

Revisión de las consideraciones metodológicas utilizadas en estudios ambientales con enfoque de ciclo de vida sobre la producción de microalgas con fines energéticos

Revisão das considerações metodológicas utilizadas nos estudos ambientais com abordagem de ciclo de vida sobre a produção de microalgas com fins energéticos

Review of the methodological considerations used in environmental studies with a life cycle approach on the production of energy-ended microalgae

Submetido em 13 de outubro 2017
Aceito em 25 de junho 2018
Disponível em 3 de outubro 2018

Paula Daniela Rodríguez*,**
Alejandro Pablo Arena*,**
Bárbara María Civit*,***
Roxana Piastrellini*,**

*Grupo CLIOPE, Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Mendoza, Argentina

**Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas CONICET. Mendoza, Argentina

pdrodriguez@mendoza-conicet.gob.ar (+54) 261 5244693

***Instituto de Ambiente, Hábitat y Energía INAHE, Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas CONICET. Mendoza, Argentina.

Resumen

El Análisis del Ciclo de Vida (ACV) ha sido utilizado por distintos autores para evaluar la producción de microalgas con fines energéticos. Sin embargo, desde la perspectiva energética y ambiental, no existen conclusiones generales acerca de ella, no sólo por las diferencias tecnológicas entre los sistemas estudiados, sino también por las distintas elecciones metodológicas adoptadas por los autores. Este trabajo tiene como objetivos hallar los principales aspectos que dificultan la comparación de los resultados de diversos estudios con enfoque de ciclo de vida de sistemas de producción de microalgas con fines energéticos, y proponer recomendaciones que permitan armonizar las elecciones metodológicas de futuros estudios. Para ello, se llevó a cabo una amplia revisión de la literatura y se seleccionaron aquellas publicaciones que consideran el cultivo de microalgas en sistemas cerrados, esto es fotobiorreactores de cualquier configuración (tubulares, flat-plate, air-lift, etc.). Las 13 publicaciones elegidas se evaluaron según los lineamientos ofrecidos por las normas ISO 14040 y

14044. Los resultados indican que factores como el producto estudiado, la unidad funcional seleccionada, los límites del sistema, los procedimientos de asignación de cargas ambientales utilizados, las fuentes de datos, los métodos de evaluación de impactos y las categorías de impacto escogidas difieren ampliamente entre estudios, imposibilitando la comparación de los mismos para llegar a conclusiones confiables. Por lo tanto, se considera necesario armonizar las elecciones metodológicas de los futuros estudios de ACV de biocombustibles de tercera generación. Para ello, se propone una serie de recomendaciones dirigidas a colaborar en la evaluación de los impactos ambientales de estos sistemas.

Palabras clave: *Análisis del Ciclo de Vida. Bioenergía. Biocombustibles de tercera generación.*

Resumo

A Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) tem sido utilizada por diversos autores para avaliar a produção de microalgas com fins energéticos. No entanto, desde a perspectiva energética e ambiental, não existem conclusões gerais sobre ela, não só pelas diferenças tecnológicas entre os sistemas estudados, mas também pelas distintas escolhas metodológicas adotadas pelos autores. Este trabalho tem como objetivo encontrar os principais aspectos que dificultam a comparação dos resultados de diversos estudos com abordagem de ciclo de vida de sistemas de produção de microalgas com fins energéticos, e propor recomendações que permitam harmonizar as escolhas metodológicas de futuros estudos. Para isso, foi realizada uma ampla revisão bibliográfica e foram selecionadas aquelas publicações que consideram o cultivo de microalgas em sistemas fechados, ou seja, fotobiorreatores de qualquer configuração (tubulares, flat-plate, air-lift, etc.). As treze publicações escolhidas foram avaliadas conforme as diretrizes presentes nas normas ISO 14040 e 14044. Os resultados indicam que fatores como o produto estudado, a unidade funcional selecionada, os limites do sistema, os procedimentos da atribuição de cargas ambientais utilizados, as fontes de dados, os métodos de avaliação de impactos e as categorias de impactos escolhidas diferem amplamente entre os estudos, impossibilitando a comparação dos mesmos para chegar a resultados confiáveis. Portanto considera-se necessário harmonizar as escolhas metodológicas dos futuros estudos de ACV de biocombustíveis de terceira geração. Para isso, propõe-se uma série de recomendações que visam a colaboração na avaliação dos impactos ambientais desses sistemas.

Palavras-chave: *Avaliação do ciclo de vida. Bioenergia. Biocombustível de terceira geração.*

Abstract

The Life Cycle Assessment (LCA) has been used by different authors to measure the production of microalgae for energy purposes. However, from the energy and environmental perspective, there are no general conclusions about this, not only because of the technological differences between the systems studied, but also because of the different methodological options adopted by the authors. The objective of this work is to find the main aspects that make it difficult to compare the results of several studies with a life cycle approach of microalgae production systems for energy purposes, and propose recommendations that allow harmonizing the methodological choices of future studies. For this, a wide review of the literature was carried out and those publications that consider the cultivation of microalgae in closed systems, that is, photobioreactors of any configuration (tubular, flat plate, air lift, etc.), were selected. The 13 selected publications were evaluated in accordance with the guidelines offered by the ISO 14040 and 14044 standards. The results indicate that factors such as the product studied, the selected functional unit, the limits of the system, the environmental allocation procedures used, the data resources, the impact evaluation methods and the impact categories chosen differ widely among the studies, making it impossible to compare them to arrive at reliable conclusions. Therefore, it is considered necessary to harmonize the methodological choices of future LCA studies of third generation biofuels. For this, a series of recommendations are proposed to collaborate in the evaluation of the environmental impacts of these systems.

Keywords: *Life Cycle Assessment. Bioenergy. Third generation biofuel.*

1. Introducción

Los problemas ambientales asociados al uso de combustibles fósiles, sumados a la creciente demanda energética de la población mundial, señalan la necesidad de utilizar energías alternativas (Ahmad et al., 2011; Chisti, 2007). Numerosos estudios se han realizado con el objeto de hallar fuentes de energías renovables, basadas en procesos sustentables, que sean capaces de sustituir a los combustibles fósiles (Li et al., 2008). En este escenario, los combustibles líquidos derivados de biomasa, denominados biocombustibles, como el biodiésel y el etanol, cobran relevancia como

sustitutos de los combustibles tradicionales, con una producción creciente en los últimos años (Ahmad et al., 2011; Abomohra et al., 2016).

