por el clima) (FAO, 2020; Li et al., 2021).

Por ello, el desarrollo de tecnologías que fomenten sistemas de cultivo cerrados, capaces de recircular nutrientes y reducir la huella ecológica, se considera prioritario en la transición hacia una bioeconomía circular. En este contexto, el interés por el aprovechamiento integral de las microalgas ha crecido significativamente en los últimos años, con aplicaciones en biocombustibles, fertilizantes, industria farmacéutica, cosmética y acuícola, entre otras (Roy y Mohanty, 2019; Vatanpour et al., 2024).

Sin embargo, a pesar de sus beneficios industriales, el elevado consumo energético para su cosecha continúa siendo una barrera crítica. A escala industrial, la recolección representa hasta el 30 % del costo total (Ogbonna y Nwoba, 2021). Por tanto, una cosecha rentable de microalgas dependerá de la utilización eficiente de los recursos, incluyendo el aprovechamiento de residuos y la reutilización de medios.

En los últimos años, las investigaciones en este campo se han orientado hacia el desarrollo de métodos más eficientes, económicos y sostenibles, con el objetivo de optimizar la recuperación de biomasa para diversas aplicaciones: biocombustibles, la biorremediación, la alimentación y la obtención de compuestos de alto valor (Barros et al., 2015; Vatanpour et al., 2024).

Entre las estrategias emergentes, la autofloculación o floculación alcalina destaca por su capacidad para reducir el uso de floculantes químicos, lo que disminuye los costos y el potencial impacto ambiental (Roy y Mohanty, 2019; Vandamme et al., 2012). Estos métodos aprovechan los cambios fisicoquímicos del medio de cultivo para inducir la agregación celular (Wu et al., 2012; Sukenik y Shelef, 1984).

La inducción alcalina es el proceso mediante el cual se eleva el pH del medio de cultivo con una base, como el hidróxido de sodio (NaOH) o el óxido de calcio (CaO), lo que mejora significativamente la eficiencia de cosecha sin generar toxicidad para las células ni requerir coagulantes minerales (Knuckey et al., 2006). Esta técnica, sencilla y efectiva, representa una alternativa prometedora y ambientalmente amigable para la recolección de biomasa microalgal.

Este artículo presenta la primera experiencia en el Perú en recuperación de biomasa de *C. vulgaris* y *P. tricornutum* mediante floculación alcalina con NaOH , desarrollada en la Universidad Científica del Sur.

Materiales y métodos

Procedimiento de cultivo

Las cepas de *C. vulgaris* y *P. tricornutum* utilizadas en este estudio fueron proporcionadas por el Laboratorio de Larvicultura de la Universidad Científica del Sur. El experimento se desarrolló en el Laboratorio de Investigación en Cultivos Marinos (LICMA), ubicado en el puerto de San Andrés, distrito de Pisco, región Ica (Perú), bajo condiciones ambientales controladas.

Para el cultivo de *C. vulgaris*, se implementó un sistema de cultivo tipo *batch* en matraces Erlenmeyer de 500 mL, se empleó agua dulce, la cual fue sometida a filtración con un tamaño de poro de 1 μm , seguida de esterilización mediante autoclave, utilizando un ciclo estándar de calor húmedo a 121 $^{\circ}\text{C}$ y 15 psi durante 20 minutos. Posteriormente, se adicionó 1 mL del medio nutritivo Guillard f/2. De manera similar, el cultivo de *P. tricornutum* se estableció en matraces Erlenmeyer de 500 mL, utilizando un medio marino preparado con agua de mar ajustada a una salinidad de 35 PSU. Esta agua fue filtrada con un tamaño de poro de 1 μm y esterilizada de la misma manera, seguida de la adición del medio Guillard f/2 (Guillard, 1975).

A continuación, se realizó un escalado progresivo en ambas cepas de microalgas; primero a frascos de 2000 mL y luego a contenedores de tereftalato de polietileno de 7 L, en ambos casos con agua filtrada a 1 micra, suplementados con el medio de cultivo Provasoli (Provasoli, 1968).

Los cultivos de *C. vulgaris* y *P. tricornutum* fueron mantenidos a una temperatura (20.0 ± 0.2 $^{\circ}\text{C}$) y fotoperiodo de 12 h luz: 12 h oscuridad estables reguladas mediante un sistema automatizado y con aireación

constante, se registró el pH con un potenciómetro marca Thermo Scientific. La concentración de biomasa se controló mediante conteo directo con cámara de Neubauer (0,1 mm) (Wood *et al.*, 2005), en cinco momentos a lo largo de un periodo de 30 días.

