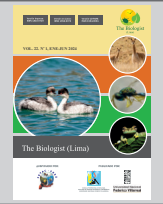




# The Biologist (Lima)



REVIEW ARTICLE / ARTÍCULO DE REVISIÓN


## BIOMASS ENHANCEMENT OF MICROALGAE BY DAIRY EFFLUENTS: A SYSTEMATIC REVIEW


### INCREMENTO DE BIOMASA EN MICROALGAS MEDIANTE EFLUENTES LÁCTEOS: REVISIÓN SISTEMÁTICA


Candy Alvarado-Vergara<sup>1\*</sup>; Milene Marín-Fernandez<sup>1</sup> & Jhaqui Salas-Pastor<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Escuela Académico Profesional Biología y Biotecnología, Facultad Ciencias de la Salud. Universidad Nacional de Cajamarca, Cajamarca 732501, Perú.

\* Corresponding author: calvaradov19\_2@unc.edu.pe

Candy Alvarado-Vergara:  <https://orcid.org/0009-0000-4287-8426>

Milene Marín-Fernandez:  <https://orcid.org/0009-0001-8463-9789>

Jhaqui Salas-Pastor:  <https://orcid.org/0000-0003-2458-1279>

#### ABSTRACT

This systematic review investigated how wastewater from the dairy industry impacts microalgae production, looking to see if it could contribute to increasing biomass and reducing environmental pollution from these landfills. Studies published between 2018 and 2024 in Scielo and Scopus were analyzed, selecting 12 relevant publications for the analysis. It was found that microalgae can effectively take advantage of the nutrients present in dairy effluents, such as nitrogen, phosphorus, and organic matter, being used for their growth. Optimizing culture conditions, including pH, temperature, and lighting, as well as choosing suitable culture systems, such as ponds and photobioreactors, are essential factors. In terms of costs and efficiency, the advantages and disadvantages of the systems to be used must be considered. In conclusion, the use of dairy waste can favor the increase in microalgae biomass, which helps mitigate pollution, offering various biotechnological opportunities.

**Keywords:** Biomass – Microalgae – Milk effluents

#### RESUMEN

Esta revisión sistemática investigó cómo las aguas residuales de la industria láctea impactan en la producción de microalgas, buscando determinar si podrían contribuir al incremento de la biomasa y reducir la contaminación ambiental de estos vertederos. Se analizaron estudios publicados entre 2018 y 2024 en Scielo y en Scopus, seleccionando 12 publicaciones relevantes para el análisis. Se encontró que las microalgas pueden aprovechar eficazmente los nutrientes presentes en los efluentes lácteos, como nitrógeno, fósforo y materia orgánica, siendo utilizados para su crecimiento. La optimización

Este artículo es publicado por la revista *The Biologist (Lima)* de la Facultad de Ciencias Naturales y Matemática, Universidad Nacional Federico Villarreal, Lima, Perú. Este es un artículo de acceso abierto, distribuido bajo los términos de la licencia Creative Commons Atribución 4.0 Internacional (CC BY 4.0) [<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.es>] que permite el uso, distribución y reproducción en cualquier medio, siempre que la obra original sea debidamente citada de su fuente original.



DOI: <https://doi.org/10.62430/rtb20242211730>

de las condiciones de cultivo, incluyendo pH, temperatura e iluminación, así como la elección de sistemas de cultivo adecuados, como estanques y fotobiorreactores, son factores fundamentales. En términos de costos y eficiencia, se deben considerar las ventajas y desventajas de los sistemas a utilizar. En conclusión, el uso de desechos lácteos puede favorecer el incremento de biomasa de microalgas, lo que ayuda a mitigar la contaminación, ofreciendo diversas oportunidades biotecnológicas.

**Palabras clave:** Biomasa – Efluentes lácteos – Microalgas

## INTRODUCCIÓN

Las industrias lácteas generan gran cantidad de aguas residuales ricas en nutrientes (Álvarez *et al.*, 2020). En la última década, la producción de leche ha experimentado un incremento del 2,4%, este crecimiento se mantuvo constante en el año 2021, y se elevó al 2,5% en el año 2022, superando las 2.000 T en producción, especialmente la leche procesada y productos fermentados como yogures y quesos. Evidenciándose en países como Nueva Zelanda, China, Alemania, Francia y Perú (Andina, 2023).

El aumento en la demanda de estos productos lácteos, incrementa la producción de residuos, principalmente agua residual, estimándose entre 2,5 y 3 L por cada L de leche procesada. A nivel mundial, la industria láctea genera entre 4 y 11 millones de T de desechos, aunque estos contienen nutrientes valiosos como lactosuero y lactoferrina (Lione *et al.*, 2021; Rojo, 2022). Estos nutrientes son vitales para el desarrollo de ciertos organismos vivos.

Las microalgas son seres unicelulares, clasificados como organismos eucariotas y procariotas. Son capaces de metabolizar compuestos orgánicos e inorgánicos, utilizando la energía solar para transformarla en energía química. Esta característica les permite aprovechar los nutrientes de los efluentes y utilizarlos para la producción de biomasa (Streit *et al.*, 2017; Rojo, 2022).

Los efluentes lácteos, ricos en nutrientes como nitrógeno, fósforo y materia orgánica, desafían a la gestión ambiental debido al impacto que generan cuando son descargados sin tratamiento adecuado. Por ello, su uso como sustratos para el cultivo de microalgas, constituye una estrategia prometedora en cuanto a soluciones sostenibles y eficientes para producir biomasa y mitigar la contaminación ambiental (Abdelfattah *et al.*, 2023).

El cultivo de microalgas utilizando estos efluentes, son una alternativa ecológica con gran capacidad de reducción de nutrientes (Monzón, 2022), ya que las microalgas utilizan los compuestos presentes, para su crecimiento exponencial en tamaño y número (Microalgas: biotecnología para el saneamiento universal, 2021). De acuerdo con Arenas (2023), las microalgas establecen una relación simbiótica con las bacterias presentes en los efluentes lácteos, constituyendo una estrategia clave para su cultivo.