Los biocombustibles pueden ser obtenidos a partir de varias materias primas: cultivos comestibles, cultivos no comestibles y residuos, y microalgas (primera, segunda y tercera generación de biocombustibles, respectivamente) (Carneiro et al., 2017). Actualmente, los biocombustibles de primera generación enfrentan una serie de controversias, entre las que se destacan los impactos producidos por el cambio en el uso del suelo, el uso del agua y la competencia con la producción de alimentos (Sander y Murthy, 2010). Es por ello que se han llevado a cabo estudios focalizados en el desarrollo de biocombustibles obtenidos a partir de materia prima no alimenticia, entre los que se encuentran los de segunda y tercera generación. Sin embargo, la segunda generación, a pesar de no usar recursos destinados directamente a la alimentación, requiere el uso de tierras, agua e insumos agrícolas para su producción (Sander y Murthy, 2010). Esta situación ha provocado que, en años recientes, las microalgas hayan sido consideradas como la fuente de biomasa óptima para la obtención de biocombustibles, principalmente biodiésel, lo que ha incrementado el número de publicaciones sobre ellas.

El Análisis de Ciclo de Vida (ACV) es un método para evaluar los aspectos ambientales y potenciales impactos asociados a un producto durante su ciclo de vida (ISO, 2006a). Este método ha sido utilizado por diversos autores para la evaluación de sistemas de producción de microalgas con fines de generación de energía, siendo usual que los resultados se confronten con el objeto de arribar a conclusiones generalizadas sobre los impactos y las bondades que estos sistemas ofrecen. Sin embargo, la equivalencia de los sistemas a comparar debe evaluarse antes de interpretar los resultados. Los sistemas deben ser comparados utilizando la misma unidad funcional y consideraciones metodológicas equivalentes, teniendo en cuenta los límites de los sistemas, la calidad de los datos, los procedimientos de asignación de cargas ambientales, la evaluación de impactos, etc. (ISO, 2006a y 2006b).

Se ha notado que existe heterogeneidad en las elecciones metodológicas y supuestos adoptados en los distintos estudios ambientales sobre la producción de microalgas para generación de energía, lo que constituye un impedimento para la correcta comparación de los mismos. Escasas publicaciones ponen en evidencia estas discrepancias, destacándose la de Thomassen et al. (2017), quienes analizan estudios ambientales y económicos sobre biorrefinerías de microalgas, realizados con distintas metodologías. Mientras que estos autores proponen un marco metodológico amplio, que integra aspectos ambientales y económicos, sin profundizar sobre aspectos específicos del ACV, el presente trabajo intenta aportar recomendaciones puntuales para los estudios ambientales realizados con enfoque de ciclo de vida. Por ello, los objetivos de este trabajo son: hallar los principales aspectos que dificultan la comparación de los resultados de diversos estudios con enfoque de ciclo de vida de sistemas de producción de microalgas con fines energéticos, y proponer recomendaciones que permitan armonizar las elecciones metodológicas de futuros estudios.

1.1. Las microalgas como materia prima para la obtención de biocombustibles

Las microalgas son microorganismos fotosintéticos unicelulares y pluricelulares simples, procariotas (cianobacterias) o eucariotas (Li et al., 2008). Su rápida tasa de crecimiento y su alta productividad en aceite las colocan como una materia prima promisoría para la producción de biodiésel. Además, junto con la obtención de biocombustibles, las microalgas pueden ser utilizadas para generar co-productos de gran valor para la alimentación humana y animal, la síntesis de pigmentos, la industria farmacéutica y la cosmética (Suganya et al., 2015; Oilgae, 2014). Asimismo, son capaces de brindar servicios para el ambiente, como la fijación de dióxido de carbono proveniente de la atmósfera y/o de gases industriales y el tratamiento de aguas residuales (Suganya et al., 2015). Debido a las múltiples aplicaciones de las microalgas, recientemente se han incrementado los estudios sobre ellas, especialmente

aquellos relacionados con la utilización de estos microorganismos para producir combustibles (Batan et al., 2010; Collet et al., 2014).

La obtención de biocombustibles a partir de microalgas requiere de una serie de procesos que pueden dividirse en la producción de la biomasa y la generación de los combustibles. La producción de la biomasa comienza con el cultivo de las microalgas en sistemas abiertos o cerrados. Los primeros están representados por piletas abiertas (en inglés, open ponds), entre las que se destacan las de tipo raceway. Los segundos comprenden a los fotobiorreactores (FBR), que pueden presentar distintas configuraciones: tubulares horizontales o verticales, flat-plate, air-lift, anulares, entre otros. Además, existen sistemas híbridos, que combinan el uso de FBR y piletas en forma secuencial. Los medios de cultivo son variados, incluyendo medios artificiales y aguas residuales de distinto origen (doméstico, agroindustrial, etc.). Luego del crecimiento de las microalgas se requiere separar la biomasa del medio de cultivo, para lo cual se pueden utilizar distintas estrategias: filtración, centrifugación, sedimentación, floculación, flotación, entre otras (Rawat et al., 2012). Posteriormente, es usual secar la biomasa, aunque se han propuesto alternativas de procesamiento desde la biomasa húmeda para evitar el secado (Saga et al., 2015; Xu et al., 2011, Liu et al., 2013). La generación de los combustibles involucra diversos procesos que permiten obtener distintos productos. El proceso más difundido implica la extracción de lípidos neutros con solventes y su posterior transesterificación para la obtención de biodiésel (Rawat et al., 2012). Además, la biomasa de microalgas es rica en hidratos de carbono, que pueden ser fermentados para producir bioetanol (Hallenbeck et al., 2016). Asimismo, la biomasa puede utilizarse para generar biogás mediante digestión anaerobia (Suganya et al., 2015). Por otra parte, existen procesos termoquímicos que posibilitan la conversión de la biomasa completa en productos energéticos: la gasificación genera gas de síntesis (syngas) y la pirólisis produce una mezcla de biochar, bio-oil y gases. Alternativamente,

la licuefacción hidrotérmica (HTL) produce bio-oil y puede realizarse con la biomasa húmeda (Hallenbeck et al., 2016).

A pesar del progreso alcanzado en estos procesos, aún no existen biorrefinerías basadas en microalgas a escala comercial (Thomassen et al., 2017). Los obstáculos que han impedido su desarrollo son de diversa índole, destacándose la ausencia de un escenario de viabilidad económica, el alto costo de instalación y operación de los FBR, la baja productividad alcanzada en los sistemas abiertos y la inmadurez de las tecnologías de recuperación de la biomasa (Assemany et al., 2016).

