

Capítulo 9

Uso de las microalgas *Scenedesmus* para la producción de biodiesel bajo un enfoque de economía circular

Tania Yamel Navarro Díaz¹

Belén Esmeralda Vázquez González²

Jesús Barrera Rojas³

Belkis Sulbarán Rangel⁴

<https://doi.org/10.61728/AE20251697>



¹ Estudiante de Ingeniería en Nanotecnología. Universidad de Guadalajara (UDG), Centro Universitario de Tonalá (CUTonalá) México. ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-9003-1617>

² Estudiante de Ingeniería en Nanotecnología. Universidad de Guadalajara (UDG), Centro Universitario de Tonalá (CUTonalá), México. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4515-9069>

³ Doctor en Ciencia con la especialidad en Bioquímica del Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional (CINVESTAV)-México. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5244-9879>

⁴ Doctora en Ciencia de Materiales. Universidad de Guadalajara (UDG), Centro Universitario de Ciencias Exactas e Ingeniería, México. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5758-6140>

Resumen

El presente artículo explora el uso de las microalgas del género *Scenedesmus* para la producción de biodiésel dentro de un enfoque de economía circular. Se discuten las limitaciones ambientales de los combustibles fósiles y se propone el biodiésel, producido a partir de microalgas, como una alternativa sostenible. A diferencia de los biocombustibles de primera y segunda generación, las microalgas no compiten con la producción de alimentos y pueden crecer en medios acuáticos improductivos, lo que las convierte en una opción eficiente y de bajo impacto ambiental. Las microalgas *Scenedesmus* se destacan por su capacidad de capturar CO₂ y crecer en aguas residuales, lo que permite no solo la producción de biocombustibles, sino también la mejora de la calidad del agua. Además, se estudia el aprovechamiento de los residuos de biomasa de microalgas a través de la digestión anaerobia para la generación de biogás, incrementando la eficiencia energética del proceso. Los coproductos derivados de la biomasa, como proteínas, carbohidratos y pigmentos naturales, tienen aplicaciones industriales en sectores alimentarios, farmacéuticos y cosméticos. Se concluye que el uso de microalgas para la producción de biodiésel, junto con la valorización de sus coproductos, se alinea con los principios de la economía circular, ofreciendo una vía para reducir la dependencia de los combustibles fósiles y minimizar los impactos ambientales.

Introducción

El consumo energético mundial está mayoritariamente sustentado en el uso de combustibles fósiles, los cuales, debido a su naturaleza no renovable y a la alta emisión de gases de efecto invernadero durante su combustión, no son sustentables. Estos combustibles contribuyen significativamente al cambio climático y a la degradación ambiental,

además de que su extracción y utilización impactan negativamente los ecosistemas y la salud pública. Ante esta problemática, los biocombustibles de tercera generación han surgido como una alternativa prometedora y sostenible para satisfacer las demandas energéticas. A diferencia de los biocombustibles de primera y segunda generación, que dependen de cultivos alimentarios y residuos agrícolas, respectivamente, los de tercera generación utilizan organismos fotosintéticos como algas, los cuales no compiten con la producción de alimentos y pueden cultivarse en aguas y tierras improductivas no aptas para la agricultura. Estas características hacen que la producción de biocombustibles sea más eficiente, con menos impactos ambientales y una notable disminución en las emisiones de gases de efecto invernadero. Además, se reduce la competencia con la agricultura tradicional, y contribuye en la captura y asimilación del CO₂ atmosférico junto con las diferentes especies que realizan fotosíntesis oxidoreductora.

Al estudiar los microorganismos, organismos vivos de dimensiones microscópicas que incluyen bacterias, arqueas, virus, hongos, protozoos y microalgas, la microbiología es una vía de generación de conocimiento con potencial aplicación tecnológica. Las investigaciones recientes incluyen aspectos relacionados con su estructura, fisiología, metabolismo, genética, ecología y su interacción con otros organismos y el medio ambiente. Esta disciplina es fundamental para comprender cómo los microorganismos afectan la salud humana, animal y vegetal, así como para desarrollar estrategias para prevenir enfermedades infecciosas, controlar la contaminación y promover la salud pública. Desde una perspectiva biotecnológica, estas investigaciones tienen numerosas implicaciones en la industria alimentaria, farmacéutica, ambiental y de materias primas. Su capacidad metabólica ha sido aprovechada en la fermentación de alimentos, la síntesis de compuestos bioactivos, la remediación de entornos contaminados y la obtención de biocombustibles y precursores químicos de origen renovable.

En este contexto, las microalgas, particularmente aquellas del género *Scenedesmus*, destacan por su capacidad fotosintética y elevada producción de biomasa. Como organismos autótrofos acuáticos, su estudio abarca aspectos fisiológicos, bioquímicos, genéticos y ecológicos, lo que

ha permitido ampliar su uso potencial en procesos industriales sostenibles. Su incorporación en esquemas de economía circular se justifica por su alta eficiencia en la conversión de recursos y la generación de coproductos valiosos, superando en algunos casos el rendimiento de fuentes tradicionales de biomasa (García Cuenca, 2015).

Además, la utilización de microalgas en el tratamiento de aguas residuales representa una estrategia dual: por un lado, permite reducir contaminantes y recuperar nutrientes; por otro, genera biomasa que puede ser transformada en productos de valor añadido. Este enfoque contribuye tanto a la sostenibilidad ambiental como a la eficiencia de procesos en la gestión del recurso hídrico. Por otro lado, el uso de microalgas en el tratamiento de aguas residuales representa una solución innovadora y eficiente para mejorar la calidad del efluente y aprovechar algunos nutrientes que de otro modo serían desechados. Este campo de estudio posibilita la comprensión más profunda de las perspectivas y potencialidades de las microalgas en la economía circular, lo que podría conducir a la implementación de políticas, tecnologías y estrategias más efectivas para promover la transición hacia una economía más sostenible. Este capítulo tiene como objetivo determinar la viabilidad del aprovechamiento de las microalgas del género *Scenedesmus* y sus residuos para la producción de biocombustibles y coproductos.