Por tanto, el objetivo de esta revisión sistemática es determinar si los efluentes lácteos incrementan la biomasa de las microalgas, aprovechando así este residuo lácteo y reduciendo la contaminación ambiental en los vertederos de descarga.

## MATERIALES Y MÉTODOS

Se realizó una revisión sistemática, relacionada con el incremento de biomasa en microalgas mediante el uso de efluentes lácteos. La búsqueda de información comprende el periodo del 2018 hasta el 2024, en las bases de datos: Scopus y Scielo. En la búsqueda de información se emplearon términos clave, en Scopus las palabras “dairy AND effluents AND increase AND biomass AND microalgae”, y en Scielo “effluents AND microalgae”. Se incluyeron artículos con enfoque cuantitativo, cualitativo y mixto.

**Aspectos Éticos:** Los autores afirman que no llevaron a cabo pruebas con seres humanos o animales. Dado que se trata de una revisión sistemática, no implica una evaluación física.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Selección de estudio

Se seleccionaron 30 estudios de las bases de datos según los criterios de inclusión y exclusión, sin ningún artículo

duplicado. Posteriormente 18 artículos fueron excluidos manualmente por desviarse de nuestro campo de estudio, incluyendo únicamente 12 artículos para un análisis más extenso. Finalmente se añadieron dos artículos de investigaciones previamente ya seleccionadas. En la fig. 1 se muestra el diagrama de flujo del proceso de selección.

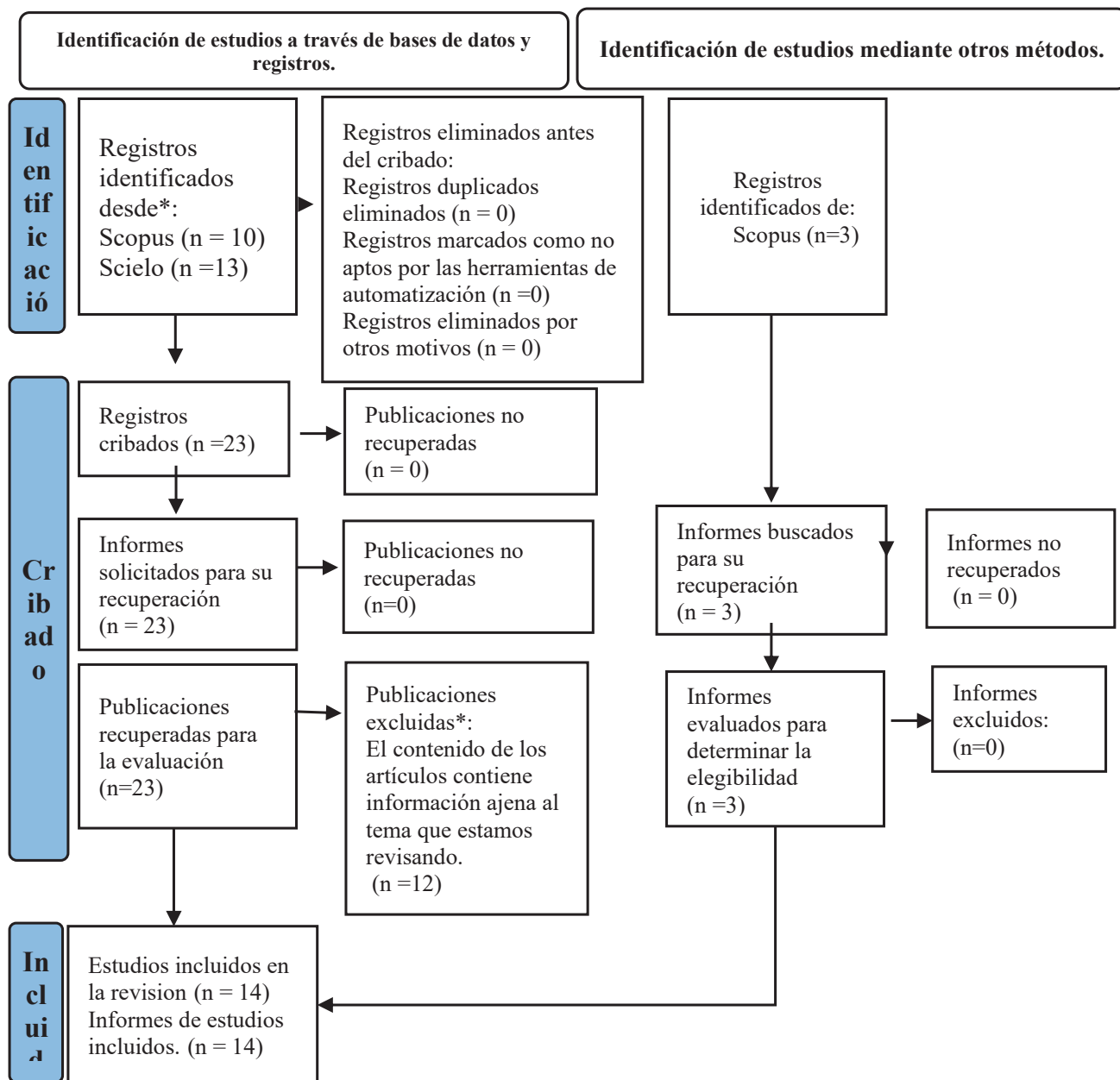


Figura. 1. Diagrama de flujo PRISMA.

**Características del estudio**

incluidos, detallando autor y año, título, objetivo y principales resultados.