Desde el punto de vista ambiental y energético, no ha sido posible arribar a conclusiones generalizadas sobre estos biocombustibles. Por ejemplo, el trabajo de Batan et al. (2010) reporta positivo el balance de energía de la producción de biodiésel a partir de microalgas cultivadas en FBR, mientras que los trabajos de Monari et al. (2015) y Brentner et al. (2011) presentan balances energéticos negativos. Por lo tanto, resulta importante profundizar y armonizar estos estudios para obtener resultados confiables, ya que, si no se puede asegurar que estos biocombustibles poseen un balance energético positivo y generan menores impactos ambientales que los combustibles fósiles, su producción está en riesgo (Thomassen et al., 2017).

En determinados estudios con enfoque de ciclo de vida, especialmente los de Huella de carbono de productos, la ISO recomienda adoptar los lineamientos establecidos en las Reglas de categoría de producto (PCRs, por sus siglas en inglés) que se hayan desarrollado de acuerdo con la Norma ISO 14025 (ISO, 2006c). Tal como se define en la ISO 14025, las PCRs son documentos que proporcionan normas, directrices y requisitos para desarrollar Declaraciones ambientales de Tipo III para cualquier categoría de producto (es decir, bienes y/o servicios que tengan funciones equivalentes). Las Declaraciones ambientales tipo III son declaraciones cuantitativas basadas en ACV sobre los aspectos medioambientales de un determinado bien o servicio. Si bien se han logrado avances en cuanto al desarrollo de

PCRs en el campo de la biomasa (por ej.: para aceite de colza en Japón y para productos madereros en Suiza), cuyas recomendaciones pueden aplicarse horizontalmente a toda la producción, independientemente de su uso final, no existe aún una estandarización suficiente para realizar declaraciones ambientales sólidas y comparables de ningún tipo de biocombustible.

2. Metodología

Se llevó a cabo una amplia revisión de la literatura que reporta estudios con enfoque de ciclo de vida de sistemas de producción de microalgas para la generación de energía. Con ese propósito, se buscaron publicaciones en revistas científicas internacionales, sin tomar en cuenta el año de publicación, según las siguientes palabras claves: life cycle assessment (en español, análisis de ciclo de vida), microalgae (en español, microalgas), biofuel (en español, biocombustible). Posteriormente, se seleccionaron aquellas publicaciones que consideraban el cultivo de microalgas en sistemas cerrados, esto es FBR de cualquier configuración (tubulares, flat-plate, air-lift, etc.), puesto que estos sistemas de cultivo presentan gran variabilidad y están siendo estudiados en forma creciente. Las publicaciones se evaluaron considerando los lineamientos propuestos por las normas ISO 14040 (2006a) y 14044 (2006b) para la realización de Análisis del Ciclo de Vida, teniendo en cuenta los siguientes aspectos: productos y co-productos estudiados, unidad funcional, límites del sistema, procedimiento de asignación de cargas ambientales, fuentes de datos utilizados, métodos de análisis de impactos de ciclo de vida usados y categorías de impacto consideradas. Para analizar las fuentes de datos se consideraron datos primarios a aquellos provenientes de mediciones experimentales hechas por los autores; datos secundarios, a aquellos obtenidos de la literatura disponible o de bases de datos; datos extrapolados, a aquellos que se calcularon en base a datos de laboratorio o de experimentos realizados en escala menor a la del trabajo en cuestión;

datos estimados, a aquellos calculados en base a conocimientos teóricos o a información correspondiente a procesos similares (por ej.: producción de biodiésel de soja); y datos consultados, a aquellos que se originaron en la consulta con expertos o profesionales del sector. Cabe aclarar que las categorías de datos definidas no son excluyentes, sino que pueden combinarse en un mismo trabajo.

Además, se tuvieron en cuenta otros aspectos, como la realización de balances energéticos, la utilización de algún estándar o norma, el lugar donde se situaba el estudio, la especie de microalga cultivada y consideraciones generales de cada caso.

Finalmente, se analizaron los resultados obtenidos para elaborar recomendaciones que sirvan a futuros trabajos de esta naturaleza.

3. Resultados y discusión

Como producto de la revisión de la literatura, se hallaron y se analizaron 43 artículos. Según el criterio descripto, se seleccionaron 13 publicaciones, realizadas entre los años 2010 y 2017: Batan et al. (2010), Stephenson et al. (2010), Jorquera et al. (2010), Brentner et al. (2011), Dufour et al. (2011), Soratana y Landis (2011), Itoiz et al. (2012), Resurreccion et al. (2012), Grierson et al. (2013), Mu et al. (2014), Silva et al. (2015), Monari et al. (2015) y Pérez-López et al. (2017).

3.1. Producto estudiado

En relación a la obtención de biocombustibles de microalgas es necesario observar si el producto evaluado es un producto energético (como biodiésel, biogás u otro) o un producto intermedio, es decir, biomasa de microalgas (húmeda o seca). La selección de uno u otro producto condiciona la elección de la unidad funcional, los procesos unitarios a incluir dentro de los límites del sistema y la consideración de los co-productos (cuando existieran).

El 54% de las publicaciones analiza al biodiésel como el producto principal del sistema, mientras que el 38% de los trabajos sólo analiza la producción de biomasa de microalgas, sin considerar los procesos necesarios para generar algún biocombustible. Por su parte, el trabajo de Grierson et al. (2013), que representa el 8% de los casos, contempla la producción simultánea de varios productos, derivados de la pirólisis de la biomasa de microalgas (biogás, bio-oil, biochar y lípidos refinados).

3.2. Unidades funcionales seleccionadas

Según la norma ISO 14040 (2006a), la propiedad fundamental de un sistema del producto se caracteriza por su función y no se puede definir solamente en términos de los productos finales. La función se cuantifica en la unidad funcional, que se utiliza como unidad de referencia sobre la cual se remiten todas las entradas, las salidas y los resultados del estudio. La naturaleza relativa de un ACV se debe a las características de la unidad funcional y esto denota la importancia de su correcta definición en la primera fase del análisis.