Productividad microalgal a través de la fotosíntesis y la digestión anaerobia

Las microalgas son organismos de una sola célula que tienen la habilidad de llevar a cabo la fotosíntesis y pueden existir tanto en colonias como en forma individual (Williams y Laurens, 2010). Las microalgas son microorganismos unicelulares de tamaño diminuto (2-200 μm), pertenecientes a distintas filogenias. Su metabolismo puede ser autótrofo o heterótrofo y, aunque la mayoría son eucariotas, las cianobacterias, siendo procariotas, a menudo se clasifican como microalgas (Greenwell et al., 2009). Varios tipos de microalgas pueden crecer utilizando fuentes orgánicas de carbono, lo que los convierte en cultivos heterótrofos, pero estas condiciones pueden propiciar la contaminación, la insaturación de ácidos grasos y aumentar los costos. Sin embargo, existen microalgas

autótrofas que solo necesitan compuestos inorgánicos como CO_2 , minerales, agua y luz para su desarrollo (Huang et al., 2010).

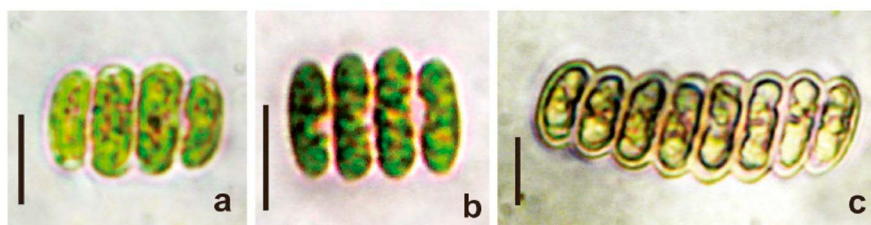
Existen tres clases principales de microorganismos que aprovechan la energía lumínica de diversas maneras: a) Las cianobacterias y algas, realizan la fotosíntesis oxidoreductora, produciendo oxígeno y utilizando fotosistemas I, II y la enzima RubisCO para fijar el CO_2 , b) Eubacterias fotosintéticas, que llevan a cabo la fotosíntesis oxidoreductora anaerobia, sin producción de oxígeno y solo con el fotosistema I o II (dependiendo del phylum) y c) Halobacterias, que no cuentan con clorofila ni con un sistema de transporte de electrones fotosintético, en su lugar, poseen una bomba de protones dependiente de la luz para generar energía (fotosíntesis no oxidoreductora), aunque no producen poder reductor y requieren una fuente orgánica de carbono. Las cianobacterias y otras bacterias fotosintéticas pertenecen al dominio Bacteria, mientras que las algas verdes, rojas y cafés pertenecen al dominio Eukarya, y las halobacterias pertenecen al dominio Archaea. Así, la habilidad de transducción de energía solar en energía química se encuentra en los tres dominios de la vida, evolucionando y apareciendo con distintos mecanismos moleculares.

La heterotrofia es un proceso biológico en el cual los organismos obtienen su energía y nutrientes a partir de la materia orgánica, en lugar de producir su propio alimento a través de la fotosíntesis o la quimiosíntesis. Los organismos heterótrofos, como muchos tipos de bacterias, hongos, animales y algunos protozoos, dependen de la degradación de compuestos orgánicos complejos, provenientes de otros seres vivos, para su supervivencia. El proceso de degradación anaerobia no puede ser realizado por un único tipo de bacteria; en cambio, implica un ecosistema complejo en el que diversos grupos bacterianos cooperan de manera sinérgica para transformar la materia orgánica en metano y dióxido de carbono (Anderson et al., 2003). La digestión anaerobia es un conjunto de procesos biológicos donde existen distintos microorganismos que descomponen la materia orgánica sin la presencia de oxígeno (Ramos, J., 2014). Este método se utiliza para gestionar residuos de origen orgánico y como una técnica de generación de energía renovable a partir de diversos materiales orgánicos, excluyendo a la madera (AEBIOM, 2009).

Características generales de las microalgas del género *scenedesmus*

La microalga *Scenedesmus* pertenece a la división *Chlorophyta*, clase *Chlorophyceae*, orden *Chlorococcales*, familia *Scenedesmaceae* y puede encontrarse solitaria o en parejas formando cenobios (Villasmil et al., 2004). *Scenedesmus* se destaca por su capacidad de tolerar altas concentraciones de nutrientes presentes en las aguas residuales, su elevada actividad metabólica y su resistencia a las fluctuaciones ambientales, factores que contribuyen a su prevalencia en estos entornos. El género *Scenedesmus* alberga un total de 456 especies, aunque solo 72 han sido oficialmente reconocidas desde el punto de vista taxonómico. Estas microalgas, típicamente, se encuentran de manera individual o formando colonias, dispuestas longitudinalmente en grupos que pueden contener de 2 a 32 células, con una media de 4 a 8 células por grupo. En ocasiones, estas colonias están envueltas por una matriz mucilaginosa. Las células de *Scenedesmus* suelen tener dimensiones que oscilan entre 3 y 78 μm de largo y de 2 a 10 μm de ancho, adoptando formas que van desde casi esféricas hasta elipsoidales o alargadas. Su pared celular está compuesta por una capa hemicelulósica, que en algunas especies puede contener esporopoleninos. *Scenedesmus* se desarrolla en aguas dulces ricas en nutrientes y muestra una notable resistencia a la contaminación. Por esta razón, es común encontrarla en plantas de tratamiento de aguas residuales, donde contribuye a oxigenar el ambiente, acelerando así el proceso de depuración y beneficiando a las bacterias aerobias (Rawat et al., 2011).

Figura 1. Imágenes de microalgas: a) *Scenedesmus acunae*, b) *Scenedesmus ecornis* and c) *Scenedesmus ellipticus*. La barra corresponde a 10 μm



Fuente: modificado de Peixoto et al., 2015.

La producción de microalgas implica la cultivación controlada de estos diminutos organismos en medios adecuados, optimizando condiciones como la luz, la temperatura, el pH y los nutrientes para maximizar la biomasa y la productividad. Una vez obtenida la biomasa microalgal, se procede a los procesos de transformación, que incluyen la extracción de componentes valiosos como lípidos, que pueden ser utilizados en la producción de biocombustibles; proteínas, que encuentran aplicación en la alimentación animal y humana; pigmentos como la clorofila, carotenoides y ficobiliproteínas, utilizados en la industria alimentaria, cosmética y farmacéutica; y compuestos bioactivos, como antioxidantes, ácidos grasos omega-3 y polisacáridos, que tienen potencial en aplicaciones nutraceuticas y terapéuticas (Rawat et al., 2011). En la Tabla 1 se muestra una composición nutricional porcentual y másica del género *Scenedesmus*.