En la tabla 1 se muestran las características de los estudios

**Tabla 1.** Características de los estudios.

AUTOR Y AÑO	TÍTULO	OBJETIVO	PRINCIPALES RESULTADOS
Bhatia <i>et al.</i> (2021)	Biorrefinería de microalgas basada en aguas residuales para la producción de bioenergía: Progresos y retos.	Recuperación de los compuestos de aguas residuales para el incremento de biomasa en microalgas.	Las aguas residuales contienen carbono, nitrógeno, potasio y fósforo. Las microalgas asimilan de mejor manera estos nutrientes y evitan la eutrofización en el medio mediante el uso de sistemas abiertos y cerrados.
Ghobrini <i>et al.</i> (2018)	Cultivo de <i>Chlorella vulgaris</i> utilizando un medio salino procedente de un efluente lácteo.	Elaborar técnicas para mejorar la eficiencia productiva y reducir costos en cuanto la producción de biomasa microalgal.	El uso de agua residual salina del efluente lácteo, afecta la tasa de crecimiento según el tiempo y las técnicas de cultivo, alcanzando un estado estacionario tras 80 h. Asimismo, niveles elevados de sales favorecen el aumento de biomasa. Se observó que el fósforo y el magnesio no inciden en la producción de cultivos, por lo que se sugiere que esta podría ser una manera rentable de incrementar la producción de biomasa.
Kumar <i>et al.</i> (2020)	Análisis técnico-económico de la producción de microalgas con tratamiento de efluentes lácteos utilizando un sistema de tanque escala piloto.	Evaluar los sistemas de escalamiento en cuanto al aspecto técnico y económico para la producción de microalgas a favor de mitigar problemas ambientales asociadas al vertimiento directo de efluentes lácteos.	Los métodos de tratamiento para aumentar la biomasa de microalgas es beneficioso ya que no suponen una carga adicional sobre los recursos hídricos. Donde el sistema de fondo plano que contenía efluente lácteo rico en la relación de C:N:P a diferentes capacidades, demostró ser rentable y eficiente para el incremento de producción de microalgas
Mercado <i>et al.</i> (2020)	Mejorar la biomasa y la productividad de lípidos de <i>Scenedesmus</i> sp. Cultivado en las aguas residuales de la industria láctea.	Evaluar el efecto del cultivo en aguas residuales procedentes de la elaboración de queso sobre los parámetros de crecimiento y la composición de la biomasa de <i>Scenedesmus</i> sp. y la capacidad de eliminación de los nutrientes presentes.	Mostró resultados prometedores alcanzando valores de $198,36 \pm 12,73 \text{ mg g}^{-1}$ para la concentración de proteínas, $268,51 \pm 24,52 \text{ mg g}^{-1}$ para los carbohidratos y $507,81 \pm 19,09 \text{ mg g}^{-1}$ para la producción de lípidos en el tratamiento, indicando que el 20%, 27% y 51% de proteínas, carbohidratos y lípidos. Asimismo, 88,41% y un 97,07% para nitrógeno y fósforo.
Nachiappan & Chandrasekaran (2023)	Microalgas: El sistema ecológico de la naturaleza para convertir residuos en recursos.	Evaluar el impacto de efluentes lácteos tratados y no tratados en el incremento de las microalgas quienes podrían estar implicadas en la germinación de <i>Vigna mungo</i> .	Se determinó que el uso de efluentes diluidos al 50% en un biorreactor con condiciones reguladas, influyó en el mayor crecimiento y multiplicación de cepas de algas. Donde se demostró que la abundancia de nitrógeno producía mayor rendimiento vegetativo, sin embargo, se excede por encima de los límites puede generar retraso en el crecimiento y madurez.

(Continúa Tabla 1)

(Continúa Tabla 1)

Olano <i>et al.</i> (2019)	El vertido de aguas residuales con fitoplancton puede favorecer el desarrollo de cianobacterias en el principal río de abastecimiento de agua potable de Uruguay.	Evaluar la influencia de un efluente industrial lácteo que agrega una gran biomasa de fitoplancton en un río utilizado para consumo humano.	El vertido de efluentes industriales lácteos contribuye significativamente a la biomasa del fitoplancton en el río, llegando a representar hasta un 37% de la carga de clorofila. Estos efluentes lácteos proporcionan un ambiente propicio para el crecimiento de cianobacterias.
Pandey <i>et al.</i> (2019)	Optimización secuencial de la adición de nutrientes esenciales en efluentes lácteos simulados para mejorar el crecimiento, la producción de lípidos y la eliminación de nutrientes de <i>Scenedesmus</i> sp. ASK22	Demostrar el rendimiento de biomasa y lípidos de <i>Scenedesmus</i> sp. ASK22 y la remediación simultánea de nutrientes de efluentes lácteos simulados (SDE).	Demostró que el valor óptimo del pH inicial, NaNO <sub>3</sub> (g L <sup>-1</sup> ), EDTA (mg L <sup>-1</sup> ) y micronutrientes (ml L <sup>-1</sup> ) era 7,18, 1,21, 0,848 y 0,969, respectivamente, para la acumulación máxima de lípidos. El rendimiento máximo de biomasa y lípidos de <i>Scenedesmus</i> sp. ASK 22 en el medio optimizado fue de 2,68 gL <sup>-1</sup> y 1,05 gL <sup>-1</sup> respectivamente, lo que resultó en un aumento general de 2,19 y 2,8 veces en comparación con el SDE sin nutrientes añadidos. Los C16:0, C18:0, C18:1 y C18:3 Fueron los ácidos grasos dominantes en los lípidos, lo que indica un gran potencial de <i>Scenedesmus</i> sp.
Ummalyima <i>et al.</i> (2021)	Recuperación de recursos mediante biorremediación de aguas residuales y residuos de carbono por microalgas: un enfoque de bioeconomía circular.	Analizar la producción sostenible de biomasa de microalgas usadas como fábricas celulares en aguas residuales, enriquecidas con productos bioquímicos adecuados para aplicaciones en biotecnológicas.	Las aguas residuales no son tóxicas y proporcionan medio adecuado en nutrientes inorgánicos (como nitrógeno y fósforo) y orgánicos (como carbono). Además esto se facilita con métodos de cultivo, donde se usan sistemas abiertos (como estanques y canales) o cerrados (como foto biorreactores).
Ummalyima <i>et al.</i> (2023)	Producción sostenible de biomasa microalgal en aguas residuales de la industria alimentaria para productos de biorrefinería de bajo coste.	Revisar los diferentes procesos de recolección de biomasa de microalgas y las brechas que tienden a obstaculizar la producción de biomasa.	Las microalgas cultivadas en aguas residuales mostraron un crecimiento eficiente y una alta producción de biomasa, debido a la concentración de nutrientes como nitrógeno y fósforo. La biomasa producida además es adecuada para la obtención de productos de alto valor, como biocombustibles, pigmentos y otros compuestos útiles.
Zieliński <i>et al.</i> (2018)	Tratamiento de efluentes de digestión anaerobia (EDA) acoplado a la producción de microalgas <i>Chlorella</i> sp.	Evaluar la eficacia de la remoción de nutrientes de los efluentes de digestión anaeróbica (EDAs) mediante el cultivo de <i>Chlorella</i> sp. y la productividad de biomasa de microalgas.	La cultura de <i>Chlorella</i> sp. demostró ser eficaz en la remediación de los EDA. Los parámetros evaluados incluyeron nitrógeno total, nitrógeno amoniacal total, fósforo total, P-PO <sub>4</sub> y la demanda bioquímica de oxígeno. Además, se obtuvo la mayor productividad de biomasa utilizando diferentes fuentes estando entre ellas las aguas residuales lácteas.