La selección de distintos productos obtenidos a partir de microalgas en los trabajos considerados condiciona la definición de las unidades funcionales. Al observar las unidades funcionales elegidas en las publicaciones que estudian al biodiésel como producto, se denota que el 43% de las publicaciones selecciona unidades en base energética (generalmente, 1 MJ de energía entregada por el producto), mientras que el 28% prefiere unidades en base de masa y el 29% utiliza distancia recorrida (por ej.: kg de biodiésel o km recorridos en un vehículo de pasajeros, respectivamente). Por su parte, las publicaciones que evalúan como producto a la biomasa de microalgas toman unidades funcionales en base de masa (por ej.: kg de biomasa seca). El trabajo de Silva et al. (2015) no define la unidad funcional seleccionada, considerándose esto como un grave defecto de dicha publicación, puesto que es imposible interpretar los resultados sin

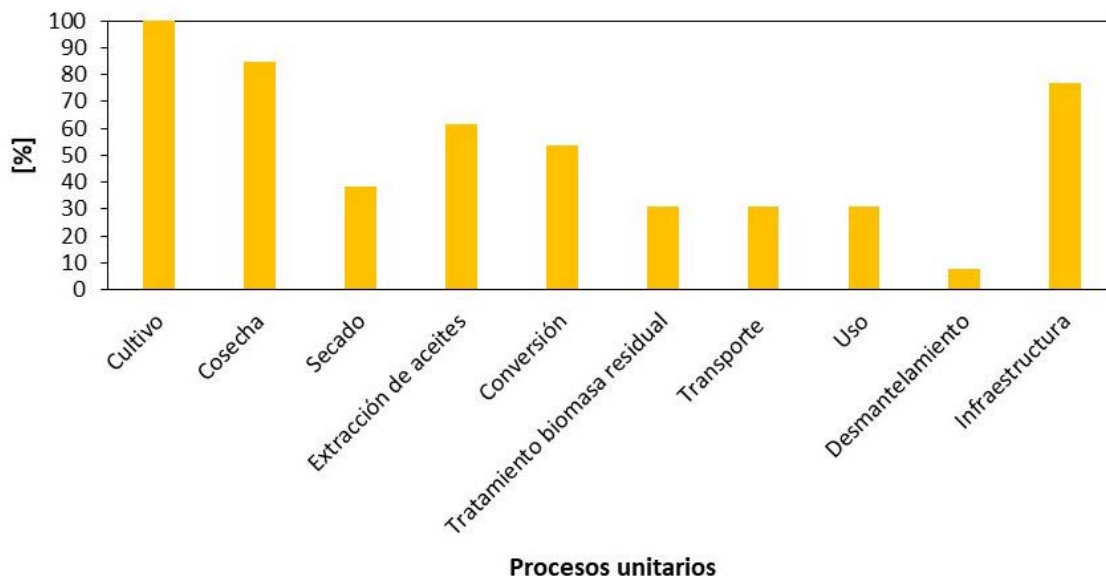
conocer la unidad de referencia utilizada. Un sistema puede tener distintas funciones posibles, por lo que la unidad funcional debe ser definida (ISO, 2006a).

3.3. Límites del sistema. Procesos unitarios seleccionados

Entre los productos energéticos obtenidos a partir de microalgas, el biodiésel es el más estudiado hasta la actualidad. Su proceso de producción presenta numerosas variaciones, que son objeto de estudio con el fin de hallar las mejores opciones. No obstante, la obtención de biodiésel y de otros biocombustibles de tercera generación incluye, en general, el cultivo de las microalgas, la cosecha y el acondicionamiento de la biomasa y los procesos de conversión.

Los procesos unitarios que se consideran dentro de los límites del sistema del producto estudiado varían en cada caso. En la Figura 1 puede observarse que el cultivo de las microalgas (en FBR) se halla dentro de los límites del sistema en todos los casos seleccionados. La cosecha de la biomasa, es decir la separación de la biomasa de microalgas de su medio de cultivo, es un proceso estudiado en 11 de los 13 casos. La construcción o ensamblaje de la infraestructura se considera en 10 trabajos. La extracción de aceites y la conversión de estos en biodiésel son procesos que sólo se contemplan en aquellos estudios que tienen al biodiésel como producto principal del sistema, y se examinan en 8 y 7 de estos trabajos, respectivamente. El secado de la biomasa de microalgas se observa en 5 de los casos analizados. El tratamiento de la biomasa residual, el transporte (de insumos o de productos) y el uso del biocombustible son procesos que se examinan en pocos artículos. Finalmente, el desmantelamiento de la infraestructura (fin de vida) se considera en un solo caso.

Figura 1: Distribución porcentual de los trabajos en función de los procesos unitarios considerados dentro de los límites del sistema-producto.



Si bien se pueden agrupar los procesos unitarios en categorías como las mencionadas más arriba (cultivo, cosecha, secado, etc.), es necesario observar que, entre los trabajos, los procesos de una misma categoría varían en función del sistema estudiado y los supuestos adoptados por cada autor. Los tipos de FBR y los parámetros de operación escogidos (aporte de nutrientes, medio de cultivo utilizado, concentración de la biomasa, tiempo de cultivo, especie de microalga, inyección de aire, etc.) son diferentes, influyendo en los flujos de entrada y salida de los procesos unitarios.

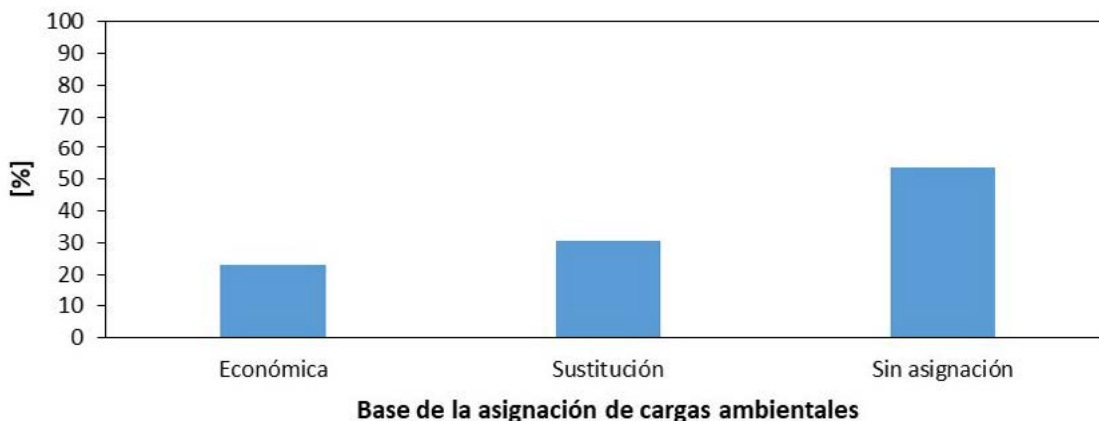
3.4. Procedimientos de asignación de cargas ambientales utilizados

La Figura 2 denota que en 3 trabajos se realizó la asignación de cargas ambientales con base en el valor económico de los productos y co-productos, en 4 de ellos se utilizó la estrategia de sustitución o expansión de los límites del

sistema (forma recomendada por la norma ISO 14044, 2006b) y ningún estudio lo hizo en base a propiedades físicas, como la masa y la energía. Cabe destacar que Stephenson et al. (2010) seleccionaron el procedimiento de expansión de límites y de asignación en base económica para diferentes co-productos generados, lo que origina una superposición en los resultados mostrados en la Figura 2.