Tabla 1. Composición fisicoquímica de la biomasa *Scenedesmus* (Andrade et al., 2019)

Contenido (%)						Producción (g/L)
H	CEN	PT	EE	FC	NTD	
7.85	28.13	33.15	2.97	11.83	56.13	0.31

H: Humedad; CEN: Cenizas; PT: Proteína verdadera; EE: Extracto etéreo; FC: Fibra cruda; NTD: Nutrientes digeribles totales.

Implementación del cultivo de microalgas

Se han explorado diversas fuentes de nutrientes y sustratos para el cultivo eficiente de microalgas, con el objetivo de maximizar la producción de biomasa y compuestos de interés. Entre estas fuentes, se ha investigado el uso de sustratos orgánicos, aguas residuales y nutrientes comerciales para promover el crecimiento óptimo de las microalgas (Andrade et al., 2009).

Además, se ha explorado el uso de agua residual de pescadería como medio de cultivo para la producción de biomasa de la microalga *Scenedesmus* sp. Esta agua residual se preparó mediante la mezcla de restos de pescado con agua potable, seguida de un proceso de biodegradación aeróbica inducida durante tres días a temperatura ambiente. Los resultados demostraron que *Scenedesmus* sp. logró adaptarse a las condiciones

externas de cultivo, mostrando un crecimiento unialgal y exhibiendo ventajas competitivas en comparación con otros tipos de cultivos a escala piloto. Asimismo, se resaltó la viabilidad de utilizar residuos de pescadería como una fuente de nutrientes para la producción de biomasa de microalgas. Estudios anteriores han demostrado que otras microalgas, como *Chlorella* sp., también pueden ser cultivadas a cielo abierto utilizando efluentes pesqueros, lo que sugiere un potencial para el tratamiento de aguas residuales y la producción de biomasa microalgal con aplicaciones en diversos sectores industriales. Estos hallazgos subrayan la importancia de investigar y desarrollar métodos de cultivo sostenibles y eficientes para aprovechar los recursos naturales y reducir los impactos ambientales asociados con la producción de biomasa microalgal.

Figura 2. Vista aérea de un sistema de cultivo de microalgas en aguas residuales. Las microalgas cumplen una doble función: biorremediación y producción de biomasa.

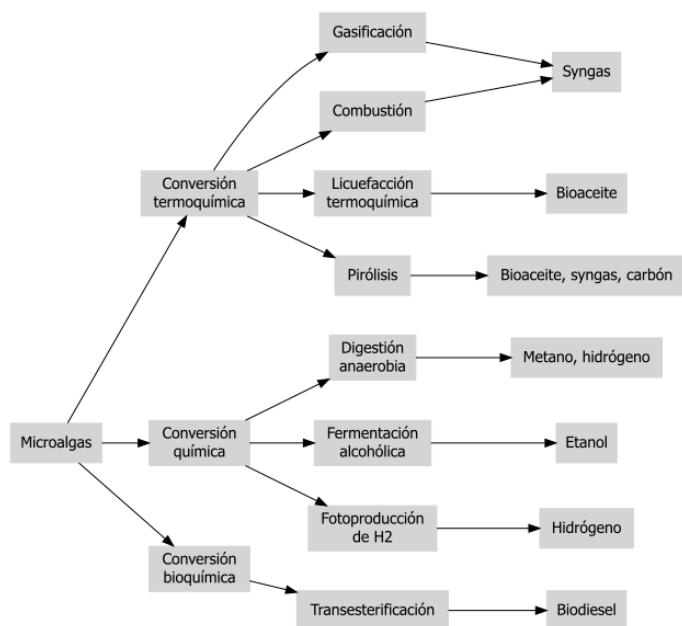


Fuente: Acuicola, M., A. P. Y. D. (s. f.).

Usos potenciales de cultivos microalgales para la generación de energía

El uso de energías renovables se ha convertido en una prioridad para enfrentar los desafíos energéticos y ambientales actuales. Según la Comisión Nacional para el Ahorro de Energía (CONAE), estas fuentes son prácticamente inagotables y técnicamente viables. Entre estas energías se encuentran la solar, eólica, hidráulica, biomasa, geotérmica y oceánica. A partir de su biomasa e incluso sus rutas metabólicas, es posible obtener diferentes tipos de biocombustible, tanto líquidos como el bioetanol (a partir de los hidratos de carbono), gaseosos como el biometano y el biohidrógeno, además del syngas (obtenidos a partir de cualquier componente orgánico) o sólidos. Todos los anteriores poseen potencialidades para su combustión para la generación de electricidad (Brennan et al., 2009).

Figura 3. Procesos de conversión de las microalgas a biocombustibles.



Fuente: Modificada de Ramos, 2014.

Además de las vías convencionales de conversión termoquímica, como la gasificación para la producción de syngas, la licuefacción termoquímica para obtener bioaceites y la pirólisis para la generación de carbón, existen rutas bioquímicas significativas. Estas incluyen la producción de biogás mediante digestión anaerobia (CH_4); la obtención de bioetanol a través de fermentación; la generación de biohidrógeno mediante procesos de digestión anaerobia acidogénica y mediante la producción fotobiológica; la producción de biodiésel a partir de la transesterificación de los lípidos, todas ellas ampliamente estudiadas para aprovechar su potencial energético.

Biodiesel como alternativa energética

La alternativa más importante a los combustibles fósiles convencionales en la actualidad es el biodiésel. Este se refiere a cualquier tipo de combustible similar al diésel que se obtiene a partir de materiales biológicos renovables y que generalmente necesita un proceso especial para convertirse en combustible (Ahmad et al., 2011). El biodiésel se ha convertido en una opción factible para reemplazar el diésel proveniente del petróleo (Taher et al., 2014). Esto se debe a sus múltiples beneficios, como su capacidad de biodegradarse y su baja toxicidad. Además, su quema genera menos emisiones de sulfatos, compuestos aromáticos, dióxido de carbono, monóxido de carbono y humo. Al contener más oxígeno, se logra una combustión más completa y una reducción en las emisiones (Atabani et al., 2012).

El biodiésel es un combustible alternativo al diésel tradicional, generalmente caracterizado como ésteres monoalquílicos derivados de aceites vegetales, grasas animales e incluso aceites usados, como los provenientes de la fritura (Knothe y Dunn 2001). La producción de biodiésel implica la reacción de aceite o grasa con un alcohol monohídrico en presencia de un catalizador, comúnmente una base como hidróxidos o metanolatos de sodio o potasio. El metanol es el alcohol más utilizado en la fabricación de biodiésel debido a su menor costo, haciéndolo competitivo en comparación con el diésel convencional derivado del petróleo (petrodiesel) en varios aspectos técnicos. Las ventajas técnicas del biodiésel incluyen

su biodegradabilidad, un alto punto de inflamación (lo que aumenta su seguridad en el manejo y almacenamiento), la reducción de la mayoría de las emisiones y una excelente capacidad de lubricación.