(Continúa Tabla 1)

(Continúa Tabla 1)

Beltran-Rocha <i>et al.</i> (2017)	Biotratamiento de efluentes secundarios municipales mediante microalgas: Efecto del pH, nutrientes (C, N y P) y enriquecimiento con CO <sub>2</sub>	Monitorizar condiciones críticas en la asimilación de C, N y P por microalgas y la influencia de los factores dependientes del pH, así como la adición de CO <sub>2</sub> y su interacción en el tratamiento terciario de aguas municipales durante la producción de biomasa de microalgas.	El uso de microalgas en el tratamiento de aguas municipales es una solución efectiva para eliminar nutrientes como nitrógeno y fósforo. Estas tecnologías biológicas garantizan el cumplimiento de normativas ambientales y promueven el reciclaje de recursos mediante la generación de biomasa con diversos usos potenciales
Campos-Pena <i>et al.</i> (2019)	Consortio de Microalgas para el Tratamiento de Efluentes de Curtiembre	Evaluar el crecimiento de microalgas en aguas residuales mediante diluidos, para determinar cuáles son los elementos más removidos y aprovechados por los microorganismos.	La dilución de los efluentes al 50% resultan ser más eficiente para la productividad de microalgas. Debido a la concentración de nutrientes disueltos y disponibles. Entre los más removidos están nitrógeno, amoníaco nitrogenado, DQO, COT y fósforo. Además, durante el proceso de tratamiento, el pH aumentó, lo cual se atribuye al consumo de dióxido de carbono por parte de las microalgas.
Tulio-Cassini <i>et al.</i> (2018)	Cosecha de biomasa de microalgas cultivadas en efluentes de tratamiento anaeróbico de aguas residuales mediante el método de coagulación-floculación: efecto del pH	Evaluar coagulantes alternativos en comparación con el sulfato de aluminio, el coagulante estándar, para la recuperación de biomasa a partir de efluentes anaeróbicos del tratamiento de aguas residuales domésticas y la calidad del efluente después de la recuperación de la biomasa.	Se evidenció que las especies de microalgas estudiadas pueden prosperar en efluentes de aguas residuales urbanas, En particular, el cultivo de <i>S. obliquus</i> mostró una fase exponencial a las 25 horas, <i>C. sorokiniana</i> a las 40 horas, mientras que <i>N. oleoabundans</i> experimentó un periodo de latencia de 65 horas.
Vieira <i>et al.</i> (2021)	Información sobre la tecnología utilizada para cultivar microalgas en efluentes lácteos	Presentar los avances recientes en biotecnología de microalgas para el tratamiento de efluentes lácteos y su importancia de las posibles aplicaciones de biomasa microalgal producida.	Las microalgas pueden eliminar nutrientes como el N y el P del efluente, lo que da como resultado la producción de biomasa, que puede utilizarse en la biorrefinería de microalgas o en la producción. de biodiesel, biofertilizantes, pigmentos y alimentos para animales.

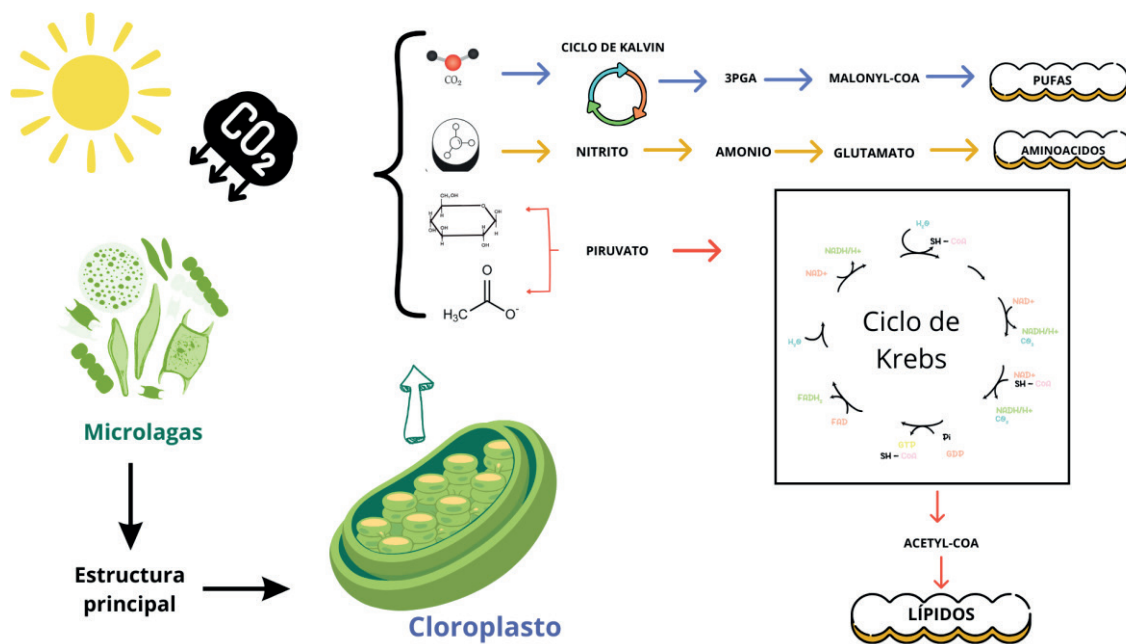
### Composición química de efluentes lácteos y su influencia en la biomasa algal