Preparación de la solución alcalina

Para inducir la floculación alcalina, se preparó una solución de hidróxido de sodio (NaOH) al 0.5 M disolviendo 19.99 g de NaOH en 1L de agua destilada y almacenado en un frasco de vidrio (Mebrat, 2021).

Ensayos de floculación alcalina

En los contenedores de 7 L, se añadió de forma controlada la solución de NaOH 0.5 M bajo agitación continua con agitador magnético, hasta alcanzar un pH de 12.0 ± 0.1 . Obtenido este valor, se interrumpió la agitación y se dejó el sistema en reposo estático durante 30 minutos para permitir la formación de flóculos y sedimentación de las microalgas. Concluido el tiempo de sedimentación, el sobrenadante fue separado cuidadosamente por decantación. El sedimento de flóculos microalgales fue recuperado mediante filtración por gravedad utilizando papel filtro Whatman de $0.45 \mu\text{m}$, y se obtuvo biomasa húmeda. Esta biomasa fue transferida a placas Petri estériles y conservada a 4°C hasta su análisis gravimétrico, considerando el peso húmedo y seco (g) (Li *et al.*, 2021; Liu, 2013).

Resultados

Crecimiento de cultivos microalgales

Ambos cultivos iniciaron con una densidad de 8.91×10^4 células/mL y mostraron un crecimiento progresivo durante el ensayo. *Chlorella vulgaris* alcanzó su máxima densidad el día 10 (4.95×10^6 células/mL) y *Phaeodactylum tricornutum* el día 17 (5.62×10^6 células/mL). Las condiciones de cultivo se mantuvieron estables ($20.0 \pm 0.2^\circ\text{C}$; fotoperiodo 12 h luz: 12 h oscuridad; iluminación LED blanca de 2800 lúmenes), con valores iniciales de pH de 8.0 para *C. vulgaris* y 9.0 para *P. tricornutum* antes de la inducción alcalina.

Concluido el cultivo, en el día 30, las densidades celulares registradas fueron de 4.69×10^6 células/mL para *C. vulgaris* y 5.02×10^6 células/mL para *P. tricornutum* (Tabla 1).

Tabla 1. Densidad celular (células/mL) de *C. vulgaris* y *P. tricornutum* durante 30 días de cultivo

Días de cultivo	<i>Chlorella vulgaris</i>	<i>Phaeodactylum tricornutum</i>
	Densidad (cel/mL)	
1	$8.91 \pm 0.040 \times 10^4$	$8.91 \pm 0.040 \times 10^4$
10	$4.95 \pm 0.048 \times 10^6$	$5.45 \pm 0.071 \times 10^6$
17	$4.86 \pm 0.075 \times 10^6$	$5.62 \pm 0.147 \times 10^6$
26	$4.56 \pm 0.042 \times 10^6$	$4.96 \pm 0.076 \times 10^6$
30	$4.69 \pm 0.094 \times 10^6$	$5.02 \pm 0.093 \times 10^6$

Inducción de la floculación alcalina

Acción del inductor

La adición de NaOH 0.5 M indujo la floculación, lo que resultó en la rápida aglomeración de las células microalgales. Este proceso modificó la suspensión dispersa en agregados compactos y definidos, tal como se evidenció en los cultivos de *C. vulgaris* (Figura 1B) y *P. tricornutum* (Figura 1C). Después de un periodo de reposo de aproximadamente 30 minutos, se observó la formación de dos fases nítidas en ambos cultivos, con una fase líquida superior (sobrenadante) y una fase inferior compuesta por los flóculos de microalgas sedimentados (Figuras 1D, 1E).

Estos agregados se depositaron en el fondo del recipiente, dejando un líquido sobrenadante casi libre de células en suspensión. Este comportamiento confirma la alta capacidad de agregación del inductor (NaOH) en la floculación para ambos taxones.

Filtración de la biomasa microalgal

Una vez retirada la fase líquida por decantación, los sedimentos fueron filtrados por gravedad (Figura 1F). Este procedimiento permitió obtener una biomasa húmeda compacta y diferenciada, con tonalidades características: verde intenso en *C. vulgaris* y marrón oscuro en *P. tricornutum* (Figura 1G).