Para un triglicérido genérico con la estructura $R_1\text{-COO-CH}_2\text{-COO-CH-COO-CH}_2$, donde R_1 , R_2 , y R_3 son cadenas alquílicas, la reacción específica utilizando metanol (CH_3OH) se describe de la siguiente manera:

Ec. 1



Donde:

- $(R_1\text{COO})3C_3H_5$ es un triglicérido
- $3R_1\text{COOCH}_3$ es el metil éster de ácido graso (biodiesel)
- $C_3H_8O_3$ es glicerol

En el ámbito de la biorrefinería, se utiliza el concepto de biorrefinación, de manera similar a las refinerías de petróleo, para procesar biomasa sostenible y generar energía, biocombustibles y productos de alto valor. Esto incluye el fraccionamiento de la biomasa de microalgas para obtener compuestos de alto valor agregado y lípidos destinados a la producción de biodiésel. La viabilidad económica de producir biodiésel se puede lograr al integrar la producción con otros coproductos de la biomasa, como proteínas, carbohidratos y compuestos funcionales valiosos.

En este contexto, los sistemas de doble propósito se han conceptualizado para reincorporar componentes nutritivos en aguas residuales en la generación de biomasa. Estos sistemas permiten obtener productos de alto valor y biocombustibles mediante procesos como la biorremediación, la obtención de biogás a través de la digestión anaerobia de residuos y la recuperación de biomasa con métodos mecánicos y fisicoquímicos. Este enfoque modular integra diferentes etapas, desde el pretratamiento de efluentes residuales hasta la obtención de productos finales, optimizando así la producción y transformación de las microalgas en una biorrefinería.

Digestión anaerobia de residuos de microalgas y la transesterificación de lípidos

Los residuos generados en los procesos relacionados con la biomasa de microalgas pueden ser aprovechados para producir biogás, lo cual podría incrementar la producción energética dentro del proceso o disminuir los requerimientos energéticos de una planta de producción y procesamiento de microalgas como se observa en la Figura 4. Esta estrategia contribuye a cerrar el ciclo de los recursos y a optimizar la eficiencia energética en la producción de biocombustibles a partir de microalgas. Las investigaciones indican que la extracción de lípidos puede servir como un pretratamiento autónomo. En todas las comparaciones entre biomasa residual y biomasa no tratada, se observó una mejora en la tasa de digestión y un incremento en la producción de metano en los primeros días del proceso (Ehimen et al., 2009). Las microalgas ofrecen una opción viable para tratar aguas residuales debido a su habilidad para eliminar nutrientes y el elevado valor comercial de la biomasa que generan.

Por otro lado, el biodiésel normalmente se produce mediante transesterificación de lípidos (principalmente triglicéridos, TG) utilizando un alcohol como aceptor de acilo y un catalizador (Khan et al. 2009). A menudo se utilizan alcoholes de cadena corta primarios o secundarios, como metanol, etanol o isopropanol (Ghadge y Raheman 2006). La extracción de lípidos de microalgas generalmente se realiza utilizando solventes. La extracción Soxhlet con hexano y el método de extracción Blight and Dyer utilizando una mezcla de solventes (cloroformo/metanol) son las técnicas más utilizadas para la extracción de lípidos de microalgas (Lee et al., 2010), donde la eficiencia de extracción disminuye con el incremento del contenido de agua en la biomasa. La transesterificación de lípidos para la producción de biodiésel a partir de microalgas se realiza mediante catálisis homogénea y heterogénea, cada una con rutas ácidas y alcalinas, que presentan características distintivas. En el caso de la catálisis alcalina homogénea, se ha reportado una alta velocidad de reacción y un alto rendimiento de conversión. Esta ruta es popular debido a su bajo costo y la amplia disponibilidad de los catalizadores alcalinos, como el hidróxido de sodio (NaOH) o el hidróxido de potasio (KOH).

No obstante, los catalizadores alcalinos homogéneos presentan una limitación importante: su sensibilidad a la presencia de agua y ácidos grasos libres, ya que bajo estas condiciones puede producirse saponificación, dificultando la separación del biodiésel y reduciendo el rendimiento del proceso. Una alternativa con mejores perspectivas en términos de sostenibilidad es la catálisis alcalina heterogénea. Este tipo de catalizadores, como los óxidos metálicos sólidos, ofrece una alta actividad catalítica y, además, puede ser reutilizado en múltiples ciclos. Su menor susceptibilidad a contaminantes como el agua o los ácidos grasos libres contribuye a reducir la formación de jabones, facilitando la purificación del biodiésel. En cambio, la catálisis ácida homogénea, si bien es adecuada para procesar materias primas de baja calidad con alto contenido de impurezas, presenta tasas de reacción considerablemente más bajas —hasta 4000 veces inferiores— en comparación con sus equivalentes alcalinos. Esto limita su aplicación en procesos de gran escala debido a su baja eficiencia (Maheshwari et al. 2022).

Por otro lado, la catálisis ácida heterogénea enfrenta obstáculos adicionales, como la lixiviación del catalizador, que compromete su estabilidad y puede generar residuos contaminantes en el producto final. Además, esta ruta requiere condiciones de operación más exigentes, como temperaturas elevadas, relaciones molares alcohol/aceite altas y tiempos de reacción prolongados, factores que incrementan el consumo energético y los costos globales del proceso. La selección del sistema catalítico óptimo dependerá, en última instancia, de variables como la composición del aceite extraído de microalgas, la disponibilidad de recursos, las metas de sostenibilidad y las condiciones específicas del proceso de producción de biodiésel (Zavala, 2024).

Transesterificación directa en microalgas

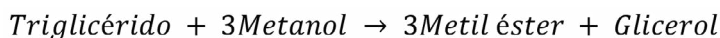
La producción de biodiésel se basa principalmente en el uso de lípidos refinados como materia prima, que contribuyen hasta el 70% de los costos totales del biodiésel. Por lo tanto, reducir los pasos de extracción y purificación de lípidos podría ser una forma útil de disminuir los costos de producción de biodiésel a partir de microalgas. Una alternativa al

proceso convencional es la transesterificación directa, donde la extracción de lípidos y la transesterificación se llevan a cabo en un solo paso, con una reacción directa de la biomasa a biodiésel.