Por otra parte, se advierte que la mayor parte de los trabajos analizados no realiza asignación de cargas ambientales entre el producto y los co-productos del sistema. Esto puede deberse a que el producto estudiado sea la biomasa de microalgas, donde no se reporta la existencia de co-productos, lo que ocurre en 5 de los trabajos estudiados. En otros estudios (Resurreccion et al., 2012 y Dufour et al., 2011) se considera la producción de biodiésel y no se habla de la generación de co-productos; sin embargo, se conoce que la obtención de este biocombustible se asocia a la generación de otros productos (Trivedi et al., 2015; Zhu, 2015; Zaimes y Khanna, 2014), por lo que debería haberse seguido algún procedimiento de asignación.

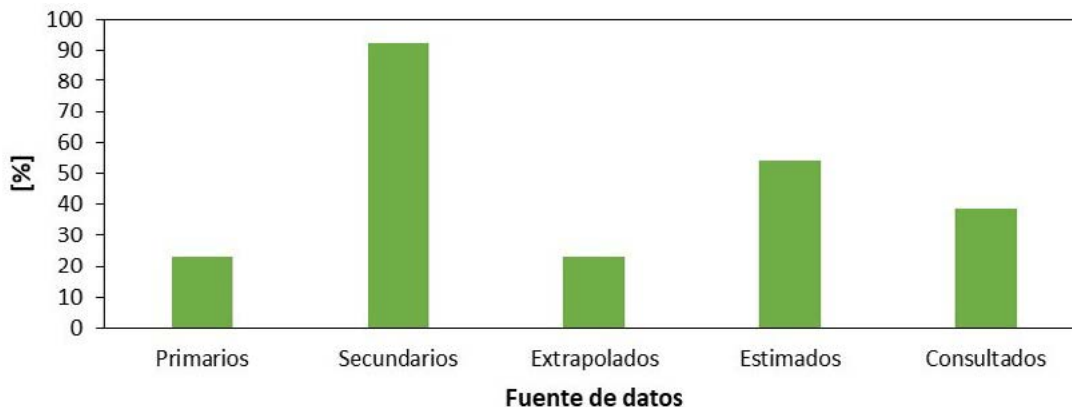
Figura 2: Distribución porcentual de los trabajos en función de la base utilizada para asignar cargas ambientales entre co-productos del sistema.



3.5. Fuentes de datos

En la figura 3 se observa que la mayoría de los trabajos se basó en datos secundarios, es decir, que no procedían de mediciones hechas por los autores. Una pequeña proporción de estudios fue realizada sobre la base de datos primarios, combinados principalmente con datos secundarios. Hay un alto aporte de datos que provienen de estimaciones, generalmente de supuestos adoptados por el conocimiento de procesos considerados similares. Los datos consultados se encuentran en 5 trabajos y los datos extrapolados, sólo en 3 de ellos. La superposición de los resultados se origina porque la mayoría de los autores usó conjuntamente datos de distintas fuentes. Cabe destacar que sólo 1 de los 13 trabajos (Brentner et al., 2011) incluyó un análisis de incertidumbre para evaluar sus resultados, destacando la importancia de realizarlo por haber utilizado información de fuentes secundarias.

Figura 3: Distribución porcentual de los trabajos en función de las fuentes de datos utilizadas.



3.6. Métodos de Evaluación de Impactos de Ciclo de Vida (EICV) y categorías de impacto usadas

Los métodos utilizados para realizar la Evaluación de Impactos de Ciclo de Vida también son una fuente de variación entre los estudios realizados. Algunos de los métodos elegidos por los autores fueron CML 2001, TRACI 3.01, BEES 4.02, IMPACT 2002+, EDIP 2003. La selección de distintos métodos implica diferencias en los resultados de la EICV, ya que las categorías de impacto varían entre métodos, así como los factores de caracterización para cada una de ellas.

Se encontró que el calentamiento global y la eutrofización son las categorías de impacto más consideradas, ya que se evaluaron en el 92% y en el 62% de los casos, respectivamente. Los impactos por uso de agua, la acidificación y el agotamiento de ozono se examinaron en el 38% de los trabajos; mientras que algunos aspectos ambientales, como el uso del suelo o la demanda de energía no renovable, se evaluaron en muy pocos casos.

Por otra parte, se halló que el 46% de las publicaciones no realiza balances energéticos, denotando una falencia importante en estos estudios. En las publicaciones que presentan balance energético, los autores escogieron diferentes metodologías e indicadores para realizarlo. Brentner et al. (2011) e Itoiz et al. (2012) recurrieron al indicador Net Energy Balance (NER) (en español, balance neto de energía), calculado como la diferencia entre la energía producida y la energía utilizada en el sistema. En ambas publicaciones se utilizó el método Cumulative Energy Demand (en español, demanda acumulada de energía) (Frischknecht et al., 2007) para calcular la demanda directa e indirecta de energía. Jorquera et al. (2010), Dufour et al. (2011) y Batan et al. (2010) también utilizaron el indicador NER, pero calculado como cociente entre la energía producida y la energía demandada, en los dos primeros casos, y como cociente entre la energía demandada y la energía producida, en el último. Batan et al. (2010) utilizaron el modelo GREET 1.8c modificado para estimar los requerimientos de energía, mientras que en las otras dos publicaciones no se explicita el método de cálculo. Resurreccion et al. (2012)

usaron el indicador Energy Return on Investment (EROI) (en español, tasa de retorno de energía), calculado como el cociente entre la energía producida y la energía demandada. Por último, Monari et al. (2015) emplearon el indicador Non-renewable energy investment in energy delivered (NEIED) (en español, inversión de energía no renovable en energía entregada), calculado como el cociente entre la energía no renovable utilizada directa e indirectamente y el contenido energético del combustible. La energía no renovable requerida fue estimada como Non-renewable energy consumption (en español, consumo de energía no renovable), utilizando el método propuesto por Humbert et al. (2014). Las discrepancias observadas en la metodología y en los indicadores seleccionados para realizar los balances energéticos también constituyen un obstáculo para la comparación de resultados.

3.7. Otros

El 46% de los trabajos utiliza como referencia las normas ISO 14040 y 14044 para la realización del Análisis de Ciclo de Vida de los sistemas en estudio. Soratana y Landis (2011) siguen las recomendaciones de la Algae Biomass Organization (ABO), mientras que Resurreccion et al. (2012) se guían por el manual desarrollado por el International Reference Life Cycle Data System (ILCD).