Conservación y análisis gravimétrico

La biomasa, una vez colocada en placas Petri estériles (Figura 1H), fue conservada a 4°C hasta su evaluación gravimétrica (Tabla 2).

Tabla 2. Rendimiento gravimétrico de biomasa húmeda y seca en cultivos de *Chlorella vulgaris* y *Phaeodactylum tricornutum* mediante floculación alcalina

Especie	Peso húmedo (g)	Peso seco (g)
<i>C. vulgaris</i>	65.54	10.12
<i>P. tricornutum</i>	270.12	38.45





Figura 1. Proceso de cultivo, floculación y recuperación de biomasa microalgal: A. Cultivos en botellas de 7 L bajo aireación continua. B. Formación de flóculos en *C. vulgaris* tras adición de NaOH 0.5 M. C. Formación de flóculos en *P. tricornutum*. D, E. Separación de fases tras 30 minutos de reposo. F. Filtración por gravedad con papel Whatman. G. Biomasa húmeda diferenciada por especie. H. Conservación en placas Petri estériles para análisis gravimétrico.

Discusión

Las microalgas presentan un amplio rango de aplicaciones derivadas de su uso, desde producción de biomasa para alimentación, su empleo en acuicultura o su uso como biofertilizante, hasta la obtención de productos de valor terapéutico o industrial (Carmona, 2013). Sin embargo, desarrollar un proceso eficiente de recolección de microalgas es fundamental, ya que esta etapa puede representar entre el 20 % y el 30 % de los costos totales de producción (Rawat *et al.*, 2011; Christenson y Sims, 2011; Danquah *et al.*, 2009; Molina-Grima *et al.*, 2003; Salim *et al.*, 2010).

Estos elevados gastos se deben principalmente al pequeño tamaño celular y a que los cultivos suelen encontrarse en bajas concentraciones. Además, la carga superficial negativa de las microalgas en suspensión dificulta su aglomeración natural (Ummalyma *et al.*, 2016). Cabe destacar que el costo de recuperación de biomasa es inversamente proporcional a la concentración del cultivo; a mayor concentración, menor será el costo de recuperación (Chisti, 2007).

Una recolección eficiente de la biomasa del cultivo es un paso esencial para la producción de insumos a gran escala (Amaro *et al.*, 2011). Las técnicas de recolección primaria incluyen procesos de centrifugación, floculación, filtración, sedimentación, flotación y electroforesis. A diferencia de la centrifugación o la microfiltración, que demandan alta energía o presión, la floculación alcalina induce la agregación celular mediante cambios fisicoquímicos, lo que reduce significativamente el consumo energético y las emisiones de gases de efecto invernadero (Schlesinger *et al.*, 2012; Vandamme *et al.*, 2010).

La elección del método de recolección debe considerar las características de la biomasa —densidad, tamaño celular y tipo de producto esperado— para garantizar eficiencia y viabilidad económica (Barros *et al.*, 2015; Olaizola, 2003).

En este estudio se eligió la floculación alcalina por su potencial económico y sostenibilidad ambiental. Esta técnica permite recuperar biomasa de forma viable, sin generar lodos tóxicos ni efluentes contaminantes y con un consumo energético reducido (Gerardo *et al.*, 2015; Vandamme *et al.*, 2013; Marinho *et al.*, 2023).

Los resultados de este estudio coinciden con lo reportado en la literatura: la adición de NaOH (0.5 M) elevó el pH a 12 ± 0.2 , y logró eficiencias de floculación del 80 % en *C. vulgaris* y del 92 % en *P. tricornutum* tras 30 minutos.

Aunque estos valores son ligeramente menores que los máximos registrados en otras especies evidencian un alto potencial de optimización.

El tratamiento promovió la formación rápida de flóculos, una adecuada clarificación del sobrenadante y la estabilidad de los agregados frente a la agitación, lo cual refleja su eficacia operativa. Estos hallazgos se alinean con estudios previos en los que condiciones alcalinas han mostrado altas eficiencias (>87 %) en especies como *C. vulgaris*, *C. fusca*, *Isochrysis galbana*, *Chlorococcum* sp. y *Scenedesmus* sp. (Butler *et al.*, 2021; Vu *et al.*, 2020; Ummalyma *et al.*, 2016; Reyes y Labra, 2016; Wu *et al.*, 2016; Granados *et al.*, 2012; Yang *et al.*, 2016b; Vandamme *et al.*, 2015), lo que refuerza el fundamento científico y técnico del enfoque aplicado (Wu *et al.*, 2015; Wan *et al.*, 2015; Matter *et al.*, 2019).