Los efluentes lácteos liberados de procesos previos presentan una combinación de materia orgánica soluble, sólidos suspendidos, sales, metales traza, así como aceites y grasas (Ghobrini *et al.*, 2018; Nachiappan & Chandrasekaran, 2023). Así mismo presentan un alto contenido de compuestos orgánicos los que se muestran en la tabla 2, estos constituyen una excelente

fente de nutrientes para el cultivo de microalgas ya que corresponden a los elementos más importantes en la vía metabólica fotosintética (Vieira *et al.*, 2021) como se muestra en la fig. 2.

**Tabla 2.** Valores medios de los componentes de los efluentes lácteos según Vieira *et al.* (2021).

COMPONENTE	SIN TRATAMIENTO
Nitrito	0,68±0,04
Fóforo	28,4±2,54
Nitrato	32,6±1,90
Nitrógeno	55,25±1,89



**Figura. 2.** Representación sencilla de la vía metabólica de las microalgas para la producción de cuerpos lipídicos, modificado a partir de Ummalyma *et al.* (2022).

Las microalgas con ayuda de la energía solar, tienen la habilidad de eliminar por completo el nitrógeno, fósforo, DQO y COT presentes en aguas residuales, y además, generan biomasa (Campos-Pena *et al.*, 2019; Pandey *et al.*, 2019) en un efluente lácteo simulado para el cultivo de *Scenedesmus* sp. en medio SDE identificaron variables significativas óptimas para cada una como 1,21 mg·L<sup>-1</sup> de NaNO<sub>3</sub>, 0,848·mg L<sup>-1</sup> de EDTA, 0,969 de micronutrientes y pH inicial de 7,18, maximizando la acumulación de lípidos. La adición de nutrientes en niveles óptimos mejora tanto el rendimiento de biomasa como la eficiencia de secuestro de nutrientes, observando un gran aumento en el rendimiento de biomasa y lípidos de *Scenedesmus* sp., siendo 2,68 g·L<sup>-1</sup> y 1,05 g L<sup>-1</sup>, respectivamente, con lo que demostraron el potencial de efluentes lácteos en el aumento de biomasa de microalgas.

### Optimización de condiciones de cultivo para maximizar el rendimiento de biomasa con efluentes lácteos

La optimización de las condiciones de cultivo para maximizar el rendimiento de biomasa se debe principalmente a la presencia de N y P en efluentes lácteos, para N las concentraciones varían entre 215–305 mg·L<sup>-1</sup> y para P 47–55 mg·L<sup>-1</sup>, logrando la eliminación de estos dos elementos con una eficacia de hasta el 100% (Olano *et al.*, 2019; Vieira *et al.*, 2021). Se puede realizar mediante los métodos estadísticos de detección y optimización (PBD, factorial completa, CCD, algoritmo neuronal y algoritmo genético). Para el enfoque PBD se consideran NaNO<sub>3</sub>, K<sub>2</sub>HPO<sub>4</sub>, MgSO<sub>4</sub>·7H<sub>2</sub>O, CaCl<sub>2</sub>·2H<sub>2</sub>O, solución de citrato férrico, EDTA (disodio sal), Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>, solución de micronutrientes y pH inicial basado en BG-11 para una mayor optimización del compuesto central (Pandey *et al.*, 2019).

La optimización de la suplementación de nutrientes mejora el rendimiento de lípidos en *Scenedesmus* sp. ASK22. Esto evidenciándose con los efectos positivos de la adición de EDTA,  $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  y una solución de citrato férrico con un valor de 0,05. Sin embargo,

también se manifiesta un efecto negativo del  $\text{NaNO}_3$  y otras fuentes de nitrógeno sobre la acumulación de lípidos por las microalgas, siendo notable en aumento de la biomasa no solo en esta microalga, sino también en las que se muestran en la tabla 3 (Pandey *et al.*, 2019).

**Tabla 3.** Producción de lípidos empleando como sustrato efluentes lácteos según Pandey *et al.* (2019).

CEPA DE MICROALGA	LÍPIDOS ( $\text{gL}^{-1}$ )
<i>Chlorella</i> sp.	11,04
<i>Acutodesmus dimorphus</i>	25,05
<i>Scenedesmus acutus</i>	20,00
<i>Scenedesmus obliquus</i>	36,26

### Diseño de sistemas de producción escalables

Se utilizan diversos sistemas para la producción de biomasa de microalgas (Costa *et al.*, 2021; Ummalyma *et al.*, 2023). Los sistemas de tratamiento incluyen los siguientes métodos:

#### Sistemas abiertos

Estos tipos de sistema se prefieren por un bajo coste. Los cultivos abiertos aprovechan condiciones ambientales a fin de aclimatar a las microalgas sin fuertes requerimientos de ingeniería (Bhatia *et al.*, 2021). Kumar *et al.* (2020) evaluaron un modelo de fondo plano como sistema de cultivo abierto de 100 L para el aumento de microalgas propias de un efluente lácteo, concluyendo una producción final de  $2,4 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$  de biomasa demostrando la factibilidad económica de este sistema para la producción de biomasa con especies autóctonas en el tratamiento de un desaguadero lácteo. Por su parte, una desventaja clara es el constante agregado de agua a fin de controlar la evaporación (Ummalyma *et al.*, 2021).