En el proceso de transesterificación directa, el alcohol desempeña un papel vital en la reacción, actuando como disolvente (extrayendo los lípidos de las células) y como aceptor de acilo (convirtiendo los lípidos en ésteres alquílicos de ácidos grasos) (Wahlen et al. 2011). El metanol (MeOH) ha sido el alcohol más utilizado en el proceso de transesterificación directa, aunque puede extraer menos TG de la biomasa de microalgas en comparación con otros alcoholes en un proceso de transesterificación directa, en este tipo de reacciones el efecto del alcohol es complementario al tipo de catalizador. Normalmente, las relaciones molares MeOH/lípidos utilizados para la transesterificación directa son mucho más altas que el valor estequiométrico para favorecer la formación de productos, ya que la transesterificación es una reacción de equilibrio.

Para una reacción de esterificación común, podemos realizar un balance energético en términos de la energía de formación estándar de los productos menos los reactivos, como se describe a continuación.

Ec. 2



Por ejemplo, para obtener metil palmitato a partir de tripalmitina, la diferencia de energía entre productos y reactivos es exotérmica:

Ec. 3

$$\Delta H_{\text{reacción}} = \sum \Delta H_{\text{productos}} - \sum \Delta H_{\text{reactivos}}$$

Ec. 4

$$\Delta H_{\text{reacción}} = \left[3 \left(-762.4 \frac{\text{kJ}}{\text{mol}} \right) + \left(-710 \frac{\text{kJ}}{\text{mol}} \right) \right] - \left[\left(-2150 \frac{\text{kJ}}{\text{mol}} \right) + 3 \left(-201 \frac{\text{kJ}}{\text{mol}} \right) \right] = -244.2 \frac{\text{kJ}}{\text{mol}}$$

Si consideramos el cambio de entropía típico (ΔS) como $+0.1 \frac{\text{kJ}}{(\text{mol} * \text{K})}$ a 298.15 K la energía libre de Gibbs sería:

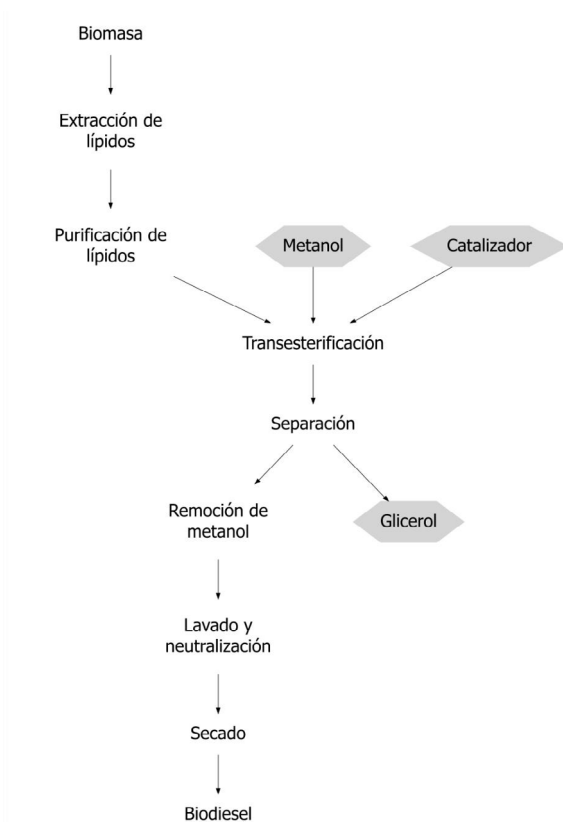
Ec. 5

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S$$

Ec. 6

$$\Delta G = -244.2 \frac{kJ}{mol} - \left(298.15 K * + 0.1 \frac{kJ}{(mol * K)} \right) = -274.015 \frac{kJ}{mol}$$

Figura 4. Proceso convencional de producción de biodiesel



Fuente: Modificado de Ghadge y Rahman, 2006.

Lo anterior denota que la reacción de transesterificación procederá de manera espontánea, favoreciendo la formación de biodiésel sin necesidad de aporte energético.

Rol de la temperatura, tiempo de reacción y co-solventes en la producción de biodiesel

Estudios previos de transesterificación convencional y directa han demostrado que al aumentar la temperatura, el tiempo necesario para alcanzar el máximo rendimiento de biodiesel disminuye. Este efecto se ha reportado principalmente para reacciones de transesterificación catalizadas por ácido (Wahlen et al. 2011). Este incremento puede atribuirse a una mayor miscibilidad entre las especies que reaccionan. La temperatura es fundamental en el proceso de transesterificación y tiene un efecto positivo en el rendimiento de extracción de lípidos debido al incremento en la solubilidad de los lípidos. Además, las altas temperaturas pueden aumentar el rendimiento de la producción de biodiésel, pero también inducir la degradación de los lípidos (Canakci y Van Gerpen 2003).

En el proceso de transesterificación directa de biomasa de microalgas, la selección del alcohol es fundamental, ya que cumple una doble función: actúa como agente extractante de los lípidos de la biomasa y como aceptor de acilo en la reacción de transesterificación para la producción de biodiésel. Sin embargo, los alcoholes alifáticos como el metanol, aunque populares por su bajo costo y alta reactividad, muestran un rendimiento limitado cuando se utilizan solos para la extracción de lípidos. Una estrategia empleada para superar las limitaciones en la extracción y conversión de lípidos es la incorporación de co-solventes en el medio de reacción. Esta adición favorece la solubilización de los lípidos presentes en la biomasa microalgal, lo que mejora la transferencia de masa entre fases y puede acelerar significativamente tanto la extracción como la transesterificación, reduciendo los tiempos de reacción y aumentando el rendimiento de biodiesel (Pérez-Bravo et al., 2022).

Entre los cosolventes más utilizados se encuentra el hexano, un compuesto no polar con alta afinidad por lípidos, que ha mostrado buenos resultados al emplearse en combinación con metanol, al facilitar la disolución de triglicéridos y favorecer su conversión. La acetona, por su parte, al ser un disolvente polar, puede desestabilizar la membrana celular de las microalgas, permitiendo una liberación más eficiente de lípidos, además de mejorar la miscibilidad entre los componentes de la

reacción. En matrices celulares más complejas o resistentes, el tolueno ha resultado útil como medio de extracción por su carácter no polar y su capacidad de penetración. Asimismo, el tetrahidrofurano (THF), solvente polar aprotónico, ha sido empleado con éxito para mejorar la solubilidad de lípidos y otros compuestos orgánicos, promoviendo una interacción más eficiente entre los reactivos en la mezcla de reacción y facilitando la conversión a biodiésel (Rodríguez Bustamante et al., 2022).