La eficiencia del NaOH como floculante varía según el tipo de medio. En sistemas marinos, la presencia de cationes divalentes como el magnesio (Mg^{2+}) favorece la formación de hidróxidos que facilitan la agregación y sedimentación celular. En cambio, en cultivos de agua dulce la baja concentración de estos iones reduce la efectividad del proceso (Cai *et al.*, 2021; Akış y Özçimen, 2019; Wu *et al.*, 2012). Esta diferencia iónica explica la variación gravimétrica observada en nuestro estudio entre *C. vulgaris* y *P. tricornutum*.

La capacidad de floculación depende de factores biológicos como la edad del cultivo, el estado fisiológico y la composición de la pared celular. Además, muchas microalgas liberan sustancias extracelulares ricas en polisacáridos, proteínas y lípidos, que favorecen la adhesión celular, la formación de agregados y la protección frente a condiciones adversas (Taghavijeloudar *et al.*, 2021; Zhou *et al.*, 2024).

La floculación es un proceso multifactorial influido por la especie cultivada, la concentración de biomasa, el pH del medio, la dosis de floculante y la presencia de otros compuestos. La adecuada optimización de estas variables es clave para garantizar un proceso eficiente (Gerde *et al.*, 2014; Liu *et al.*, 2013; Akış y Özçimen, 2019).

Finalmente, es necesario considerar las implicaciones ambientales de los agentes de floculación empleados. La incorporación de floculantes de origen natural o la optimización de los químicos existentes puede reducir significativamente la huella ecológica asociada a la recolección de microalgas (Mubarak *et al.*, 2019).

Conclusiones

Los ensayos demostraron que la floculación alcalina con NaOH (0.5 M) es una técnica efectiva para recuperar biomasa de *Chlorella vulgaris* y *Phaeodactylum tricornutum*. Las eficiencias obtenidas (80 % y 92 %, respectivamente) y los rendimientos gravimétricos confirman la viabilidad operativa del proceso en condiciones controladas.

Los valores de masa húmeda y seca evidencian un rendimiento significativo, especialmente en la microalga marina *P. tricornutum*, lo que reafirma su potencial para aplicaciones biotecnológicas.

En conjunto, los resultados confirman que la floculación alcalina es una herramienta estratégica para sistemas de producción sostenibles, alineada con los principios de la economía circular y con los ODS, en particular producción responsable (ODS 12) y acción climática (ODS 13).

Contribución de autoría

JBC: conceptualización, metodología, recursos, redacción del manuscrito original, supervisión, administración del proyecto. **MCF:** metodología, investigación, revisión del manuscrito. **AMR:** metodología, investigación, revisión y edición, visualización. **PBG:** conceptualización, redacción del manuscrito original, visualización, supervisión, administración del proyecto.

Fuente de financiamiento

Laboratorio de Investigación en Cultivos Marinos, Universidad Científica del Sur.

Conflictos de interés

Los autores declaran no tener conflictos de intereses.