3.8. Análisis de los aspectos evaluados y recomendaciones

El producto evaluado constituye uno de los primeros impedimentos para comparar resultados obtenidos en distintos trabajos, porque no se pueden contrastar estudios que evalúan productos con distinta función. Por esta razón, se sugiere evaluar productos cuya finalidad es la provisión de energía, por ejemplo biodiésel. También se considera necesario identificar todos los co-productos del sistema.

La elección de las unidades funcionales es un aspecto crítico cuando se están evaluando distintos sistemas para garantizar que las comparaciones se

realizan sobre una base común. Por lo tanto, la unidad funcional es otro de los aspectos que condiciona la comparabilidad de los estudios de ACV de sistemas de obtención de productos de microalgas, ya que algunos casos que evalúan el mismo producto poseen unidades funcionales diferentes, es decir, no tienen una base común que garantice una correcta comparación. Al evaluar sistemas que tienen la finalidad de producir energía, se recomienda utilizar unidades funcionales en base energética, como por ejemplo 1 MJ generado. Además, es conveniente informar el poder calorífico del producto analizado para no generalizar las equivalencias energéticas entre productos, puesto que una misma cantidad de energía puede provenir de diferentes cantidades de productos energéticos de distinta composición. Esto también facilitará la comparación con los estudios desarrollados para otros combustibles.

La selección de los límites del sistema es un motivo importante de discrepancia hallado entre los distintos estudios de ACV, que introduce incertidumbre en las comparaciones realizadas para llegar a una conclusión general, lo que se advierte también en el trabajo de Collet et al. (2015). En este sentido, Carneiro et al. (2017) observan que el interés en la generación de biocombustibles de tercera generación, principalmente biodiésel, incrementó el número de publicaciones; pero el estado inicial de desarrollo de esta tecnología y la existencia de diversas opciones de producción contribuyen con el incremento de la variabilidad y la incertidumbre de los resultados de los ACV, dificultando considerablemente la generación de conclusiones. Por tanto, se propone incluir todos los procesos necesarios para la obtención de biodiésel (u otro biocombustible), es decir, adoptar el enfoque “de la cuna a la puerta”, evitando la exclusión arbitraria de procesos unitarios.

Respecto a la elección de los procedimientos de asignación de cargas ambientales, Zaimes y Khanna (2014) exponen que este aspecto tiene un impacto significativo en el desempeño energético y ambiental de los sistemas de producción de microalgas. Por esta razón, los diferentes procedimientos de asignación utilizados en estos trabajos contribuyen con la discrepancia

existente en los resultados y con la dificultad para su comparación. En concordancia con la norma ISO 14044 (2006b), se propone evitar la asignación de cargas expandiendo los límites del sistema o aplicar diversas estrategias de asignación y evaluar sus consecuencias, lo que podría ser de interés al evaluar sistemas que se encuentran en una fase inicial de desarrollo. Se desaconseja el uso de la asignación en base económica, puesto que aún no existen valores de mercado para los biocombustibles de tercera generación, lo cual incrementa la incertidumbre de los supuestos adoptados.

Por otra parte, la evaluación de estos biocombustibles es particularmente desafiante porque no existen, hasta la actualidad, plantas industriales y hay pocas plantas experimentales en operación (Collet et al., 2015; Carneiro et al., 2017). Esto se ve reflejado en el escaso número de trabajos que se realizan con datos primarios, obtenidos directamente por medición de los flujos de entrada y salida de los procesos unitarios del sistema. Muchos estudios plantean sistemas hipotéticos contruidos en base a supuestos, incluyendo datos provenientes de procesos que no son equivalentes o de experiencias de laboratorio realizadas en condiciones diferentes. Sin duda, este punto constituye una fuente de incertidumbre en los resultados alcanzados por los estudios analizados y no permite que se obtengan conclusiones certeras. En este sentido, los estudios de ACV deberían incluir análisis de incertidumbre para cuantificar el efecto de la variación simultánea de todos los parámetros de los modelos contruidos (Sills et al., 2013). Por lo tanto, es necesario incrementar el número de estudios de ACV que analicen la obtención de biocombustibles de microalgas en plantas piloto o experimentales, reduciendo el número de supuestos sustentados en datos menos confiables. Además, es fundamental incorporar análisis de incertidumbre de los datos utilizados cuando se trabaja con datos de fuentes secundarias. De este modo se podrá arribar a conclusiones más seguras y comparables.

Conjuntamente, aunque aún no exista estandarización suficiente para realizar declaraciones ambientales de biocombustibles, es necesario que los

estudios muestren un perfil de impactos ambientales completo, explorando no sólo el potencial de calentamiento global, sino otras categorías. Esto coincide con lo manifestado por Collet et al. (2015), quienes recomiendan proveer información sobre otros impactos, además del calentamiento global. Estos autores también expresan la necesidad de tener en consideración impactos relacionados con el uso de fertilizantes (acidificación y eutrofización) y productos fitosanitarios (toxicidad humana y ecotoxicidad), impactos por el cambio en el uso del suelo y por el consumo de agua. En este trabajo se cree oportuno contemplar estos impactos, excepto el cambio en el uso del suelo, que no se asume de gran significancia para sistemas cerrados de cultivo de microalgas. Asimismo, se considera importante la evaluación de otros aspectos ambientales relacionados con las emisiones a la atmósfera, como el agotamiento del ozono y la oxidación fotoquímica.

De igual modo, al analizar productos cuya función es la provisión de energía, es esencial comprobar que son capaces de entregar más energía de la que se requiere para generarlos. Además, la realización de balances energéticos permite comparar la aptitud energética de la tercera generación de biocombustibles con las otras y con los combustibles fósiles. Por consiguiente, se sugiere enfáticamente la elaboración de balances energéticos de productos energéticos de microalgas, que consideren las entradas directas e indirectas de energía para su producción, coincidiendo con lo recomendado por Collet et al. (2015). A tal efecto, se propone utilizar el indicador NER, calculado como cociente entre la energía contenida en el producto y la energía requerida para generarlo, puesto que es el indicador más utilizado en los trabajos revisados. Se recomienda utilizar el método Cumulative Energy Demand (Frischknecht et al., 2007) para estimar los requerimientos de energía directa e indirecta, porque expresa los resultados en unidades de energía primaria utilizada.

Por último, si bien este trabajo se realizó siguiendo los lineamientos establecidos por las normas ISO 14040 y 14044, se destaca la importancia de realizar estudios de ACV sobre la base de cualquier estándar reconocido.