Producción de biogás y su valorización

Durante la digestión anaerobia, la materia orgánica es degradada por consorcios microbianos en ausencia de oxígeno, generando como producto principal una mezcla gaseosa conocida como biogás. Esta mezcla está compuesta principalmente por metano (CH_4) y dióxido de carbono (CO_2), aunque también pueden encontrarse trazas de nitrógeno (N_2), hidrógeno (H_2), sulfuro de hidrógeno (H_2S), vapor de agua, amoníaco (NH_3) y otros compuestos, cuya presencia varía según el tipo y la composición del sustrato utilizado. La valorización energética del biogás consiste en su transformación en una fuente de energía útil, lo cual puede realizarse mediante cogeneración para la obtención simultánea de electricidad y calor, o bien a través del proceso de purificación para la producción de biometano. Este último puede ser inyectado a la red de gas natural o empleado como combustible en el sector transporte (Chrispim et al., 2021).

Además de su contribución al aprovechamiento energético de residuos orgánicos, el uso del biogás representa una estrategia efectiva para reducir emisiones de gases de efecto invernadero, diversificar la matriz energética y disminuir la dependencia de combustibles fósiles. Su implementación en contextos rurales o aislados permite también generar soluciones energéticas descentralizadas, con impacto directo en la seguridad energética y el desarrollo local. La integración del biogás en sistemas energéticos sostenibles se alinea con políticas de economía circular y transición energética, posicionándolo como una alternativa viable para avanzar hacia modelos más resilientes y ambientalmente responsables.

Coproductos de la biomasa de *Scenedesmus*

La biomasa de *Scenedesmus* genera coproductos con alto valor agregado que pueden ser aprovechados en múltiples sectores industriales, lo que refuerza su papel dentro de esquemas de biorrefinería integrales. Más allá de los lípidos empleados en la producción de biodiésel, estas microalgas son fuentes relevantes de proteínas de calidad, carbohidratos fermentables, pigmentos naturales y compuestos bioactivos. Las proteínas extraídas de *Scenedesmus* poseen un perfil de aminoácidos equilibrado y buena digestibilidad, lo que las hace aptas para su incorporación en formulaciones alimentarias, suplementos nutricionales e incluso alimentos balanceados para animales. Su potencial como ingrediente funcional ha sido ampliamente documentado, especialmente en el contexto de dietas sostenibles (Balan et al., 2023). En cuanto a los carbohidratos presentes en la biomasa, estos pueden ser utilizados como materia prima para la obtención de biocombustibles de segunda generación, precursores químicos y materiales biodegradables. Esta versatilidad convierte a *Scenedesmus* en una plataforma atractiva para el desarrollo de procesos bioeconómicos (Kruger et al., 2022).

Asimismo, los pigmentos naturales como la clorofila, carotenoides y ficobiliproteínas extraídos de estas microalgas han mostrado aplicaciones prometedoras como colorantes naturales en alimentos, además de su uso en productos cosméticos y farmacéuticos debido a sus propiedades antioxidantes, antiinflamatorias y fotoprotectoras. Estos pigmentos pueden ser extraídos y purificados para su uso en una variedad de productos, desde alimentos y bebidas hasta cremas solares y productos para el cuidado de la piel. Además, la biomasa de *Scenedesmus* contiene una variedad de compuestos bioactivos, como antioxidantes, vitaminas y ácidos grasos omega-3, que ofrecen beneficios para la salud humana y animal. Estos compuestos pueden ser utilizados en la formulación de suplementos nutricionales, productos farmacéuticos y alimentos funcionales, contribuyendo así a mejorar la salud y el bienestar de las personas y los animales (Magro et al., 2021).

Integración de la economía circular en la producción de biodiesel a partir de microalgas

La economía circular es un modelo de producción y consumo que busca extender el ciclo de vida de los productos, reduciendo al mínimo el desperdicio mediante la reutilización, reparación, reciclaje y valorización de los recursos. Este enfoque contrasta con el modelo lineal tradicional de “tomar, hacer, desechar”, promoviendo en su lugar un sistema regenerativo donde los materiales y la energía circulan en la economía durante el mayor tiempo posible. En el contexto de la bioenergía, la economía circular se presenta como una estrategia esencial para la sostenibilidad, especialmente en la producción de biocombustibles a partir de biomasa.

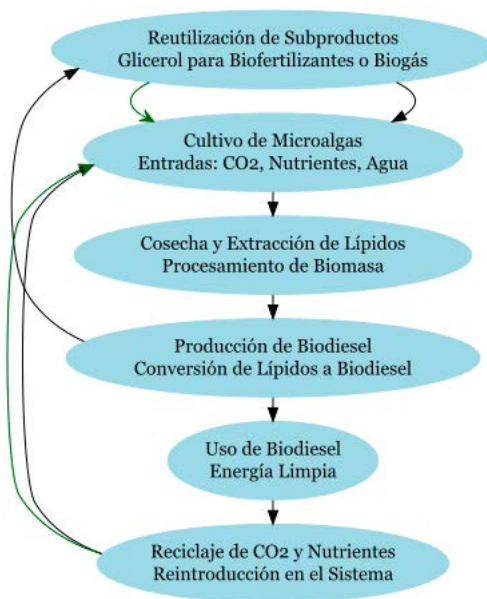
El ciclo de la economía circular aplicado a la producción de biodiésel a partir de microalgas se muestra en la Figura 5. El proceso se inicia con la cultivación de microalgas, donde se utilizan insumos fundamentales como dióxido de carbono (CO_2), nutrientes y agua. Las microalgas, al captar CO_2 de la atmósfera o de fuentes industriales, desempeñan un papel crucial en la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero. Este paso inicial es crítico para asegurar la acumulación de biomasa rica en lípidos, que servirá como materia prima en etapas posteriores.

Tras la fase de cultivo, se procede a la cosecha y extracción de lípidos, donde la biomasa obtenida es procesada para extraer los lípidos, los cuales son los precursores del biodiésel. Este proceso de extracción es vital para maximizar la eficiencia del sistema, asegurando la obtención de la mayor cantidad de lípidos posible a partir de la biomasa disponible. A continuación, la producción de biodiésel se lleva a cabo mediante la transesterificación de los lípidos extraídos, transformándolos en biodiésel y generando glicerol como subproducto. Este biodiésel representa una fuente de energía renovable y de baja emisión de carbono, alineada con los objetivos de sostenibilidad.