Referencias bibliográficas

- Akış, S. y Özçimen, D. (2019). «Optimization of pH-induced flocculation of marine and freshwater microalgae via central composite design». *Biotechnology Progress*, 35(3). Disponible en: <https://doi.org/10.1002/btpr.2801>
- Amaro, H. M., Guedes, A. C. y Malcata, F. X. (2011). «Advances and perspectives in using microalgae to produce biodiesel». *Applied Energy*, 88(10), pp. 3402-3410. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2010.12.014>
- Barros, A. I., Gonçalves, A. L., Simões, M. y Pires, J. C. M. (2015). «Harvesting techniques applied to microalgae: A review». *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 41, pp. 1489-1500. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.09.037>
- Butler, T. O., Acurio, K., Mukherjee, J., Dangasuk, M. M., Corona, O. y Vaidyanathan, S. (2021). «The transition away from chemical flocculants: Commercially viable harvesting of *Phaeodactylum tricornutum*». *Separation and Purification Technology*, 255, 117733. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2020.117733>
- Cai, J., Wang, Y., Feng, C. y Zhang, X. (2021). «Using ferric sulfate, sodium hydroxide, and chitosan to harvest marine microalgae *Chlorella vulgaris* and recycling the culture medium». *Research Square (preprint)*. Disponible en: <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-164732/v1>
- Carmona, M. y Rendón-Castrillón, L. y Vélez-Salazar, Y. (2013). *Microalgas para la industria alimenticia*. Medellín: Universidad Pontificia Bolivariana.
- Chisti, Y. (2007). «Biodiesel from microalgae». *Biotechnology Advances*, 25(3), pp. 294-306. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2007.02.001>
- Christenson, L. y Sims, R. (2011). «Production and harvesting of microalgae for wastewater treatment, biofuels, and bioproducts». *Biotechnology Advances*, 29, pp. 686-702. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2011.05.015>
- Danquah, M. K., Ang, L., Uduman, N., Moheimani, N. y Forde, G. M. (2009). «Dewatering of microalgal culture for biodiesel production: Exploring polymer flocculation and tangential flow filtration». *Journal of Chemical Technology & Biotechnology*, 84, pp. 1078-1083. Disponible en: <https://doi.org/10.1002/jctb.2137>
- Food and Agriculture Organization. (2020). *The State of World Fisheries and Aquaculture. 2020. Sustainability in action*. Disponible en: <https://doi.org/10.4060/ca9229en>
- Gerardo, M. L., Van Den Hende, S., Vervaeren, H., Coward, T. y Skill, S. C. (2015). «Harvesting of microalgae within a biorefinery approach: A review of the developments and case studies from pilot plants». *Algal Research*, 11, pp. 248-262. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.algal.2015.06.019>
- Gerde, J. A., Yao, L., Lio, J., Wen, Z. y Wang, T. (2014). «Microalgae flocculation: Impact of flocculant type, algae species and cell concentration». *Algal Research*, 3, pp. 30-35. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.algal.2013.11.015>
- Granados, M. R., Acien, F. G., Gómez, C., Fernández-Sevilla, J. M. y Molina-Grima, E. (2012). «Evaluation of flocculants for the recovery of freshwater microalgae». *Bioresource Technology*, 118, pp. 102-110. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2012.05.018>
- Guillard, R. R. L. (1975). «Culture of phytoplankton for feeding marine invertebrates». En W. L. Smith y M. H. Chanley (eds.), *Culture of marine invertebrate animals*. (pp. 26-60). Nueva York: Plenum Press.
- Iñiguez-Moreno, M., González-Meza, G., Araújo, R. G., Flores-Contreras, E. A. y De la Rosa, O. (2025). «Microalgae biomass as a sustainable solution for food security: Advances in biotechnology and their role in achieving Sustainable Development Goals». *Bioresource Technology Reports*, 31, 102183. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2025.102183>