#### Sistemas cerrados

A diferencia de los sistemas abiertos, los cultivos cerrados tienen alto coste, pero una producción mayor de biomasa al tener parámetros totalmente controlados en bioreactores (Ummalyma *et al.*, 2021). Diversos estudios han utilizado este modelo ya que facilita el estudio con condiciones óptimas, utilizando fotobiorreactores de columna, de burbuja, de cama móvil entre muchos otros (Ummalyma *et al.*, 2023; Zieliński *et al.*, 2018). Otra desventaja adicional a su alto coste de construcción son su limpieza, mantenimiento constante y dependiendo

del tipo de fermentación si es batch, batch alimentado o continuo, requerirá el adicionar más insumos al proceso, por lo que es una técnica recomendada a procesos industriales.

### Evaluación de la calidad de la biomasa producida utilizando efluentes lácteos en comparación con otras fuentes de nutrientes

Las aguas residuales de la agroindustria impulsan el cultivo de microalgas como *Scenedesmus* sp. aumentando significativamente la densidad celular. La eficacia de este incremento varía según la capacidad metabólica de las cepas y las características del agua residual. *Scenedesmus* sp., empleando efluentes lácteos genera una alta concentración de lípidos siendo  $507,81 \pm 19,09 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ ,  $198,36 \pm 12,73 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$  para la concentración de proteínas,  $268,51 \pm 24,52 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$  para los carbohidratos, en contraste con el medio de cultivo convencional así mismo, se registraron elevados porcentajes de asimilación de nutrientes de las aguas residuales empleadas, alcanzando un 88,41% y un 97,07% para nitrógeno y fósforo (Mercado *et al.*, 2020).

El uso de efluentes lácteos en cultivos de microalgas incrementa la biomasa, pero se necesitan estanques poco profundos para maximizar la proliferación y producción de biomasa. Esto se puede evidenciar en el cultivo de *Chlorella* la cual genera la eliminación del 20 % de fósforo con una productividad de biomasa de 31,3 T totales de sólidos suspendidos ha/estanque/ año. Siendo los lípidos y proteínas los productos obtenidos en mayor cantidad a comparación de lo que se obtiene en un cultivo tradicional (Ghobrini *et al.*, 2018; Ummalyma *et al.*, 2023).



### Estudios de casos demuestran aplicaciones exitosas de efluentes lácteos en el aumento de biomasa algal

Mercado *et al.* (2020) en su estudio evaluó determinar la mejora de la biomasa y la productividad de lípidos de *Scenedesmus* sp. cultivado en aguas residuales de la industria láctea, evaluando los parámetros de crecimiento y composición de la biomasa de este género, así mismo la capacidad de eliminación de nutrientes, obteniéndose

una concentración alta de lípidos en cultivos con efluentes lácteos en comparación con el medio estándar utilizado, y lograron altos porcentajes de asimilación de nutrientes de las aguas residuales utilizadas (88,41% y 97,07% para nitrógeno y fósforo, respectivamente), con estos resultados buscan verificar la viabilidad del cultivo de microalgas en aguas residuales agroindustriales como medio de cultivo alternativo que induzca la acumulación de compuestos con potenciales aplicaciones bioenergéticas.

**Tabla 4.** Productos obtenidos a partir de microalgas en aguas residuales de efluentes lácteos, según Ummalyma *et al.* (2022).

MICROALGA	PRODUCTOS
<i>Clorococo</i> sp.	Biomasa y Lípidos
<i>Chlorella sorokiniana</i>	Biomasa, proteínas, almidón y lípidos
<i>Tetraselmis</i> sp.	Lípidos
<i>C. reinhardtii</i>	Lípidos y proteínas recombinantes

Estos microorganismos tienen entre un 20 y 50% de lípidos en condiciones de estrés en relación del peso seco de la biomasa, teniendo en cuenta que la producción de biomasa está entre 15 y 25 T por ha por año, lo que correspondería a 4,5 y 7,5 T por ha por año de producción de lípidos (porcentaje de lípidos celulares del 30%) (Mercado *et al.*, 2020).

Hay cepas de microalgas que ya se han estudiado y producen biomasa y concentración de lípidos, como: *Chorella sacharophita* que produce 0,20 gL<sup>-1</sup> día<sup>-1</sup> con una concentración de lípidos de 21,82%, *Scenedesmus* sp., 0,21 gL<sup>-1</sup> día<sup>-1</sup> y 13,64% de concentración de lípidos, así mismo *Chlorella* sp. con 1,68% de productividad y 29,3 de concentración de lípidos, *Chlorella sorokiniana* que su productividad aún no está definida pero tiene una alta concentración de lípidos en un 46,9% y *Scenedesmus* que produce 1,75 gL<sup>-1</sup> día<sup>-1</sup> y 50,78% de concentración de lípidos (Ghobrani *et al.*, 2018). En otro estudio en el cual se estudió *Scenedesmus* donde la productividad fue de 0,085 g.L<sup>-1</sup> día, dio como resultado la composición de la biomasa seca fue de 28,5% de proteínas, 27,5% de carbohidratos y 26,5% de lípidos (Mercado *et al.*, 2020).