La utilización del biodiésel es la fase donde el biocombustible se emplea como energía limpia, sustituyendo a los combustibles fósiles convencionales y contribuyendo a la reducción de la huella de carbono en el sector energético. Esta etapa demuestra el impacto positivo del biodiésel en la mitigación del cambio climático. Para cerrar el ciclo, el

diagrama incluye dos procesos fundamentales: el Reciclaje de CO₂ y Nutrientes y la Reutilización de Subproductos. El CO₂ y los nutrientes, que se generan como residuos en etapas anteriores, son capturados y reintroducidos en el sistema de cultivo de microalgas, promoviendo la autosuficiencia y sostenibilidad del proceso. Por su parte, el glicerol, un subproducto de la producción de biodiésel, es valorizado mediante su conversión en biofertilizantes o biogás, integrando aún más el ciclo productivo en un marco de economía circular.

Figura 5. Diagrama conceptual de la economía circular en la producción de biodiesel a partir de microalgas.



Conclusiones

Las microalgas del género *Scenedesmus* se han consolidado como una alternativa prometedora dentro de esquemas de economía circular, debido a su eficiencia en la producción de biocombustibles y en la generación de compuestos con alto valor agregado. Su capacidad para desarrollarse en aguas residuales y entornos no aptos para cultivos agrícolas permite integrar procesos de tratamiento de efluentes con la producción de bio-

masa, reduciendo simultáneamente impactos ambientales y demandas energéticas asociadas al uso de recursos fósiles. La elevada concentración de lípidos y la favorable composición de ácidos grasos en *Scenedesmus* permiten obtener un biodiésel de calidad técnica comparable —e incluso superior— al derivado de fuentes convencionales. Esta característica, junto con la posibilidad de implementar sistemas acoplados para el cultivo de microalgas y el tratamiento de aguas residuales, evidencia la viabilidad de modelos sostenibles basados en el aprovechamiento integral de la biomasa.

Además, los coproductos obtenidos, como proteínas, carbohidratos y pigmentos naturales, amplían el rango de aplicaciones industriales, con usos potenciales en los sectores alimentario, farmacéutico y cosmético. La valorización de estos compuestos no solo mejora la rentabilidad del proceso, sino que refuerza su sustentabilidad al diversificar los productos obtenidos y minimizar la generación de residuos. El cultivo y estudio del género de microalgas *Scenedesmus* ofrece una oportunidad para avanzar hacia un modelo energético y económico más sostenible. Su integración en la economía circular no solo promueve un uso más eficiente de los recursos naturales, sino que también contribuye a la creación de una sociedad más resiliente y preparada para enfrentar los desafíos ambientales del siglo XXI. La capacidad de estas microalgas para transformar residuos en recursos y su potencial para ser un componente clave en la biorrefinería del futuro subrayan su relevancia en la transición hacia una economía más verde y circular.

Referencias

- Acuicola, M. A. P. Y. D. (s. f.). Un gran futuro por delante en la biotecnología de microalgas para remediar aguas residuales. *MisPeces*. <https://www.mispecies.com/noticias/Un-gran-futuro-por-delante-en-la-biotecnologia-de-microalgas-para-remediar-aguas-residuales/>
- Ahmad, A. L., Mat Yasin, N. H., Derek, C. J. C., Lim, J. K. 2011. Microalgae as a sustainable energy source for biodiesel production: A review. *Renew. Sust. Energ. Rev.* 15, 584–593. Recuperado en 01 de mayo de 2024, de <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/>

- pii/S1364032110003059
- Allen, M. (s. f.). *Scenedesmus quadricauda* [Imagen de microscopía electrónica de barrido coloreada]. Cortesía de Plymouth Marine Laboratory. *Scenedesmus Quadricauda #1 Photograph by Steve Gschmeissner/science Photo Library - Fine Art America*
- Andrade, R., Charity, E., Vera, B., Alexandra, L., Cárdenas, L., Carmen, H., & Morales, A., Ever, D. (2009). Producción de biomasa de la microalga *Scenedesmus* sp. utilizando aguas residuales de pescadería. *Revista Técnica de la Facultad de Ingeniería Universidad del Zulia*, 32(2).
- Balat, M. (2011). Potential alternatives to edible oils for biodiesel production: A review. *Energy Conversion and Management*, 52(2), 1479-1492.
- Canakci, M., & Van Gerpen, J. (2003). Una planta piloto para producir biodiesel a partir de materias primas con alto contenido de ácidos grasos libres. *Trans Am Soc Agric Eng*, 46(4), 945-954. <https://elibrary.asabe.org/abstract.asp?aid=13949>
- Castillo, O. S., Torres-Badajoz, S. G., Núñez-Colín, C. A., Peña-Caballero, V., Herrera Méndez, C. H., & Rodríguez-Núñez, J. R. (2017). Producción de biodiésel a partir de microalgas: avances y perspectivas biotecnológicas. *Hidrobiológica*, 27(3), 337-352.
- Castro, J. (2011). Perspectivas de la demanda energética global. *Petrotecnia*, 1, 54-70. <https://www.petrotecnia.com.ar/abril11/sin/Demanda.pdf>
- Chasquibol Calongos, S. D. (2021). *Revisión de las técnicas de producción de biocombustibles a partir de microalgas*. <https://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/60819>
- Chia, S. R., Ling, J., Chia, W. Y., Nomanbhay, S., Kurniawan, T. A., & Chew, K. W. (2023). Future bioenergy source by microalgae-bacteria consortia: a circular economy approach. *Green Chemistry*, 25(22), 8935-8949.
- Chrispim, M. C., Scholz, M., & Nolasco, M. A. (2021). Biogas recovery for sustainable cities: A critical review of enhancement techniques and key local conditions for implementation. *Sustainable Cities and Society*, 72, 103033.
- Crean empresa en NL para producir biocombustibles. (2013, 3 de septiembre). *El Financiero*. <https://www.elfinanciero.com.mx/empresas/>