- Knuckey, R., Brown, M., Robert, R. y Frampton, D. (2006). «Production of microalgal concentrates by flocculation and their assessment as aquaculture feeds». *Aquacultural Engineering*, 35(3), pp. 300-313. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2006.04.001>
- Li, Y., Ma, Q., Chen, Q., Sun, Z. y Hu, P. (2021). «Development of an effective flocculation method by utilizing the auto-flocculation capability of *Phaeodactylum tricornutum*». *Algal Research*, 58, 102413. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.algal.2021.102413>
- Liu, J., Zhu, Y., Tao, Y., Zhang, Y., Li, A., Li, T., Sang, M. y Zhang, C. (2013). «Freshwater microalgae harvested via flocculation induced by pH decrease». *Biotechnology for Biofuels*, 6, 98. Disponible en: <https://doi.org/10.1186/1754-6834-6-98>
- Marinho, P. H. O., Hoffmann, N. K. S. A. y Saavedra, N. (2023). «Microalgae recovery via alkaline flocculation in a stabilization pond». *Revista de Gestão Social e Ambiental*, 17(10). Disponible en: <https://doi.org/10.24857/rgsa.v17n10-006>
- Matter, I. A., Bui, V. K. H., Jung, M., Seo, J. Y., Kim, Y.-E., Lee, Y. C. y Oh, Y. K. (2019). «Flocculation harvesting techniques for microalgae: A review». *Applied Sciences*, 9(15). Disponible en: <https://doi.org/10.3390/app9153069>
- Mebrat, Y. (2021). «A laboratory manual for the preparation of chemical reagents, solutions and special indicators». *Cognizance Journal of Multidisciplinary Studies*, 1(12), pp. 1-62. Disponible en: <https://doi.org/10.47760/cognizance.2021.v01i12.001>
- Molina-Grima, E., Belarbi, E. H., Acien Fernández, F. G., Robles-Medina, A. y Chisti, Y. (2003). «Recovery of microalgal biomass and metabolites: Process options and economics». *Biotechnology Advances*, 20(7-8), pp. 491-515. Disponible en: [https://doi.org/10.1016/S0734-9750\(02\)00050-2](https://doi.org/10.1016/S0734-9750(02)00050-2)
- Mubarak, M., Shaija, A. y Suchithra, T. V. (2019). «Flocculation: An effective way to harvest microalgae for biodiesel production». *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 7(4), 103221. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jece.2019.103221>
- Olaizola, M. (2003). «Commercial development of microalgal biotechnology: From the laboratory to the marketplace». *Biotechnology Advances*, 20(7-8), pp. 651-657. Disponible en: [https://doi.org/10.1016/S1389-0344\(03\)00076-5](https://doi.org/10.1016/S1389-0344(03)00076-5)
- Ogbonna, C. N. y Nwoba, E. G. (2021). «Bio-based flocculants for sustainable harvesting of microalgae for biofuel production: A review». *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 139, 110690. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110690>
- Provasoli, L. (1968). «Media and prospects for the cultivation of marine algae». En A. Watanabe y A. Hattori (eds.), *Cultures and collections of algae: Proceedings of the U.S.-Japan Conference, Hakone, September 12-15, 1966* (pp. 63-75). Kioto: Japanese Society of Plant Physiology.
- Rawat, I., Ranjith Kumar, R., Mutanda, T. y Bux, F. (2011). «Dual role of microalgae: Phycoremediation of domestic wastewater and biomass production for sustainable biofuels production». *Applied Energy*, 88(10), pp. 3411-3424. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2010.11.025>
- Reyes, J. F. y Labra, C. (2016). «Biomass harvesting and concentration of microalgae *Scenedesmus* sp. cultivated in a pilot photobioreactor». *Biomass and Bioenergy*, 87, pp. 78-83. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2016.02.014>