### Evaluación de la viabilidad económica y ambiental de utilizar efluentes lácteos como fuente de nutrientes para microalgas

El cultivo de microalgas empleando efluentes lácteos es un método rentable, muy productivo y amigable con el medio ambiente, ya que contribuye a reducir la

eutrofización. Por otra parte, la producción de biomasa de microalgas en conjunto con el manejo de aguas residuales de la agroindustria puede ser una estrategia económica para disminuir la demanda de fertilizantes requeridos en el crecimiento de las microalgas (Ummalyma *et al.*, 2023).

Varios análisis sobre la viabilidad económica del cultivo de microalgas a gran escala, específicamente para la producción de biocombustibles, han indicado que el proceso no resulta rentable debido al elevado costo de los insumos necesarios en las etapas iniciales del proceso; sin embargo, el empleo de aguas residuales como fuente de nutrientes para su cultivo es ampliamente estudiado, ya que reduce los costos de producción y la contaminación del agua, debido a la capacidad de las microalgas que pueden crecer en varios tipos de aguas residuales con poca adición de nutrientes (Pandey *et al.*, 2019).

### Biotecnología aplicable: Perspectivas futuras

Las biomasa de las microalgas cultivadas en efluentes lácteos tienen muchas aplicaciones, no se puede aplicar directamente para el consumo humano por las restricciones de seguridad alimentaria y las reglamentaciones del comercio internacional, sin embargo se puede utilizar en la generación de biocombustibles como reemplazo a los combustibles fósiles debido a que no afecta el CO<sub>2</sub>, tiene alta tasa de crecimiento en aguas residuales, en la generación de biofertilizantes, pigmentos o para la creación de alimentos para animales (Vieira *et al.*, 2021).

Las microalgas presentan relevancia en la fitorremediación. Esto se debe a que el aumento de la demanda de alimentos y la contaminación, han provocado importantes desafíos para el sector agrícola, que van desde la degradación del suelo hasta la disminución en el rendimiento de los cultivos. Es por ello que se llevó a cabo un estudio para analizar la germinación de *Vigna mungo*, mediante el tratamiento de efluentes lácteos utilizando consorcios de microalgas. Donde se observó que las plantas crecieron de manera eficaz y eficiente, demostrando su potencial aplicación biotecnológica como foco de futuro interés científico (Nachiappan & Chandrasekaran, 2023).

Los efluentes lácteos promueven el aumento de la producción de biomasa de las microalgas, siendo las más estudiadas *Chlorella*, *Scenedesmus dimorphus*, *Scenedesmus acutus*, *Acutodesmus dimorphus* que producen 11,04 g·L<sup>-1</sup>, 25,05 g·L<sup>-1</sup> y 20 g·L<sup>-1</sup> respectivamente. *Tretraselmis* y *Chlorococcum* sp. producen biomasa, lípidos y proteínas recombinantes. Se puede realizar mediante los métodos estadísticos de detección y optimización, mediante sistemas cerrados y abiertos, aprovechando así este residuo lácteo y reduciendo la contaminación ambiental en los vertederos y utilizando en diferentes aplicaciones como la generación de biocombustibles fósiles, generación de biofertilizantes, pigmentos y elaboración de alimento para animales.

## AGRADECIMIENTO

Agradecemos los comentarios y sugerencias de Hans Ramón Quiroz-Ruiz, quien con sus aportes ayudó a enriquecer este manuscrito.

## Author contributions: CRediT (Contributor Roles Taxonomy)

**CYAV** = Candy Yoseli Alvarado Vergara

**MKMF** = Milene Katherine Marín Fernández

**JESP** = Jhaqui Evelin Salas Pastor

**Conceptualization:** CYAV, MKMF, JESP

**Data curation:** MKMF

**Formal Analysis:** CYAV

**Funding acquisition:** CYAV, MKMF, JESP

**Investigation:** CYAV, MKMF, JESP

**Methodology:** CYAV

**Project administration:** CYAV, MKMF, JESP

**Resources:** CYAV, MKMF, JESP

**Software:** MKMF

**Supervision:** CYAV, MKMF, JESP

**Validation:** CYAV, MKMF

**Visualization:** CYAV

**Writing – original draft:** CYAV, MKMF, JESP

**Writing – review & editing:** CYAV, MKMF, JESP

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abdelfattah, A., Ali, S. S., Ramadan, H., El-Aswar, E. I., Eltawab, R., Ho, S., Elsamahy, T., Li, S., El-Sheekh, M. M., Schagerl, M., Kornaros, M., & Sun, J. (2023). Microalgae-based wastewater treatment: Mechanisms, challenges, recent advances, and future prospects. *Environmental Science And Ecotechnology*, 13, 100205.
- Álvarez, X., Arévalo, O., Salvador, M., Mercado, I., & Velázquez-Martí, B. (2020). Cyanobacterial biomass produced in the wastewater of the dairy industry and its evaluation in Anaerobic Co-Digestion with Cattle Manure for Enhanced Methane Production. *Processes*, 8, 1290.
- Andina. (2023). *Minagri: La producción de leche tuvo un crecimiento anual de 2.4 % en la última década*. Lima.
- Arenas, R. Y. (2023). *Tratamiento de lactosuero por cavitación hidrodinámica posterior precipitación química y subsecuente uso para cultivo de microalgas (Chlorella vulgaris) en un biorreactor tipo raceway*. Universidad Católica de Santa María. Arequipa. [https://repositorio.ucsm.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12920/12626/42.0284\\_IB.pdf?sequence=3&isAllowed=y](https://repositorio.ucsm.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12920/12626/42.0284_IB.pdf?sequence=3&isAllowed=y)
- Beltran-Rocha, J.C., Guajardo-Barbosa, C., Barcelo-Quintal, I. D., & Lopez-Chuken, U.J. (2017). Biotratamiento de efluentes secundarios municipales utilizando microalgas: Efecto del pH, nutrientes (C, N y P) y enriquecimiento con CO<sub>2</sub>. *Revista de Biología Marina y Oceanografía*, 52, 417-427.
- Bhatia, S. K., Mehariya, S., Bhatia, R., Kumar, M., Pugazhendhi, A., Awasthi, M. K., Atabani, A., Kumar, G., Kim, W., Seo, S. B., & Yang, Y.H. (2021). Wastewater based microalgal biorefinery for bioenergy production: Progress and challenges. *Science of the Total Environment*, 751, 141599.