4. Conclusiones

Las disparidades en las consideraciones metodológicas y en los supuestos adoptados en los estudios con enfoque de ciclo de vida de sistemas de producción de microalgas en FBR no permiten realizar comparaciones seguras, que posibiliten arribar a conclusiones generales acerca de los impactos y beneficios aportados por ellos. Si bien estos estudios constituyen una base para el conocimiento de estos sistemas, la dificultad para comparar sus resultados provoca controversias que deben ser solucionadas para el desarrollo de los biocombustibles de tercera generación.

En este trabajo se halló que existe discrepancia entre los estudios analizados por todos los aspectos evaluados. Para comparar productos es necesario que estos sean similares o que, al menos, posean la misma función, manifestada en la unidad funcional seleccionada. Por otra parte, es importante que los límites del sistema sean compatibles, ya que la inclusión de determinados procesos unitarios en algunos estudios, y la exclusión en otros, probablemente conducirá a resultados incomparables. Además, la procedencia de los datos es un aspecto que influye en la incertidumbre de los resultados, aumentando o disminuyendo la confiabilidad de los diferentes estudios. Por su parte, la asignación de cargas ambientales es necesaria para asociar los impactos debidos a la generación de un producto, sin incurrir en estimaciones por exceso o por defecto. En consecuencia, se considera que el producto principal analizado, la unidad funcional elegida, los límites del sistema (procesos unitarios incluidos), las fuentes de datos usados y los procedimientos de asignación de cargas ambientales son los aspectos que pueden influir con mayor fuerza en los resultados. Por otro lado, existen muchos métodos de evaluación de impacto válidos y la elección de ellos queda sujeta al criterio del investigador, razón por la cual no se considera como un aspecto de relevancia.

Se asume, entonces, que es necesario armonizar las elecciones metodológicas de futuros estudios de ACV para posibilitar su comparación, con el objeto

de obtener conclusiones válidas sobre la producción de microalgas para la generación de energía. A partir de lo analizado en la sección 3.8, se sugieren las siguientes recomendaciones:

- *adoptar como unidad funcional 1 MJ de energía, cuando la finalidad del sistema es la producción de energía;*
- *incluir todos los procesos necesarios para la obtención del biocombustible (enfoque “de la cuna a la puerta”);*
- *expandir los límites del sistema para evitar la asignación de cargas o bien aplicar más de un procedimiento de asignación para evaluar sus consecuencias;*
- *incrementar los estudios realizados con datos de plantas experimentales e incluir análisis de incertidumbre;*
- *reportar un perfil de múltiples impactos ambientales;*
- *incluir balances energéticos de los productos energéticos de microalgas, utilizando indicadores como el NER.*

Se propone con insistencia tomar en consideración las recomendaciones aquí realizadas, dirigidas a colaborar con la evaluación de los impactos ambientales de los sistemas de producción de microalgas.

Referencias

ABOMOHRA, A., JIN, W., TU, R., HAN, S., EID, M., ELADEL, H. Microalgal biomass production as a sustainable feedstock for biodiésel: Current status and perspectives. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2016, 64, 596-606. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.06.056>

AHMAD, A.L., MAT YASIN, N.H., DEREK, C.J.C., LIM, J.K. Microalgae as a sustainable energy source for biodiésel production: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2011, 15, 584-593. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2010.09.018>

ASSEMANY, P. P., CALIJURI, M. L., TANGO, M. D., COUTO, E. A. Energy potential of algal biomass cultivated in a photobioreactor using effluent from a meat processing plant. *Algal Research*. 2016, 17, 53-60. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.06.056>

algal.2016.04.018

BATAN, L., QUINN, J., WILLSON, B., BRADLEY, T. Net energy and greenhouse gas emission evaluation of biodiesel derived from microalgae. *Environmental Science and Technology*. 2010, 44, 20, 7975-7980. DOI: 10.1021/es102052y

BRENNAN, L., OWENDE, P. Biofuels from microalgae - A review of technologies for production, processing, and extractions of biofuels and co-products. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2009, 14, 2, 557-577. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2009.10.009>

BRENTNER, L., ECKELMAN, M., ZIMMERMAN, J. Combinatorial Life Cycle Assessment to Inform Process Design of Industrial Production of Algal Biodiesel. *Environmental Science and Technology*. 2011, 45, 7060-7067. DOI: 10.1021/es2006995

CARNEIRO, M., PRADELLE, F., BRAGA, S., GOMES, M., MARTINS, A., TURKOVICS, F., PRADELLE, R. Potential of biofuels from algae: Comparison with fossil fuels, ethanol and biodiesel in Europe and Brazil through life cycle assessment (LCA). *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2017, 73, 632-653. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.01.152>

CHISTI, Y. Biodiesel from microalgae. *Science Direct-Biotechnology Advances*. 2007, 25, 294-306. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2007.02.001>

COLLET, P., LARDON, L., HÉLIAS, A., BRICOUT, S., LOMBAERT-VALOT, I., PERRIER, B., LÉPINE, O., STEYER, J., BERNARD, O. Biodiesel from microalgae-Life cycle assessment and recommendations for potential improvements. *Renewable Energy*. 2014, 71, 525-533. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2014.06.009>

COLLET, P., HÉLIAS, A., LARDON, L., STEYER, J., BERNARD, O. Recommendations for Life Cycle Assessment of algal fuels. *Applied energy*. 2015, 154, 1089-1102. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.03.056>

DUFOUR, J., MORENO, J., RODRÍGUEZ, R. Life cycle assessment of biodiesel production from microalgae oil: effect of algae species and cultivation system. *Towards Life Cycle Sustainability Management*. 2011, 437-442.

FRISCHKNECHT R., JUNGBLUTH N., ALTHAUS H., BAUER C., DOKA G., DONES R., HISCHIER R., HELLWEG S., HUMBERT S., KÖLLNER T., LOERINCIK Y., MARGNI M., NEMECEK T. Implementation of Life Cycle Impact Assessment Methods. *Ecoinvent report No. 3, v2.0*. Swiss Centre for Life Cycle Inventories. Dübendorf: 2007.

GRIERSON, S., STREZOV, V., BENGTTSSON, J. Life cycle assessment of a microalgae

biomass cultivation, bio-oil extraction and pyrolysis processing regime. *Algal Research*. 2013, 2, 299-311. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2013.04.004>

HALLENBECK, P. C., GROGGER, M., MRAZ, M., VEVERKA, D. Solar biofuels production with microalgae. *Applied Energy*. 2016, 179, 136-145. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.06.024>

HUMBERT, S., MARGNI, M., JOLLIET, O. IMPACT 2002+: user guide. Draft for version. 2014, 2.