- Roy, M. y Mohanty, K. (2019). «A comprehensive review on microalgal harvesting strategies: Current status and future prospects». *Algal Research*, 44, 101683. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.algal.2019.101683>
- Salim, S., Bosma, R., Vermue, M. H. y Wijffels, R. H. (2010). «Harvesting of microalgae by bioflocculation». *Journal of Applied Phycology*, 23, pp. 849-855. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s10811-010-9591-x>
- Schlesinger, A., Eisenstadt, D., Bar-Gil, A., Carmely, H., Einbinder, S. y Gressel, J. (2012). «Inexpensive non-toxic flocculation of microalgae contradicts theories; overcoming a major hurdle to bulk algal production». *Biotechnology Advances*, 30(5), pp. 1023-1030. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2012.01.011>
- Sukenik, A. y Shelef, G. (1984). «Algal autoflocculation—Verification and proposed mechanism». *Biotechnology and Bioengineering*, 26(2), pp. 142-147. Disponible en: <https://doi.org/10.1002/bit.260260206>
- Taghavijeloudar, M., Kebria, D. Y. y Yaqoubnejad, P. (2021). «Simultaneous harvesting and extracellular polymeric substances extrusion of microalgae using surfactant: Promoting surfactant-assisted flocculation through pH adjustment». *Bioresource Technology*, 319, 124224. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.124224>
- Udayan, A., Arumugam, M. y Pandey, A. (2017). «Nutraceuticals from algae and cyanobacteria». En R. P. Rastogi, D. Madamwar y A. Pandey (eds.), *Algal green chemistry* (pp. 65-89). Disponible en: <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-63784-0.00004-7>
- Ummalyma, S. B., Mathew, A. K., Pandey, A. y Sukumaran, R. K. (2016). «Harvesting of microalgal biomass: Efficient method for flocculation through pH modulation». *Bioresource Technology*, 213, pp. 216-221. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.03.114>
- United Nations, Department of Economic and Social Affairs. (2022). *World population prospects 2022. Executive summary*. Disponible en: <https://www.un.org/development/desa/pd/content/world-population-prospects-2022>
- Van Dijk, M., Morley, T., Rau, M. L. y Saghai, Y. (2021). «A meta-analysis of projected global food demand and population at risk of hunger for the period 2010-2050». *Nature Food*, 2(7), pp. 494-501. Disponible en: <https://doi.org/10.1038/s43016-021-00322-9>
- Vandamme, D., Foubert, I. y Muylaert, K. (2013). «Flocculation as a low-cost method for harvesting microalgae for bulk biomass production». *Trends in Biotechnology*, 31(4), pp. 233-239. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.tibtech.2012.12.005>
- Vandamme, D., Foubert, I., Fraeye, I., Meesschaert, B. y Muylaert, K. (2012). «Flocculation of *Chlorella vulgaris* induced by high pH: Role of magnesium and calcium and practical implications». *Bioresource Technology*, 105, pp. 114-119. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2011.11.105>
- Vandamme, D., Foubert, I., Meesschaert, B. y Muylaert, K. (2010). «Flocculation of microalgae using cationic starch». *Journal of Applied Phycology*, 22(4), pp. 525-530. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s10811-009-9488-8>
- Vandamme, D., Pohl, P. I., Beuckels, A., Foubert, I., Brady, P. V., Hewson, J. C. y Muylaert, K. (2015). «Alkaline flocculation of *Phaeodactylum tricornutum* induced by brucite and calcite». *Bioresource Technology*, 196, pp. 656-661. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2015.08.042>
- Vatanpour, V., Khaligh, S. S., Sertgümeç, S., Ceylan-Perver, G., Yüsekdağ, A., Gül, B. Y., Altınbaş, M. y Koyuncu, I. (2024). «A review on algal biomass dewatering and recovery of microalgal-based valuable products with different membrane technologies». *Journal of Environmental Management*, 371, 123182. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.123182>
- Vu, H. P., Nguyen, L. N., Lesage, G. y Nghiem, L. D. (2020). «Synergistic effect of dual flocculation between inorganic salts and chitosan on harvesting microalgae *Chlorella vulgaris*». *Environmental Technology & Innovation*, 17, 100622. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.eti.2020.100622>
- Wan, C., Alam, M. A., Zhao, X. Q., Zhang, X. Y., Guo, S. L., Ho, S. H., Chang, J. S. y Bai, F. W. (2015). «Current progress and future prospect of microalgal biomass harvest using various flocculation technologies». *Bioresource Technology*, 184, pp. 251-257. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2014.11.081>
- Wood, A. M., Everroad, R. y Wingard, L. M. (2005). «Measuring growth rates in microalgal cultures». En R. Andersen (ed.), *Algal culturing techniques* (pp. 269-285). Oxford: Elsevier/Academic Press. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/B978-012088426-1/50019-6>
- Wu, J., Liu, J., Lin, L., Zhang, C., Li, A., Zhu, Y. y Zhang, Y. (2015). «Evaluation of several flocculants for flocculating microalgae». *Bioresource Technology*, 197, pp. 495-501. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2015.08.094>
- Wu, S. C., Xie, X. J., Huan, L., Zheng, Z. B., Zhao, P. P., Kuang, J. X., Liu, X. P. y Wang, G. C. (2016). «Selection of optimal flocculant for effective harvesting of the fucoxanthin-rich marine microalga *Isochrysis galbana*». *Journal of Applied Phycology*, 28, pp. 1579-1588. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s10811-015-0716-0>
- Wu, Z., Zhu, Y., Huang, W., Zhang, C., Li, T., Zhang, Y. y Li, A. (2012). «Evaluation of flocculation induced by pH increase for harvesting microalgae and reuse of flocculated medium». *Bioresource Technology*, 110, pp. 496-502. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2012.01.101>
- Yang, F., Xiang, W., Fan, J., Wu, H., Li, T. y Long, L. (2016b). «High pH-induced flocculation of marine *Chlorella* sp. for biofuel production». *Journal of Applied Phycology*, 28, pp. 747-756. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s10811-015-0576-7>
- Zhou, Y., Cui, X., Wu, B., Wang, Z., Liu, Y., Ren, T., Xia, S. y Rittmann, B. E. (2024). «Microalgal extracellular polymeric substances (EPS) and their roles in cultivation, biomass harvesting, and bioproducts extraction». *Bioresource Technology*, 406, 131054. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2024.131054>