- Campos-Pena, A. de C., Bertoldi, C. F., Toldo da Fontoura, J., Ferreira Trierweiler, L. F., & Gutterres, M. (2019). Consortium of Microalgae for Tannery Effluent Treatment. *Brazilian Archives of Biology and Technology*, 62, e19170518.
- Costa, J. A. V., Cruz, C. G., & Da Rosa, A. P. C. (2021). Insights into the technology utilized to cultivate microalgae in dairy effluents. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, 35, 102106.
- Ghobrini, D., Brányik, T., Kebab, L., Puchero, B., & Aïboud, K. (2018). *Cultivation of Chlorella vulgaris using medium from a dairy effluent*. International Renewable and Sustainable Energy Conference (IRSEC). IEEE, <https://ieeexplore.ieee.org/xpl/conhome/8694926/proceeding>
- Kumar, A. K., Sharma, S., Dixit, G., Shah, E., & Patel, A. (2020). Techno-economic analysis of microalgae production with simultaneous dairy effluent treatment using a pilot-scale High Volume V-shape pond system. *Renewable Energy*, 145, 1620-1632.
- Lione, D., Chenevier, D., & Fideleff, S. (2021). Tratamiento de lactosuero acoplado a la producción de biomasa: estudio de factibilidad a escala laboratorio para el cultivo de cianobacterias con fines biotecnológicos. *Enhanced Reader*. <https://repositorio.uca.edu.ar/bitstream/123456789/13101/1/tratamiento-lactosuero-acoplado.pdf>
- Mercado, I., Álvarez, X., Verduga, M., & Cruz, A. (2020). Enhancement of Biomass and Lipid Productivities of Scenedesmus sp. Cultivated in the Wastewater of the Dairy Industry. *Processes*, 8, 1458.
- Microalgas: biotecnología para el saneamiento universal. (2021). *We Are Water*. [https://www.wearewater.org/es/microalgas-biotecnologia-para-el-saneamiento-universal\\_342415](https://www.wearewater.org/es/microalgas-biotecnologia-para-el-saneamiento-universal_342415)
- Monzón, L. J. (2022). *Caracterización del crecimiento y composición bioquímica del consorcio microalga-bacteria mediante un sistema air-lift a escala laboratorio usando como fuente de nutrientes el agua residual de curtiembres*. Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa. Arequipa <https://repositorio.unsa.edu.pe/server/api/core/bitstreams/5929a3dc-569c-4164-87d8-bb3e751b4ce4/content>
- Nachiappan, K., & Chandrasekaran, R. (2023). Microalgae: Nature's Green System to Recycle Waste to Resource. *Journal of Natural Remedies*, 23, 121-128.
- Olano, H., Martigani, F., Somma, A., & Aubriot, L. (2019). Wastewater discharge with phytoplankton may favor cyanobacterial development in the main drinking water supply river in Uruguay. *Environmental Monitoring and Assessment*, 191, 146.
- Pandey, A., Srivastava, S., & Kumar, S. (2019). Sequential optimization of essential nutrients addition in simulated dairy effluent for improved Scenedesmus sp ASK22 growth, lipid production and nutrients removal. *Biomass and Bioenergy*, 128, 105319.
- Rojó, E. (2022). *Valorización de lactosuero para la obtención de biomasa de microalgas y cianobacterias*. Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional. México. <https://repositorio.cinvestav.mx/bitstream/handle/cinvestav/4075/SSIT0019105.pdf?sequence=1>
- Streit, N. M., Ramírez-Mérida, L. G., Zepka, L. Q., Jacob-Lopes, E., & Queiroz, M. I. (2017). Producción de pigmentos por Aphanothece microscópica Nageli a partir de residuos industriales lácteos. *Ingeniare. Revista Chilena de Ingeniería*, 25, 350-358.
- Tulio-Cassini, S., Aparecida-Francisco, S., Pereira-Antunes, P.W., Nunes-Oss, R., & Keller, R. (2018). Harvesting Microalgal Biomass grown in Anaerobic Sewage Treatment Effluent by the Coagulation-Flocculation Method: Effect of pH. *Brazilian Archives of Biology and Technology*, 60, e160174,
- Ummalyma, S. B., Sahoo, D., & Pandey, A. (2021). Resource recovery through bioremediation of wastewaters and waste carbon by microalgae: a circular bioeconomy approach. *Environmental Science and Pollution Research*, 28, 58837-58856.
- Ummalyma, S.B., Sirohi, R., Udayan, A., Yadav, P., Raj, A., Sim, S.J., & Pandey, A. (2023). Sustainable microalgal biomass production in food industry wastewater for low-cost biorefinery products: a review. *Phytochemistry Reviews*, 22, 969-991.
- Vieira, M.V., Turkiewicz, I.P., Tkacz, K., Fuentes-Grünwald, C., Pastrana, L.M., Fuciños, P., Wojdyło, A., & Nowicka, P. (2021). Microalgae as a Potential Functional Ingredient: Evaluation of the Phytochemical Profile, Antioxidant Activity and In-Vitro Enzymatic Inhibitory Effect of Different Species. *Molecules*, 26, 7593.

Zieliński, M., Dębowski, M., Szwaja, S., & Kisielwska, M. (2018). Anaerobic digestion Effluents (ADEs) Treatment coupling with *Chlorella* sp. microalgae

production. *Water Environment Research*, 90, 155-163.

Received March 13, 2024.

Accepted April 25, 2024.