- p>crean-empresa-en-nl-para-producir-biocombustibles/
-
- Figge, F., Thorpe, A. S., & Gutberlet, M. (2023). Definitions of the circular economy: Circularity matters. *Ecological Economics*, 208, 107823
- Ghadge, S., & Raheman, H. (2006). Optimización de procesos para la producción de biodiesel a partir de aceite de mahua (*Madhuca indica*) utilizando la metodología de superficie de respuesta. *Tecnología de biorrecursos*, 97(3), 379–384.
- García Cuenca, H. (2015). *Sistemas de cultivo de microalgas para la depuración de aguas residuales y producción de biocombustibles*. <https://dspace.umh.es/handle/11000/2710>
- Greenwell, H. C., Laurens, M. L., Shields, R. J., Lovitt, R. W., & Flynn, K. J. (2009). *Placing microalgae on the biofuels priority list: a review of the technological challenges*.
- Hernández-Pérez, A., & Labbé, J. I. (2014). Microalgas, cultivo y beneficios. *Revista de biología marina y oceanografía*, 49(2), 157-173.
- Hidalgo, P., Toro, C., Ciudad, G., & Navia, R. (2013). Advances in direct transesterification of microalgal biomass for biodiesel production. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, 12, 179-199.
- Huang, G. H., Chen, F., Wei, D., Zhang, X. W., & Chen, G. (2010). Biodiesel production by microalgal biotechnology. *Applied Energy*, 87(1), 38-46.
- Johnson, M., & Wen, Z. (2009). Producción de combustible biodiesel a partir de la microalga *Schizochytrium limacinum* mediante transesterificación directa de biomasa de algas. *Combustibles energéticos*, 23(10), 5179–5183.
- Jorge-Luis, S. O., & Jorge-Enrique, L. G. (2023). Microalgas: relación bibliométrica de las biorrefinerías, la economía circular y el medio ambiente. *Biotecnología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial*, 21(2), 145-160.
- Kafarov, V., González, A. D., & Guzmán Monsalve, A. (2009). *Desarrollo de métodos de extracción de aceite en la cadena de producción de biodiesel a partir de microalgas*. <http://repositorio.uac.edu.co/handle/11619/1348>
- Khan, S., Rashmi, M. H., Prasad, S., & Banerjee, U. (2009). Perspectivas de la producción de biodiesel a partir de microalgas en la India. *Renovar la energía sostenible Rev*, 13(9), 2361–2372. <https://econpapers.repec>

- org/article/eeerensus/v_3a13_3ay_3a2009_3ai_3a9_3ap_3a2361-2372.htm
- Kruger, J. S., Wiatrowski, M., Davis, R. E., Dong, T., Knoshaug, E. P., Nagle, N. J., ... & Pienkos, P. T. (2022). Enabling production of algal biofuels by techno-economic optimization of co-product suites. *Frontiers in Chemical Engineering*, 3, 803513.
- Kumar, V., Vangnai, A. S., Sharma, N., Kaur, K., Chakraborty, P., Umesh, M., ... & Taherzadeh, M. J. (2023). Bioengineering of biowaste to recover bioproducts and bioenergy: a circular economy approach towards sustainable zero-waste environment. *Chemosphere*, 319, 138005.
- Lee, J., Yoo, C., Jun, S., Ahn, C., & Oh, H. (2010). Comparación de varios métodos para la extracción eficaz de lípidos de microalgas. *Tecnología de biorrecursos*, 101(1), 575–577.
- Magro, F. G., Freitag, J. F., Bergoli, A., Cavanhi, V. A. F., & Colla, L. M. (2021). Microalgae consortia cultivation using effluents for bioproduct manufacture. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, 20(3), 865-886.
- Maheshwari, P., Haider, M. B., Yusuf, M., et al. (2022). A review on latest trends in cleaner biodiesel production: Role of feedstock, production methods, and catalysts. *Journal of Cleaner Production*, 355, 131588.
- Parra Huertas, R. A. (2015). Digestión anaeróbica: mecanismos biotecnológicos en el tratamiento de aguas residuales y su aplicación en la industria alimentaria. *Producción + Limpia*, 10(2), 142-159.
- Pérez-Bravo, S. G., Aguilera-Vázquez, L., Castañeda-Chávez, M. D. R., & Gallardo-Rivas, N. V. (2022). Condiciones del proceso de transesterificación en la producción de biodiésel y sus distintos mecanismos de reacción. TIP. *Revista especializada en ciencias químico-biológicas*, 25.
- Ramos, F. D., Díaz, M. S., & Villar, M. A. (2016). *Biocombustibles*. Recuperado en 23 de junio de 2024, de <https://ri.conicet.gov.ar/handle/11336/25791>
- Ramos Suárez, J. L. (2014). *Producción de biogás a partir de biomasa de la microalga Scenedesmus sp. procedente de diferentes procesos* [Tesis doctoral, E.T.S.I. Agrónomos (UPM)]. Repositorio Institucional de la Universidad Politécnica de Madrid. <https://doi.org/10.20868/>

UPM.thesis.28957

- Rawat, I., Kumar, R., Mutanda, T., & Bux, F. (2011). Dual role of microalgae: phycoremediation of domestic wastewater and biomass production for sustainable biofuels production. *Applied Energy*, 88, 3411-3424.
- Rodríguez Bustamante, J. I., Meza Gago, D. J., & Gutiérrez Rodríguez, I. D. C. (2022). Rendimiento de producción de biodiesel por transesterificación a partir de aceite de soja usado. *Fides et Ratio-Revista de Difusión cultural y científica de la Universidad La Salle en Bolivia*, 23(23), 149-176.
- Servicios – BioLets. (s.f.). <https://biolets.com/servicios/>
- Stephanopoulos, G., Fischer, C. R., & Klein-Marcuschamer, D. (2008). Selection and optimization of microbial hosts for biofuels production. *Metabolic Engineering*, 10(6), 295-304.
- Villasmil, T. (2004). *Aislamiento, Identificación y cultivo de cianobacterias presentes en la Laguna Gato Negro, Municipio Maracaibo, Estado Zulia*. La Universidad del Zulia. Recuperado el 29 de abril de 2024, de [Enlace no proporcionado]
- Wahlen, B., Willis, R., & Seefeldt, L. (2011). Producción de biodiesel mediante extracción y conversión simultánea de lípidos totales de microalgas, cianobacterias y cultivos mixtos silvestres. *Tecnología de biorrecursos*, 102(3), 2724-2730.
- Zavala, J. R. S. (2024). *Estudio de la catálisis heterogénea en la esterificación de ácido acético con etanol*. (Tesis Doctoral, Universidad Nacional Autónoma de México).