ISO. International Standard 14040. Life Cycle Assessment. Requirements and guidelines. International Organization for Standardization. Geneva: 2006a.

ISO. International Standard 14044. Environmental Management-Life Cycle Assessment-Requirements and guidelines. International Organization for Standardization. Geneva: 2006b.

ISO. International Standard 14025. Environmental labels and declarations-Type III environmental declarations- Principles and procedures. International Organization for Standardization. Geneva: 2006c.

ITOIZ, E.S., FUENTES-GRÜNEWALD, C., GASOL, C.M., GARCÉS, E., ALACID, E., ROSSI, S., RIERADEVALL, J. Energy balance and environmental impact analysis of marine microalgal biomass production for biodiesel generation in a photobioreactor pilot plant. *Biomass and bioenergy*. 2012, 39, 324-335. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2012.01.026>

JORQUERA, O., KIPERSTOK, A., SALES, E.A., EMBIRUÇU, M., GHIRARDI, M.L. Comparative energy life-cycle analyses of microalgal biomass production in open ponds and photobioreactors. *Bioresource Technology*. 2010, 101, 1406-1413. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2009.09.038>

LI, Y., HORSMAN, M., WU, N., LAN, C., DUBOIS-CALERO, N. Biofuels from microalgae. *Biotechnology Progress*. 2008, 24, 4, 815-820. DOI: 10.1021/bp070371k

LIU, X., SAYDAH, B., ERANKI, P., COLOSI, L. M., MITCHELL, B. G., RHODES, J., CLARENS, A. F. Pilot-scale data provide enhanced estimates of the life cycle energy and emissions profile of algae biofuels produced via hydrothermal liquefaction. *Bioresource technology*. 2013, 148, 163-171. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2013.08.112>

MONARI, C., RIGHI, S., OLSEN, S. Greenhouse gas emissions and energy balance of biodiesel production from microalgae cultivated in photobioreactors in Denmark: a lifecycle modeling. *Journal of Cleaner Production*. 2015, 112, 4084-

4092. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.08.112>

MU, D., MIN, M., KROHN, B., MULLINS, K., RUAN, R., HILL, J. Life Cycle Environmental Impacts of Wastewater-Based Algal Biofuels. *Environmental Science and Technology*. 2014, 48, 11696-11704. DOI: 10.1021/es5027689

OILGAE. Comprehensive Report on Attractive Algae Product Opportunities – Preview. Tamilnadu: 2014.

PÉREZ-LÓPEZ, P., DE VREE, J. H., FEIJOO, G., BOSMA, R., BARBOSA, M. J., MOREIRA, M. T., KLEINEGRIS, D. M. Comparative life cycle assessment of real pilot reactors for microalgae cultivation in different seasons. *Applied Energy*. 2017, 205, 1151-1164. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.08.102>

RAWAT, I., KUMAR, R. R., MUTANDA, T., BUX, F. Biodiésel from microalgae: a critical evaluation from laboratory to large scale production. *Applied energy*. 2012, 103, 444-467. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.10.004>

RESURRECCION, E., COLOSI, L., WHITE, M., CLARENS, A. Comparison of algae cultivation methods for bioenergy production using a combined life cycle assessment and life cycle costing approach. *Bioresource Technology*. 2012, 126, 298-306. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2012.09.038>

SAGA, K., HASEGAWA, F., MIYAGI, S., ATOBE, S., OKADA, S., IMOU, K., OSAKA, N., YAMAGISHI, T. Comparative evaluation of wet and dry processes for recovering hydrocarbon from *Botryococcus Braunii*. *Applied Energy*. 2015, 141, 90-95. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.12.018>

SANDER, K., MURTHY, G. Life cycle analysis of algae biodiésel. *International Journal of Life Cycle Assessment*. 2010, 15, 704-714. doi:10.1007/s11367-010-0194-1

SILLS, D., PARAMITA, V., FRANKE, M., JOHNSON, M., AKABAS, T., GREENE, C., TESTER, J. Quantitative uncertainty analysis of life cycle assessment for algal biofuel production. *Environmental science & technology*. 2013, 47, 687-694. [dx.doi.org/10.1021/es3029236](https://doi.org/10.1021/es3029236)

SILVA, A., CARTER, R., MERSS, F., CORREA, D., VARGAS, J., MARIANO, A., ORDONEZ, J., SCHERER, M. Life cycle assessment of biomass production in microalgae compact photobioreactors. *GCB Bioenergy*. 2015, 7, 184-194. DOI: 10.1111/gcbb.12120

SORATANA, K., LANDIS, A. Evaluating industrial symbiosis and algae cultivation from a life cycle perspective. *Bioresource Technology*. 2011, 102, 6892-6901. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2011.04.018>

STEPHENSON, A., KAZAMIA, E., DENNIS, J., HOWE, C., SCOTT, S., SMITH, A. Life-Cycle Assessment of Potential Algal Biodiesel Production in the United Kingdom: A Comparison of Raceways and Air-Lift Tubular Bioreactors. *Energy Fuels*. 2010, 24, 4062-4077. DOI: 10.1021/ef1003123

SUGANYA, T., VARMAN, M., MASJUKI, H.H., RENGANATHAN, S. Macroalgae and microalgae as a potential source for commercial applications along with biofuels production: A biorefinery approach. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2015, 55, 909-941. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.11.026>

THOMASSEN, G., VAN DAEL, M., LEMMENS, B., VAN PASSEL, S. A review of the sustainability of algal-based biorefineries: Towards an integrated assessment framework. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2017, 68, 876-887. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.02.015>

TRIVEDI, J., AILA, M., BANGWAL, D.P., KAUL, S., GARG M.O. Algae based biorefinery-How to make sense? *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2015, 47, 295-307. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.03.052>

XU, L., BRILMAN, D. W. W., WITHAG, J. A., BREM, G., KERSTEN, S. Assessment of a dry and a wet route for the production of biofuels from microalgae: energy balance analysis. *Bioresource technology*. 2011, 102, 8, 5113-5122. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2011.01.066>

ZAIMES, G., KHANNA, V. The role of allocation and coproducts in environmental evaluation of microalgal biofuels: How important? *Sustainable Energy Technologies and Assessments*. 2014, 7, 247-256. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2014.01.011>

ZHU, L. Biorefinery as a promising approach to promote microalgae industry: An innovative framework. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2015, 41, 1376-1384. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.09.040>